

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El incremento de los accidentes de tránsito y sus consecuencias, ha generado en los últimos tiempos una profunda preocupación en la sociedad. Si bien las tragedias que generalmente a diario ocurren en la ruta del país no son fenómenos nuevos, la magnitud de los hechos está logrando sensibilizar a la población que hoy reclama avances en la materia.

Según el Concejo Nacional de Seguridad Vial de los Estados Unidos un accidente es “un suceso inesperado, inevitable precedido de un acto inseguro o una combinación de actos y condiciones inseguras, que no necesariamente produce daño, y que interrumpe la terminación de alguna actividad”. Estos sucesos inesperados son debido a diversos factores tales como humano, vehículo y medio.

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 rollover no ocurre muy a menudo y representan una fracción reducida del total de accidentes. Sin embargo, el número de fatalidades y lesiones graves es mayor respecto a otros tipos de accidentes, particularmente cuando se ven involucrados buses. Por tanto, su análisis no puede dejarse de lado y así se contribuye a evitar fatalidades.

El rollover se define 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 se da principalmente por variables geométricas del trazado (radio y peralte de curva), operacionales (velocidad de punto) y por su geometría de vehículos (altura al centro de gravedad y ancho de trocha).

Para estimar el rollover existen modelos estáticos y dinámicos. 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.

Aplicando principios de confiabilidad es posible no solamente estimar la probabilidad de rollover, sino que además extender el cálculo hacia curvas de fragilidad que determinan, 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 FORM (First Order Reliability Method). 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 un método de estimación de potencial de rollover en base a modelos estáticos usando principios de la teoría de la confiabilidad para determinar la estimación analítica de la probabilidad de ocurrencia de rollover ante diversos escenarios de diseño geométrico, operación y tipo de vehículo pesado.

En primer lugar se describen los modelos estáticos de estimación de rollover para vehículos pesados, considerando vehículos rígidos y con suspensión, para posteriormente presentar el diseño experimental que permite aplicar el método FORM (First Order Reliability Method). Luego se explica el modelo matemático empleado, enfatizando el desarrollo de la función de estado límite requerida para estimar la probabilidad de falla.

Se utiliza la aplicación de un software de probabilidades llamado STATGRAPHICS el cual nos facilitara en el cálculo de probabilidades de rollover en curvas horizontales.

Con este trabajo se pretende resolver una de las causas de accidentes en carreteras que es el potencial de rollover en curvas horizontales y así evitar accidentes de rollover mediante la señalización respectiva en las curvas más críticas a sufrir el fenómeno del rollover, estas señalizaciones serán señales horizontales, tal que produzca la reducción de velocidad de los vehículos pesados y la pintura en el pavimento que indique la máxima velocidad, así como también de señales verticales que indiquen mediante letreros luminosos la presencia de los reductores de velocidad así como también la velocidad máxima a transitar por dichas curvas críticas y por lo cual se pretende tener vías de tránsito más seguras en nuestra región.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Debido a los accidentes de tránsito de vehículos pesados que ocurren en curvas horizontales en las rutas viales del Gran Chaco según el informe de la unidad operativa de tránsito de la región de Yacuiba, se pretende evaluar una de las causas de accidentes de tránsito que ocurren en la región, que es la estimación de rollover de vehículos pesados que transcurren en curvas horizontales.

Esto pretende determinar el potencial de rollover en las curvas horizontales existentes en dicho tramo mediante la teoría de confiabilidad para así tomar precauciones en las curvas de alta probabilidad de vuelco.

La aplicación de teoría de confiabilidad en el potencial de “rollover” pretende estimar la probabilidad del rollover de vehículos pesados en el cual inciden en el diseño de curvas horizontales.

La evaluación de probabilidad de rollover se la realizará para determinar las causas y factores que afectan al potencial de rollover de vehículos pesados en el tramo en estudio, y así se pretende la disminución de accidentes en curvas horizontales.

Este trabajo resolverá la seguridad vial, con la disminución de este tipo de accidente en curvas horizontales mediante la probabilidad de rollover de vehículos pesados identificando las curvas horizontales más propensas a existir rollover y proponiendo una advertencia de seguridad a las curvas de alta probabilidad de rollover.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. Situación problemática

El rollover es la desestabilización del centro de gravedad de un vehículo, el cual produce una fuerza volcante que separa del pavimento las ruedas del vehículo, acompañada de una pérdida brusca del control del vehículo tal que éste no pueda retomar el control, terminando generalmente en un accidente.

Las causas para que exista volteo de vehículos en curvas horizontales son múltiples pero para este estudio se evaluará el potencial de rollover de vehículos pesados.

En las normas de diseño de carreteras de curvas horizontales se toman factores de diseño como la velocidad de diseño y tipo de carreteras a ser diseñada pero no se toma como factor que influye el potencial de rollover de vehículos pesados.

El problema está en los vehículos que ingresan en curvas horizontales el cual el rollover afecta principalmente a los vehículos pesados que ingresan a las curvas a velocidades elevadas por lo cual se estima que es una de las causas para que ocurra accidente de rollover.

Se analizará los factores que producen rollover en curvas horizontales tales como la velocidad, radio de curvatura, peralte y geometría de vehículo pesado para así determinar las causas que producen rollover en curvas horizontales.

Una vez analizados esos factores se recurrirá a la teoría de la confiabilidad para así determinar la probabilidad de falla.

Identificadas las curvas horizontales con mayor probabilidad de potencial de rollover se planteará como alternativa el colocado de letreros de aviso al ingreso de dicha curva horizontal.

1.3.2. Problema

¿Qué incidencia se tiene mediante un análisis probabilístico de falla en el potencial de rollover de vehículos pesados para el diseño de elementos curvos en el tramo analizado?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Realizar evaluaciones de probabilidades de “rollover” de vehículos pesados en las curvas horizontales en el tramo vial de la ruta Campo Pajoso – Caraparí, utilizando la teoría de la confiabilidad.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el fenómeno del rollover y las variables que lo explican para la ocurrencia de este fenómeno.
- Evaluar una de las causas de accidentes de tránsito de vehículos pesados en curvas horizontales mediante el estudio de la probabilidad de ocurrencia de rollover.
- Elaborar curvas de fragilidad a partir de estimación de la probabilidad de ocurrencia de rollover mediante la simulación de las funciones de estado límite desarrolladas, aplicando el software de probabilidades STATGRAPHICS.
- Aplicar la teoría de confiabilidad de primer orden FORM (First Order Reliability Method), mediante el índice de confiabilidad de Hasofer Lind y así determinar la probabilidad de ocurrencia de rollover.
- Determinar la máxima probabilidad de falla en las curvas horizontales a estudio y a si identificar las curvas más propensas a sufrir el fenómeno de rollover estático.
- Identificar el radio de curvatura mínimo en curva horizontal a considerar en el diseño de carreteras, considerando vehículos pesados como estudio.
- Determinar las velocidades límite de vehículos pesados antes de sufrir el fenómeno de rollover estático.
- Aplicar los modelos de rollover estático descritos por W. Kühn y Thomas D.Gillespie al diseño de carreteras.
- Aplicar una propuesta de acción, en función a la probabilidad de falla máxima obtenida.

1.5. HIPÓTESIS

El estudio de evaluación de potencial de rollover de vehículos pesados ayudará en una parte a reducir una de las causas de accidentes en curvas horizontales en nuestra región dependiendo de la geometría del vehículo, velocidad y geometría de curvas horizontales (radio y su peralte), aplicando la teoría de confiabilidad mediante la probabilidad de falla.

1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

1.6.1. Variables independientes

Diseño geométrico de carreteras.

1.6.2. Variables dependientes

Rollover.

1.6.3. Conceptualización y operacionalización de variables

En la tabla 1.1 se muestra la variable independiente con sus respectivas conceptualizaciones y su operacionalización (dimensión, indicador y valor de acción)

Tabla 1.1. Conceptualización y operacionalización de variables

Variables	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor acción
Var. independiente				
Diseño geométrico de carreteras	Es una técnica de ingeniería civil que consiste en situar el trazado y diseño de carreteras	Manual de diseño de carreteras	Manual	ABC
Var. Dependiente				
Rollover	Se refiere a la desestabilización del centro de gravedad de un vehículo el cual produce desestabilización del vehículo.	Fenómeno	%	Modelos de W. Kühn y Thomas D.Gillespie utilizando la teoría de confiabilidad

Fuente: Elaboración propia

1.7. DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1. Componentes

1.7.1.1. Unidad de estudio

El comportamiento de vehículos en tramos curvos en carretera.

1.7.1.2. Población

Comportamiento de vehículos pesados en tramos curvos del departamento de Tarija.

1.7.1.3. Muestra

Comportamiento de tramos curvos en el sub tramo Campo Pajoso- Caraparí

1.7.1.4. Muestreo

Para el cálculo de tamaño de muestra se utilizó un nivel de confianza del 90% y un error de 10%.

Donde:

Nivel de Confianza =90%

n= Tamaño de la Muestra.

z= Valor del nivel de confianza

Z=1,65

e_{error p.}= 10%

N. Confianza	Coficiente de confianza (Z)
99%	2.58
98%	2.33
97%	2.17
96%	2.05
95%	1.96
90%	1.65
80%	1.28
50%	0.67

Debido a que los datos son números reales se refieren a las variables cuantitativas de orden continuo y no se conoce la población se usó la ecuación de cálculo de muestra de estimación de promedios para población infinita.

Tabla 1.2. Ecuaciones para determinar el tamaño de muestra

N (población)	Estimación de proporción	Estimación de promedio
Infinito (Desconocido)	$n = \frac{Z^2 * p * q}{e^2}$	$n = \frac{Z^2 * \sigma^2}{e^2}$
Finito (conocido)	$n = \frac{N^2 * Z^2 * p * q}{(n - 1)e^2 + Z^2 * p * q}$	$n = \frac{N^2 * Z^2 * \sigma^2}{(n - 1)e^2 + Z^2 * p * q}$

Fuente: Tamaño de muestra Vicente Manzano Arrondo – 2009-2013

$$n = \frac{Z^2 * \sigma^2}{e^2}$$

Donde:

n= Tamaño de la muestra

σ^2 = Varianza

1.8. MÉTODOS Y TÉCNICA EMPLEADAS

1.8.1. Selección de métodos y técnicas

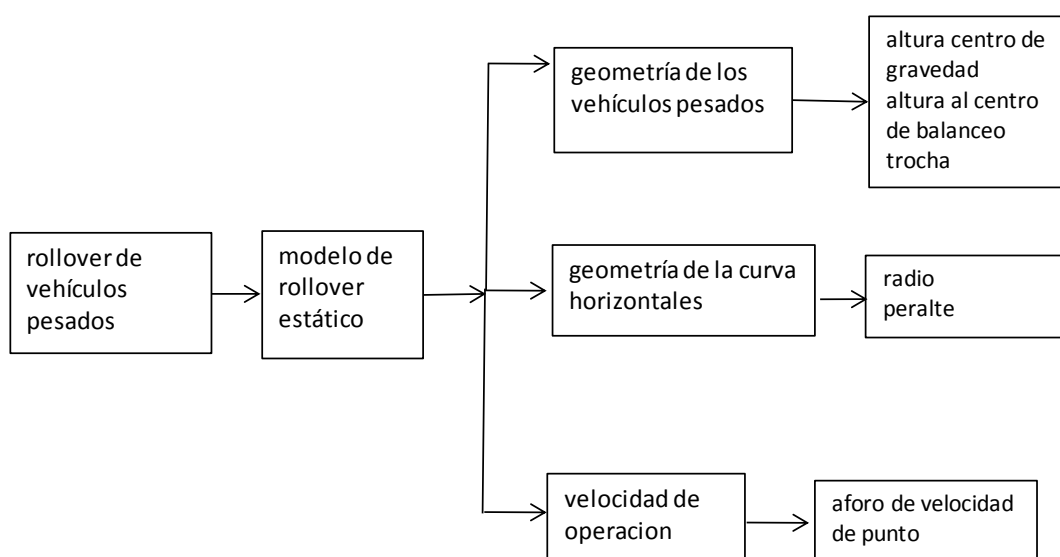
El Método inductivo.- Se emplea como instrumento de trabajo, es un procedimiento en el que, comenzando por los datos, se acaba llegando a la teoría. Por tanto, se asciende de lo particular a lo general.

