



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería -Programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención
en Ingeniería Civil

Proposición de Modelos de Probabilidad de Ocurrencia de Rollover Utilizando Teoría de la Confiabilidad

Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería con
mención en Ingeniería Civil

PABLO NICOLÁS CRUZ MARABOLÍ
CONCEPCIÓN-CHILE
2016

Profesor Guía: Tomás Echaveguren Navarro
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

RESUMEN

La estimación del potencial de *rollover* estático tradicionalmente se ha realizado usando umbrales de aceleración lateral que, al ser superados, llevan al vehículo a sufrir *rollover*. Estos modelos consideran la geometría del vehículo, la geometría del camino y la velocidad de operación. En algunos casos consideran también el sistema de amortiguación del vehículo. Este enfoque es adecuado para analizar el potencial de *rollover* vehículo a vehículo y para una geometría en particular. Sin embargo, su respuesta no se puede extrapolar al diseño geométrico.

Para ello, resulta necesario caracterizar tipos de vehículo, considerar diversas geometrías y capturar la variabilidad de la velocidad de operación de los diversos conductores que circulan por ellas, lo que se puede lograr utilizando variables explicativas aleatorias, lo que es posible mediante un enfoque probabilístico basado en un análisis de confiabilidad.

En esta tesis se propusieron curvas de probabilidad para llevar a cabo la evaluación del riesgo de *rollover* durante el diseño geométrico de curvas horizontales. Estas curvas se calibraron utilizando el enfoque de estimación analítica, el que se realiza con el método de análisis de confiabilidad de primer orden (FORM). Con los valores obtenidos se construyeron ecuaciones analíticas, las cuales estiman la probabilidad de *rollover* para cada tipo de vehículo, utilizando como variables de entrada la velocidad de operación a la entrada de la curva, el radio de curvatura y, en algunos casos, el peralte de la curva.

Se concluyó que el peralte no resulta ser una variable significativa en los modelos de *rollover* interno, en ningún tipo de vehículo, a diferencia de los modelos de *rollover* externo, donde el peralte sí adquirió significancia. Además, no resulta aconsejable utilizar radios de curvas horizontales menores a 260 m, toda vez que los vehículos pesados exhiben alguna probabilidad de ocurrencia de *rollover* superior al 50%.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONICYT) del Ministerio de Educación de Chile por el financiamiento otorgado al proyecto FONDEQUIP EQM 150029, dentro del cual se enmarca este trabajo.

También agradezco a mis padres, Pablo Cruz Cáceres y Angélica Marabolí Rojas, por su apoyo incondicional en cada paso de esta larga etapa, y a mi profesor guía, Tomás Echaveguren Navarro, por su inagotable paciencia y dedicación durante este último semestre.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Hipótesis	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Plan de trabajo	3
1.5 Principales resultados y conclusiones.....	4
1.6 Alcances de la tesis	4
1.7 Estructura del informe	5
CAPÍTULO 2 EL <i>ROLLOVER</i> EN CURVAS HORIZONTALES Y LA TEORÍA DE LA CONFIABILIDAD.....	6
2.1 Introducción	6
2.2 El fenómeno del <i>rollover</i>	6
2.3 Modelos de <i>rollover</i> existentes	8
2.4 Análisis de confiabilidad en el diseño geométrico de carreteras	10
2.5 Curvas de fragilidad.....	11
2.6 Método de análisis FORM.....	12
2.7 Conclusiones	13
CAPÍTULO 3 DISEÑO EXPERIMENTAL	15
3.1 Introducción	15
3.2 Variables explicativas	15
3.3 Matriz factorial	17
3.4 Diseño factorial y tamaño de la muestra.....	17
3.5 Conclusiones	18
CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD	19
4.1 Introducción	19
4.2 Funciones de estado límite.....	19
4.3 Datos de entrada.....	20
4.4 Análisis de curvas de fragilidad para cada modelo de <i>rollover</i>	22

4.5	Simulación detallada de curvas de fragilidad	25
4.6	Conclusiones	28
CAPÍTULO 5 PARAMETRIZACIÓN DE MODELOS DE PROBABILIDAD DE FALLA		29
5.1	Introducción	29
5.2	Ajuste de funciones a los datos simulados.....	29
5.3	Patrones de comportamiento de los parámetros del Crecimiento de Gompertz	30
5.4	Parametrización de curvas de fragilidad	34
5.5	Discusión de los resultados.....	37
5.6	Ejemplos de aplicación de curvas de fragilidad.....	39
5.7	Conclusiones	48
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES		50
REFERENCIAS		53

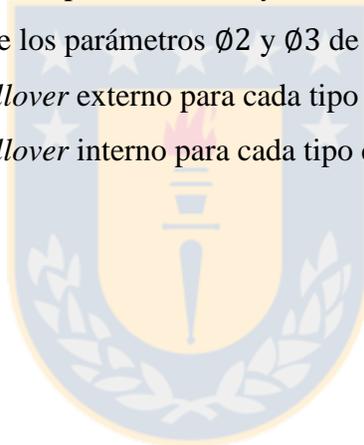


ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Niveles y rangos de las variables explicativas del modelo.....	16
Tabla 3.2	Matriz factorial	17
Tabla 4.1	Geometría de cada tipo de vehículo	21
Tabla 4.2	Distribución de probabilidad para geometría de curvas horizontales	21
Tabla 4.3	Distribución de probabilidad de la velocidad de operación	21
Tabla 5.1	Modelos de crecimiento sigmoideal utilizados y su MSE	29
Tabla 5.2	Resumen de parámetros de los modelos de regresión $\emptyset 2$ de la FCG de la FEL G_1	34
Tabla 5.3	Resumen de parámetros de los modelos de regresión $\emptyset 3$ de la FCG de la FEL G_1	35
Tabla 5.4	Resumen de parámetros de los modelos de regresión $\emptyset 2$ y $\emptyset 3$ de la FCG de la FEL G_4	35
Tabla 5.5	Modelos de probabilidad de <i>rollover</i> hacia el exterior de la curva horizontal.....	36
Tabla 5.6	Modelos de probabilidad de <i>rollover</i> hacia el interior de la curva horizontal.....	36
Tabla 5.7	Comparación resultados modelados y simulados para <i>rollover</i> externo y peralte 3 – 5%	38
Tabla 5.8	Comparación resultados modelados y simulados para <i>rollover</i> externo y peralte 5 – 7%	38
Tabla 5.9	Comparación resultados modelados y simulados para <i>rollover</i> interno.....	39
Tabla 5.10	Radios mínimos para $V = 60$ km/h y <i>rollover</i> al exterior de la curva.....	40
Tabla 5.11	Radios mínimos para $V = 60$ km/h y <i>rollover</i> al interior de la curva.....	41
Tabla 5.12	Radios mínimos para $V = 100$ km/h y <i>rollover</i> al exterior de la curva.....	43
Tabla 5.13	Radios mínimos para $V = 100$ km/h y <i>rollover</i> al interior de la curva.....	44
Tabla 5.14	Límite de velocidad para probabilidad de falla de 0.5 al exterior de la curva	45
Tabla 5.15	Límite de velocidad para probabilidad de falla de 0.5 al interior de la curva	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Fuerzas actuantes sobre un vehículo en una curva horizontal	7
Figura 2.2	Ejemplo de una curva de fragilidad	12
Figura 3.1	Potencia estadística en función del tamaño de la muestra y del efecto tamaño	18
Figura 4.1	Probabilidad de <i>rollover</i> por tipo de vehículo para velocidad de operación de 60 km/h	23
Figura 4.2	Probabilidad de <i>rollover</i> por tipo de vehículo para velocidad de operación de 80 km/h	25
Figura 4.3	Probabilidad de <i>rollover</i> externo para cada tipo de vehículo.....	26
Figura 4.4	Probabilidad de <i>rollover</i> interno para cada tipo de vehículo	27
Figura 5.1	Comportamiento de los parámetros $\emptyset 2$ y $\emptyset 3$ de la FCG para la FEL G_1	32
Figura 5.2	Comportamiento de los parámetros $\emptyset 2$ y $\emptyset 3$ de la FCG para la FEL G_4	34
Figura 5.3	Probabilidad de <i>rollover</i> externo para cada tipo de vehículo.....	37
Figura 5.4	Probabilidad de <i>rollover</i> interno para cada tipo de vehículo	37



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Las normas de diseño de curvas horizontales generalmente establecen modelos de diseño en base al control del deslizamiento, fenómeno que afecta principalmente a vehículos livianos. Asumen que el radio de diseño es suficientemente grande como para no producir el *rollover* de vehículos pesados. La existencia de accidentes por esta causa evidencia que dicho supuesto se debe examinar con mayor detalle. Los accidentes por *rollover* no ocurren muy a menudo y representan una fracción reducida del total de accidentes. Sin embargo, el número de fatalidades y lesiones graves es sustancialmente mayor respecto de otros tipos de accidentes, particularmente cuando se ven involucrados buses. Por tanto, su análisis no puede dejarse de lado durante el diseño si así se contribuye a evitar fatalidades.

El *rollover* se define en términos simples como la desestabilización del centro de gravedad de un vehículo tal que éste no pueda retomar el control. En curvas horizontales, el *rollover* de vehículos pesados queda explicado principalmente por variables geométricas del trazado (radio y peralte), operacionales (velocidad de operación) y por la geometría del vehículo (altura del centro de gravedad y ancho de la trocha).

Existen dos enfoques para el análisis del *rollover*: uno estático y uno dinámico. El primero determina la aceleración lateral crítica mediante equilibrio de fuerzas y momento de un cuerpo rígido o amortiguado que se desplaza por una curva con inclinación transversal. El segundo establece algoritmos para estimar el riesgo de *rollover* en vehículos mientras circulan por curvas horizontales, de manera de alertar al conductor o bien actuar sobre el vehículo mediante mecanismos de estabilización. Ambos enfoques de análisis tienen en común el hecho que analizan los vehículos de manera individual y para una geometría en particular, por lo cual no necesariamente los resultados que se obtienen son extrapolables al diseño geométrico. Para extrapolar el análisis al diseño es menester caracterizar vehículos típicos, considerar la totalidad de las geometrías que admiten las normas de diseño vial y la variabilidad de las velocidades de operación que puede experimentar la población de conductores de vehículos pesados. Este

inconveniente se puede sobrellevar si dicha diversidad se traduce en variables explicativas del *rollover* pseudo-aleatorias, que permitan para diversos vehículos tipo estimar la probabilidad de que experimenten *rollover* en una curva.

Aplicando principios de confiabilidad es posible no solamente estimar dicha probabilidad, sino que además extender el cálculo hacia curvas de fragilidad que determinarán, para diversas condiciones de diseño y operación, la probabilidad de falla. Estas curvas se pueden calibrar mediante enfoques empíricos, analíticos, juicio de expertos o una combinación de los anteriores. Particularmente, la calibración analítica de curvas de fragilidad se puede realizar con simulación de Montecarlo o con métodos de solución analítica, como el método de análisis de confiabilidad de primer orden (*First Order Reliability Method*, FORM). En el caso en estudio, las curvas de fragilidad estiman la probabilidad de que un vehículo que circula por una curva horizontal experimente *rollover* mientras la recorre en función de la geometría de la carretera y de la velocidad de operación del vehículo.

Este trabajo presenta la estimación analítica de la probabilidad de *rollover* para vehículos pesados, usando principios de confiabilidad. Estas curvas de fragilidad se pueden utilizar para el diseño geométrico de curvas horizontales. O bien para determinar valores de velocidad límite para vehículos pesados en curvas horizontales asociadas a una cierta probabilidad de ocurrencia de *rollover*. El método utiliza el enfoque de estimación analítica de curvas de fragilidad, el que se realiza con el método FORM.

1.2 Hipótesis

La probabilidad de que un vehículo pesado experimente *rollover* mientras circula por una curva horizontal varía dependiendo de la geometría del vehículo, de la velocidad de operación a la entrada de la curva, de su radio y su peralte.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Proponer expresiones analíticas que permitan estimar la probabilidad de *rollover* en vehículos pesados, tanto hacia al interior como al exterior de la curva, utilizando Teoría de la Confiabilidad.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar el fenómeno del *rollover* y las variables que lo explican.
- b) Desarrollar un diseño experimental que permita identificar el tamaño muestral mínimo requerido.
- c) Elaborar curvas de fragilidad a partir de la estimación de la probabilidad de ocurrencia de *rollover* mediante la simulación de las funciones de estado límite desarrolladas.
- d) Proponer expresiones analíticas de probabilidad de falla a partir de la selección de las especificaciones funcionales más robustas aplicadas sobre los parámetros de la función.

1.4 Plan de trabajo

El plan de trabajo se dividió en cinco etapas: (i) revisión del estado del arte; (ii) diseño experimental; (iii) simulación de curvas de fragilidad; (iv) parametrización de modelos de probabilidad de falla; (v) ejemplos de aplicación de curvas de fragilidad. La primera etapa consistió en llevar a cabo una revisión detallada del estado del arte, de manera de identificar las principales variables y modelos que describen el *rollover*. Luego, se realizó un diseño experimental donde se definieron los escenarios de simulación y se determinó el tamaño muestral necesario para el desarrollo de las simulaciones. La tercera etapa consistió en el desarrollo y posterior simulación de las funciones de estado límite que permiten estimar la probabilidad de

ocurrencia de *rollover* para los diversos escenarios de diseño, operación y tipo de vehículo pesado, lo que permite elaborar las curvas de fragilidad para cada uno de los modelos en estudio. En la cuarta etapa se parametrizaron modelos de probabilidad de falla, donde se ajustaron diversas funciones sigmoideas a los datos simulados y se observaron los patrones de comportamiento en la de mejor ajuste, terminando por proponer expresiones analíticas que permiten estimar la probabilidad de *rollover* para cada tipo de vehículo en estudio, en función de variables geométricas, radio y peralte de la curva, y operacionales, velocidad de operación. Finalmente, la quinta etapa consistió en el desarrollo de ejemplos de aplicación de curvas de fragilidad calculando radios mínimos para velocidades de 60 y 100 km/h y límites de velocidad para diversas geometrías.

1.5 Principales resultados y conclusiones

Se observó que para una misma velocidad de operación, cualquier radio de curvatura e independiente del tipo de vehículo, la probabilidad de *rollover* al interior de la curva es mayor que la probabilidad de *rollover* al exterior de la curva.

Se determinó que para velocidades de operación entre 40 y 100 km/h no es recomendable utilizar radios de diseño menores a 260 m, pues para dichos radios la mayor parte de los vehículos considerados presentaban una probabilidad de ocurrencia de *rollover* superior al 50%.

El peralte no resultó ser una variable significativa en los modelos de probabilidad de falla para el *rollover* hacia el interior de la curva, en ningún tipo de vehículo, a diferencia de los modelos de probabilidad de falla para el *rollover* hacia el exterior de la curva, donde el peralte si adquirió significancia.

1.6 Alcances de la tesis

La presente investigación estuvo enfocada únicamente a vehículos pesados, puesto que son los que se encuentran más propensos a sufrir *rollover*. Se consideraron sólo buses de 2 pisos, buses urbanos y vehículos pesados de una unidad, con trochas entre 1.7 y 2.1 m y alturas de centro de

gravedad entre 1.2 y 3.4 m. Se consideraron curvas horizontales a partir de lo señalado en el Volumen 3 del Manual de Carreteras (MOP, 1994), considerando radios entre $50 \text{ m} < R < 350 \text{ m}$ y peralte entre $3 \leq p \leq 7\%$. Finalmente, se consideraron velocidades de operación entre 40 y 100 km/h, esto pues se consideró que el *rollover* se debe a factores estáticos bajo los 40 km/h y que el límite de velocidad superior en buses interurbanos es 100 km/h.

1.7 Estructura del informe

El documento se encuentra compuesto por seis capítulos:

En el capítulo que sigue se realiza un análisis del fenómeno y de los principales modelos estáticos que son utilizados para la estimación de su ocurrencia en vehículos pesados, para luego hacer referencia a la teoría de la confiabilidad, señalando sus diversas aplicaciones en el marco del diseño geométrico y presentando sus conceptos básicos empleados. En el tercer capítulo se presenta el diseño experimental, describiendo las variables explicativas consideradas, con sus respectivos niveles y rangos de variación, para luego presentar la forma en la que se agrupan dichas variables en la matriz factorial y determinar el tamaño muestral requerido para la realización del estudio.

En el capítulo cuatro se elaboran, en primera instancia, las funciones de estado límite necesarias para el cálculo de la probabilidad de falla de los modelos, para luego dar paso al desarrollo de las curvas de fragilidad utilizando el método de análisis de confiabilidad de primer orden (FORM). En el quinto capítulo se presenta la parametrización de las curvas de fragilidad para cada tipo de vehículo en estudio, para posteriormente realizar una discusión de los resultados, comparando la respuesta de los modelos generados con los datos simulados, y presentar ejemplos de aplicación de las curvas de fragilidad relacionados con el cálculo de radios mínimos y de límites de velocidad. Finalmente, en el capítulo seis se presentan las principales conclusiones del trabajo y las líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO 2 EL ROLLOVER EN CURVAS HORIZONTALES Y LA TEORÍA DE LA CONFIABILIDAD

2.1 Introducción

En el siguiente capítulo se presenta un análisis del *rollover* y de los principales modelos estáticos que son utilizados para la estimación de su ocurrencia en vehículos pesados, para luego hacer referencia a la teoría de la confiabilidad, señalando sus diversas aplicaciones en el marco del diseño geométrico y presentando sus conceptos básicos empleados.

2.2 El fenómeno del *rollover*

El *rollover* ocurre cuando un vehículo rota al menos un cuarto alrededor de su eje longitudinal o lateral (Conroy *et al*, 2006). Produce una fuerza volcante que separa del pavimento las ruedas del vehículo, acompañado de una pérdida brusca del control y de la trayectoria, terminando generalmente en un accidente. El *rollover* se clasifica en 8 tipos dependiendo si el volcamiento es por impacto con/por otros vehículos, objetos fijos o desestabilización en curvas horizontales (Sferco *et al*, 2003): *flip-over*, *trip-over*, *turn-over*, *climb-over*, *fall-over*, *bounce-over*, *collision with another vehicle* y *end-over-end*. En curvas horizontales el *rollover* afecta principalmente a los vehículos pesados, pero eventualmente puede afectar también a vehículos ligeros (Blower *et al*, 2005; Keall y Newstead, 2009).

Los factores que contribuyen a *rollover* se pueden clasificar en (Rakheja y Ranganathan, 1993; García *et al*, 2003; Keall y Newstead, 2009; McKnight y Bahouth, 2009; Hosseinpour *et al*, 2016): operacionales (velocidad de operación, distribución y tipo de carga), geométricos (diseño de las curvas horizontales), vehiculares (ancho de trocha, altura del centro de gravedad) y factores humanos (errores, estado de ánimo, ansiedad).

La posibilidad de que ocurra *rollover* en un vehículo se magnifica cuando posee trocha angosta, un centro de gravedad elevado, ingresa a la curva a una velocidad elevada, la curva es cerrada, y la carga no está distribuida y sujeta adecuadamente o es un fluido. Estos factores, en su conjunto,

dependen de las fuerzas laterales que experimenta el vehículo al circular por una curva horizontal, las cuales se pueden caracterizar en términos de las aceleraciones laterales que experimenta el vehículo. Si estas aceleraciones son superiores a un valor crítico propio de cada vehículo, dados los factores que explican el *rollover*, el vehículo se desestabilizará y experimentará *rollover*. El aspecto central de la evaluación de la posibilidad de *rollover* en curvas horizontales es determinar dicha aceleración lateral crítica y compararla con los valores de aceleración de operación de los vehículos en la curva.

La Figura 1 muestra el diagrama de fuerzas que actúan sobre un vehículo cuando circula por una curva horizontal. El *rollover* tiene lugar si el momento producido por las fuerzas desestabilizadoras supera al momento generado por las fuerzas estabilizadoras. Realizando un equilibrio de momento respecto del centro de gravedad del vehículo y un equilibrio de fuerzas horizontales y verticales, se determina la condición de estabilidad que de no ser satisfecha llevará al vehículo a experimentar *rollover* (Ver Expresión 2.1).

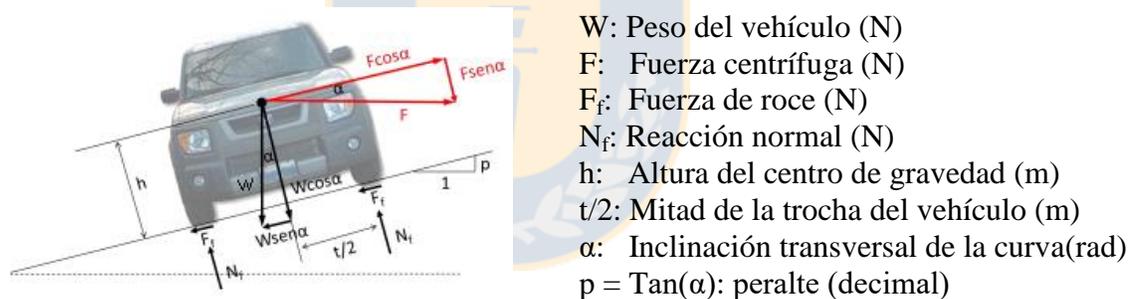


Figura 2.1 Fuerzas actuantes sobre un vehículo en una curva horizontal

$$\frac{a_c}{g} > \left(\frac{t}{2h} + p \right). \tag{2.1}$$

En el lado izquierdo de la desigualdad de la Expresión 2.1 se encuentra la aceleración lateral que experimenta un vehículo (a_c en m/s^2) al circular por una curva horizontal y en el lado derecho la aceleración lateral que el vehículo es capaz de sostener sin experimentar *rollover* en función de la trocha (t , en m), de la altura del centro de gravedad (h , en m), del peralte (p , en decimal) y de la aceleración de gravedad ($g = 9.81 m/s^2$).

La aceleración lateral teórica que un vehículo experimenta en una curva horizontal, está dada por la aceleración centrípeta neta que actúa sobre el cuerpo y que le permite describir una trayectoria curva. La Ecuación 2.2 presenta dicha aceleración, que depende de la velocidad de operación del vehículo (V , en m/s) y del radio de la curva (R , en m).

$$\frac{a_c}{g} = \left(\frac{V^2}{gR} - p \right). \quad (2.2)$$

2.3 Modelos de rollover existentes

Para estimar esta aceleración crítica existen modelos estáticos y dinámicos. Los primeros estiman el potencial de rollover mediante equilibrio estático de fuerzas de un vehículo circulando por una curva (Véase por ejemplo a Robertson y Kelley, 1989; Gillespie, 1992; Navin, 1992b; Hac, 2002; García *et al*, 2003 y Kühn, 2013). Los segundos utilizan modelos complejos de la dinámica de vehículos pesados para predecir el rollover. Algunos de estos métodos se utilizan en tiempo cuasi-real en sistemas de prevención y detección de rollover a bordo de vehículos pesados (Véase por ejemplo a Huang *et al*, 2012; Dahmani *et al*, 2013 y Alberding *et al*, 2014).

Los modelos estáticos de rollover estiman el umbral de aceleración lateral que un vehículo puede sostener en una curva horizontal sin experimentar rollover. Este umbral se estima como la razón entre la aceleración lateral límite ($a_{c,lim}$) y la aceleración de gravedad (g). Los modelos consideran las características geométricas del vehículo (trocha y altura del centro de gravedad), del camino (peralte) y en algunos casos la suspensión del vehículo (altura del centro de balanceo y tasa de rotación).

Los modelos estáticos pueden utilizarse en el diseño geométrico para establecer una estimación del potencial de rollover, pero dependen del tipo de vehículo, por lo cual por sí mismos no pueden generalizarse para verificar diseños geométricos debido a la variedad de configuraciones geométricas disponibles en el mercado automotriz, a la variedad de posibles diseños geométricos que admiten las diversas normas de diseño y a la variabilidad de la velocidad de operación que eligen los conductores al ingresar a las curvas horizontales.

Dentro de los modelos estáticos de *rollover* destacan: el umbral estático de *rollover* para vehículos rígidos con amortiguación (*Static Roll Threshold*, SRT) de Gillespie (1992), el umbral estático de *rollover* para vehículos articulados de Navin (1992b), el umbral estático de *rollover* para vehículos rígidos sin amortiguación descrito en Kühn (2013), el modelo de propensión de *rollover* ajustado por estiba de la carga de García *et al* (2003), el modelo de umbral estático de *rollover* para cargas líquidas de Rakheja y Ranganathan (1993) y el factor de estabilidad estática (*Static Stability Factor*, SSF) descrito en Robertson y Kelley (1989) y Hac (2002). Esta tesis analiza vehículos pesados de una unidad, para lo cual se utilizan los modelos de Gillespie (1992), Kühn (2013), Robertson y Kelley (1989) y Hac (2002).

2.3.1 Modelos de umbral estático de *rollover*

El modelo descrito en Kühn (2013) estima el umbral estático de *rollover* ($a_{c,lim}/g$) hacia el interior de la curva (Ecuación 2.3) y hacia el exterior de la curva (Ecuación 2.4). Ambas ecuaciones consideran los vehículos como entidades rígidas, sin sistema de amortiguación. En las Ecuaciones 2.3 y 2.4, t es la trocha del vehículo (en m); h es la altura del centro de gravedad (en m) y p es el peralte (en decimal).

$$\frac{a_{c,lim}}{g} = SRT_{Rigido_EXT} = \frac{\frac{t}{2h} + p}{1 - \frac{t}{2h} p} \quad (2.3)$$

$$\frac{a_{c,lim}}{g} = SRT_{Rigido_INT} = \frac{\frac{t}{2h} - p}{1 + \frac{t}{2h} p} \quad (2.4)$$

El modelo de Gillespie (1992) considera que los vehículos cuentan con un sistema de amortiguación. Para ello, agrega a las Ecuaciones 2.3 y 2.4 el efecto de la altura del centro de balanceo (h_o en m) y la tasa de rotación (r_ϕ en rad/g), como se muestra en las Ecuaciones 2.5 y 2.6.

$$\frac{a_{c,lim}}{g} = SRT_{Amortiguado_EXT} = \frac{\frac{t}{2h} + p}{\left[r_{\phi} \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) + 1 - \frac{t}{2h} p \right]} \quad y \quad (2.5)$$

$$\frac{a_{c,lim}}{g} = SRT_{Amortiguado_INT} = \frac{\frac{t}{2h} - p}{\left[r_{\phi} \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) + 1 + \frac{t}{2h} p \right]} \quad (2.6)$$

2.3.2 El modelo de factor de estabilidad estática

El factor de estabilidad estática (SSF), descrito en Robertson y Kelley (1989) y Hac (2002), estima el umbral de *rollover*, cuando el peralte es nulo, como la razón entre la trocha del vehículo y la altura del centro de gravedad (Ecuación 2.7).

$$\frac{a_{c,lim}}{g} = SSF = \frac{t}{2h} \quad (2.7)$$

2.4 Análisis de confiabilidad en el diseño geométrico de carreteras

El estado del arte ofrece diversos ejemplos de aplicación de los principios de confiabilidad en el diseño geométrico. La mayor parte de la investigación realizada hasta ahora se dedica al diseño de curvas horizontales, distancia de visibilidad de parada y adelantamiento, despejes laterales, accidentes y seguridad vial. La mayor parte de los estudios utiliza como solución analítica el método de análisis de confiabilidad de primer orden (FORM), asumiendo distribuciones de probabilidad normal y funciones de estado límite lineales.

Navin (1990), Ismail y Sayed (2009, 2010, 2012) y Hussein *et al* (2014) analizaron en general el potencial de incorporación de la confiabilidad en el diseño geométrico. Navin (1992a), Easa (1994; 2000), El-Khoury y Hobeika (2007a; 2007b), Sarhan y Hassan (2008), Ismail y Sayed (2010), Sarhan y Hassan (2011), Ibrahim *et al* (2012), Wood y Donnel (2014) y Essa *et al* (2016) analizaron la distancia de visibilidad en diversas configuraciones geométricas; Echaveguren *et al* (2005), de Solminihac *et al* (2007), Rey *et al* (2011a; 2011b), You *et al* (2012), You y Sun (2013), Himes y Donnel (2014), Shin y Lee (2014a), Dahir y Hassan (2016), Essa *et al* (2016)

examinaron el diseño de curvas horizontales analizando la probabilidad de deslizamiento de vehículos ligeros; Snæbjornsson *et al* (2007), Chen y Chen (2011), Shin y Lee (2014a; 2014b), analizan el efecto del viento en curvas horizontales; Echaveguren y Vargas (2013) analizaron la necesidad de emplazamiento de pistas de emergencia; Richl y Sayed (2006) analizaron la reducción de ancho de medianas; Jalayer y Zhou (2016) evaluaron la peligrosidad de zonas laterales. Imine y Dolcemascolo (2007), Rey *et al* (2010; 2014), You y Sun (2013) y Shin y Lee (2014) analizaron el potencial de *rollover* para diseñar sistemas de alerta para vehículos articulados, utilizando modelos de *rollover* dinámico.

Sobre la base de la revisión de la literatura, se aprecia que en curvas horizontales la mayor parte de los estudios se dedican a la falla por deslizamiento en curvas horizontales y a la proposición de criterios de diseño asociados a dicha falla. En contraste, existen pocos estudios sobre *rollover* en curvas horizontales usando principios de confiabilidad, los que son conducentes principalmente al análisis de vehículos individuales más que para proponer esquemas de diseño.

2.5 Curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad corresponden a curvas de probabilidad de falla de un sistema dada una cierta sollicitación. Dicho sistema será confiable si la probabilidad de que un componente o el sistema opere bajo ciertas condiciones por un período de tiempo determinado (Lewis, 1987). En términos matemáticos, corresponde a la función inversa de la probabilidad de falla. En este caso corresponde a: $P(a_c > a_{c,lim})$. Para estimarlas, en este trabajo se utilizó el método de análisis de confiabilidad de primer orden (FORM), el cual es el fundamento del análisis de confiabilidad (Haldar y Mahadevan, 2000).

En la Figura 2.2 se presenta un ejemplo de curvas de fragilidad, donde en el eje de las ordenadas se presenta la probabilidad de falla de diversos modelos de estimación de *rollover*, mientras que en el eje de las abscisas, se presenta la curvatura de diversas curvas horizontales. Se observa que estas curvas presentan un comportamiento sinusoidal, adquiriendo la forma de una función escala a medida que la incertidumbre es menor, es decir, a medida que las curvas se desplazan al origen.

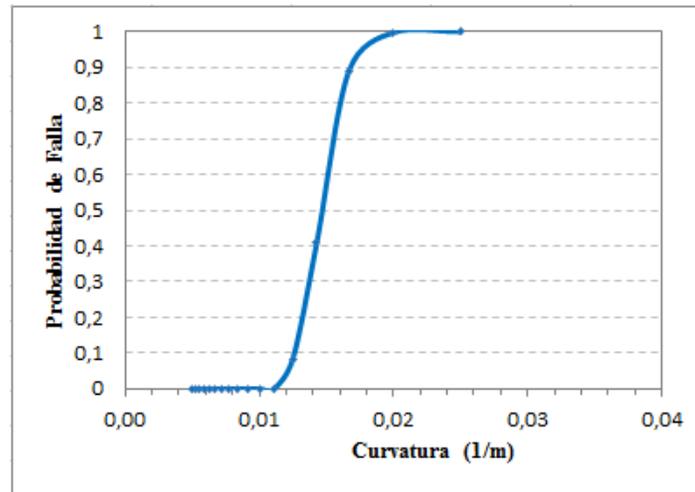


Figura 2.2 Ejemplo de una curva de fragilidad

2.6 Método de análisis FORM

El planteamiento teórico del FORM es el siguiente: Sean las funciones de falla G_1 y G_2 no lineales y aleatorias tales que: $G_1 = f_1(X)$ y $G_2 = f_2(X)$, siendo X el vector de variables aleatorias que describen las características geométricas. Sea la función de estado límite la función $g(X) = G_1 - G_2 = f_1(X) - f_2(X)$. La probabilidad de falla (P_f) se define con la probabilidad que $g(X)$ sea menor o igual a 0. Es decir: $P(g(X) \leq 0)$. La función de estado límite $g(X)$ expresa la falla de un sistema de acuerdo al comportamiento de las variables explicativas, que son aleatorias. En particular, la función de estado límite corresponde a la frontera que delimita las zonas de falla y de no falla, por lo cual corresponde a una función implícita del tipo $g(X) = 0$, siendo X un vector de variables aleatorias.

El lugar geométrico de todos los puntos X que cumplen la condición límite $g(X) = 0$, representa el estado límite que separa las zonas de falla y de no falla. Si $g(X)$ es una función lineal, las variables aleatorias siguen una distribución de probabilidades normal y no están correlacionadas, entonces la probabilidad de falla puede describirse según la Ecuación 2.8 (Haldar y Mahadevan, 2000).

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) ; \beta = \frac{\mu}{\sigma} = \frac{a_0 + \sum_i a_i \mu_{X_i}}{\sqrt{\sum_i a_i^2 \sigma_{X_i}^2}}, \quad (2.8)$$

donde β es el índice de confiabilidad, μ y σ son la media y desviación estándar de la función $g(X)$, a_i son constantes determinísticas, μ_{x_i} y σ_{x_i} son la media y la desviación estándar de X . Si $a_0 = 0$, $i = 2$ y $a_1 = 1$, se llega a la expresión de cálculo del margen de seguridad asociado a resistencias y sollicitaciones que se usa habitualmente en ingeniería.

En el caso en estudio, la función $g(X)$ es no lineal y las distribuciones de probabilidad de las componentes de X son no normales. Por tal motivo, se utilizó el método de Hasofer y Lind (1974), el cual linealiza la función de estado límite en el punto de diseño y define β como la distancia mínima entre el origen del sistema de coordenadas y el punto de diseño localizado sobre la función de estado límite $g(X) = 0$. El método requiere además la normalización de las variables para lo cual se utilizó la transformación de Rosenblatt (1952), con lo cual β se estima en base a la Ecuación 2.9 (Hasofer y Lind, 1974).

$$\beta_{HL} = \min_{\{x \in g(X) = 0\}} \sqrt{\sum_i x_i^2} ; u^* = -\beta_{HL} \alpha^* = \beta_{HL} \left(\frac{\frac{\partial g}{\partial x_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)^2}} \right), \quad (2.9)$$

en donde β_{HL} es el índice de confiabilidad de Hasofer y Lind, u_i es la variable x_i normalizada y α es el vector normalizado que describe la función $g(u)=0$ en el punto de diseño u^* . La Ecuación 2.9 se resuelve numéricamente o mediante programas computacionales de análisis de confiabilidad. La probabilidad de falla se estima usando la Ecuación 2.10, en función del valor de β_{HL} .

$$P_f = 1 - \Phi(\beta_{HL}). \quad (2.10)$$

2.7 Conclusiones

El rollover es un fenómeno que afecta fundamentalmente a los vehículos pesados, magnificándose dicho efecto a medida que el vehículo presenta trocha angosta, altura de centro de gravedad elevado e ingresa a una curva a velocidad elevada.

Los modelos estáticos caracterizan al fenómeno en función de las características geométricas del camino, geométricas del vehículo y en algunos casos del sistema de amortiguación del vehículo, determinando la aceleración lateral máxima que un vehículo es capaz de sostener en una curva sin que ocurra *rollover*. Estos modelos son incapaces de entregar información en línea sobre el estado en el que se encuentra el vehículo, pues no consideran características dinámicas y cinemáticas que sí son incorporadas en los modelos dinámicos.