Debido a los registros de accidentes de tránsito en la zona, todos los vehículos presentan una probabilidad de falla de sufrir accidente, debido a diversas causas. Para ello aplicando el método inductivo, se evaluará la probabilidad de falla de que presenta los vehículos, mediante un análisis de confiabilidad.

Método Deductivo.- Es un tipo de razonamiento que nos lleva de lo general a lo particular de lo complejo a lo simple.

Se evaluará una de las causas de accidentes que presenta la zona en estudio debido a los accidentes de tránsito que se presentan en dicha zona.

Por lo tanto evaluando la causa de accidente por rollover en curvas horizontales, sabremos una de las causas de accidentes de tránsito en la zona.



Entre las técnicas empleadas éstas:

Aforo.- Se realizará aforos de velocidad en la zona a estudio de tipo manual para así determinar la velocidad con la que circulan los vehículos.

Mediciones.- En cuanto a la medición se medirán las distancias de aforo mediante una huincha de lona.

Analítica.- Se analizará los datos geométrico de elementos curvos y vehículos pesados en función a la velocidad de circulación, para así determinar la probabilidad de falla que presentan mediante un análisis de confiabilidad.

1.8.2. Técnicas de muestreo

1.8.2.1. Probabilísticas Aleatorio simple

Debido a que todos los datos tienen la misma probabilidad de ser muestreadas se utiliza la técnica de muestreo aleatorio simple sin reposición el cual se hizo uso de esta técnica con la facilitación de la calculadora de números aleatorios sin reposición la cual está disponible en la web (<http://www.alazar.info/generador-de-numeros-aleatorios-sin-repeticion>), este tipo de técnica de muestreo se aplica a los aforos de velocidades de punto para los vehículos pesados que circulan en las curvas horizontales para lo cual se analizó en cada curva, 25 metros de longitud de aforo.

1.8.2.2. No probabilística

El muestreo no probabilístico se aplica a la selección de vehículo a estudio pues se analizó sólo los vehículos pesados de suspensión de resorte y suspensión de aire de geometría específica en cada curva horizontal a estudio y se efectuó el análisis de rollover estático en las curvas horizontales pavimentadas y no así las no pavimentadas.

En la selección de las curvas horizontales a analizar se analizó curva a criterio de las 19 curvas se evaluó 15 curvas horizontales del tramo Campo Pajoso-Ojo de Agua.

1.8.3. Descripción de los instrumentos para la obtención de datos

Para el aforo de velocidades de punto

Cronómetro.- Es un cronómetro que se utiliza para la medición de tiempo en los puntos de aforos de velocidad de punto.

Huinchita lona.- Es un equipo que es utilizado para medir las longitudes de 25 metros en cada curva horizontal para el respectivo cronometrado.

Planilla de aforo.- Es una hoja trabajada para la recolección de datos de los aforos en cada curva horizontal.

Pintura en aerosol.- Utilizada para el marcado de la distancia medida y proveer visión al momento del cronometrado de tiempo.

Para obtención de datos geométricos de curvas

Se obtuvo planos del tramo a ser estudiado y así obtener los datos geométricos de las curvas horizontales, tales como peralte y radio de curvatura.

Para obtención de datos geométricos de los vehículos pesados

Se procedió a identificar los tipos de vehículos pesados a ser estudiados y medir sus respectivas trochas y mediante la ARRB (Junta de Investigación Vial de Australia, por sus siglas en inglés), se procedió a obtención de las propiedades de la suspensión de vehículos el cual comprende el centro de gravedad y centro de balanceo.

1.8.4. Procedimiento de aplicación

A. Identificación de curvas horizontales

Se procede a visitar el tramo para realizar la inspección previa de las curvas a estudiar y ubicar los puntos de aforo de las curvas horizontales existentes.

Una vez se hizo la inspección de la zona en estudio se procede a la marca de ubicación correcta de ubicación para la realización del aforo.

El tramo en estudio campo fue sólo del pavimento rígido debido a que todo el tramo carretero no se encuentra pavimentada y por ende se evaluó el tramo pavimentado de la carretera a caraparí, específicamente se evaluó el tramo Campo Pajoso - Ojo de Agua que es el tramo de la subida del aguaragüe.

B. Características geométricas de curvas

Para la obtención de datos geométricos de cada curva a estudiar se procedió a obtener los datos de radio de curvatura y peralte de los planos obtenidos.

C. Clasificación y características geométricas de vehículo pesados

Antes de realizar los aforos se clasifiqué los vehículos pesados, que para el estudio se clasificó según lo indicado en la ABC los cuales son: En camiones grandes, camión semirremolque, camión remolque y buses grandes, una vez clasificado los vehículos pesados se procede a la medición geométrica de todos los vehículos a estudio los cuales son, trocha, altura al centro de gravedad, altura al centro de balanceo.

D. Aforo de velocidad de vehículos en curvas horizontales

Una vez obtenida los datos anteriores se precede al aforo de velocidades. Se procedió primeramente a la medición de 25 metros con la Huincha y lo posteriormente se hizo señalizados de la distancias con pintura en aerosol en cada curva para realizar los aforos.

La ubicación de los puntos de aforo fue en lugares discretos para no alertar a los conductores y obtener datos reales de velocidades de operación, el aforo consistió en el cronometrado de tiempo de los 25 metros medidos y anotados en la planilla de aforos.

Los aforos se realizaron todo el día en cada curva horizontal durante una semana según la normativa de tráfico.

E. Análisis de datos

Una vez obtenidos los datos necesarios se procederán a la evaluación de datos y ordenado para la aplicación de la teoría de la confiabilidad utilizando el método de primer orden FORM y así obtener la probabilidad de falla en cada curva estudiada.

F. Análisis de resultado y conclusiones

Aplicado la teoría de la confiabilidad se procederá al análisis de los resultados e interpretación de las curvas de fragilidad e identificar las probabilidades de falla en las curvas estudiadas y su influencia en el diseño de carreteras.

1.8.5. Preparación previa para la aplicación de instrumentos, requisitos y condiciones para la aplicación

La preparación previa a la aplicación de la obtención de datos será:

Visita a la unidad de tránsito de la región para así obtener datos de accidentes ocurridos en la zona a ser estudiado.

Generación de planillas de aforo según el tipo de vehículo pesado para el llenado de los tiempos cronometrados, peralte radio de curvatura y distancia de aforo en cada curva y también se realizó un pequeño desmonte del punto a realizar el aforo para una mejor comodidad y visión.

1.9. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Una vez obtenido todos los datos mediante el aforo manual se procederá al análisis de los datos mediante la aplicación de la teoría de la confiabilidad utilizando el método de primer orden FORM para así determinar e interpretar la probabilidad de falla por rollover en las curvas horizontales que son de estudio.

Para la aplicación de la teoría de confiabilidad y determinar probabilidad de falla por rollover en las curvas horizontales se hará uso del método de primer orden FORM utilizando el índice de confiabilidad de Hasofer-Lind, con los coeficientes de seguridad global de cada modelo al estado límite se graficarán las curvas de fragilidad mediante uso del software.

El análisis e interpretación de los resultados será realizada para cada curva de fragilidad en función a la probabilidad de fallas obtenidas de los tipos de vehículos pesados estudiados, en las curvas horizontales de estudio.

En función al estado límite se determinará la velocidad límite que presentan antes de sufrir el fenómeno de rollover, esto se obtendrá mediante un proceso iterativo al estado límite.

1.10. ALCANCE DEL ESTUDIO

La evaluación de probabilidad de rollover estuvo enfocada únicamente a vehículos pesados, pues son las que se encuentran más propensas a sufrir rollover.

Los vehículos pesados en estudio son los vehículos con suspensión con aire y con resorte.

La presente investigación estuvo enfocada a vehículos pesados que circulan en carreteras de pavimento rígido existentes en el tramo en estudio.

Se realizará la aplicación del modelo de rollover tipo estático para la presente evaluación.

Se realizará aforos tipo manual de observación de los vehículos pesados en las curvas horizontales evaluadas.

Se evaluará distintas variables para evaluar la probabilidad de rollover mediante aforos de los tipos de vehículos pesados que transcurren a distintas velocidades y distintos tipos de peraltes, radio de curvatura existente en las curvas horizontales el tramo Yacuiba (Campo Pajoso – Ojo de agua).

El análisis de confiabilidad será evaluada mediante el método de primer orden FORM que en inglés (First Order Reliability Method), para así determinar la probabilidad de falla que ocurren en las diferentes curvas de estudio.

En conclusión se tendrá que incluir los vehículos pesados en el diseño de curvas horizontales, como también estimar límites de velocidad de curvatura y radios mínimos de curvatura puesto que no se considera el rollover en vehículos pesados en el diseño geométrico de curvas horizontales. También se puede aplicar a la seguridad vial en las curvas analizadas.

CAPÍTULO II
ASPECTOS GENERALES QUE ENGLOBAN
EL ESTUDIO DEL ROLLOVER

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES QUE ENGLOBAN EL ESTUDIO DEL ROLLOVER

2.1. ANTECEDENTES SOBRE EL PAVIMENTO

2.1.1 Definición de pavimento

El pavimento es el conjunto de capas de materiales seleccionados que reciben en forma directa las cargas de tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente.

2.1.2. Función de un pavimento

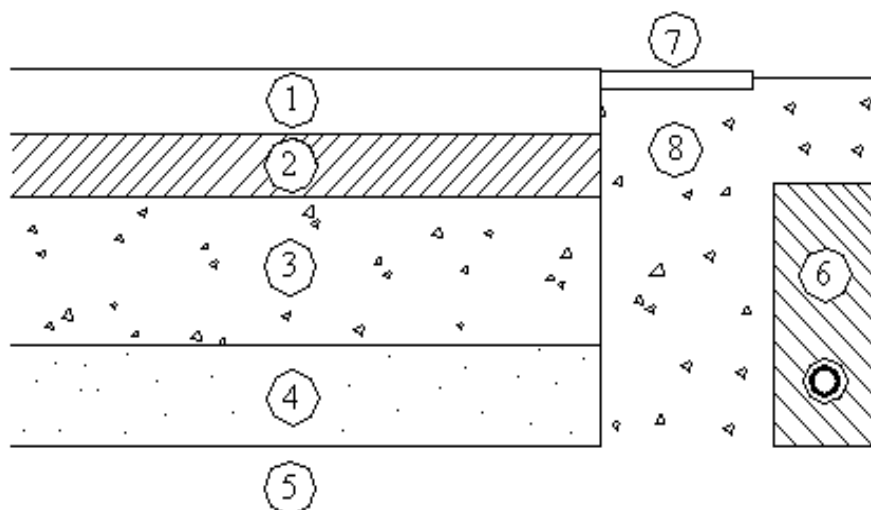
Un pavimento de una estructura, asentado sobre una fundación apropiada, tiene por finalidad proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confortable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática. Hay una gran diversidad de tipos de pavimento, dependiendo del tipo de vehículos que transitarán y del volumen de tráfico.