La modelación del potencial de *rollover* utilizando umbrales de aceleración lateral, sólo permite analizar el fenómeno para cada vehículo en forma individual, siendo incapaz de analizar el fenómeno para una flota de vehículos.

Los modelos de umbral estático de *rollover* (SRT) presentan expresiones que permiten estimar el potencial de *rollover* tanto al interior como al exterior de la curva, a diferencia del factor de estabilidad estática (SSF), el cual considera un modelo único para toda la curva.

El factor de estabilidad estática (SSF) es un caso particular del umbral estático de *rollover* (SRT) desarrollado por Kühn, para la situación en la que el peralte es cero.

En lo que a curvas horizontales se refiere, la mayoría de los estudios que utilizan confiabilidad se enfocan en la falla de los vehículos por deslizamiento, generando criterios de diseño basados en ello, dejando de lado la falla por *rollover*. Los pocos estudios que la consideran lo hacen utilizando a los vehículos en forma individual y no caracterizando distintos tipos de vehículos.

CAPÍTULO 3 DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

En este capítulo se describe el diseño experimental. En primer lugar, se presentan las variables explicativas del fenómeno con sus respectivos niveles y rangos de variación. Luego, se presenta la matriz factorial donde se observa la forma en la que se agrupan dichas variables. Posteriormente, se calcula el tamaño muestral mínimo requerido para que el estudio sea representativo. Finalmente, se presentan las conclusiones.

3.2 Variables explicativas

La identificación de las variables explicativas se obtuvo a partir de una revisión detallada del estado del arte como consecuencia de su gran importancia en la modelación del fenómeno. De dicha revisión se obtuvo que las variables explicativas se podían clasificar en dos grupos: variables geométricas y variables de operación. Las variables geométricas del vehículo son: trocha, altura del centro de gravedad y altura de centro de balanceo, mientras que las variables geométricas del camino corresponden a radio de curvatura y peralte. La variable de operación fue la velocidad de operación a la entrada de la curva.

Los rangos para cada una de las variables fueron definidos de la siguiente manera:

- Se utilizan velocidades de operación entre 40 y 100 km/h, pues se considera que el *rollover* se debe a factores estáticos bajo los 40 km/h y que el límite de velocidades en buses interurbanos es 100 km/h.
- En relación al radio de curvatura, el Manual de Carreteras Volumen 3 establece que el radio mínimo en curvas horizontales para velocidades de 40 km/h es de 50 m, por lo que se utiliza este radio como cota inferior. Por otro lado, la cota superior de 350 m se escoge debido a la realización de simulaciones previas, a modo de inspección, donde

se observó que para dicho valor ya todos los modelos estudiados presentaban probabilidades de ocurrencia nula.

- El rango de peraltes se obtiene asociado al rango de radios utilizado.
- Los rangos de las características geométricas de un vehículo (trocha, altura de centro de gravedad, altura de centro de balanceo), se obtuvieron mediante una inspección de sus valores en los diversos vehículos pesados considerados en el estudio: buses de dos pisos, buses urbano, camiones de una unidad.

La Tabla 3.1 resume las variables explicativas de los modelos de estimación del potencial de *rollover* (Ecuaciones 2.3 a la 2.7) y sus respectivos niveles y rangos de variación.

Tabla 3.1 Niveles y rangos de las variables explicativas del modelo

Variable	Niveles	Rango de variación
Tipo de vehículo <ul style="list-style-type: none"> • Vehículo Tipo 1 (T1): camión liviano para transporte ligero • Vehículo Tipo 2 (T2): camión articulado de trocha ancha • Vehículo Tipo 3 (T3): bus urbano • Vehículo Tipo 4 (T4): bus interurbano de 2 pisos 	4	–
Velocidad de operación (V, en km/h)	3	40 – 100
Radio (R, en m)	3	50 – 350 (1)
Peralte (p, en %)	2	3 – 7 (2)
Trocha (t, en m)	2	1.7 – 2.1 (3)
Altura del centro de gravedad (h, en m)	2	1.2 – 3.4 (3)
Altura del centro de balanceo (h_0 , en m)	2	0.11 – 0.75 (3)

(1) Radios admitidos según velocidad de proyecto (MOP, 1994).

(2) Máximo peralte admitido asociado al rango de radios utilizado (MOP, 1994).

(3) Considera las características de los tipos de vehículos pesados utilizados en el análisis.

3.3 Matriz factorial

La matriz factorial de la Tabla 3.2 contiene a las variables geométricas en las columnas y a la variable operativa en las filas. Las variables geométricas son de dos tipos: del vehículo, donde se encuentran la trocha y la altura del centro de gravedad con 2 niveles cada una, y del camino, donde se encuentran el radio de la curva y el peralte con 3 y 2 niveles, respectivamente. La matriz factorial contó con 5 factores, 72 grupos y 4 grados de libertad.

Tabla 3.2 Matriz factorial

		Radio de la curva, R (m)																							
		50 - 150						150 - 250						250 - 350											
		Peralte del camino, p (%)																							
		3 - 5				5 - 7				3 - 5				5 - 7				3 - 5				5 - 7			
		Trocha del vehículo, T (m)																							
		Ancha		Angosta		Ancha		Angosta		Ancha		Angosta		Ancha		Angosta		Ancha		Angosta		Ancha		Angosta	
		Altura Centro de Gravedad, h (m)																							
		Media	Alta	Media	Alta	Media	Alta	Media	Alta	Media	Alta	Media	Alta	Media	Alta	Media	Alta	Media	Alta	Media	Alta	Media	Alta		
V (km/h)	40 - 60																								
	60 - 80																								
	80 - 100																								

3.4 Diseño factorial y tamaño de la muestra

El tamaño muestral se estimó mediante un análisis de potencia estadística utilizando los métodos de Cohen (1988), los cuales fueron aplicados mediante el *software* GPower 3.0.10. El análisis consideró una evaluación a priori del test F con un test estadístico ANOVA. Para dicho cálculo se consideró un nivel de confianza del 95%, una potencia estadística de 95% y un efecto tamaño de 0.25.

En la Figura 3.1 se muestra la variación de la potencia en función del tamaño muestral. De aquí se observa que el tamaño muestral mínimo corresponde a 304 pruebas. Luego, como el total de niveles de tratamiento es de 72, se debe realizar como mínimo 5 repeticiones en cada celda de la matriz factorial de la Tabla 3.2. El tamaño muestral total es de 360 pruebas, alcanzando una potencia estadística de 97%.

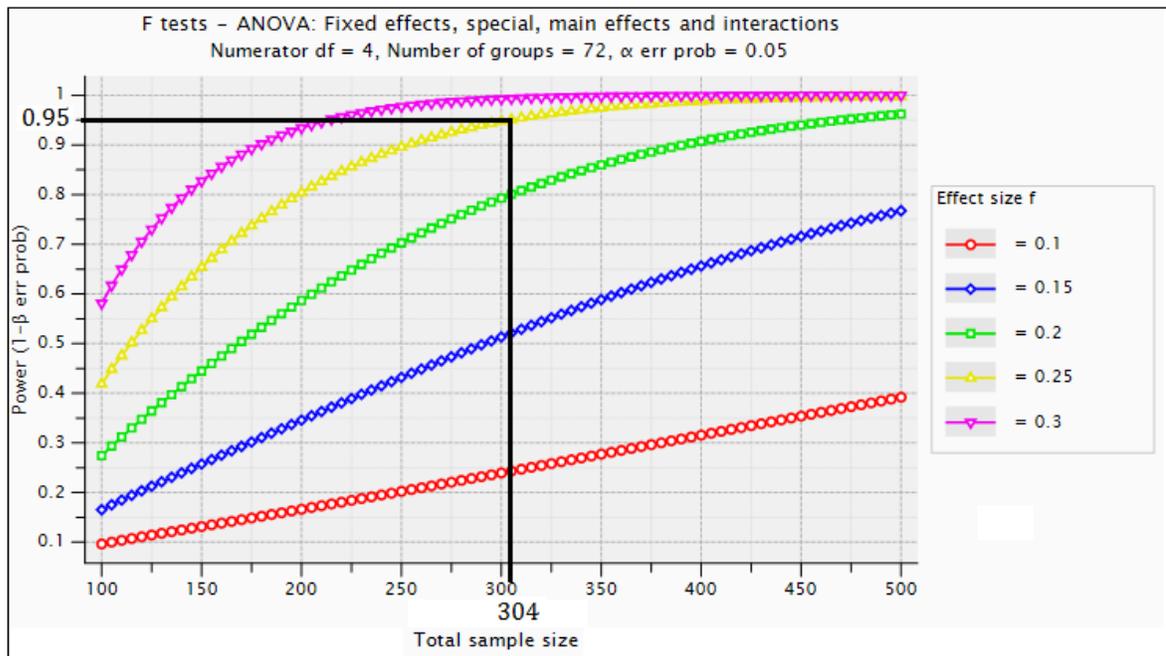


Figura 3.1 Potencia estadística en función del tamaño de la muestra y del efecto tamaño

3.5 Conclusiones

El diseño factorial se llevó a cabo para definir la cantidad mínima de simulaciones que se deben realizar en cada una de las celdas de la matriz factorial. Al tratarse de simulaciones, será posible realizar la cantidad total de pruebas en cada una de las celdas.

El tamaño muestral mínimo obtenido fue de 360 pruebas, equivalente a cinco réplicas por celda, para una potencia estadística del 97%, un efecto de tamaño medio y un error probable del 5%.

CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD

4.1 Introducción

En este capítulo se elaboran, en primera instancia, las funciones de estado límite necesarias para el cálculo de la probabilidad de falla de los modelos, para luego dar paso al desarrollo de las curvas de fragilidad usando análisis de confiabilidad de primer orden (FORM). En la sección final, se presentan algunas conclusiones asociadas al capítulo.

4.2 Funciones de estado límite

La función de estado límite (FEL) corresponde a la Ecuación 4.1, en donde a_c es la aceleración de operación y $a_{c,lim}$ la aceleración límite tal que ocurra *rollover*. La condición límite de la Ecuación 4.1 corresponde a la condición la cual $G(X)=0$.

$$G(X) = a_{c,lim} - a_c . \quad (4.1)$$

Considerando las Ecuaciones 2.3 a 2.7 se definieron 5 FEL (Ecuaciones 4.2 a 4.6). En las funciones $G_1(x)$ y $G_2(x)$ se usaron los modelos $SRT_{RIG-EXT}$ (Ecuación 2.3) y $SRT_{RIG-INT}$ (Ecuación 2.4). En las funciones $G_3(x)$ y $G_4(x)$ se usaron los modelos SRT_{AM-EXT} (Ecuación 2.5) y SRT_{AM-INT} (Ecuación 2.6). En la función $G_5(x)$ se usó el modelo SSF (Ecuación 2.7).

$$G_1(x) = \frac{\frac{t}{2h} + p}{1 - \frac{t}{2h}p} - \left(\frac{V^2}{gR} - p \right), \quad (4.2)$$

$$G_2(x) = \frac{\frac{t}{2h} - p}{1 + \frac{t}{2h}p} - \left(\frac{V^2}{gR} - p \right), \quad (4.3)$$

$$G_3(x) = \frac{\frac{t}{2h} + p}{\left[r_{\emptyset} \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) - \frac{t}{2h} p + 1 \right]} - \left(\frac{V^2}{gR} - p \right), \quad (4.4)$$

$$G_4(x) = \frac{\frac{t}{2h} - p}{\left[r_{\emptyset} \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) + \frac{t}{2h} p + 1 \right]} - \left(\frac{V^2}{gR} - p \right) y \quad (4.5)$$

$$G_5(x) = \frac{t}{2h} - \left(\frac{V^2}{gR} - p \right). \quad (4.6)$$

4.3 Datos de entrada

Las variables de entrada de las FEL se clasificaron en determinísticas y aleatorias para cada tipo de vehículo. La tipología de vehículos utilizada fue la siguiente:

- Vehículo Tipo 1 (T1): camión liviano de trocha ancha para transporte ligero
- Vehículo Tipo 2 (T2): camión articulado de trocha ancha
- Vehículo Tipo 3 (T3): bus urbano
- Vehículo Tipo 4 (T4): bus interurbano de 2 pisos

La Tabla 4.1 resume las características geométricas de las poblaciones de vehículos tipo utilizados en el análisis. En el caso de la trocha se consideró una distribución rectangular acotada con valores extremos (Re(min ; max)). En el caso de las distribuciones de altura de los centros de gravedad y de balanceo, se asumió una distribución normal, con media μ y desviación estándar σ según: $N(\mu; \sigma)$.

Tabla 4.1 Geometría de cada tipo de vehículo

Tipo de vehículo	Distribución de probabilidad de la trocha (m)	Distribución de probabilidad altura (m) de:	
		Centro de gravedad (CG)	Centro de balance (CB)
T1	Re(1.9 ; 2.1)	N (1.75 ; 0.14)	N (0.44 ; 0.0350)
T2	Re(1.9 ; 2.1)	N (2.85 ; 0.15)	N (0.72 ; 0.0375)
T3	Re(1.7 ; 1.9)	N (1.75 ; 0.13)	N (0.44 ; 0.0325)
T4	Re(1.7 ; 1.9)	N (2.85 ; 0.14)	N (0.72 ; 0.0350)

La Tabla 4.2 resume las geometrías consideradas, las cuales fueron obtenidas en base a las recomendaciones de diseño del Manual de Carreteras de Chile (MOP, 1994), asumiendo las condiciones de diseño de caminos existentes.

Tabla 4.2 Distribución de probabilidad para geometría de curvas horizontales

Radio (m)	Peralte (%)	Radio (m)	Peralte (%)
Re(50 ; 79)	Re(3 ; 7)	Re(140 ; 169)	Re(3 ; 7)
Re(80 ; 109)	Re(3 ; 7)	Re(170 ; 209)	Re(3 ; 7)
Re(110 ; 139)	Re(3 ; 7)	Re(210 ; 350)	Re(3 , 7)

La Tabla 4.3 resume las distribuciones de velocidad de operación consideradas. Éstas se obtuvieron considerando los modelos de velocidad de operación para vehículos pesados de Sáez (2001) para cada distribución de radios de curvatura. Estas velocidades se estimaron en términos de los radios de curvatura de la Tabla 4.2, de manera de considerar valores realistas.

Tabla 4.3 Distribución de probabilidad de la velocidad de operación

Radio (m)	Velocidad de operación (km/h)				
	40	60	65	70	75
R(50;79)	N(40;0.58)	N(60;0.58)	N(65;0.58)	N(70;0.58)	N(75;0.58)
R(80;109)	N(40;0.86)	N(60;0.86)	N(65;0.86)	N(70;0.86)	N(75;0.86)
R(110;139)	N(40;0.98)	N(60;0.98)	N(65;0.98)	N(70;0.98)	N(75;0.98)

Radio (m)	Velocidad de operación (km/h)				
	40	60	65	70	75
R(140;169)	N(40;1.05)	N(60;1.05)	N(65;1.05)	N(70;1.05)	N(75;1.05)
R(170;209)	N(40;1.09)	N(60;1.09)	N(65;1.09)	N(70;1.09)	N(75;1.09)
R(210;350)	N(40;1.13)	N(60;1.13)	N(65;1.13)	N(70;1.13)	N(75;1.13)
Radio (m)	Velocidad de operación (km/h)				
	80	85	90	95	100
R(50;79)	N(80;0.58)	N(85;0.58)	N(90;0.58)	N(95;0.58)	N(100;0.58)
R(80;109)	N(80;0.86)	N(85;0.86)	N(90;0.86)	N(95;0.86)	N(100;0.86)
R(110;139)	N(80;0.98)	N(85;0.98)	N(90;0.98)	N(95;0.98)	N(100;0.98)
R(140;169)	N(80;1.05)	N(85;1.05)	N(90;1.05)	N(95;1.05)	N(100;1.05)
R(170;209)	N(80;1.09)	N(85;1.09)	N(90;1.09)	N(95;1.09)	N(100;1.09)
R(210;350)	N(80;1.13)	N(85;1.13)	N(90;1.13)	N(95;1.13)	N(100;1.13)

4.4 Análisis de curvas de fragilidad para cada modelo de rollover

Las probabilidades de falla que representan los diversos puntos de las curvas de fragilidad de las Figuras 4.1 y 4.2 se calcularon utilizando el *software* VaP 1.6 (*Swiss Federal Institute of Technology* ETH, 1997). Las simulaciones se realizaron para todas las funciones de estado límite, en forma individual, utilizando como entrada las distribuciones de probabilidad de las diversas variables geométricas y de operación, utilizando en primera instancia velocidades de 40, 60 y 80 km/h, una a la vez. En cada una de las simulaciones se ingresaron las distribuciones de las variables en forma manual, obteniendo como respuesta la probabilidad de falla y el beta de Hasofer y Lind.

Para la velocidad de operación de 40 km/h se observó que en el vehículo T4 la probabilidad de falla de los diversos modelos era 0 para radios mayores a 50 m. Para los vehículos T1, T2 y T3 la probabilidad de falla resultó ser 0 para todos los radios. Por tal motivo, este patrón de comportamiento, $V_{op} = 40$ km/h, no se analizó en detalle.

Los resultados obtenidos para las velocidades de operación de 60 km/h y 80 km/h y las 5 FEL se muestran en las Figuras 4.1 y 4.2 respectivamente. Las líneas continuas en ambas figuras representan la probabilidad de falla cuando el peralte varía entre 3 y 5%. Las líneas segmentadas representan la probabilidad de falla cuando el peralte varía entre 5 y 7%.

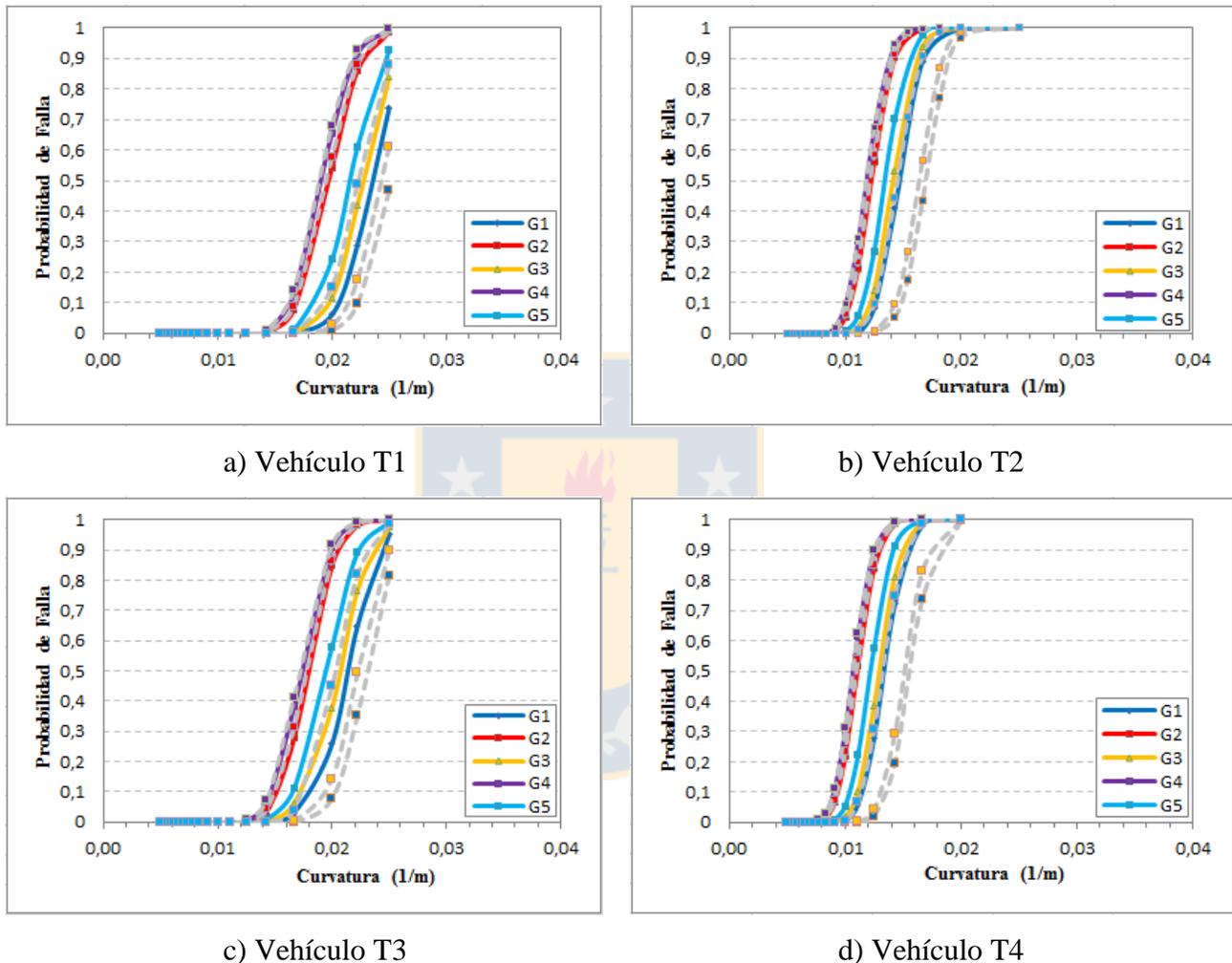
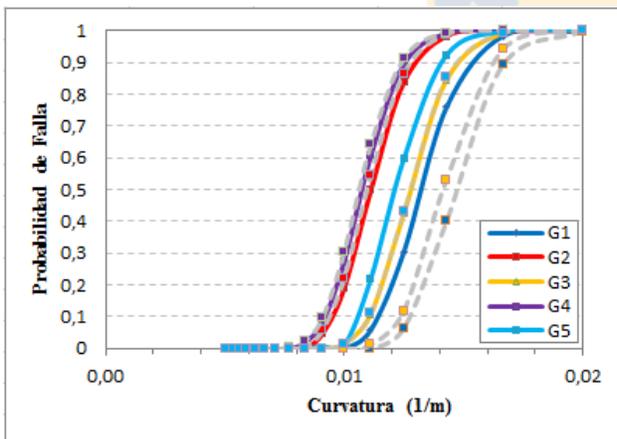


Figura 4.1 Probabilidad de *rollover* por tipo de vehículo para velocidad de operación de 60 km/h

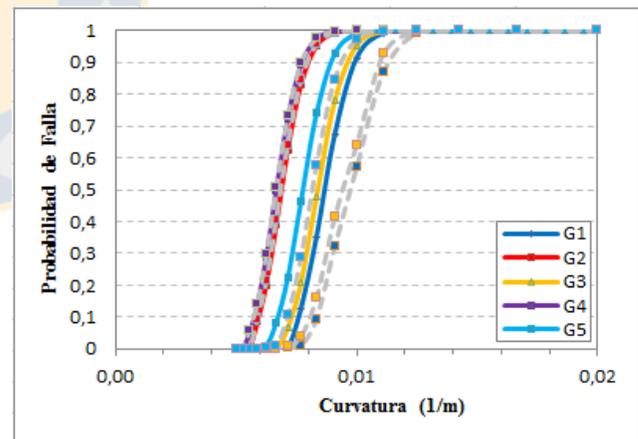
Las Figuras 4.1a y 4.1c (vehículos con altura de centro de gravedad media) muestran que la probabilidad de falla hacia el exterior de la curva (G₁ y G₃) es menor a 0.5 para radios mayores a 50 m, independientemente del peralte. Para el interior de la curva (G₂ y G₄), la probabilidad de falla de 0.5 se alcanza para radios entre 50 y 60 m. En el caso de falla por estabilidad estática (G₅), la probabilidad de falla es nula para vehículos de trocha ancha (Figura 4.1a y 4.1b) cuando el radio es mayor a 50 m.

En vehículos con centro de gravedad alto (Vehículo T2 y T4) (Figura 4.1b y 4.1d), la probabilidad de falla de 0.5 hacia el exterior de la curva (G_1 y G_3) se alcanza con radios entre 70 a 80 m, y con radios de 60 a 70 m para peraltes mayores. La probabilidad de falla al interior de la curva (G_2 y G_4) es elevada para radios entre 70 y 80 m, disminuyendo a 0.5 para radios entre 80 a 90 m, los cuales no varían al aumentar el peralte. Para G_5 se observa que la probabilidad de falla de 0.5 se alcanza con radios entre 70 y 80 m, valores que permanecen constantes al aumentar el peralte para vehículos con trochas angostas (vehículo T4) y disminuyen a 70 m para vehículos con trocha ancha (vehículo T2).

Las Figuras 4.2a y 4.2c (vehículos con altura de centro de gravedad media) muestran que la probabilidad de falla al exterior de la curva es elevada para radios entre 50 y 60 m, cayendo a 0.5 con radios entre 75 y 85 m. Al interior de la curva la probabilidad de falla de 0.5 se alcanza con radios entre 90 y 100 m, los cuales no varían ante un aumento del peralte. Para G_5 se observa una caída de la probabilidad hasta 0.5 con radios entre 80 y 90 m, disminuyendo levemente a 75 y 85 m al aumentar el peralte.



a) Vehículo T1



b) Vehículo T2

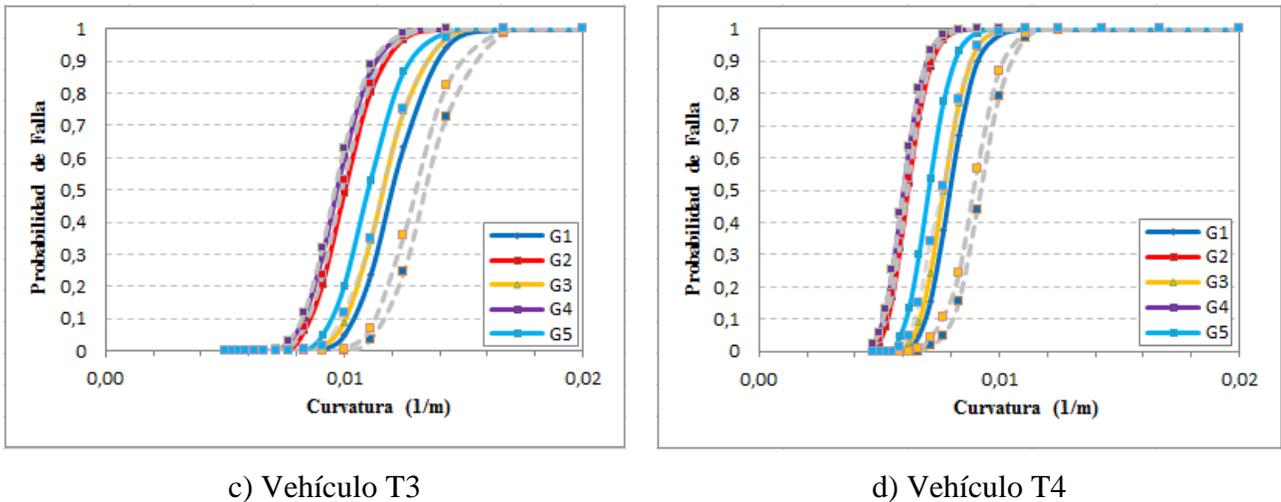


Figura 4.2 Probabilidad de *rollover* por tipo de vehículo para velocidad de operación de 80 km/h

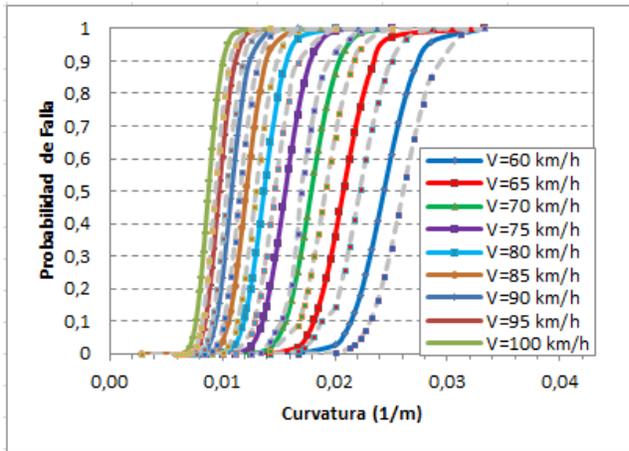
En las Figuras 4.2b y 4.2d (vehículos con alturas de centro de gravedad elevadas) se aprecia que la probabilidad de falla hacia el interior de la curva es cercana a 1 para radios menores a 120 m si la trocha es ancha y para radios menores a 140 m si la trocha es angosta. La probabilidad disminuye a 0.5 para radios de 150 a 160 m, independientemente si el peralte es bajo o alto. La probabilidad de falla al exterior de la curva es alta para radios menores a 100 m cuando el peralte es bajo y para radios entre 80 y 90 m cuando el peralte es alto. La probabilidad de falla disminuye a 0.5 con radios entre 110 y 120 m. Para G₅ la probabilidad de falla mayor a 0.5 ocurre en radios de aproximadamente 140 m cuando el peralte es bajo y del orden de 130 m cuando es elevado.

4.5 Simulación detallada de curvas de fragilidad

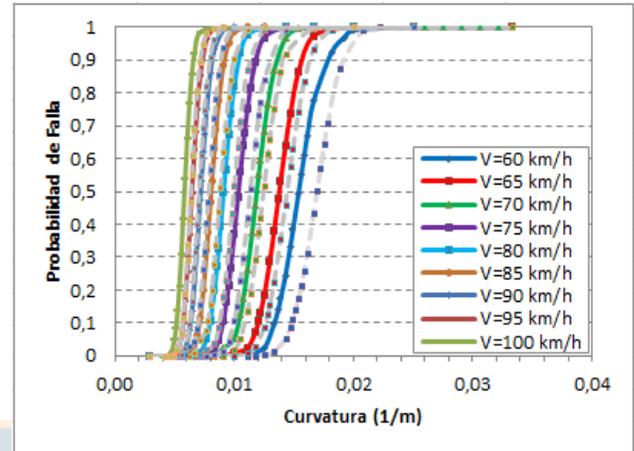
Para la simulación detallada se escogieron los modelos que estimaban la probabilidad de *rollover* hacia el exterior de la curva (FEL G₁) y hacia interior de la curva (FEL G₄). Se descartaron las FEL G₂ y G₃ dado que se superponían a las otras FEL, lo cual evidencia que al considerar modelos rígidos con o sin amortiguamiento la probabilidad de *rollover* resultante es similar.

Para la simulación se utilizaron los datos de entrada presentes en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3. Las simulaciones se realizaron por separado para los modelos de *rollover* al exterior e interior de la curva, tipos de vehículo y niveles de velocidad. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 4.3 y 4.4 para los modelos de *rollover* externo e interno, respectivamente. En ambas

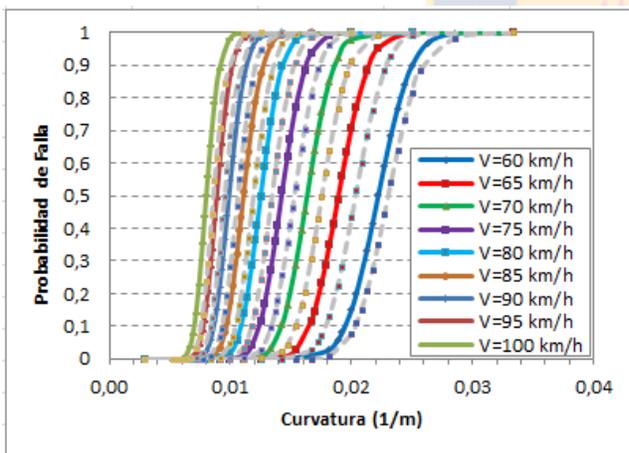
figuras las líneas continuas describen la probabilidad de falla cuando el peralte varía entre 3 y 5%. Las líneas segmentadas describen la probabilidad de falla cuando el peralte varía entre 5 y 7%.



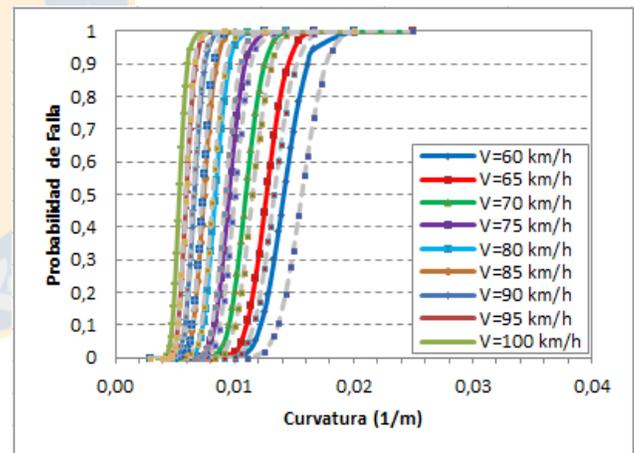
a) Vehículo T1



b) Vehículo T2



c) Vehículo T3



d) Vehículo T4

Figura 4.3 Probabilidad de *rollover* externo para cada tipo de vehículo

En la Figura 4.3 se observa que la probabilidad de *rollover* hacia el exterior de la curva es sensible a la variación del peralte para una misma velocidad de operación. Por tanto, al parametrizar las curvas es necesario segmentar los modelos por tipo de peralte para cada tipo de vehículo. Se observa también que a velocidades elevadas la probabilidad de *rollover* tiende a ser insensible a la curvatura y peralte, fenómeno que se aprecia en la pendiente pronunciada de la curva para velocidades cercanas a los 100 km/h. Este comportamiento es independiente del tipo

de vehículo. A velocidades más bajas la pendiente de la curva de probabilidad de *rollover* tiende a reducirse, siendo sensible tanto al peralte como a la curvatura. Por tanto, tanto la geometría como la operación explican la probabilidad de falla para todos los tipos de vehículo.