En un camino no pavimentado, las condiciones de funcionamiento son precarias, lo que genera limitaciones en las velocidades y las cargas de los vehículos, también se elevan los costos operacionales (mantenimiento y combustible). En un camino con revestimiento primario (cascajo o un suelo pedregoso arenoso), las condiciones climáticas pueden ser menos importantes pero si un drenaje eficaz.

2.1.3. Componentes de un pavimento

En la figura 2.1 se muestra esquemáticamente, los componentes principales de un pavimento asfáltico. Se puede considerar que la estructura de un pavimento está formada por una superestructura encima de una fundación, esta última debe ser el resultado de un estudio geotécnico adecuado. En los pavimentos camineros, la superestructura está constituida por la capa de revestimiento y la capa base, la fundación está formada por las capas de sub-base y suelo compactado. A continuación se observa la sección típica de un pavimento en la figura 2.1.

Figura 2.1. Sección típica de un pavimento.



Fuente: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Ingeniería de Pavimentos, Brasil, 2000

- | | |
|---------------------|-------------------------------|
| 1. Capa de Rodadura | 5. Sub rasante |
| 2. Capa Base | 6. Sub-drenaje longitudinal |
| 3. Capa Sub-base | 7. Revestimiento de Hombreras |
| 4. Suelo Compactado | 8. Sub-base de Hombreras |

La capa de rodadura o revestimiento asfáltico tiene las siguientes funciones:

Impermeabilizar el pavimento, para que las capas subyacentes puedan mantener su capacidad de soporte.

Proveer una superficie resistente al deslizamiento, incluso en una pista húmeda.

Reducir las tensiones verticales que la carga por eje ejerce sobre la capa base, para poder controlar la acumulación de deformaciones plásticas en dicha capa.

La capa base tiene las siguientes funciones:

Reducir las tensiones verticales que las cargas por eje ejercen sobre las capas sub-base y suelo natural.

Reducir las deformaciones de tracción que las cargas por eje ejercen a la capa de revestimiento asfáltico.

Permitir el drenaje del agua que se infiltra en el pavimento, a través de drenajes laterales longitudinales.

La capa sub-base está constituida por un material de capacidad de soporte superior a la del suelo compactado y se utiliza para permitir la reducción del espesor de la capa base.

La capa de suelo reforzado, puede estar presente en una estructura de pavimento, para poder reducir el espesor de la capa sub-base.

El suelo compactado, es el mismo suelo del terraplén, que está escarificado y compactado una cierta profundidad dependiendo de su naturaleza o de las especificaciones del proyecto.

2.1.4. Tipos de pavimento

Los tipos de pavimento son los siguientes:

Pavimentos flexibles

Pavimentos rígidos

Pavimento semirrígido

2.1.4.1. Pavimento flexible

Son aquéllos que tienen un revestimiento asfáltico sobre una capa base granular. La distribución de tensiones y deformaciones generadas en la estructura por las cargas de rueda del tráfico, se da de tal forma que las capas de revestimiento y base absorben las tensiones verticales de compresión del suelo de fundación por medio de la absorción de tensiones cizallantes.

2.1.4.2. Pavimento rígido

Son aquellos en los que la losa de concreto de cemento Portland (C.C.P.) es el principal componente estructural, que alivia las tensiones en las capas subyacentes por medio de su elevada resistencia a la flexión, cuando se generan tensiones y deformaciones de

tracción de bajo la losa producen su figuración por fatiga, después de un cierto número de repeticiones de carga.

2.1.4.3. Pavimento semirrígidos

En términos amplios, un pavimento semirrígido o compuesto es aquel en el que se combinan tipos de pavimentos diferentes, es decir, pavimentos “flexibles” y pavimentos “rígidos”, normalmente la capa rígida está por debajo y la capa flexible por encima. Es usual que un pavimento compuesto comprenda una capa de base de concreto o tratada con cemento Portland junto con una superficie de rodadura de concreto asfáltico.

La estabilidad de suelos por medio de ligante hidráulicos (cemento Portland) permite que se obtengan materiales con capacidad de soporte suficiente para construir capas para base en pavimentos sujetos a cargas pesadas como ser camiones o aeronaves.

2.2. EL VEHÍCULO

2.2.1. Generalidades

En ciertos países, la incorporación de mayor cantidad de vehículos no sólo ha mejorado el transporte, ya que también ha elevado el nivel económico general del país, por lo que se puede afirmar que la relación de habitantes por vehículo es un indicador para apreciar el progreso de un determinado territorio.

Por lo tanto, es indispensable que cada país mejore las condiciones del transporte para su progreso y de esta manera poder transportar los bienes de consumo desde las fuentes de producción hasta los mercados y de allí comercializarlo a la población. Actualmente, es inevitable que aumente el número de vehículos cada año, lo que es deseable y conveniente, logrando así reducir más la actual relación de habitantes por vehículo.

Por lo tanto, el segundo elemento componente del tránsito, el vehículo, irremediablemente va en aumento.

Siendo el vehículo uno de los factores primordiales del tráfico, se hace necesario estudiarlo con todo detalle.

2.2.2. Clasificación y características del vehículo de proyecto

Los vehículo de proyecto es aquel tipo de vehículo hipotético, cuyo peso, dimensiones y características de operación son utilizados para establecer los lineamientos que guiaran el proyecto geométrico de las carreteras, calles e intersecciones, tal que éstas puedan acomodar vehículos de este tipo.

Los vehículos se clasifican en 2:

Vehículos ligeros o livianos

Vehículos pesados (Camiones y autobuses)

2.2.2.1. Vehículo ligero de proyecto

Los vehículos ligeros de proyecto pueden ser utilizados en:

Intersecciones menores en zonas residenciales donde el número de vehículos que realizan vueltas no es significativo.

Intersecciones mayores que dispongan de carriles de estacionamiento y cruces peatonales demarcados, que obliguen el uso de radios pequeños en las esquinas aún aceptables.

Áreas urbanas con intersecciones a nivel sobre calles arteriales, siempre que se disponga de carriles de cambio de velocidad y que las vueltas de camiones sea ocasional.

2.2.2.2. Vehículo pesado de proyecto

Los vehículos pesados de proyecto pueden ser utilizados en:












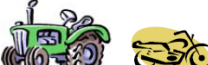
Terminales de pasajeros y de cargas.

Autopistas y arterias rápidas, siempre y cuando sea grande el número de movimientos de vueltas.

Los vehículos pesados y livianos tienen una clasificación vehicular según la administradora boliviana de caminos ABC, por tipo de ejes mostradas en la tabla 2.2.

2.2.3. Clasificación vehicular por tipo de ejes según la Administradora Boliviana de Carreteras ABC

Figura 2.2. Clasificación vehicular por tipo de ejes

Código	Tipo de Vehículos	Figura
1	Automóviles y Vagonetas	
2	Camionetas (hasta 2 Tn.)	
3	Minibuses (hasta 15 pasajeros)	
MB	Microbuses (hasta 21 pasajeros; de 2 ejes)	
B2	Buses Medianos (hasta 35 pasajeros; de 2 ejes)	
B3	Buses Grandes (más de 35 pasajeros; de 3 ejes)	
C2m	Camiones Medianos (de 2,5 a 10,0 t; de 2 ejes)	
C2	Camiones Grandes (más de 10,0 t; de 2 ejes)	
C3	Camiones Grandes (más de 10,0 t; de 3 ejes)	
CSR	Camiones Semiremolque	
CR	Camiones Remolque	
12	Otros Vehículos	

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras (ABC)

2.2.4 Altura al centro de gravedad de vehículos

El centro de gravedad es el punto, que puede considerarse, en que actúa el peso total de un objeto (Física clásica y moderna, Getts Keller y Skove, editorial Mc. Graw Hill).

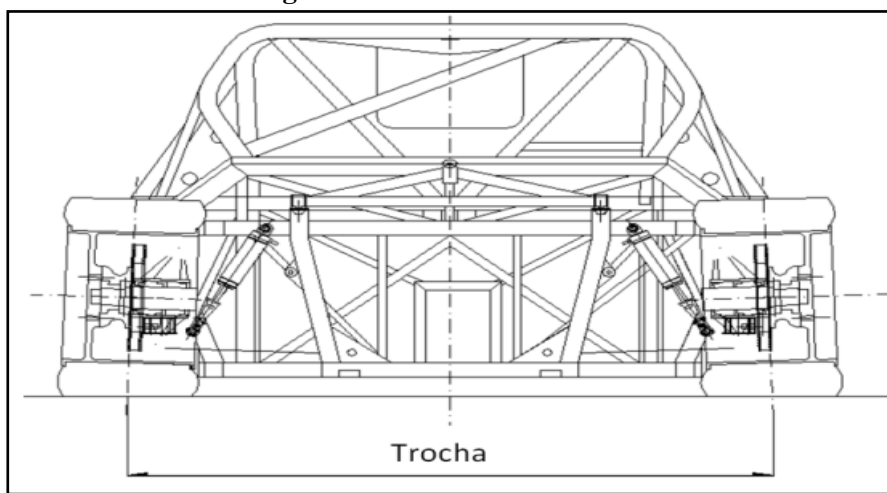
Este punto es atraído con más fuerza hacia el centro de la tierra que el resto del auto. La zona ideal donde un auto puede llevar este punto de gravedad es exactamente en medio de las cuatro llantas del auto y lo más pegado al suelo posible (de esta manera el auto será atraído al centro de la tierra de forma equilibrada y tendrá mayor estabilidad).

2.2.5 Trocha de vehículos

La trocha es la distancia entre los puntos de contactos del plano medio de las ruedas de un mismo eje (DONADIO, Gustavo. Seminario de automovilismo de competición. 2005. pp.25)

Una trocha ancha permite que las trasferencias de masas en curvas sean inferiores y dota al vehículo de mayor estabilidad, sin embargo aumenta la superficie aerodinámica de este, aumenta su inercia en el eje z (vertical) a la vez que disminuye su maniobrabilidad por trazados estrechos.

Figura 2.3.: Trocha de vehículo

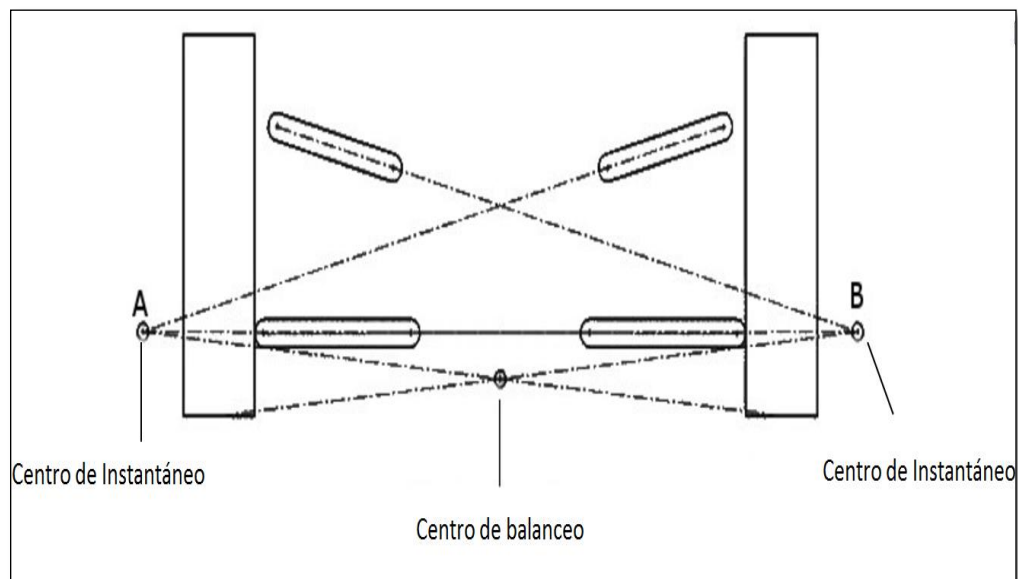


Fuente: Escuela superior politécnica de Chimborazo facultad de mecánica escuela de ingeniería automotriz

2.2.6. Altura al centro de balanceo

El centro de balanceo es el punto sobre el que pivota un vehículo cuando está sometido a fuerzas laterales.

Figura 2.4. Centro de balanceo



Fuente: MotoIQ more signal, less noise “the ultimate guide to suspension and handling: It’s all in the geometry- part one, the roll center”

Para determinar el centro de balanceo, antes será necesario encontrar los centros instantáneos. El centro instantáneo es el punto alrededor del cual rotan los brazos de suspensión, para calcular dichos puntos es sencillo como trazar líneas que pasen por las rótulas de los brazos de suspensión y buscar su intersección (A y B en la figura 2.4).

Una vez conseguido el centro instantáneo, debemos trazar una línea que una este con el centro de la superficie de contacto del neumático, la intersección de la línea correspondiente a cada uno de los lados, determinará el centro de balanceo.

La diferencia entre la posición del centro de gravedad y el centro de balanceo origina un brazo de palanca. Este brazo es sobre quien se actúa la fuerza centrífuga para hacer inclinar el coche en torno al centro de balanceo. Cuanto mayor sea la distancia entre el centro de gravedad y el centro de balanceo, mayor será la tendencia del coche a inclinarse, haciendo que tenga una respuesta más lenta a los movimientos del volante.

2.3. VELOCIDADES DE TRÁFICO

2.3.1. Definición de velocidad en general

En general, el termino velocidad se define como las relación entre el espacio recorrido y el tiempo que se tarda en recorrerlo. Es decir, para un vehículo representa su relación de movimiento, generalmente expresada en kilómetros por hora km/h (ingeniería de tránsito Cal y Mayor & James Cárdenas G.).

Para el caso de una velocidad constante, esta se define como una función lineal de la distancia y el tiempo, expresado por la fórmula:

$$v = \frac{d}{t}$$

Donde:

v= Velocidad constante (km/hr)

d= Distancia recorrida (km)

t= Tiempo de recorrido (hr)

En este mismo concepto existen diferentes tipos de velocidad entre los cuales las más importantes son:

Velocidad de punto

Velocidad de recorrido total

Velocidad de crucero

Velocidad directriz o de diseño

Para el presente proyecto se enfocó con más al estudio de la velocidad de punto o instantánea puesto que esta se adecua al estudio del tema de proyecto.

2.3.2. Velocidad de punto

Es la velocidad de un vehículo a su paso por un determinado punto de una carretera o de una calle. Como dicha velocidad se toma en el preciso instante del paso del vehículo por el punto, también se le denomina velocidad instantánea.

La velocidad de punto no se la puede considerar como una velocidad de diseño ni en carreteras ni en calles, pero es una velocidad cuya referencia nos da las velocidades máximas posibles que se puedan presentar tanto en calles como en carreteras.

El estudio de la velocidad de punto da la información relativa a la velocidad que prevalece en determinado lugar y la distribución de las velocidades por grupos de usuarios.

Generalmente la velocidad de punto es utilizada para establecer restricciones de velocidad, indicar la velocidad de seguridad en las curvas y para ayudar en los estudios que relacionan a los accidentes con la velocidad.

Al ser una velocidad que se considere en flujo libre eso no sería posible en espacios o distancias largas por ello que para su estudio se definen espacios o distancias pequeñas, en el caso de ciudades vías urbanas los espacios serán de 25 o 50 metros y en el caso de carreteras los espacios serán de 75 o 100 metros siempre y cuando no hayan accesos de entrada y salida.

2.3.3. Velocidad de proyecto

Llamada también velocidad de diseño, es la velocidad máxima a la cual pueden circular los vehículos con seguridad sobre una sección específica de una vía, cuando las condiciones atmosféricas y del tránsito son tan favorables que las características del proyecto gobiernan la circulación. Todo aquellos elementos geométricos del alineamiento horizontal, vertical y transversal, tales como radios mínimos, pendientes máximas, distancias de visibilidad, sobre elevaciones, ancho de carril y acotamiento, etc., dependen de la velocidad de proyecto y varían con un cambio de ésta.

La selección de velocidad de proyecto depende de la importancia o categoría de la futura vía, de los volúmenes de tránsito que va a mover, de la configuración topográfica de la región, del uso del suelo y de la disponibilidad de recursos económicos. Es conveniente mantener constante la velocidad de proyecto, pero dada las limitaciones topográficas que se pueden presentar, la velocidad de proyecto puede variar en distintos tramos de la vía.

2.3.4. Estudio de la velocidad de punto

Los estudios de velocidades de los vehículos de motor puede ser tratado en dos categorías generales: estudio de velocidad de punto y estudio de tiempos de recorrido. Los estudios de velocidad de punto tienen por objeto medir la distribución de velocidades de los vehículos en un tramo de camino de longitud relativamente corta. Los resultados se expresan normalmente como velocidades promedio.

La velocidad de punto determina el efecto o la intensidad de diversos dispositivos de control de tránsito, tales como señales preventivas, señales restrictivas de velocidad y zonificación de la velocidad, también determina la relación de la velocidad asociada a detalles de proyecto, accidentes, y otras características operacionales. En los estudios de velocidad de punto se registra la distribución de velocidades en una distancia corta, o sean las velocidades instantáneas. Los datos no deberán usarse como sustitutos de los estudios de tiempo de recorrido, los cuales normalmente tienen que ver con las velocidades promedio sobre tramos largos.

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N}$$

Donde:

\bar{x} = Velocidad promedio (Km/hr).

$\sum X$ = Suma de velocidades observadas (Km/hr).

N= Número de observaciones.

2.3.5. Radio de giro

Se define como radio de giro al radio de la circunferencia descrita por su rueda delantera exterior al girar a pequeña velocidad cuando su dirección ha sido girada totalmente.

Vueltas a baja velocidad (Velocidades ≤ 15 Km/hr):

El radio de las curvas es controlado por las huellas de giro mínimas de las velocidades, esta situación se presenta en intersecciones agudas.

Vueltas a alta velocidad (velocidades cercanas al 70% de la velocidad de proyecto):

El radio de las curvas es controlado por el peralte y fricción lateral entre llantas y la superficie de rodamiento, esta situación se presenta en las curvas a campo abierto y en las curvas de los enlaces en intersecciones importantes.

Razones por lo que un vehículo se sale de la curva.- Porque el peralte de la curva no es suficiente para contrarrestar la velocidad produciendo el derrape o deslizamiento del vehículo.

Por la presencia de hielo, arena, agua, aceite y otros elementos sobre el pavimento.

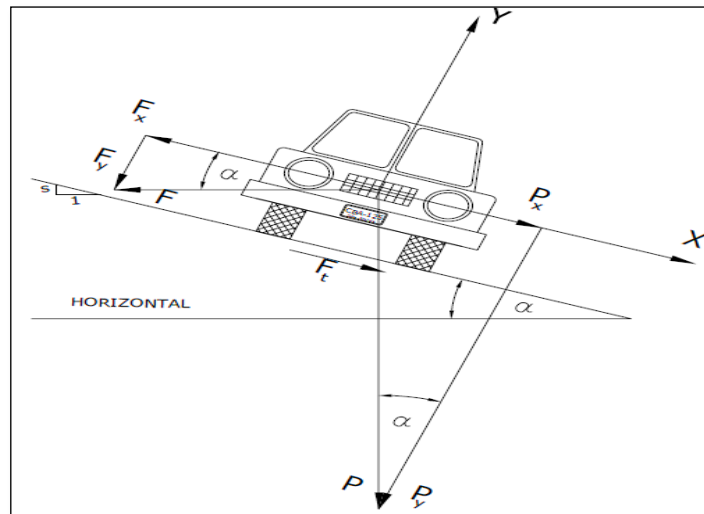
2.4. FUERZA CENTRÍFUGA

En la mecánica clásica o mecánica newtoniana, la fuerza centrífuga es una fuerza ficticia que aparece cuando se describe el movimiento de un cuerpo en un sistema de referencia en rotación, o equivalentemente la fuerza aparente que percibe un observador no inercial que se encuentra en un sistema de referencia rotatorio.

Es la fuerza que tiende a conservar el movimiento en línea recta si es que el vehículo cambia su trayectoria de movimiento rectilíneo a curvilíneo, es decir que tiende a desviar el vehículo hacia fuera de su trayectoria normal.

El efecto centrífugo se elimina con la sobre elevación o peralte, junto con el peso propio del vehículo y la fricción entre llantas y el pavimento, logrando la estabilidad del vehículo en la curva.

Figura 2.5. Estabilidad del vehículo en curva



Fuente: Ingeniería de Tránsito de Rafael Cal y Mayor R. & James Cárdenas G.

De las leyes de la dinámica, en movimiento uniforme, sabemos que la fuerza es igual a la masa del cuerpo multiplicada por la aceleración:

$$F = m * a$$

Donde:

F= Fuerza centrífuga (N)

m= Masa de vehículo (kg)

a= Aceleración radial (m/s^2)

Sabemos también que la masa de un cuerpo es igual al peso del mismo, dividido entre la aceleración de la gravedad, que equivale a $9.81 m/s^2$.

La aceleración en el movimiento circular es igual a " v^2/R ", en donde " v " es la velocidad y " R " el radio de la curva.

Por tanto, tenemos que la fuerza centrífuga vale:

$$F_c = \frac{P v^2}{g R}$$

Donde:

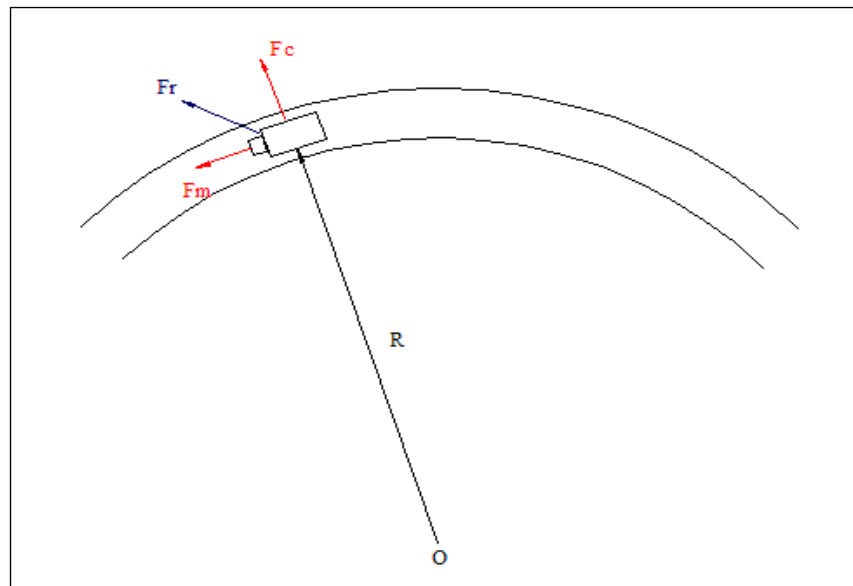
P= Peso del vehículo (N)

g= Aceleración debido a la gravedad (m/s²)

v= Velocidad del vehículo (m/s)

R= Radio de la curva circular (m)

Figura 2.6. Fuerza centrífuga



Fuente: Texto de trafico UMSS edición 2000

2.5. ACCIDENTALIDAD

2.5.1. Generalidades

Las 2 consecuencias principales del problema del tránsito lo constituyen los accidentes y el congestionamiento. De ellos, el primero es de orden vital y por eso de gran importancia, ya que significa grandes bajas entre la población, por el resultado de muertos y heridos, además de la pérdida económica.