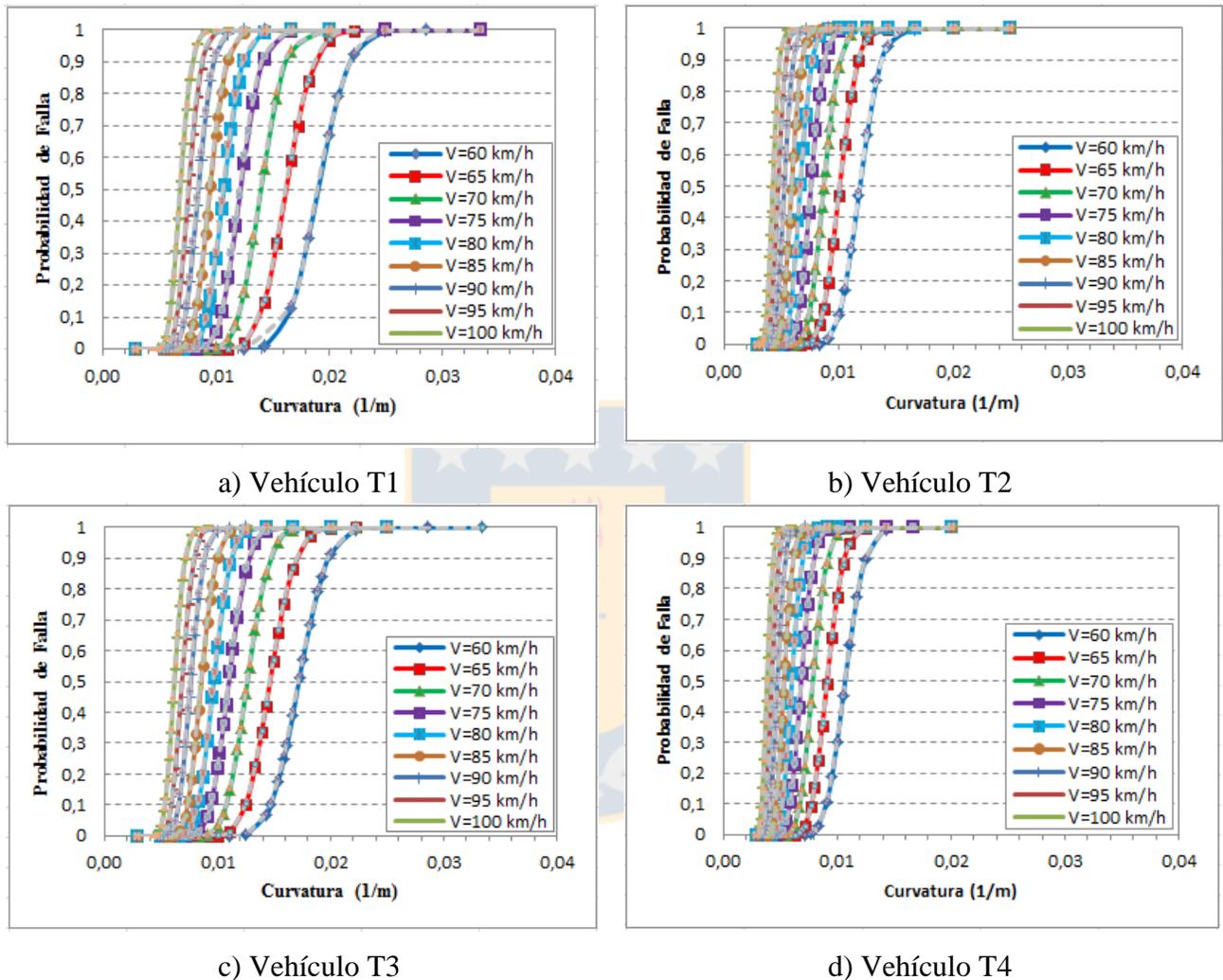


Figura 4.4 Probabilidad de *rollover* interno para cada tipo de vehículo

En la Figura 4.4 se observa que la probabilidad de falla por *rollover* hacia el interior de la curva (FEL G4) no es sensible a variaciones del peralte para una misma velocidad de operación. Por lo tanto, las curvas de probabilidad de falla se pueden parametrizar excluyendo el peralte como variable explicativa.

4.6 Conclusiones

Para velocidades de operación de 40 km/h, los modelos de estimación de *rollover* estático considerados presentaron probabilidad de falla nula para los vehículos T1, T2 y T3, para todo radio de curvatura. Mientras que para el caso de los vehículos T4 la probabilidad resultó nula para radios menores a 50 m.

Para velocidades de 60 km/h, los vehículos con centros de gravedad elevados presentaron probabilidades de experimentar *rollover* superiores a 50% para radios menores a 90 m. Para el caso de vehículos con alturas de centro de gravedad más bajo dicha probabilidad se alcanzó para radios menores a 60 m.

Para velocidades de 80 km/h, los vehículos con centros de gravedad elevados presentaron probabilidades de experimentar *rollover* superiores a 50% para radios de curvatura menores a 170 m. Para el caso de vehículos con alturas de centro de gravedad más bajos dicha probabilidad se alcanzó para radios menores a 100 m.

Para velocidades de 100 km/h, los vehículos con centros de gravedad elevados presentaron probabilidades de experimentar *rollover* superiores a 50% para radios menores a 260 m. Para el caso de vehículos con alturas de centro de gravedad más bajos dicha probabilidad se alcanzó para radios menores a 160 m.

En términos físicos, vehículos con centro de gravedad elevado presentan mayor inestabilidad que aquellos con centro de gravedad bajo, aumentando dicha inestabilidad a medida que su trocha es más angosta. Ante esto, los resultados obtenidos resultan razonables, puesto que para cualquier radio de curvatura, a una misma velocidad e independiente del tipo de peralte, son los vehículos con centro de gravedad elevado los que presentan mayor probabilidad de experimentar *rollover*.

Al variar la clase de peralte, los modelos de *rollover* hacia el exterior de la curva presentaron una sensibilidad en su respuesta, al contrario, los modelos de *rollover* hacia el interior de la curva se mostraron insensibles al cambio.

CAPÍTULO 5 PARAMETRIZACIÓN DE MODELOS DE PROBABILIDAD DE FALLA

5.1 Introducción

En este capítulo se presenta la parametrización de las curvas de fragilidad para cada tipo de vehículo en estudio, realizando previamente un ajuste de funciones de crecimiento sigmoideal sobre los datos simulados. Finalmente, se realiza una discusión de los resultados (comparando las respuestas de los modelos generados y los datos simulados) y se presentan ejemplos de aplicación de las curvas de fragilidad relacionados con el cálculo de radios mínimos y de límites de velocidad.

5.2 Ajuste de funciones a los datos simulados

Una vez realizadas las simulaciones se ajustaron a los datos simulados diversas funciones de crecimiento sigmoideal, con el objetivo de encontrar la función con el menor error cuadrático medio (MSE). Para ello, se utilizó el *software* MINITAB 17 (Minitab inc., 2014), el cual cuenta con un catálogo de 6 funciones sigmoideales. En la Tabla 5.1 se muestra el rango de los MSE obtenidos. Las funciones Crecimiento de Gompertz y logístico presentaron el menor MSE, por lo cual se seleccionaron para parametrizar.

Tabla 5.1 Modelos de crecimiento sigmoideal utilizados y su MSE

#	Nombre	Modelo	MSE
1	Crecimiento de Gompertz	$P_{ro} = \phi_1 e^{-\left\{ \phi_2 \cdot \frac{\phi_3}{R} \right\}}$	0.000093 – 0.034
2	Crecimiento Log-logístico	$P_{ro} = \theta_1 + \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{(1 + e^{(\theta_4 * \ln(\frac{x}{\theta_3}))})}$	0.014 – 0.114
3	Crecimiento Logístico	$P_{ro} = \theta_1 + \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{(1 + e^{\left(\frac{(x-\theta_3)}{\theta_4}\right)})}$	0.000069 – 0.018
4	Sigmoide de 1 parámetro Tipo I	$P_{ro} = 1 - e^{(-x^\theta)}$	0.065 – 0.177
5	Sigmoide de 2 parámetros Tipo II	$P_{ro} = 1 - e^{(-\theta_1 * x^{\theta_2})}$	0.0002 – 0.015
6	Sigmoide de 2 parámetros Tipo I	$P_{ro} = 1 - e^{(-e^{(\theta_1 - \theta_2 * x)})}$	0.0009 – 0.058

El ajuste se realizó utilizando las 18 curvas de fragilidad, para cada tipo de vehículo, obtenidas considerando 9 velocidades de operación entre 60 y 100 km/h, cada 5 km/h, y dos clases de peralte (3 – 5% y 5 – 7%), tanto para *rollover* interno como externo, obteniéndose un total de 144 curvas. Luego, para cada curva de fragilidad se tomaron las coordenadas curvatura - probabilidad de falla, que representan los puntos de la curva, y se ingresaron al *software* MINITAB 17, donde se seleccionó cada una de las 6 funciones sigmoideas disponibles. Finalmente, de cada una de estas curvas de fragilidad, se obtuvo como resultado el conjunto de parámetros de la función con su respectivo error cuadrático medio (MSE). Los parámetros se encuentran graficados en las Figuras 5.1 y 5.2 para *rollover* externo e interno, respectivamente, y para cada tipo de vehículo.

Se detectó que Crecimiento de Gompertz sobrestimaba en un 1% la probabilidad de falla en la cola superior, lo cual se resolvió aumentando la cantidad de datos en la cola superior y haciendo $\phi_1=1$. Por otro lado, se observó que el modelo de Crecimiento Logístico estimaba probabilidades de falla negativas en ausencia de *rollover*. Al aumentar la cantidad de datos en la cola inferior se observó que el modelo perdía su capacidad de predicción. Al mismo tiempo, se observó que los modelos sigmoideas de 2 parámetros, tipo I y II, sobreestimaban la probabilidad de ocurrencia de *rollover* tanto en la cola inferior como en las proximidades de la cola superior. Al aumentar la cantidad de datos en las colas no se observó disminución en las sobreestimaciones. En consecuencia, se optó por la función de Crecimiento de Gompertz (FCG) para la estimación analítica. Para ello, en primera instancia, se analizó el patrón de comportamiento de los parámetros de FCG y posteriormente se ajustaron funciones analíticas a cada parámetro.

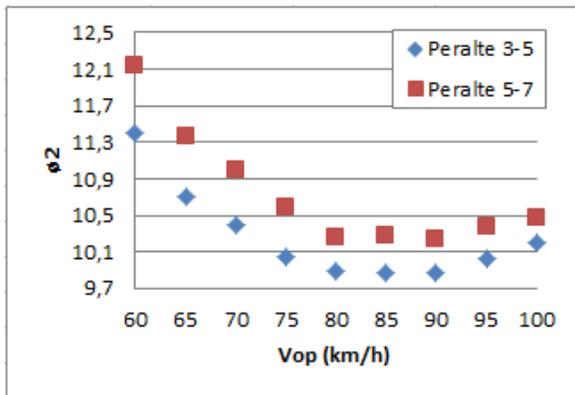
5.3 Patrones de comportamiento de los parámetros del Crecimiento de Gompertz

5.3.1 *Rollover* externo

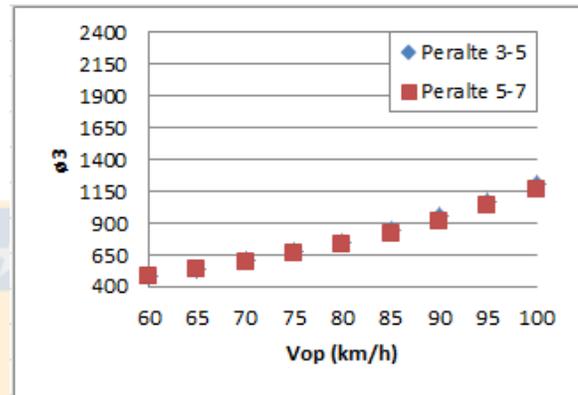
En la Figura 5.1a y 5.1e (vehículos T1 y T3, de altura de centro de gravedad media), el parámetro ϕ_2 presenta una ley de variación parabólica en función de la velocidad de operación para los dos niveles de peralte. En las Figuras 5.1c y 5.1g (Vehículos T2 y T4, de altura de centro de gravedad elevada), el parámetro ϕ_2 es monótonamente creciente para los dos niveles de peralte. En el caso

del parámetro ϕ_3 , por el contrario, el patrón de crecimiento es el mismo, independientemente del nivel del peralte, variando solo la tasa de crecimiento.

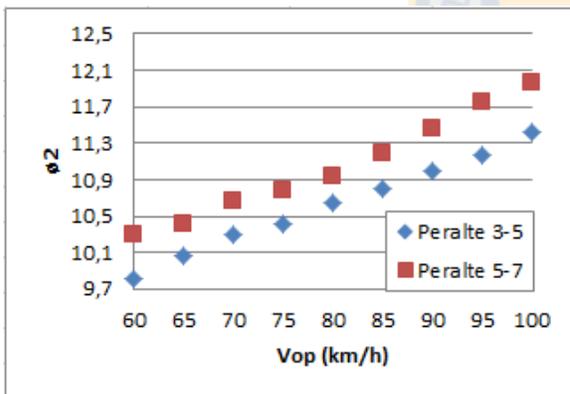
En la figura 5.1, a velocidad constante, se observa que el parámetro ϕ_2 de la FCG presenta un comportamiento sensible ante variaciones en el tipo de peralte, lo que hace necesario crear expresiones de probabilidad de falla para cada clase de peralte, a diferencia del parámetro ϕ_3 , el cual se presenta insensible al cambio.



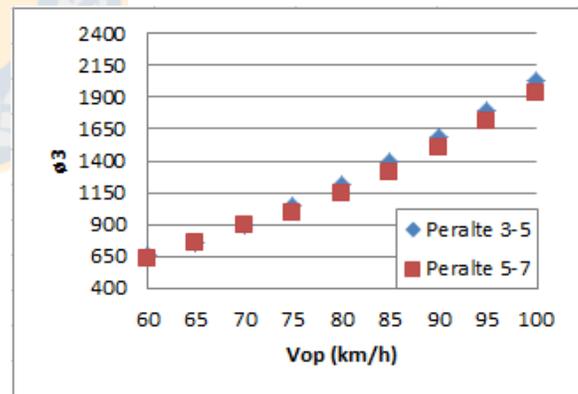
a) Vehículo tipo 1 - Parámetro ϕ_2



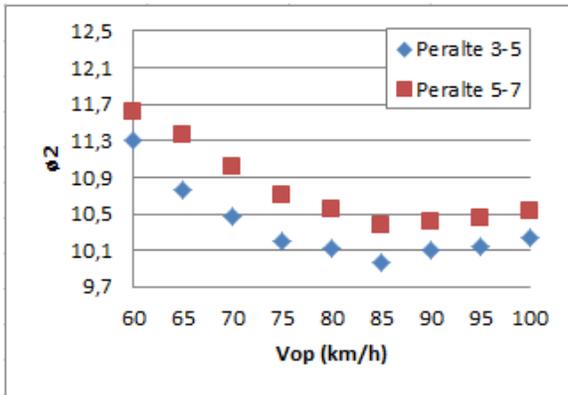
b) Vehículo tipo 1 - Parámetro ϕ_3



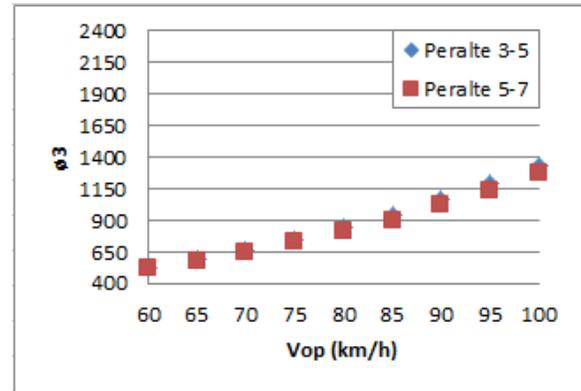
c) Vehículo tipo 2 - Parámetro ϕ_2



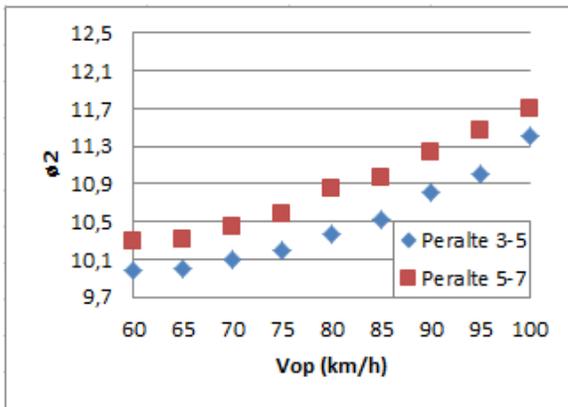
d) Vehículo tipo 2 - Parámetro ϕ_3



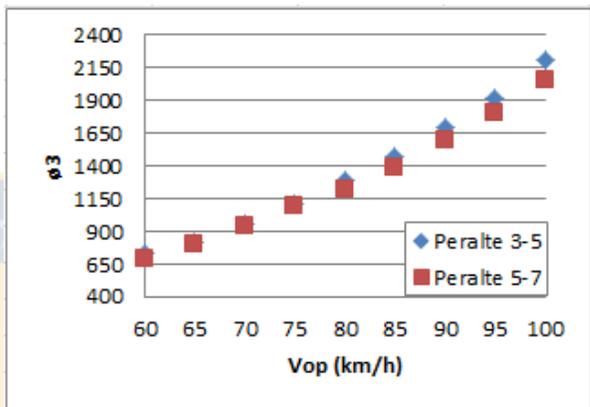
e) Vehículo tipo 3 - Parámetro Φ_2



f) Vehículo tipo 3 - Parámetro Φ_3



g) Vehículo tipo 4 - Parámetro Φ_2



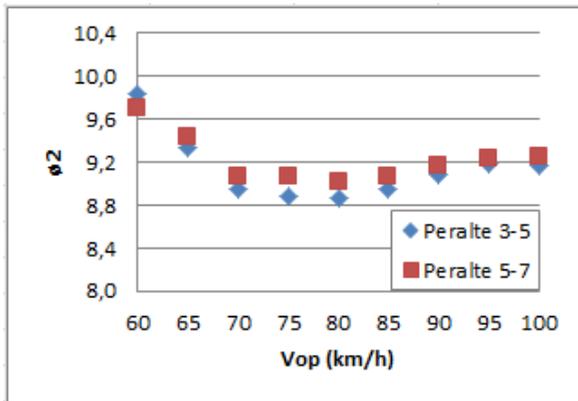
h) Vehículo tipo 4 - Parámetro Φ_3

Figura 5.1 Comportamiento de los parámetros Φ_2 y Φ_3 de la FCG para la FEL G₁

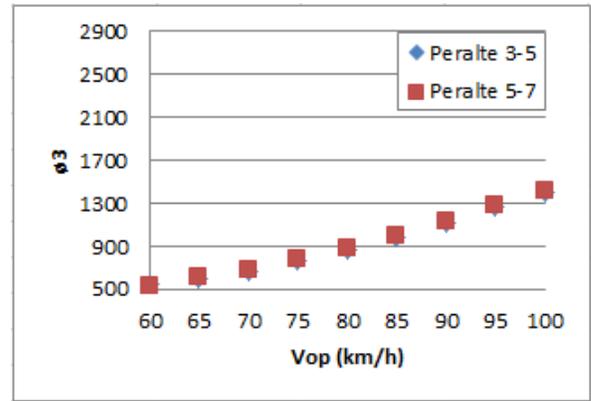
5.3.2 Rollover interno

En la Figura 5.2 se observan patrones similares para Φ_3 . En el caso del parámetro Φ_2 , se aprecia un cambio de concavidad en torno a los 80 km/h, lo que sugiere un modelo de comportamiento polinomial de tercer orden.