Hoy en día los accidentes de tránsito en calles y carreteras, ocasionan en todo el mundo alrededor de 500000 muertos por año y 15 millones de personas lesionadas. A pesar de que es cierto que del 70% al 90% de estos accidentes de tránsito son debidos a errores humanos, no cabe duda que el mejoramiento del sistema vial y de los vehículos mismos reducirá la ocurrencia de tales errores. Nosotros como ingenieros de tránsito, debemos de alguna manera coadyuvar al logro de este objetivo, planeando, estudiando, proyectando, construyendo y administrando cada vez mejores sistemas viales, teniendo como lema la seguridad.

Uno de los estudios más importantes de la ingeniería de tránsito, es el de accidente. Las soluciones diversas aplicadas a través del correcto análisis del problema, puede rendir muy valiosos resultados, salvando muchas vidas y evitando un gran número de lesionados, que quizás quedarían lisiados para siempre, así como el ahorro de grandes pérdidas económicas.

2.5.2 Estudio de accidentes

Siguiendo los pasos lógicos en el estudio de este problema, se ha encontrado conveniente determinar tres importantes datos, a saber:

Causas aparente de los accidente

Falla operacional

Magnitud del problema

Será necesario encontrar o determinar ciertas relaciones que permitan conocer el cuadro completo en el aspecto de accidentes. Es necesario relacionar los accidentes con las causas aparentes y reales, los tipos de accidentes, la frecuencia, la ubicación, etc. Del uso correcto de los datos recopilados, o sea la estadística, se destacan los datos ya mencionados y que serán auxiliar insustituible en labor preventiva.

2.5.2.1. Causas aparentes y reales

El agente de tránsito es la persona con la responsabilidad oficial de rendir el informe de cada accidente de tránsito. En su informe está la base de la estadística vital del tránsito.

De acuerdo con el criterio de esta persona, los informes perfilan la “causa” de accidente. Solo podrá ser “causa aparente” hasta en tanto el análisis correspondiente dictamine la “causa real”.

Bastante importante en sí, será la información que se logre acumular de accidentes por: ubicación, frecuencia, saldos, conductores o empresas, etc.

Analizando debidamente las causas aparentes, con frecuencia se puede determinar las causas reales. Estas permitirán saber si la falla de la operación del tránsito dependió de la carretera o calle, del vehículo o del usuario.

Al determinar la causa real, será fácil fijar las medidas necesarias para contrarrestarlas, eliminando o disminuyendo el resultado negativo.

2.5.3. Causas de los accidentes

Del estudio de los informes de accidentes de tránsito, se puede empezar a apreciar los actos del conductor que contribuyen principalmente al hecho, por lo general considerado fortuito, llamado accidente. Usualmente se piensa en una causa y verdad es que muchas veces el accidente incluye una “cadena” de causas, o bien, una causa y una serie de circunstancias contribuyentes. Sin embargo, es usual referirse en general a la “causa aparente” del accidente. También, previo análisis, se llegará en algunos casos a la “causa real”. En muchas situaciones, ambas causas coincidirán.

Como consecuencia del desarrollo de la velocidad en los vehículos modernos y del no disponer, en muchos casos, de una infraestructura vial acorde con estos avances, la causa más frecuente de los accidentes de tránsito en el mundo entero es el exceso de velocidad. Debe entenderse que es “velocidad excesiva” para las condiciones imperantes, la cual en muchos casos puede no ser muy alta. En orden de importancia sigue las causas catalogadas como “invasión de circulación contraria”. Como su nombre lo indica, es el acto de invadir la sección de la calle o carretera donde los vehículos viajan en sentido opuesto. Casi invariablemente sigue la causa clasificada genéricamente como “imprudencia para manejar”. Esta causa engloba muchos actos del conductor, en general en contraposición con las “reglas del camino”.

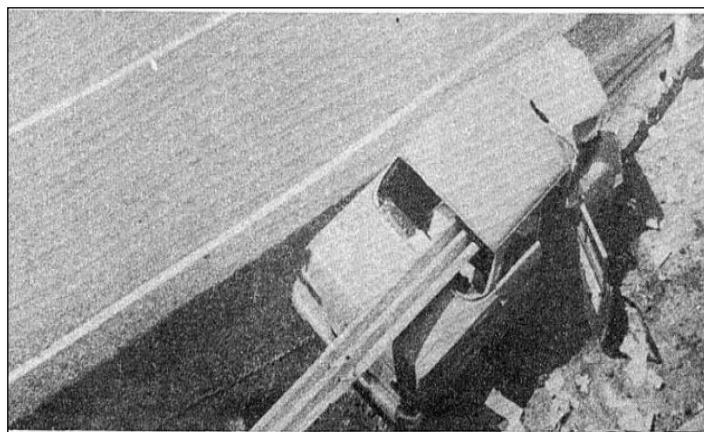
Figura 2.7 Accidente por exceso de velocidad.



Fuente: ingeniería de tránsito Cal y Mayor & James Cárdenas G. 7ª. Ed.

Muchas veces las causas se complican con una falla de camino, como la falta de empotramiento, en el suelo, del extremo de una defensa metálica, tal como se aprecia en la fotografía de la figura 2.8.

Figura 2.8. Causa del accidente por falla de camino



Fuente: ingeniería de tránsito Cal y Mayor & James Cárdenas G. 7ª. Ed.

2.6. SEGURIDAD VIAL

La Estrategia Nacional de Educación Vial en Bolivia define como Seguridad Vial a las acciones que pueden realizarse para asegurar la prevención de accidentes de tránsito y para evitar que produzcan lesiones o muerte a las personas y pérdidas económicas (Ministerio de Gobierno, Viceministerio de Seguridad Ciudadana, Policía Boliviana y OPS/OMS. Estrategia Nacional de Educación Vial, Bolivia 2011).

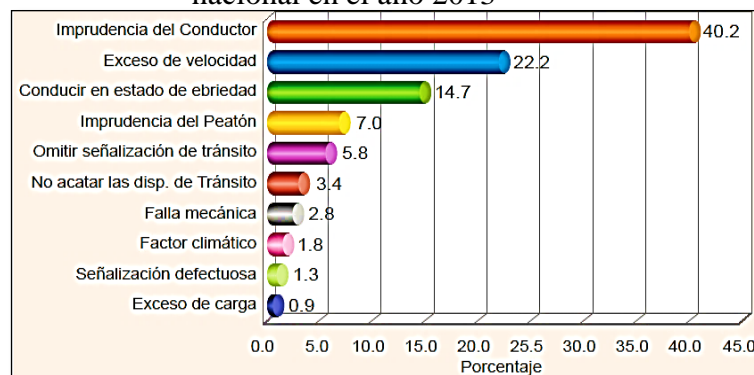
En el marco de esta definición y otras referidas sobre Seguridad Vial a nivel internacional, a fin de describir mejor de lo que se trata, se puede ampliar su significado de la siguiente manera:

“La seguridad vial es un derecho y bien común de toda la población, dirigida a lograr la correcta armonización del elemento humano, vehículo y vía. Esto implica la aplicación de un conjunto de acciones y mecanismos destinados a controlar los factores de riesgo relacionados con los accidentes de tránsito; así como, el conocimiento y cumplimiento de las leyes y reglamentos establecidos; a fin de prevenir posibles accidentes de tránsito o la severidad de los mismos.”(Viceministerio de Seguridad Ciudadana, 2013).

“Por Seguridad Vial se entiende como el conjunto de acciones y mecanismos que garantizan el buen funcionamiento de la circulación del tránsito, mediante la utilización de conocimientos (leyes, reglamento y disposiciones) y normas de conducta, bien sea como Peatón, Pasajero o Conductor, a fin de usar correctamente la vía pública previniendo los accidentes de tránsito. (Ley de Tránsito República Bolivariana de Venezuela).”

Para el año 2013 de igual manera dentro de las causas que ocasionan los accidentes de tránsito se evidencia que continua la misma tendencia en relación al quinquenio, donde en 1er lugar tenemos a la imprudencia del conductor, como 2do lugar tenemos al exceso de velocidad y como 3er lugar al estado de embriaguez.(Ver figura 2.9)

Figura 2.9. Relación porcentual de causas que ocasionaron accidentes de tránsito a nivel nacional en el año 2013



Fuente: Observatorio nacional de seguridad ciudadana con datos del comando general de la policía Boliviana.

2.7. VOLUMEN DE TRÁNSITO

Se define “Volumen de tránsito”, como el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados, de un carril o una calzada, durante un periodo determinado. Se expresa como:

$$Q = \frac{N}{T}$$

Donde:

Q= Vehículos que pasan por unidad de tiempo (vehículos/periodo)

N= Número total de vehículos que pasan (vehículos)

T= Periodo determinado (unidad de tiempo)

2.8. AFOROS

Una vez definidas las magnitudes y los fundamentos teóricos, se hace indispensable recabar información acerca de las características de la circulación de vehículos en las carreteras existentes. Para ello se emplean métodos de aforos que serán más o menos precisos dependiendo del grado de exactitud que pretenda obtenerse.

Los aforos realizados en un punto o sección de una vía nos permiten obtener datos relacionados con el movimiento de automóviles respecto al tiempo y espacio, las características de los aforos dependen del tipo de análisis solicitado en una vía.

Las características que son objeto de un estudio de aforo son:

Intensidad de circulación

Velocidades y tiempos de recorrido de los vehículos

Origen, destino y objeto de los viajes realizados

Accidentes de circulación

Para el presente proyecto se efectuó aforos de velocidad y tiempo de recorrido de vehículos pesados en curvas horizontales que es el objeto de estudio del presente proyecto.

2.8.1 Métodos de aforo

Para realizar estas mediciones se dispone de diversos métodos, entre los cuales destacan los siguientes:

Aforos manuales

Aforos automáticos

Aforos móviles

Aforos fotográficos

2.8.1.1. Aforos manuales

Este método de aforo consiste en el llenado de planillas elaboradas de acuerdo al tipo de datos a recabar en la vía, a cargo de una o varias personas.

Este tipo de aforos son los más costosos dado que emplean personal calificado para su realización. Su metodología es simple: el observador se coloca en una sección de carretera y realiza un conteo y cronometrado de tiempo de todos los vehículos que circulan a través de ella, bien por medio de impresos destinados a tal efecto, bien a través de apartados electrónicos o pulsadores.

La efectividad de este tipo de aforo es mayor que la del resto, ya que permite distinguir entre los diferentes tipos de vehículos que transitan. En algunas situaciones se antoja imprescindible, como es el caso de las intersecciones, donde interesa cuantificar todo los movimientos posibles

2.8.1.2. Aforos automáticos

Se basan en utilización de mecanismos automáticos que detectan el paso de vehículos, procediendo a su conteo y posterior almacenamiento.

Los aparatos más empleados en este tipo de aforos son los neumáticos, que consta de un captador formado por un tubo de goma colocado transversalmente sobre la calzada, y un detector compuesto por una membrana formada por dos laminas metálicas que entran en contacto cada vez que un vehículo pisa el captador.

Otro tipo de sistemas empleados aunque en menor medida son los detectores de lazo o bucle, basados en la inducción electromagnética e incluso detectores basados en ondas de choque o en el láser.