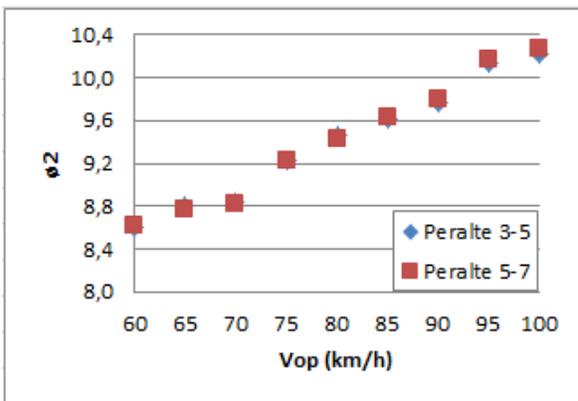
A velocidad constante, tanto el parámetro Φ_2 como el parámetro Φ_3 de la FCG no presentan ninguna sensibilidad ante variaciones en el tipo de peralte, por lo que se pueden crear expresiones de probabilidad de falla únicas, y no por tipo de peralte, para cada tipo de vehículo.



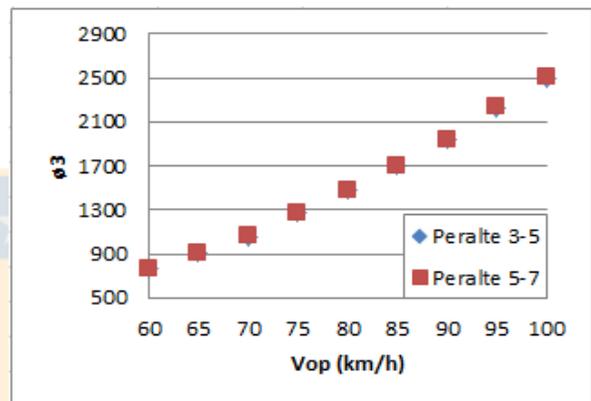
a) Vehículo tipo 1 - Parámetro ϕ_2



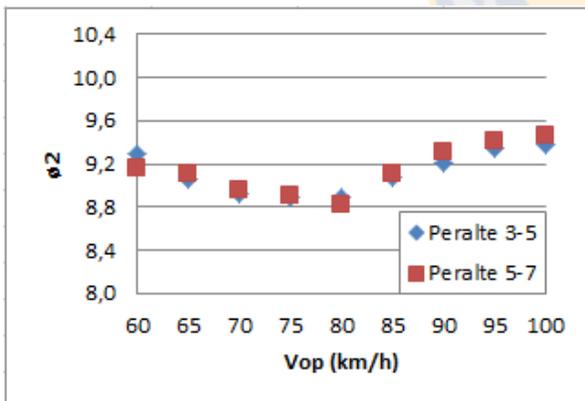
b) Vehículo tipo 1 - Parámetro ϕ_3



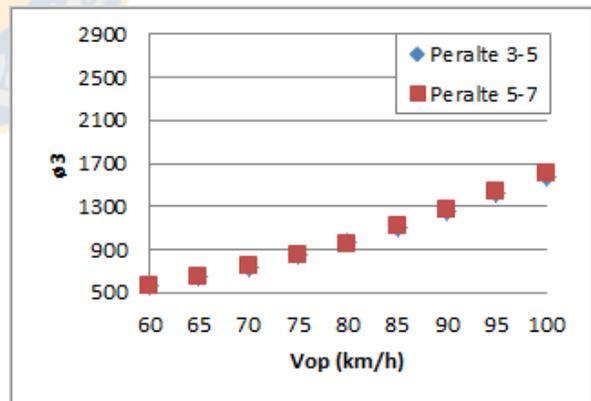
c) Vehículo tipo 2 - Parámetro ϕ_2



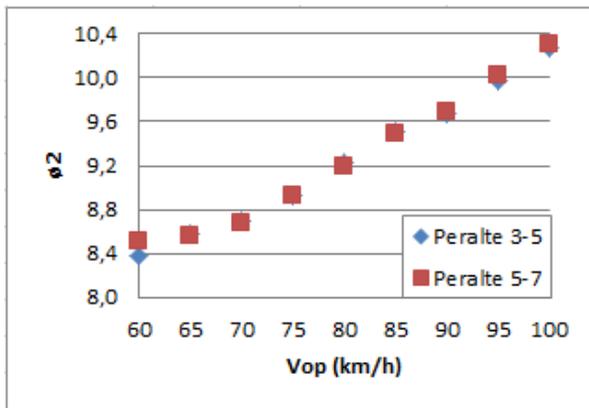
d) Vehículo tipo 2 - Parámetro ϕ_3



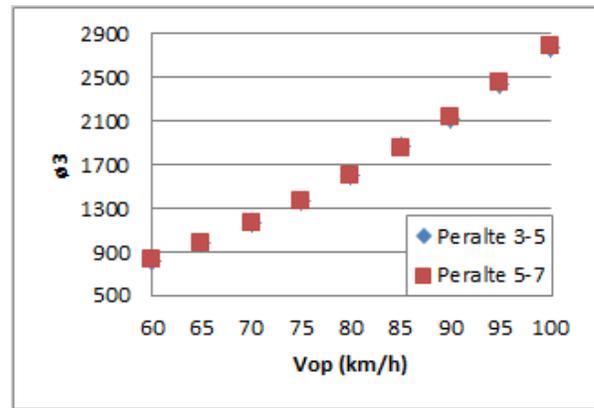
e) Vehículo tipo 3 - Parámetro ϕ_2



f) Vehículo tipo 3 - Parámetro ϕ_3



g) Vehículo tipo 4 - Parámetro ϕ_2



h) Vehículo tipo 4 - Parámetro ϕ_3

Figura 5.2 Comportamiento de los parámetros ϕ_2 y ϕ_3 de la FCG para la FEL G₄

5.4 Parametrización de curvas de fragilidad

Una vez identificados los patrones de comportamiento se probaron 10 especificaciones funcionales para los parámetros ϕ_2 y ϕ_3 utilizando regresión lineal simple. De estas especificaciones se seleccionaron las más robustas. Las Tablas 5.2 y 5.3 presentan los resultados obtenidos para la FEL G₁ y la Tabla 5.4 los resultados obtenidos para la FEL G₄.

Tabla 5.2 Resumen de parámetros de los modelos de regresión ϕ_2 de la FCG de la FEL G₁

Modelo		ϕ_2 , Peralte $\leq 5\%$				ϕ_2 ; Peralte $> 5\%$			
		α_1	α_2	α_3	R^2	α_1	α_2	α_3	R^2
T1	$\phi_2 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op} + \alpha_3 V_{op}^2$	26.33 (32.1)	-1.38 (-18.0)	0.029 (17.1)	0.99	28.77 (25.6)	-1.52 (-14.0)	0.031 (13.4)	0.99
T2	$\phi_2 = \alpha_1 \ln(V_{op}) + \alpha_2$	3.04 (31.7)	1.24 (4.2)	-	0.99	3.28 (14.3)	0.93 (1.3)	-	0.97
T3	$\phi_2 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op} + \alpha_3 V_{op}^2$	22.91 (25.9)	-1.07 (-13.0)	0.022 (12.2)	0.98	21.76 (29.8)	-0.91 (-13.0)	0.018 (11.9)	0.99
T4	$\phi_2 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op} + \alpha_3 P$ $\phi_2 = \alpha_1 \ln(V_{op}) + \alpha_2$	8.87 (14.4)	0.14 (10.8)	-30.69 (-2.1)	0.94	2.86 (10.9)	2.04 (2.5)	-	0.94

Tabla 5.3 Resumen de parámetros de los modelos de regresión ϕ_3 de la FCG de la FEL G₁

Modelo		ϕ_3			
		α_1	α_2	α_3	R^2
T1	$\phi_3 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op}$	-612.79 (-17.6)	62.79 (40.7)	-	0.97
T2	$\phi_3 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op} + \alpha_3 P$	-1355 (-22.5)	120.69 (51.7)	-1699.9 (-2.9)	0.98
T3	$\phi_3 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op} + \alpha_3 P$	-645.6 (-17.1)	69.93 (47.7)	-874.1 (-2.4)	0.98
T4	$\phi_3 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op} + \alpha_3 P$	-1406 (-18.8)	127.6 (44.2)	-2030 (-2.8)	0.98

Tabla 5.4 Resumen de parámetros de los modelos de regresión ϕ_2 y ϕ_3 de la FCG de la FEL G₄

Modelo		ϕ_2				ϕ_3			
		α_1	α_2	α_3	R^2	α_1	α_2	α_3	R^2
T1	$\phi_2 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op} + \alpha_3 V_{op}^2$	18.82	-0.86	0.019	0.82	-838.9	79.02	-	0.98
	$\phi_3 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op}$	(25.0)	(-12.4)	(12.0)		(-23.7)	(50.2)	-	
T2	$\phi_2 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op}$	5.97	0.155	-	0.98	-259	3.55	-	0.99
	$\phi_3 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op}^2$	(90.7)	(53.1)	-		(-23.9)	(174.0)	-	
T3	$\phi_2 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op} + \alpha_3 V_{op}^2$	14.75	-0.55	0.013	0.83	-1056.1	93.28	-	0.98
	$\phi_3 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op}$	(27.6)	(-11.2)	(11.9)		(-26.9)	(53.4)	-	
T4	$\phi_2 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op}$	5.46	0.171	-	0.98	-322	3.956	-	0.99
	$\phi_3 = \alpha_1 + \alpha_2 V_{op}^2$	(76.3)	(53.8)	-		(-20.2)	(131.0)	-	

Con los modelos de las Tablas 5.2, 5.3 y 5.4, se obtuvieron las curvas de fragilidad que se muestran en las Tablas 5.5 y 5.6.

Tabla 5.5 Modelos de probabilidad de *rollover* hacia el exterior de la curva horizontal

Vehículo	Modelo de probabilidad de <i>rollover</i>	
	Peralte entre 3 y 5%	Peralte entre 5 y 7%
T1: Camión ligero	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{26.33 - 1.38S + 0.029S^2 - 62.79S - 612.79}{R} \right\}}$	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{28.77 - 1.52S + 0.031S^2 - 62.79S - 612.79}{R} \right\}}$
T2: Camión articulado, eje ancho	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{3.04 \ln(S) + 1.24 - 120.69S - 1700P - 1355}{R} \right\}}$	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{3.28 \ln(S) + 0.93 - 120.69S - 1700P - 1355}{R} \right\}}$
T3: Bus urbano	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{22.91 - 1.07S + 0.022S^2 - 69.93S - 874.1P - 645.6}{R} \right\}}$	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{21.76 - 0.91S + 0.018S^2 - 69.93S - 874.1P - 645.6}{R} \right\}}$
T4: Bus inter urbano de 2 pisos	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{8.87 + 0.14S - 30.69P - 127.6S - 2030P - 1406}{R} \right\}}$	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{2.86 \ln(S) + 2.04 - 127.6S - 2030P - 1406}{R} \right\}}$

R: radio (m); S: Velocidad de operación (m/s), P: Peralte (decimal).

Tabla 5.6 Modelos de probabilidad de *rollover* hacia el interior de la curva horizontal

Vehículo	Modelo de probabilidad de <i>rollover</i>	
	Peralte entre 3 y 5%	Peralte entre 5 y 7%
T1: Camión ligero	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{18.82 - 0.86S + 0.019S^2 - 79.02S - 838.9}{R} \right\}}$	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{18.82 - 0.86S + 0.019S^2 - 79.02S - 838.9}{R} \right\}}$
T2: Camión articulado, eje ancho	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{5.97 + 0.155S - 3.55S^2 - 259}{R} \right\}}$	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{5.97 + 0.155S - 3.55S^2 - 259}{R} \right\}}$
T3: Bus urbano	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{14.75 - 0.55S + 0.013S^2 - 93.28S - 1056.1}{R} \right\}}$	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{14.75 - 0.55S + 0.013S^2 - 93.28S - 1056.1}{R} \right\}}$
T4: Bus inter urbano de 2 pisos	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{5.46 + 0.171S - 3.956S^2 - 322}{R} \right\}}$	$P_{ro} = e^{-\left\{ \frac{5.46 + 0.171S - 3.956S^2 - 322}{R} \right\}}$

R: radio (m); S: velocidad de operación (m/s), P: Peralte (decimal).

5.5 Discusión de los resultados

A partir de las expresiones generadas en las Tablas 5.5 y 5.6, se procedió a confeccionar sus curvas de fragilidad considerando velocidades de operación de 60 y 100 km/h, de manera de comparar los resultados generados analíticamente con los resultados obtenidos por medio de simulaciones. En la Figura 5.3 se presentan las curvas de fragilidad de los modelos generados para el *rollover* hacia el exterior de la curva, mientras que en la Figura 5.4 se presentan las curvas de fragilidad de los modelos generados para el *rollover* hacia el interior de la curva. En ambas figuras las líneas continuas describen la probabilidad de falla para velocidades de operación de 60 km/h. Las líneas segmentadas describen la probabilidad de falla para velocidades de operación de 100 km/h.

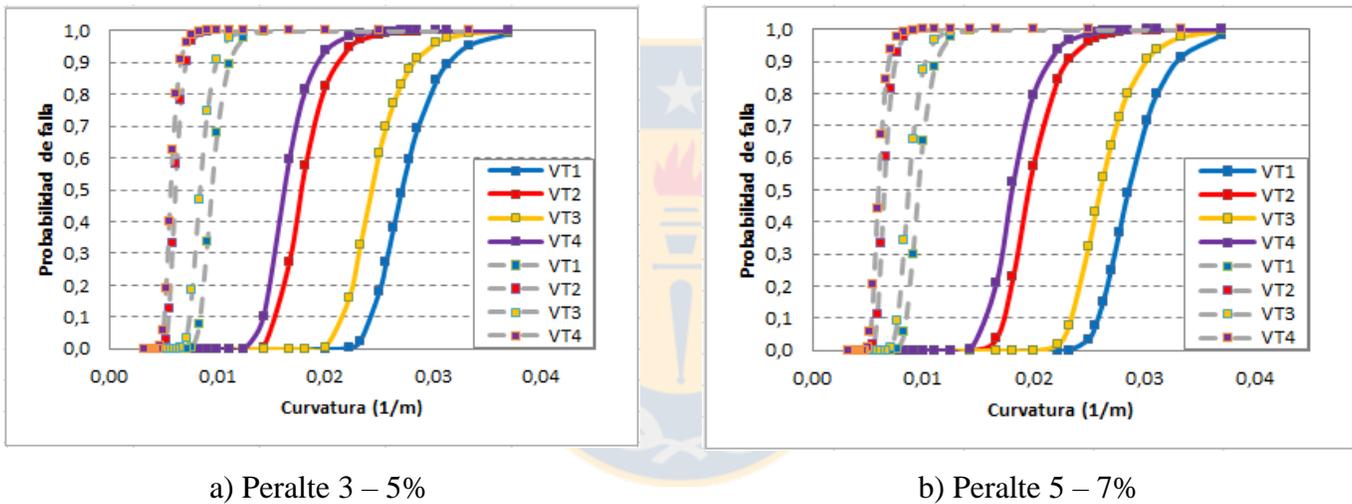


Figura 5.3 Probabilidad de *rollover* externo para cada tipo de vehículo

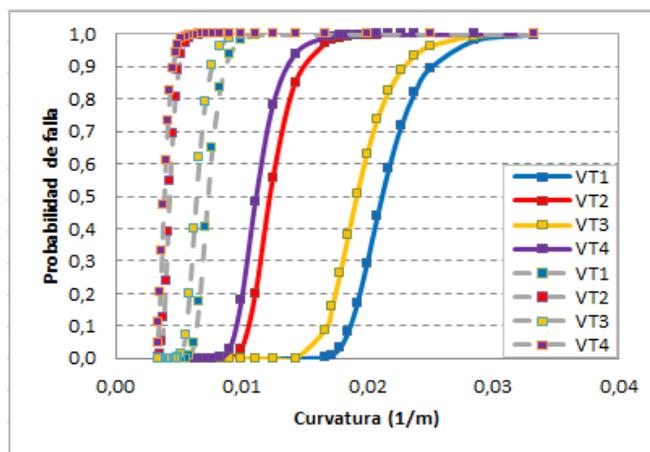


Figura 5.4 Probabilidad de *rollover* interno para cada tipo de vehículo

Para las comparaciones se utilizó una probabilidad de falla de 0.5 y velocidades de operación de 60 y 100 km/h. Para *rollover* externo, los resultados obtenidos en la Figura 5.3, utilizando los modelos generados, fueron comparados con los resultados obtenidos en la Figura 4.3, obtenidos por medio de simulaciones. De igual forma, para el *rollover* interno, los resultados obtenidos en la Figura 5.4 fueron comparados con los obtenidos en la Figura 4.4.

Para el caso del *rollover* externo, cuando el peralte varía entre 3 y 5%, se observó en la Figura 5.3a que la probabilidad de falla de 0.5 se alcanzó en las situaciones presentadas en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Comparación resultados modelados y simulados para *rollover* externo y peralte 3 – 5%

Velocidad de Operación (km/h)	Radio (m)							
	Vehículo T1		Vehículo T2		Vehículo T3		Vehículo T4	
	Modelado	Simulado	Modelado	Simulado	Modelado	Simulado	Modelado	Simulado
60	37	41	56	65	41	45	62	70
100	105	114	163	172	119	125	176	186

Aquí se observa que cuando el peralte es bajo, la probabilidad de falla de 50% siempre se alcanzó en radios menores cuando se utilizaron los modelos generados analíticamente, obteniéndose diferencias, con respecto a los radios obtenidos mediante simulaciones, de hasta 9 y 10 m en velocidades de 60 y 100 km/h, respectivamente.

Para *rollover* externo, pero esta vez considerando un peralte entre 5 y 7%, se observó en la Figura 5.3b que la probabilidad de falla de 0.5 se alcanzó en las situaciones presentadas en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8 Comparación resultados modelados y simulados para *rollover* externo y peralte 5 – 7%

Velocidad de Operación (km/h)	Radio (m)							
	Vehículo T1		Vehículo T2		Vehículo T3		Vehículo T4	
	Modelado	Simulado	Modelado	Simulado	Modelado	Simulado	Modelado	Simulado
60	35	38	51	59	38	43	56	64
100	104	107	154	157	115	117	168	170

Aquí, al igual que cuando el peralte es bajo, se observa que la probabilidad de falla de 50% se alcanzó en radios menores cuando se utilizaron los modelos obtenidos en forma analítica, con

diferencias, respecto a los radios obtenidos mediante simulaciones, de hasta 9 y 3 m para velocidades de 60 y 100 km/h, respectivamente.

A continuación, se analizó la situación para el caso de *rollover* hacia el interior de la curva. Luego, para cada tipo de vehículo, se observó que la probabilidad de falla de 0.5 se alcanzó en las situaciones presentadas en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Comparación resultados modelados y simulados para *rollover* interno

Velocidad de Operación (km/h)	Radio (m)							
	Vehículo T1		Vehículo T2		Vehículo T3		Vehículo T4	
	Modelado	Simulado	Modelado	Simulado	Modelado	Simulado	Modelado	Simulado
60	47	53	82	84	52	58	90	94
100	136	145	233	235	155	161	260	260

Para velocidades de 60 y 100 km/h la respuesta de los modelos generados analíticamente presentó radios levemente más pequeños que los obtenidos mediante simulaciones, esta vez con diferencias de hasta 6 m en velocidades de 60 km/h y de hasta 9 m en velocidades de 100 km/h.

En términos generales, los modelos obtenidos analíticamente siempre alcanzaron una probabilidad de falla de 50% en radios muy próximos a los alcanzados por los datos obtenidos mediante simulaciones, presentándose diferencias que van entre 3 a 10 m para el *rollover* externo y entre 6 a 9 m para el *rollover* interno.

5.6 Ejemplos de aplicación de curvas de fragilidad

A continuación, se presentan ejemplos de aplicación de las curvas de fragilidad asociados al cálculo de radios mínimos para diversos valores de probabilidad de falla y al cálculo de límites de velocidad para una probabilidad de falla fija. Para ello, se utilizaron las curvas de fragilidad presentadas en las Figuras 5.3 y 5.4, las cuales fueron creadas utilizando los modelos analíticos obtenidos en las Tablas 5.5 y 5.6.

5.6.1 Cálculo de radios mínimos

Usando los modelos analíticos obtenidos en las Tablas 5.5 y 5.6, se estimó los radios mínimos de curvatura cuando los vehículos circulan a una velocidad de operación de 60 y 100 km/h y los valores de la probabilidad de falla son 0.3, 0.5 y 0.7.

a) Cálculo de radios mínimos para velocidad de operación de 60 km/h

En la Tabla 5.10 se entregan los resultados obtenidos para los modelos generados al exterior de la curva, mientras que en la Tabla 5.11 se entregan los resultados obtenidos para los modelos generados al interior de la curva.

Tabla 5.10 Radios mínimos para $V = 60$ km/h y *rollover* al exterior de la curva

Valores de P_{falla}	Peralte 3 – 5%				Radio mínimo MOP (2016) (m)
	Radio de curvatura mínimo (m)				
	Vehículo T1	Vehículo T2	Vehículo T3	Vehículo T4	
0.3	39	60	43	65	120
0.5	37	56	41	62	
0.7	35	53	39	58	
	Peralte 5 – 7%				
0.3	37	54	40	58	
0.5	35	51	38	55	
0.7	33	48	36	52	

De la Tabla 5.10 se observa lo siguiente:

- Para cada tipo de vehículo, en forma individual, se observan mayores radios mínimos cuando el peralte es bajo en comparación a cuando el peralte es alto.
- Ante una variación del 40% en la probabilidad de falla, se observa una variación en los radios mínimos de 4 – 13 m cuando el peralte es bajo y de 4 – 6 m cuando el peralte es alto.

Es decir, para $V = 60$ km/h y los cuatro tipos de vehículo, la probabilidad de ocurrencia de *rollover* externo es sensible a pequeños cambios en el radio de la curva.

- Los vehículos con altura de centro de gravedad elevada, vehículos T2 y T4, presentan radios mínimos superiores al de los vehículos con altura de centro de gravedad media, vehículos T1 y T3, del orden de los 12 – 19 m.

Tabla 5.11 Radios mínimos para $V = 60$ km/h y *rollover* al interior de la curva

Valores de P_{falla}	Radio de curvatura mínimo (m)				Radio mínimo MOP (2016) (m)
	Vehículo T1	Vehículo T2	Vehículo T3	Vehículo T4	
0.3	50	87	55	96	120
0.5	47	82	52	90	
0.7	44	76	49	83	

De la Tabla 5.11 se observa lo siguiente:

- Ante una variación del 40% en la probabilidad de falla, se observa una variación en los radios mínimos de 6 – 13 m. Es decir, para $V = 60$ km/h y los cuatro tipos de vehículo, la probabilidad de ocurrencia de *rollover* interno es sensible a pequeños cambios en el radio de la curva.
- Los vehículos con altura de centro de gravedad elevada, vehículos T2 y T4, presentan radios mínimos superiores al de los vehículos con altura de centro de gravedad media, vehículos T1 y T3, del orden de los 27 – 46 m.
- A mayor valor de probabilidad de falla, menores son los radios mínimos de curvatura obtenidos.

En términos generales, para una velocidad de operación de 60 km/h, el radio mínimo de curvatura se encuentra condicionado al comportamiento del vehículo T4, es decir, del vehículo que presenta trocha angosta y elevado centro de gravedad.

Luego, al comparar los radios mínimos obtenidos con los modelos generados, para $V = 60$ km/h, y los entregados por las recomendaciones de diseño del Manual de Carreteras de Chile (MOP, 2016), se observó lo siguiente:

- Los radios mínimos entregados por el MOP (2016) están asociados a vehículos livianos, en cambio, los obtenidos por modelos analíticos se encuentran asociados a vehículos pesados.
- Al momento del diseño de curvas horizontales, los radios mínimos que se deben satisfacer corresponden a los entregados por el MOP (2016). Luego, para una velocidad de 60 km/h se observó que el radio mínimo entregado por el Manual es de 120 m, mientras que para la misma velocidad, el radio mínimo más crítico entregado por los modelos es de 96 m, para *rollover* interno de un vehículo T4. Así, se concluyó que para velocidades de 60 km/h el radio mínimo entregado por el MOP (2016) corresponde a un valor lo suficientemente grande de manera que en los vehículos pesados no ocurra *rollover*.

b) Cálculo de radios mínimos para velocidad de operación de 100 km/h

En la Tabla 5.12 se entregan los resultados obtenidos para los modelos generados al exterior de la curva, mientras que en la Tabla 5.13 se entregan los resultados obtenidos para los modelos generados al interior de la curva.

Tabla 5.12 Radios mínimos para $V = 100$ km/h y *rollover* al exterior de la curva

Valores de P_{falla}	Peralte 3 – 5%				Radio mínimo MOP (2016) (m)
	Radio de curvatura mínimo (m)				
	Vehículo T1	Vehículo T2	Vehículo T3	Vehículo T4	
0.3	111	171	125	185	425
0.5	105	163	119	176	
0.7	99	155	112	166	
	Peralte 5 – 7%				
0.3	110	161	121	176	
0.5	104	154	115	168	
0.7	98	146	108	159	

De la Tabla 5.12 se observa lo siguiente:

- Para cada tipo de vehículo, en forma individual, se observan mayores valores de radios mínimos cuando el peralte es bajo en comparación a cuando el peralte es alto.
- Ante una variación del 40% en la probabilidad de falla, se observa una variación en los radios mínimos de 12 – 19 m cuando el peralte es bajo y de 12 – 17 m cuando el peralte es alto. Es decir, para $V = 100$ km/h y los cuatro tipos de vehículo, la probabilidad de ocurrencia de *rollover* externo es sensible a pequeños cambios en el radio de la curva.
- Los vehículos con altura de centro de gravedad elevada, vehículos T2 y T4, presentan radios mínimos superiores al de los vehículos con altura de centro de gravedad media, vehículos T1 y T3, del orden de los 50 – 70 m.

Tabla 5.13 Radios mínimos para $V = 100$ km/h y *rollover* al interior de la curva

Valores de P_{falla}	Radio de curvatura mínimo (m)				Radio Mínimo MOP (2016) (m)
	Vehículo T1	Vehículo T2	Vehículo T3	Vehículo T4	
0.3	144	246	165	272	425
0.5	136	233	155	260	
0.7	128	220	145	243	

De la Tabla 5.13 se observa lo siguiente:

- Ante una variación en la probabilidad de falla del 40%, existe una variación en los radios mínimos de 16 – 29 m. Es decir, para $V = 100$ km/h y los cuatro tipos de vehículo, la probabilidad de ocurrencia de *rollover* interno es sensible a pequeños cambios en el radio de la curva.
- Los vehículos con altura de centro de gravedad elevada, vehículos T2 y T4, presentan radios mínimos superiores al de los vehículos con altura de centro de gravedad media, vehículos T1 y T3, del orden de los 75 – 115 m.
- A mayor probabilidad de falla, menores son los valores de los radios mínimos de curvatura.

En términos generales, para una velocidad de operación de 100 km/h, y al igual que para 60 km/h, el radio mínimo de curvatura se encontró condicionado al comportamiento del vehículo T4, es decir, del vehículo que presenta trocha angosta y elevado centro de gravedad.

Finalmente, al comparar los radios mínimos obtenidos con los modelos generados y los entregados por el MOP (2016), se observó lo siguiente:

- Los radios mínimos entregados por el MOP (2016) se encuentran asociados a vehículos livianos. En cambio, los obtenidos por los modelos analíticos se encuentran asociados a vehículos pesados.

- Al momento del diseño de curvas horizontales, los radios mínimos que se deben satisfacer corresponden a los entregados por el MOP (2016). Luego, para una velocidad de 100 km/h se observó que el radio mínimo entregado por el Manual es de 425 m, mientras que para la misma velocidad, el radio mínimo más crítico entregado por los modelos es de 272 m, para *rollover* interno de un vehículo T4. Así, se concluyó que para velocidades de 100 km/h el radio mínimo entregado por el MOP (2016) corresponde a un valor lo suficientemente grande de manera que en los vehículos pesados no ocurra *rollover*.

5.6.2 Cálculo de límites de velocidad

Utilizando los modelos analíticos obtenidos en las Tablas 5.5 y 5.6 y fijando una probabilidad de falla de 0.5, se estimaron límites de velocidad de operación para diversos radios de curvatura, utilizando radios que van desde 50 m, con pasos de 30 m, hasta valores donde todos los tipos de vehículos alcancen límites de velocidad de 100 km/h. Esto último, debido a que para velocidades superiores a 100 – 110 km/h los modelos generados para los distintos tipos de vehículos pierden su capacidad predictiva. En la Tabla 5.14 se presentan los resultados obtenidos para los modelos de *rollover* hacia el exterior de la curva, mientras que en la Tabla 5.15 se presentan los resultados obtenidos para los modelo de *rollover* hacia el interior de la curva.

Tabla 5.14 Límite de velocidad para probabilidad de falla de 0.5 al exterior de la curva

Radio (m)	Peralte 3 - 5%			
	Límite de velocidad (km/h)			
	Vehículo T1	Vehículo T2	Vehículo T3	Vehículo T4
50	67	58	64	57
80	82	68	78	66
110	105	79	94	75
140	-	90	-	86
170	-	103	-	98

Radio (m)	Peralte 5 - 7%			
	Límite de velocidad (km/h)			
	Vehículo T1	Vehículo T2	Vehículo T3	Vehículo T4
50	68	60	66	58
80	83	70	81	68
110	106	82	97	78
140	-	94	-	89
170	-	107	-	101

De la Tabla 5.14 se observa lo siguiente:

- En vehículos con altura de centro de gravedad media se observa que aquellos con trocha angosta (Vehículo T3) presentan límites de velocidad inferiores en relación a los de trocha ancha (Vehículo T1), en ambas clases de peralte y para un mismo radio, diferencia que se hace mayor al aumentar el radio considerado. Por otro lado, para ambos vehículos en forma individual, se observa que los límites de velocidad a la entrada de la curva son menores cuando estas tienen un peralte entre 3 y 5% en relación a cuando tienen un peralte entre 5 y 7%, para un mismo radio, no observándose una tendencia en la diferencia al aumentar el radio considerado.
- Para los vehículos recién mencionados, los límites de velocidad de 100 km/h se deben conservar para radios superiores a 105 m, para vehículos T1, y para radios superiores a 120 m, para vehículos T3, ambos casos para las dos clases de peralte consideradas.
- En vehículos con altura de centro de gravedad elevada se observa, al igual que en los de altura media, que los vehículos con trocha angosta (Vehículos T4) presentan límites de velocidad inferiores en relación a los de trocha ancha (Vehículos T2), en ambas clases de peralte y para un mismo radio, y nuevamente la diferencia se hace mayor al aumentar el radio considerado. Por otro lado, para ambos vehículos en forma individual, una vez más los límites de velocidad a la entrada de la curva son menores cuando estas tienen un peralte

entre 3 y 5% en relación a cuando tienen un peralte entre 5 y 7%, para un mismo radio, observándose esta vez que mayor es la diferencia al aumentar el radio considerado.

- Para los vehículos recién mencionados, los límites de velocidad de 100 km/h se deben conservar para radios superiores a 160 m, para vehículos T2, y para radios superiores a 170 m, para vehículos T4, ambos casos para las dos clases de peralte consideradas.

Al momento de definir límites de velocidad, éstos se encontraron condicionados por el comportamiento de los vehículos más críticos, es decir, aquellos con altura de centro de gravedad elevado y trocha angosta (Vehículos T4), por lo que sus valores son aquellos que deben de ser utilizados.

Tabla 5.15 Límite de velocidad para probabilidad de falla de 0.5 al interior de la curva

Radio (m)	Límite de velocidad (km/h)			
	Vehículo T1	Vehículo T2	Vehículo T3	Vehículo T4
50	61	50	59	49
80	73	59	69	57
110	86	68	80	65
140	103	76	92	73
170	-	84	109	80
200	-	92	-	87
230	-	99	-	94
260	-	106	-	100

De la Tabla 5.15, independiente del peralte de la curva, se observa lo siguiente:

- En vehículos con altura de centro de gravedad media se observa, al igual que en la Tabla 5.14, que aquellos con trocha angosta (Vehículo T3) presentan límites de velocidad inferiores en relación a los de trocha ancha (Vehículo T1), para un mismo radio, diferencia que se hace mayor al aumentar el radio considerado. Por otro lado, los límites de velocidad

de 100 km/h se deben conservar para radios superiores a 135 m, para vehículos T1, y para radios superiores a 160 m, para vehículos T3.

- En vehículos con altura de centro de gravedad elevada se observa, al igual que en los de altura media, que los vehículos con trocha angosta (Vehículos T4) presentan límites de velocidad inferiores en relación a los de trocha ancha (Vehículos T2), para un mismo radio, y nuevamente la diferencia se hace mayor al aumentar el radio considerado. Por otro lado, los límites de velocidad de 100 km/h se deben conservar para radios superiores a 240 m, para vehículos T2, y para radios superiores a 260 m, para vehículos T4.

De la Tabla 5.15, y al igual que en la Tabla 5.14, las restricciones geométricas para los límites de velocidad se encontraron condicionadas por el comportamiento del vehículo más crítico, que nuevamente fue aquel que presenta altura de centro de gravedad elevado y trocha angosta (vehículo T4), por lo que sus valores son aquellos que deben de ser utilizados.

A partir de los límites de velocidad obtenidos, tanto para el *rollover* externo como interno, se observó que los límites más estrictos se presentaron hacia el interior de la curva, en específico, para el vehículo T4, por lo que se concluye que dichos valores, presentes en la Tabla 5.15, representan los límites de velocidad a la entrada de la curva en las geometrías analizadas.

5.7 Conclusiones

Se parametrizaron sólo los modelos G1 y G4 (modelos de *rollover* al exterior e interior de la curva, respectivamente). Esto debido a que los modelos G2 y G3 presentaban prácticamente la misma respuesta que los modelos G4 y G1, respectivamente, por lo que su parametrización hubiese sido redundante.

La función que presentó el mejor ajuste sobre los datos simulados fue el Crecimiento de Gompertz, la cual corresponde a una función sigmoideal compuesta por tres parámetros.

A velocidad constante, en el modelo de *rollover* hacia el exterior de la curva (G1), el parámetro \emptyset_2 de la función del Crecimiento de Gompertz presentó un comportamiento sensible ante variaciones en el tipo de peralte, lo que hizo necesario crear expresiones de probabilidad de falla para cada clase de peralte, a diferencia del parámetro \emptyset_3 , el cual resultó insensible al cambio.

A velocidad constante, en el modelo de *rollover* hacia el interior de la curva (G4), tanto el parámetro \emptyset_2 como el parámetro \emptyset_3 de la función del Crecimiento de Gompertz no presentaron ninguna sensibilidad ante variaciones en el tipo de peralte, por lo que se pudieron crear expresiones de probabilidad de falla únicas, y no por tipo de peralte, para cada tipo de vehículo.

El peralte no resultó ser una variable significativa en los modelos de probabilidad de falla para el *rollover* hacia el interior de la curva (G4), en ningún tipo de vehículo, a diferencia de los modelos de probabilidad de falla para el *rollover* hacia el exterior de la curva (G1), donde el peralte sí adquirió significancia.