2.8.1.3. Aforos móviles

En determinadas ocasiones puede interesar la determinación de aforos en un tramo determinado, para lo que se recurre al conteo de vehículos desde otro automóvil determinado, para lo que se recurre al conteo de vehículos desde otro automóvil en movimiento e integrado en la corriente de tráfico.

2.8.1.4. Aforos fotográficos

Se basan en el control aéreo de la circulación, aprovechando los medios de los que se dispone para vigilancia del tráfico, de los populares helicópteros.

Aun así, este método es caro y poco usual, aunque puede ofrecer información interesante acerca de las densidades, velocidades e incluso intensidad de tráfico.

Para el presente proyecto se realizó el método de aforo manual ya que es el más adecuado para aforar, ya que sólo se aforarán velocidades de vehículos pesados.

2.9. EL FENOMENO DEL ROLLOVER

El fenómeno del 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, acompañada 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). 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).

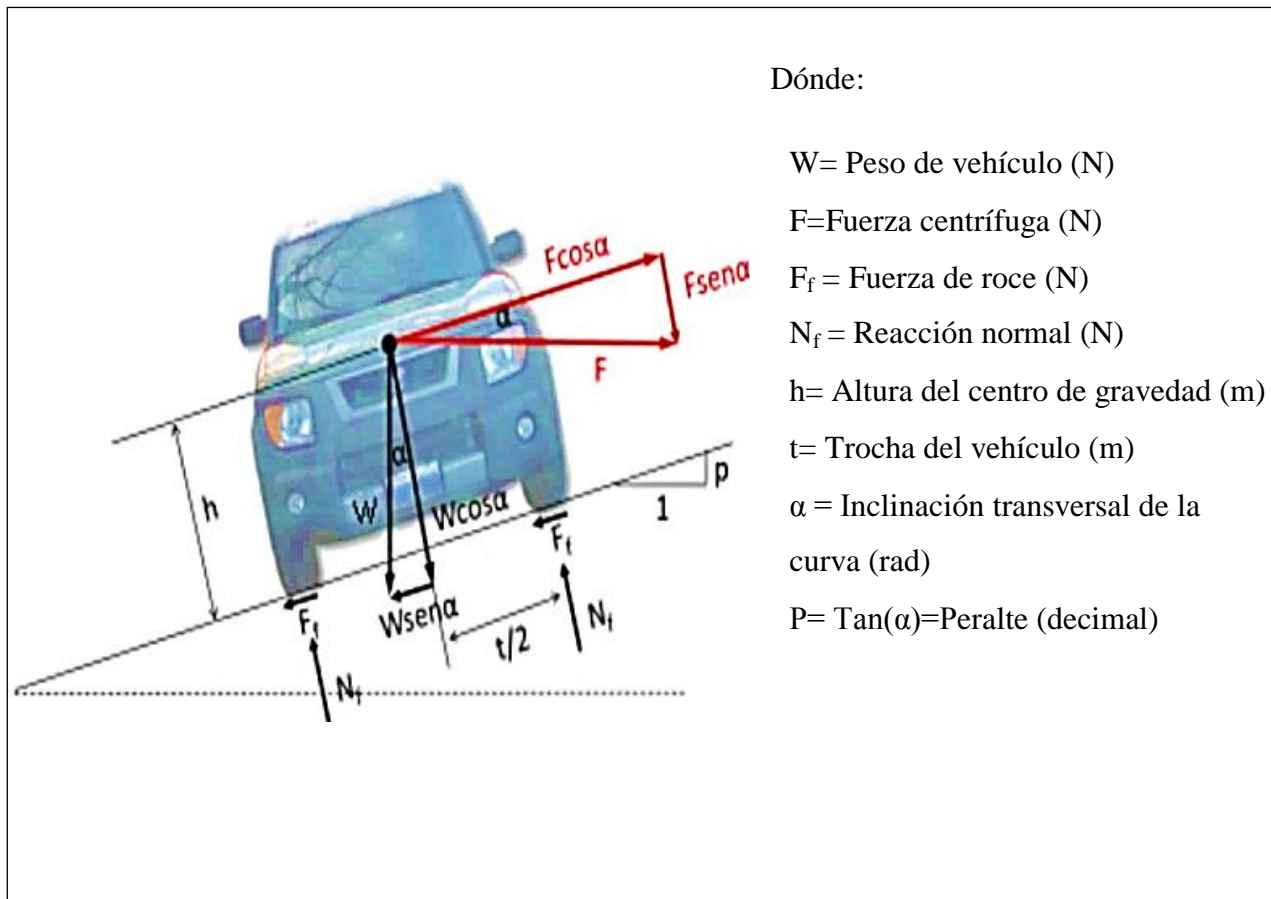
Los factores que contribuyen a rollover se puede clasificar en (Rakheja y Ranganathan, 1993; García *et al*, 2003; Keall y Newstead, 2009; McKnight y Bahouth, 2009; Hosseinpour *et al*, 2016): operacionales (velocidades de operación, distribución y tipo de carga), geométricos (diseño de las curvas horizontales),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

La posibilidad de que ocupa 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, dado 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 aceleraciones de operación de los vehículos en la curva.

La Figura 2.10 muestra el diagrama de fuerzas que actúan sobre un vehículo cuando circula por una curva circular peraltada. El rollover tendrá 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 puede determinar la condición de estabilidad que de no ser satisfecha llevará al vehículo a experimentar rollover (Ver la ecuación 2.1)

A continuación en la figura 2.10 nos muestra la reacción normal, la altura al centro de gravedad, peralte de la curva, fuerza centrífuga, fuerza de roce, inclinación transversal y el ancho de trocha que presenta un vehículo.

Figura 2.10. Fuerzas actuantes sobre un vehículo en una curva horizontal



Dónde:

W= Peso de vehículo (N)

F=Fuerza centrífuga (N)

F_f = Fuerza de roce (N)

N_f = Reacción normal (N)

h= Altura del centro de gravedad (m)

t= Trocha del vehículo (m)

α = Inclinación transversal de la curva (rad)

P= $\tan(\alpha)$ =Peralte (decimal)

Fuente: Departamento de ingeniería civil, laboratorio GESITRAN. Universidad de concepción, Chile

2.9.1. Aceleración lateral

$$\frac{a_c}{g} = \left(\frac{t}{2h} + p \right) \quad (2.1)$$

Donde:

t = Trocha del vehículo (m)

h = Altura del centro de gravedad (m)

p = Peralte (decimal)

g= Gravedad (m/s^2)

La ecuación 2.1 expresa dicha condición de estabilidad. En el lado izquierdo de la desigualdad 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 la gravedad ($g= 9,81m/s^2$).

2.9.2. Aceleración lateral teórica

La aceleración de un vehículo que experimenta cuando circula por una curva horizontal está dada por la aceleración centrípeta que actúa sobre el cuerpo y que le permite describir una trayectoria curva. La ecuación 2.2 se 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).

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

Donde:

t = Trocha del vehículo (m)

R = Radio de curvatura (m)

p = Peralte (decimal)

g = Gravedad (m/s^2)

2.10. MODELOS DE ROLLOVER EXISTENTES

Para estimar esta aceleración lateral crítica existen modelos estáticos y dinámicos.

2.10.1. Modelos de rollover estático

Este modelo estima el potencial de rollover mediante equilibrio estático de fuerzas de un vehículo circulando por una curva (véase el ejemplo de Robertson y Kelley, 1989; Gillespie, 1992; Navin, 1992b; Hac, 2002; Garcia *et al*, 2003 y Kühn, 2013).

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 balaceo y tasa de rotación).

Los modelos estáticos pueden utilizarse en el diseño geométrico para establecer una estimación de potencial de rollover, pero dependen del tipo de vehículo, por lo cual por sí mismo no puede generalizarse para verificar diseños geométricos debido 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 Garcia *et al* (2003), el modelo de umbral estático 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).

Este proyecto 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).

2.10.2. Modelo de rollover Dinámico

Utilizan modelos de la dinámica de los 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 vehículo pesado (véase por ejemplo a Huang *et al*, 2012; Dahmani *et al*, 2013 y Alberding *et al*, 2014).

Para el presente proyecto se estimará el rollover utilizando los modelos estáticos ya que este método no es muy complejo de proseguir a la práctica.

2.11. MODELOS DE UMBRAL ESTÁTICO DE ROLLOVER

2.11.1 El modelo de W. Kühn (2013)

Estima el umbral estático de rollover ($a_{c,lim}/g$) hacia el exterior de la curva (Ecuación 2.3) y hacia el interior 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,

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

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

Donde:

t = Trocha del vehículo (m)

h = Altura del centro de gravedad (m)

p = Peralte (decimal)

g = Gravedad (m/s^2)

2.11.2. El modelo de Thomas D. 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 y la tasa de rotación, como se muestra en las Ecuaciones 2.5 y 2.6

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

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

Donde:

t = Trocha del vehículo (en m)

h₀ = Altura del centro de balanceo (en m)

p = Peralte (en decimal)

r_φ = Tasa de rotación (en rad/g)

De la ecuación 2.5 y 2.6 el autor Thomas D. Gillespie (1992) del modelo a aplicar indica, que teniendo en cuenta el desplazamiento lateral del CG, el umbral de refinanciación es "t sobre 2h " reducido por el segundo término en el lado derecho de la ecuación anterior. Para una h₀ / h = 0.5 y una tasa de balanceo de 6 grados por g (0.1 radianes/g), el segundo término se evalúa a aproximadamente 0.95. Es decir, el umbral de renovación se reduce aproximadamente un 5 por ciento debido a este mecanismo.

2.12. TEORÍA DE LA CONFIABILIDAD

2.12.1. Antecedentes

La palabra confiabilidad designa la probabilidad de que un sistema cumpla satisfactoriamente con la función para la que fue diseñado, durante determinado período y en condiciones especificadas de operación. Así un evento que interrumpa ese funcionamiento se denomina falla.

El campo de aplicación de la Teoría de la Confiabilidad se amplía constantemente. Todos los sistemas de ingeniería, simples y complejos, pueden beneficiarse de la

aplicación integrada de los conceptos de esta teoría en sus fases de planeación, diseño y operación. Un aumento de la confiabilidad conlleva, en general, el aumento a corto plazo de los costos. Pero este aumento de la confiabilidad puede revertirse en ganancia en un plazo mayor, y puede significar, por otra parte, una disminución de riesgos para la salud y la vida de las personas, y para el medio ambiente. Ahora, el aumento de los costos debe compensarse con la disminución del riesgo, es decir, se debe establecer una adecuada relación entre el costo y el beneficio que se obtendrá, con el fin de no exagerar ni escatimar las provisiones de seguridad.

2.12.2. Principios básicos de la teoría de la confiabilidad

2.12.2.1. Objetivo

“La Teoría de la Confiabilidad se ocupa principalmente de las fallas de los sistemas. Sin embargo, no indaga tanto en los fenómenos que las causan sino en la frecuencia con que ocurren. Por lo tanto no es una teoría física de las fallas, sino una teoría estadística, una teoría de probabilidades.” (Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Asociación “Ciencia Hoy”. Volumen 5, N°35, 1996).

El objetivo del análisis de confiabilidad estructural es determinar la probabilidad de falla de estructuras tomando en consideración las incertidumbres asociadas con las resistencias y cargas. La respuesta de una estructura se evalúa por medio de modelos basados en datos estadísticos recopilados previamente. La teoría de confiabilidad estructural toma como base el modelo probabilístico de estas incertidumbres y provee los métodos para la cuantificación de la probabilidad de que las estructuras no cumplan con la función para la que fueron diseñadas.

2.12.2.2. Modelación de incertidumbres

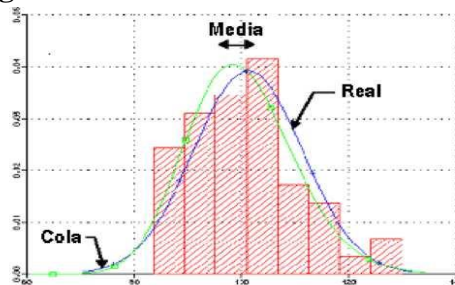
Existen tres tipos de incertidumbres asociadas al cálculo de la confiabilidad estructural, las Físicas, las estadísticas, y las de modelo.

Las incertidumbres físicas están asociadas a la variabilidad de la carga impuesta, la geometría de la estructura, y las propiedades del material.

Las incertidumbres estadísticas son dependientes de la cantidad de datos disponibles para el análisis y se incrementan cuanto mayor es la ausencia de información. En la mayoría de los casos la modelación probabilística de las incertidumbres involucradas en el problema se hace asignándoles una función de probabilidad con parámetros de distribución estimados del análisis de la información recopilada y/o en base a información subjetiva o a la experiencia pasada. Estos parámetros son dependientes de la cantidad de datos recopilados. Además, influye también el modelo matemático elegido para ajustar los datos observados, ya que la aceptación del modelo proviene de una prueba de bondad de ajuste con un adecuado nivel de significancia. Por otro lado, al usar dicho modelo matemático en el cálculo de la confiabilidad estructural, podría suceder que el punto de falla más probable tenga sus coordenadas en las colas de la distribución, donde hay muy poca información y donde la probabilidad de falla es muy sensitiva (ver Figura 2.11).

Las incertidumbres del modelo se deben a la idealización usada en el modelo matemático para calcular el comportamiento real de la estructura y son el resultado de las simplificaciones realizadas, de las condiciones de borde desconocidas y de los efectos desconocidos de otras variables y sus interacciones, las cuales no están incluidas en el modelo.

Figura 2.11. Gráfico de incertidumbre



Fuente: Fuentes de incertidumbre estadística

2.12.2.3. Funciones de estado límite y variables básicas

Una variable básica es toda aquella cantidad involucrada y reconocida como fundamental en el cálculo de un estado límite. Un paso importante en el análisis de la

confiabilidad es decidir cuáles cantidades deben ser modeladas como variables aleatorias, y cuáles deben ser modeladas como parámetros determinísticos.

Un estado límite es un evento predefinido, cuya ocurrencia debe evitarse para asegurar el adecuado comportamiento de la estructura. Se presume que es posible representar dicho evento, a través de un modelo matemático y calcular de este modo su probabilidad de ocurrencia. Para un elemento estructural para el cual la capacidad C es modelada como una variable aleatoria, y sujeta a una demanda D también aleatoria, la función que representa dicho estado límite será simplemente:

$$G(X) = C - D \quad (2.7)$$

Donde C y D son funciones de las variables aleatorias denotadas como $X = (X_1, \dots, X_n)$. Esta n variable aleatoria en X es conocida como variables básicas, y pueden representar las incertidumbres físicas, las estadísticas y las de modelo. La capacidad y la demanda, por ende, son cada una función de las variables básicas aleatorias.

La función del estado límite o función falla está definida de tal modo que los valores positivos de $G(X)$ corresponden a situaciones seguras, y los negativos a situaciones de falla. Es importante notar que la superficie de falla no define una función de falla única, ya que dicha superficie puede ser descrita por varias funciones de falla equivalentes. Por lo tanto, cuando es posible, es conveniente utilizar funciones de falla diferenciables para facilitar el trabajo de los procedimientos implementados con el fin de calcular la confiabilidad. En confiabilidad estructural la función de falla usualmente resulta del análisis mecánico de la estructura.

2.12.3. Coeficiente de seguridad global

2.12.3.1. Fundamento teórico

Es el método clásico utilizado para la evaluación de la seguridad en infraestructuras. Si consideramos las distintas variables que intervienen en un problema dado (variables geométricas de vehículo, curvas y variable de velocidad de punto), como un vector de un espacio n -dimensional (X_1, X_2, \dots, X_n) , y definimos una función de resistencia $C(x_1, x_2, \dots, x_n)$ que favorece la seguridad y una función de sollicitación $D(x_1, x_2, \dots, x_n)$ que

favorece el fallo, se puede definir una función adimensional $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ a partir de las anteriores de modo que:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(x_1, x_2, \dots, x_n) - D(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.8)$$

Un determinado punto del espacio n -dimensional definido está en la región segura si se verifica la condición:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0 \quad (2.9)$$

Por otro lado, un punto de este espacio queda en la región de fallo si:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (2.10)$$

La frontera entre estas dos regiones, o estado límite, corresponde a la situación definida por el hiperplano.

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (2.11)$$

2.12.4. Confiabilidad y probabilidad de falla

El criterio de confiabilidad se expresa normalmente en términos de ecuaciones de estados límite, $G(X)$, también llamados eventos de falla, F :

$$F = \{G(X) < 0\} \quad (2.12)$$

La probabilidad de que sucedan eventos F viene dada por la probabilidad de que la demanda D supere a la capacidad C de la estructura:

$$P_f = P(C - D < 0) = P(C < D) \quad (2.13)$$

La demanda impuesta o los efectos de las cargas, D , en una estructura, y la capacidad o resistencia, C , de la misma para un evento determinado, se podrían representar por dos curvas de distribución de probabilidad como se muestra gráficamente en la Figura 2.12.

Asumiendo que la capacidad, C y la demanda, D son independientes, (lo cual es aproximadamente cierto para el caso en el que las cargas son estáticas), existirá siempre

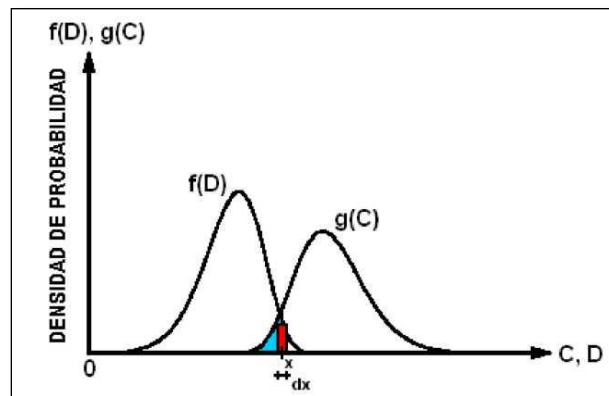
la posibilidad, aunque sea muy pequeña, de que $C < D$ y la estructura falle. Por el contrario, si $C > D$, la estructura es segura.

Figura 2.12. Ilustración de la integración de la probabilidad de falla en dos dimensiones. El cálculo de la probabilidad de falla se puede efectuar resolviendo la siguiente integral:

$$P_F = P(\text{falla}) = P(C < D) = \int_0^{\infty} P(C < x) P(x < D < x + dx) dx = \int_0^{\infty} f(D) g(C) dx$$

$J-X$

$J-X$

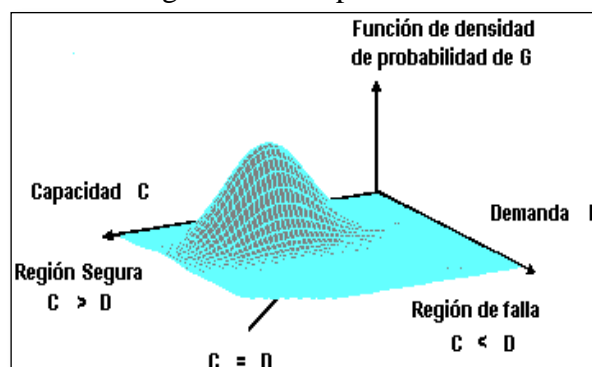


Fuente: Teoría de la confiabilidad

http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_154_179_106_1463.

Esta integral, ilustrada en la Figura 2.12 se muestra una integral de volumen en la región de falla, es sin embargo, muy difícil de resolver y por lo tanto las aproximaciones numéricas resultan adecuadas y eficientes. Varios métodos para la solución de dicha integral han sido propuestos incluyendo técnicas de integración numérica, simulación Montecarlo, y procedimientos de cálculo de confiabilidad de primer y segundo orden.

Figura 2.13. Ilustración de la integración de la probabilidad de falla en tres dimensiones



Fuente: Teoría de la confiabilidad

http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_154_179_106_1463.

2.13. MÉTODOS APROXIMADOS DE CÁLCULO DE LA CONFIABILIDAD

Como se ha visto en el ítem anterior, la probabilidad de falla puede ser obtenida al calcular la probabilidad de que $G < 0$. Sin embargo, el hecho de que muchas variables aleatorias estén involucradas, hace que este cálculo requiera de la implementación de la función de densidad de probabilidad de la función $G(X)$ y una integración múltiple sobre la región de falla en la que $G < 0$. Este procedimiento exacto rara vez puede ser aplicado dado que la función de densidad de probabilidad de G es desconocida y además es difícil de obtener.

Como una alternativa, otros métodos aproximados han sido desarrollados con la finalidad de estimar la probabilidad de falla. Estos métodos conocidos como procedimientos FORM/SORM (*First Order* o *Second Order Reliability Methods*), son basados en el cálculo de un índice de confiabilidad, β , del cual la probabilidad de falla P_f , puede ser estimada usando la función de densidad de probabilidad normal $\Phi(-\beta)$:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2.14)$$

Donde:

P_f = Probabilidad de falla (decimal)

β = Índice de confiabilidad (decimal)

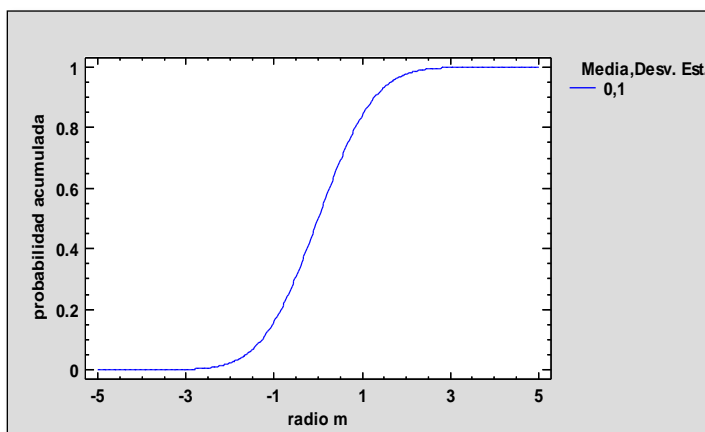
Φ =Función densidad.

2.14. CURVA 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 periodo 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 2.14 se representa 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 el radio de 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 2.14. Ejemplo de curva de fragilidad



Fuente: Elaboración propia.

2.15. MÉTODO DE ANÁLISIS DE PRIMER ORDEN (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 variable 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 fallas y de no falla. Si $g(X)$ es una función lineal, las variables aleatorias siguen una distribución de probabilidad normal y

no están correlacionadas, entonces la probabilidades de falla pueden describirse según la Ecuacion 2.15 (Haldar y Mahadevan, 2000).

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f); \beta = \frac{\mu}{\sigma} = \frac{a_0 + \sum_i a_i \mu_{xi}}{\sqrt{\sum_i a_i^2 \sigma_i^2}} \quad (2.15)$$

Donde:

β = Índice de confiabilidad

μ = Media

σ = Desviación estándar en función $g(X)$

Si $a_0 = 0$, $i = 2$ y $a_i = 1$, se llega a la expresión de cálculo del margen de seguridad asociado a resistencias y solicitaciones 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 Hasofer y Lind (1974), el cual linealiza la función de estado límite en el punto de diseño en 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 Ecuaciones 2.15 (Hasofer y Lind, 1974).