En términos generales, los modelos obtenidos analíticamente siempre alcanzaron la probabilidad de falla de 0.5 en radios muy próximos a los alcanzados por los datos obtenidos mediante simulaciones, presentándose diferencias entre 3 a 10 m para el *rollover* externo y entre 6 a 9 m para el *rollover* interno. Esto implica que los modelos generados analíticamente fueron capaces de explicar de buena manera a los datos obtenidos mediante simulaciones.

Los límites de velocidad y radios mínimos más críticos se obtuvieron a partir del comportamiento del *rollover* interno de los vehículos T4. Esto se debe a que la probabilidad de falla del *rollover* interno siempre resultó mayor que la probabilidad de falla del *rollover* externo. Por otro lado, los vehículos T4, al ser de trocha angosta y centro de gravedad elevado, presentan mayor inestabilidad al momento de circular por curvas horizontales, por lo que requieren de radios mínimos más elevados y límites de velocidad más restringidos en relación al resto de los vehículos.

Se concluyó que para velocidades de 60 y 100 km/h los radios mínimos entregados por el Volumen 3 del Manual de Carreteras corresponden a valores lo suficientemente grandes de manera que en los vehículos pesados no ocurra *rollover*.

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

Esta tesis tuvo por objetivo proponer curvas de fragilidad para evaluar el riesgo de *rollover* durante el diseño geométrico de curvas horizontales. Utilizando la técnica de calibración analítica FORM se obtuvieron valores de probabilidad de *rollover* para diversos vehículos tipo, velocidades de operación y radios de curvatura. Con estos valores se construyeron ecuaciones analíticas que utilizan como dato de entrada el radio de curvatura y la velocidad de operación a partir de las cuales se puede estimar la probabilidad de *rollover* de cada vehículo tipo.

Las principales conclusiones obtenidas de la presente investigación fueron las siguientes:

El trabajo genera un aporte en lo que respecta a la modelación de la estimación del potencial de *rollover* de los vehículos pesados, la que hasta ahora se realizaba utilizando umbrales de aceleración lateral. Aquí, se presentó que con análisis de confiabilidad es posible modelar el fenómeno considerando la aleatoriedad de las variables que lo describen, permitiendo dicha variabilidad considerar a una flota de vehículos. Es importante destacar que en el estado del arte no se encontraron estudios que utilizaran este enfoque para analizar el fenómeno.

El presente estudio también contribuye en lo que al diseño geométrico se refiere, puesto que al usar un análisis de confiabilidad los resultados obtenidos se pueden extrapolar al diseño geométrico, esto debido a que se pueden caracterizar distintos tipos de vehículos, se pueden considerar tantas geometrías como las normas de diseño lo permitan y se puede considerar la variabilidad de la velocidad de operación de una población de conductores en dichas geometrías. Esto con los métodos tradicionales de estimación de potencial de *rollover* no se podía hacer, ya que consideraban un vehículo individual en una geometría en particular.

En base a los resultados obtenidos, al nivel de ajuste de los modelos generados y de la significancia estadística de sus variables, se verificó la hipótesis de que la probabilidad que un vehículo pesado experimente *rollover* mientras circula por una curva horizontal varía dependiendo de la geometría del vehículo, de la velocidad de operación a la entrada de la curva, de su radio y además para el caso de *rollover* externo, de su peralte.

En la simulación de los modelos de ocurrencia de *rollover* existen variables como las alturas de centro de gravedad y de balanceo, además del radio, que se pueden aleatorizar de otra manera, como variables con distribución triangular, de igual forma se espera que los resultados no sufran modificaciones significativas.

Para analizar los patrones de comportamiento de los modelos de *rollover* estudiados se utilizó como umbral una probabilidad de falla de 0.5, esto porque al hacer una sensibilidad considerando probabilidades de falla de 0.3, 0.5 y 0.7 se observó que la probabilidad de ocurrencia de *rollover* no generaba grandes variaciones entre las probabilidades de 0.3 y 0.7, por lo que se decidió establecer como umbral el término medio, es decir, la probabilidad de falla de 0.5.

Para cualquier radio de curvatura, a una misma velocidad e independientemente del tipo de vehículo, la probabilidad de experimentar *rollover* al interior de la curva resultó mayor que la probabilidad de experimentar *rollover* al exterior de la curva. Esto implica que los modelos de *rollover* interno son los que limitan el comportamiento de los vehículos pesados en curvas horizontales, en términos de *rollover*.

El peralte no resultó ser una variable significativa en los modelos de probabilidad de falla para el *rollover* hacia el interior de la curva, en ningún tipo de vehículo, a diferencia de los modelos de probabilidad de falla para el *rollover* hacia el exterior de la curva, donde el peralte sí adquirió significancia.

Radios de diseño inferiores a 260 m no son recomendables, toda vez que para un rango de velocidades de operación como el usado en este estudio, la mayor parte de los vehículos exhibían alguna probabilidad de ocurrencia de *rollover*.

Es importante destacar que esta tesis se centró en el estudio de vehículos pesados, en específico, de buses de dos pisos, buses urbanos y camiones de una unidad. En cuanto a características geométricas, se utilizaron sólo curvas horizontales con radios entre 50 - 350 m y peraltes entre 3 – 7%, por lo que los modelos no son capaces de capturar el fenómeno, por ejemplo, en los lazos y

ramales de un enlace. En cuanto a características operacionales, los modelos son válidos para velocidades de operación entre 40 y 100 km/h.

A partir del presente estudio se sugiere desarrollar las siguientes líneas de investigación:

- i. Estimar el potencial de *rollover* de vehículos pesados utilizando modelos dinámicos de estimación de *rollover*.
- ii. Ampliar el estudio a una mayor diversidad de vehículos, considerando los vehículos pesados articulados, de transporte de cargas móviles y los vehículos deportivos utilitarios (SUV). Para ello, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - En vehículos articulados, incorporar variables como la longitud del camión, el efecto del tipo de articulación (quinta rueda o dolly), la longitud de los semi remolque y la distancia entre los ejes del semi remolque.
 - En vehículos de transporte de carga, considerar como variable el efecto del movimiento de la carga que transporta, la cual irá haciendo variar la ubicación del centro de gravedad del vehículo en cada instante.
 - En SUV, analizar si sus trochas y alturas de centro de gravedad caen en alguno de los vehículos tipos considerados en este estudio, de manera que se puedan aplicar directamente las expresiones obtenidas.
- iii. Ampliar este estudio al caso de lazos y ramales de enlaces viales.
- iv. Calibrar los modelos generados con datos obtenidos directamente de terreno, por ejemplo, mediante el uso de sensores.

REFERENCIAS

Alberding, M.B. Tjønnås, J. y Johansen, T.A. (2014) Integration of vehicle yaw stabilization and rollover prevention through nonlinear hierarchical control allocation. **Vehicle System Dynamics**, **52(12)**. 1607 – 1621.

Albertsson, P. Falkmer, T. Kirk, A. Mayrhofer, E. y Bjornstig, U. (2006) Case study: 128 injured in rollover coach crashes in Sweden—Injury outcome, mechanisms and possible effects of seat belts. **Safety Science**, **44**. 87 – 109.

Blower, D. Woodroffe, J. Green, P. Matteson, A. y Shrank, M. (2005) Determination of events leading to sport utility vehicle rollover. **Transportation Research Record**, **1908**. 180 – 186.

Chen, F. y Chen, S. (2011) Reliability-based assessment of vehicle safety in adverse driving conditions. **Transportation Research Part C**, **19**. 156–168.

Conroy, C. Hoyt, D.B. Eastman, A.B. Erwin, S. Pacyna, S. Holbrook, T.L. Vaughan, T. Sise, M. Kennedy, F. y Velky, T. (2006) Rollover crashes: predicting serious injury based on occupant, vehicle, and crash characteristics. **Accident Analysis and Prevention**, **38(5)**. 835–842.

Dahir, B. y Hassan, Y. (2016) Reliability-based design of horizontal curves on two-lane rural highways. **Transportation Research Record**, **2588**. 22 – 31.

Dahmani, H. Chadli, M. Rabhi, A. y El Hajjaji, A. (2013) Vehicle dynamic estimation with road bank angle consideration for rollover detection: theoretical and experimental studies. **Vehicle System Dynamics**, **51(12)**. 1853 – 1871.

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.

Easa, S. (1994) Reliability based design of sight distance at railroad grade crossing. **Transportation Research Part A**, **28(1)**. 1 – 15.

Easa, S. (2000) Reliability approach to intersection sight distance design. **Transportation Research Record**, **1701**. 42 – 52.

Echaveguren, T. Bustos, M. y de Solminihac, H. (2005) Assessment of horizontal curves of an existing road using reliability concepts. **Canadian Journal of Civil Engineering**, **32(6)**. 1030–1038.

Echaveguren, T. y Vargas-Tejeda, S. (2013) Assessment the arrestor bed needs in downwards based on reliability principles. **Revista Ingeniería de Construcción**, **28(3)**. 113- 127.

El-Khoury, J. y Hobeika, A. (2007a) Incorporating uncertainty into the estimation of the passing sight distance requirements. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, **22**. 347–357.

El-Khoury, J. y Hobeika, A. (2007b) Assessing the risk in the design of passing sight distances. **Journal of Transportation Engineering**, **133(6)**. 370 – 377.

Essa, M. Sayed, T. y Hussein. M. (2016) Multi-mode reliability-based design of horizontal curves. **Accident Analysis and Prevention**, **93**. 124–134.

Farmer, C.M. y Lund, A.K. (2002) Rollover risk of cars and light trucks after accounting for driver and environmental factors. **Accident Analysis and Prevention**, **34**. 163 – 173.

Gillespie, T. (1992) **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Primera edición. Society of Automotive Engineers, Warrendale. Estados Unidos.

García, L. Wilson, F. y Innes, D. (2003) Heavy truck dynamic rollover effect of load distribution, cargo type, and road design characteristics. **Transportation Research Record**, **1851**. 25 – 31.

Hac, A. (2002) Rollover stability index including effects of suspension design. **SAE Technical Paper, 2002-01-0965**.

Haldar, A. y Mahadevan, S. (2000) **Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design**. Primera edición. Wiley. Nueva York.

Hasofer, A.M. y Lind. N.C. (1974) An exact and invariant first order reliability format. **Journal of Engineering Mechanical, 100**. 111 – 121.

Himes, S. y Donnell, E. (2014) Reliability Approach to Horizontal Curve Design. **Transportation Research Record, 2436**. 51 – 59.

Hosseinpour, M. Yahaya, A.S. Sadullah, A.F. Ismail N. y Ghadiri, S.M.R. (2016) Evaluating the effects of road geometry, environment, and traffic volume on rollover crashes. **Transport, 31(2)**. 221 – 232.

Huang H-H., Yedavalli, R.K. y Guenther, D.A. (2012) Active roll control for rollover prevention of heavy articulated vehicles with multiple-rollover-index minimization. **Vehicle System Dynamics, 50(3)**. 471 – 493.

Hussein, M. Sayed, T. Ismail, K. y Van Espen, A. (2014) Calibrating road design guides using risk-based reliability analysis. **Journal of Transportation Engineering, 140(9)**. 04014041-1.

Ibrahim, S. Sayed, T. y Ismail, K. (2012) Methodology for safety optimization of highway cross-sections for horizontal curves with restricted sight distance. **Accident Analysis and Prevention, 49**. 476 – 485.

Imine, H. y Dolcemascolo, V. (2007) Rollover risk prediction of heavy vehicle in interaction with infrastructure. **Int. J. Heavy Vehicle Systems, 14(3)**. 294 - 307.

Ismail, K. y Sayed, T. (2009) Risk-based framework for accommodating uncertainty in highway geometric design. **Canadian Journal of Civil Engineering**, **36**. 743 – 753.

Ismail, K. y Sayed, T. (2010) Risk-based highway design. Case studies from British Columbia, Canada. **Transportation Research Record**, **2195**. 3 – 13.

Ismail, K. y Sayed, T. (2012) Risk-optimal highway design: Methodology and case studies. **Safety Science**, **50**. 1513 – 1521.

Jalayer, M. y Zhou, H. (2016) Evaluating the safety risk of roadside features for rural two-lane roads using reliability analysis. **Accident Analysis and Prevention**, **93**. 101 – 112.

Keall, M. y Newstead, S. (2009) Induced exposure estimates of rollover risk for different types of passenger vehicles. **Traffic Injury Prevention**, **10(1)**. 30 – 36.

Krull, K.A. Khattak, A.J. y Council F.M. (2000) Injury effects of rollovers and events sequence in single vehicle crashes. **Transportation Research Record**, **1717**. 46 – 54.

Kühn, W. (2013) **Fundamentals of Road Design**. Primera edición. WIT Press. Southampton.

Lewis, E.E. (1987) **Introduction to Reliability Engineering**. Primera edición. Wiley. Nueva York.

Mandell S.M. Kaufman, R. Mack, C.D. y Bulger, E.M. (2010) Mortality and injury patterns associated with roof crush in rollover crashes. **Accident Analysis and Prevention**, **42**. 1326 – 1331.

Martínez, L., Aparicio, F., García, A., Páez, J. y Ferichola, G. (2003) Improving occupant safety in coach rollover. **International Journal of Crashworthiness**, **8(2)**. 121–132.

McKnight, A.J. y Bahouth, G.T. (2009) Analysis of large truck rollover crashes. **Traffic Injury Prevention**, **10(5)**. 421 – 426.

Minitab Inc. (2014) **Software para estadísticas de Minitab**. Versión 17 para Windows. State College. Pennsylvania.

MOP. (1994) **Instrucciones de Diseño. Vol. 3. Manual de Carreteras**. Ministerio de Obras Públicas. Chile.

MOP. (2016) **Instrucciones de Diseño. Vol. 3. Manual de Carreteras**. Ministerio de Obras Públicas. Chile.

Navin, F. (1990) Safety factors for road design: can they be estimated?. **Transportation Research Record, 1280**. 181 – 89.

Navin, F. (1992a) Reliability indices for road geometric Design. **Canadian Journal of Civil Engineering, 19**. 760 – 766.

Navin, F. (1992b) Estimating truck's critical cornering speed and factor of safety. **Journal of Transportation Engineering, 118(1)**. 130 – 145.

Rakheja, S. y Ranganathan, R. (1993) Estimation of the rollover threshold of heavy vehicles carrying liquid cargo: A Simplified Approach. **Heavy Vehicle Systems. International Journal of Vehicle Design, 1(1)**. 79 – 98.

Rey, G. Clair, D. Fogli, M. y Bernardin, F. (2011a) Probabilistic assessment of roadway departure risk in a curve. **Vehicle System. Dynamics, 49(10)**. 1649–1671.

Rey, G. Clair, D. Fogli, M. y Bernardin, F. (2011b) Reliability analysis of roadway departure risk using stochastic processes. **Mechanical Systems and Signal Processing, 25**. 1377–1392.

Rey, G. Clair, D. Fogli, M. y Bernardin, F. (2014) Infrastructure based approach for roadway departure risk assessment. **Transportation Research Part C, 48**. 109 – 119.

Richl, L. y Sayed, T., (2006) Evaluating the safety risk of narrow medians using reliability analysis. **Journal of Transportation Engineering**, **132 (5)**. 366–375.

Robertson, L.S. (1989) Risk of fatal rollover in utility vehicles relative to static stability. **American Journal of Public Health**, **79(3)**. 300 – 303.

Robertson L.S. y Kelley A.B. (1989) Static stability as a predictor of overturn in fatal motor vehicle crashes. **Journal of Trauma-Injury Infection and Critical Care**, **29(3)**. 313 – 319.

Rosenblatt, M. (1952) Remarks on a multivariate transformation. **The Annals of Mathematical Statistics**, **23(3)**. 470 – 472.

Saez, J. (2001) **Estudio de Consistencia en el Diseño de Vías Rurales**. Memoria de Título. Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Chile.

Sarhan, M. y Hassan, Y. (2008) Three-dimensional, probabilistic highway design sight distance application. **Transportation Research Record**, **2060**. 10 – 18.

Sarhan, M. y Hassan, Y. (2011) Reliability-based three-dimensional design of horizontal lateral clearance. **Canadian Journal of Civil Engineering**, **38(8)**. 900 – 908.

Schultz, M. Gouldby, B. Simm, J. y Wibowo, J. (2010) **Beyond the Factor of Safety: Developing Fragility Curves to Characterize System Reliability**. Water Resources Infrastructure Program. Report ERDC SR-10-1. USACE, Estados Unidos.

Sferco, R. Fay P. y Asic, S. (2003) **Comparison of US and European Rollover Data**. Report WP1 – Task 1.1, Ford Motor Company and Delphi, European Community – R&TD Project – 5th Framework-Programme “Growth” – Project “Rollover” G3RD-CT-2002-00802.

Shin, J. y Lee, I. (2014a) Reliability based vehicle safety assessment and design optimization of roadway radius and speed limit in windy environments. **Journal of Mechanical Design**, **136(8)**. 081006-1.

Shin, J. y Lee, I. (2014b) Reliability analysis and reliability based design optimization of roadway horizontal curves using a first order reliability method. **Engineering Optimization**, **47(5)**. 622 – 641.

Snæbjornsson, J.Th. Baker, C.J. y Sigbjornsson, R. (2007) Probabilistic assessment of road vehicle safety in windy environments. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, **95**. 1445–1462.

Swiss Federal Institute of Technology ETH (1997) **Variables Processor (VaP)**. Versión 1.6 para Windows. Institute of Structural Engineering. Zurich.

Wood, J. y Donnell, E. (2014) Stopping sight distance and horizontal sight line offsets at horizontal curves. **Transportation Research Record**, **2436**. 43 – 50.

You, K. Sun, L. y Gu, W. (2012) Reliability based risk analysis of roadway horizontal curves. **Journal of Transportation Engineering**, **138(8)**. 1071 – 1081.

You, K. y Sun, L. (2013) Reliability analysis of vehicle stability on combined horizontal and vertical alignments: Driving Safety Perspective. **Journal of Transportation Engineering**, **139(8)**. 804 – 814.