2.16. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD DE HASOFER-LIND

Uno de los problemas que se plantea al utilizar las metodologías del desarrollo en serie de Taylor y del Point Estimate Method y de Coronel es que los índices de fiabilidad que se obtienen no son invariantes, sino que dependen de cómo se haya definido la función g^* . Para evitar este problema, Hasofer y Lind propusieron una definición invariante del índice de fiabilidad.

Sea \mathbf{X} el vector de las variables aleatorias que intervienen (X_1, X_2, \dots, X_n), que se suponen normales, μ_X el vector de las medias, σ_X la matriz de varianzas covarianzas y

g^*X la función de estado, que se supone lineal por ahora. El índice de fiabilidad de Hasofer y Lind es el obtenido al resolver el problema:

$$\beta_{HL} = \min_{\{x \in g(x)=0\}} \sqrt{\sum_i x_i^2} ; \quad u^* = -\beta_{HL} \alpha^* = \beta_{HL} \left(\frac{\frac{\partial g}{\partial x_1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)^2}} \right) \quad (2.16)$$

$$\beta_{HL} = \text{minimo}_x \sqrt{(x - \mu_x)^T \sigma_x^{-1} (x - \mu_x)} \quad (2.17)$$

Sujeto a:

$$g_x^*(x) = 0 \quad (2.18)$$

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 2.16 se resuelve numéricamente o mediante programas computacionales de análisis de confiabilidad.

En el caso de las variables aleatorias sean independientes, la matriz de varianzas covarianzas es una matriz diagonal, donde los términos de la diagonal son las varianzas de las funciones aleatorias, $\sigma^2 X_i$, por lo que el problema se puede formular como la ecuación 2.19:

$$\beta_{HL} = \text{minimo}_{x_i} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \right)^2} \quad (2.19)$$

Sujeto a:

$$g_x^*(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (2.20)$$

Entonces la probabilidad de falla se estima usando la Ecuación 2.14, en función del valor de β_{HL} quedando como:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta_{HL}) \quad (2.21)$$

Donde:

P_f = Probabilidad de falla (decimal)

β_{HL} = Índice de confiabilidad de Hasofer-Lind (decimal)

CAPÍTULO III
APLICACIÓN PRÁCTICA

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE ACCIDENTOLOGÍA EN LA ZONA DE ESTUDIO

Lo primero que se hizo es la verificación de la existencia de accidentes en la zona de estudio, recaudando informaciones de accidentes de vehículos pesados que ocurren en la zona y de esta manera continuar con el proceso de estudio. Las informaciones obtenidas a las que se recurrió fueron dos. La primera fue información de sucesos de accidentes por medio de periódicos locales así como también digitales, la segunda se recurrió al informe de accidentes de parte de la unidad de tránsito de la región de Yacuiba y así constatar la existencia de accidentes.

Con la información ya obtenida se procedió al estudio de accidentes debido a la falla por rollover en la zona de estudio.

3.1.1 Informe de accidentes en la zona de estudio por medio de periódicos locales

Recolectadas las informaciones de accidentes en la zona de estudio se puede apreciar la existencia de accidentes de vehículos pesados ocurridos en la zona a estudio, que en cual se muestra en la figura 3.1 el cual informa el periódico digital EL Chaco Informa.

En los periódicos locales de Yacuiba el Chaqueño evidencian la existencia de accidentes tránsito en la zona.

Los accidentes en la zona son de gran magnitud en los vehículos pesados las causas son debido a varias hipótesis.

Una de las hipótesis que se tiene en común es el exceso de velocidad, seguida por la distracción del operador del vehículo y fallas mecánicas, lo cual no se toma en cuenta el fenómeno de rollover de vehículos pesados que en este proyecto si se toma en cuenta.

Figura 3.1. Accidentes de tránsito de vehículos pesados ocurridos en la zona de estudio

Región - Deportes - Departamental - Nacional - Internacional - Frontera Informativa - **Policías** - Secciones

Inicio / Caraparí / VUELCO DE COSTADO EN LA CARRETERA CARAPARÍ – CAMPO PAJOSO

VUELCO DE COSTADO EN LA CARRETERA CARAPARÍ – CAMPO PAJOSO

10 Agosto, 2015 339 Visitas

Facebook Twitter Google+ LinkedIn

En el reporte policial habitual de los días lunes, el Comandante de Frontera Policial de Yacuiba Cnel. Yeese Barberito, informó sobre un hecho ocurrido el pasado miércoles en la carretera Caraparí – Campo Pajoso.

ARTÍCULOS RELACIONADOS
CARAPARÍ: COMUNARIOS, YPFB Y OPERADORA DEL

la altura de La Ripiera, ruta Caraparí-Yacuiba. (Foto: WhatsApp)

Inicio / Caraparí / PUESTO POLICIAL DE CARAPARÍ REPORTA HECHOS DE TRÁNSITO EN LA CARRETERA A YACUIBA

PUESTO POLICIAL DE CARAPARÍ REPORTA HECHOS DE TRÁNSITO EN LA CARRETERA A YACUIBA

28 Julio, 2015 370 Visitas

Facebook Twitter Google+ LinkedIn

El pasado fin de semana la Policía de Caraparí, atendió un hecho de tránsito Vuelco de Costado (Chata) del camión marca Volvo, color blanco, con placa de control 514-GZB, de propiedad de la empresa IMBOLPACK, conducido por Luis Fernando Mendoza Baqueros, con licencia de conducir categoría "C" vigente, sobre la carretera Caraparí-Yacuiba, a la altura de la Virgen de Guadalupe, en la serranía del Aguarañe.

ARTÍCULOS RELACIONADOS

23 Agosto, 2017

CARAPARÍ: COMUNARIOS, YPFB Y OPERADORA DEL POZO BOYUY PONEN FIN AL CONFLICTO

Un camión bloqueó el camino entre Caraparí y Yacuiba, a la altura de la Virgen. (Foto WhatsApp)

Caraparí/El Chaqueño

Fuente: Periódico digital “El Chaco informa”

En las figura 3.1 se puede observar imágenes de accidentes de tránsito, el cual se puede identificar el vuelco de vehículos pesados en el tramo de estudio, el cual amerita su estudio y por ende en este proyecto se evaluará una de las causas de accidente de tránsito, el cual es el estudio del fenómeno de rollover tipo estático.

3.1.2. Informe de accidentes en la zona de estudio por parte de la unidad de tránsito

Se procedió a la visita de la unidad de transito de la región de Yacuiba para así obtener un informe que constata la existencia de accidentes ocurridos en la zona a ser estudiado el cual está en el anexo A.

3.2. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El tramo en estudio está ubicado en el departamento de Tarija, provincia Gran Chaco, Yacuiba primera sección del Gran Chaco, específicamente el tramo carretero en estudio es la subida del Aguarangue ruta que une Yacuiba y Caraparí (tramo Campo Pajoso – Ojo de Agua), teniendo como inicio las siguientes coordenadas geográficas latitud $21^{\circ}53'4.63''$ S, longitud $63^{\circ}39'44.02''$ O y final de estudio latitud $21^{\circ}52'35.94''$ S, longitud $63^{\circ}41'27.33''$ O.

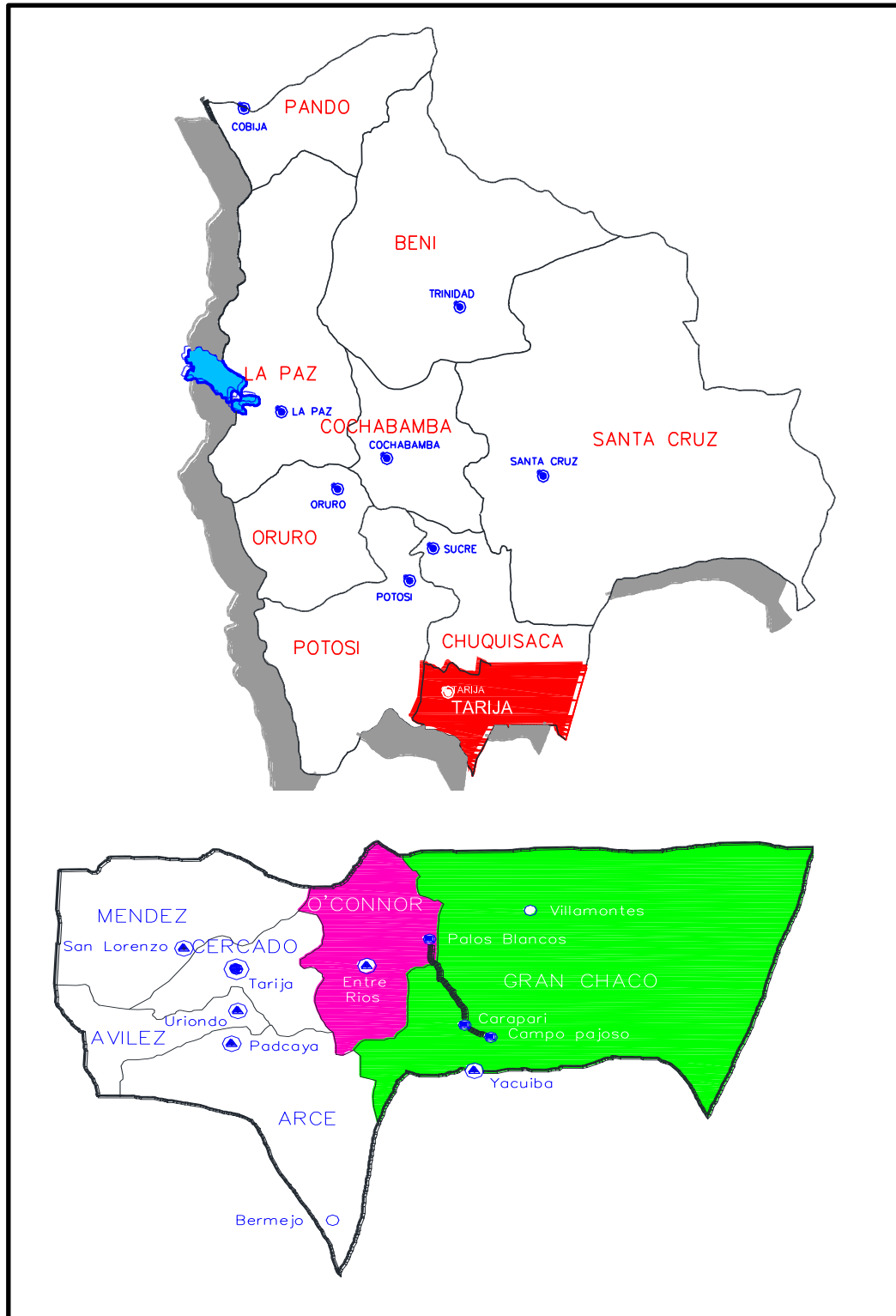
El Gran Chaco es una zona constituida por su vegetación y abundante calor el cual se la cataloga como el lugar más cálido del departamento.

También se observó que la zona en estudio la subida el aguarangué es un lugar el cual es catalogado como “Parque nacional y área natural de manejo integrado Aguaragüe” del Gran Chaco.

El tramo en estudio es una carretera de la Red Departamental de Carreteras de Tarija; es una vía de vinculación entre dos corredores de exportación constituidos por las rutas fundamentales.

En la figura 3.2. Se observa una imagen geográfica de un mapa, el cual indica la ubicación de lugar en estudio el cual es la región del Gran Chaco en su primera sección Yacuiba.

Figura 3.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

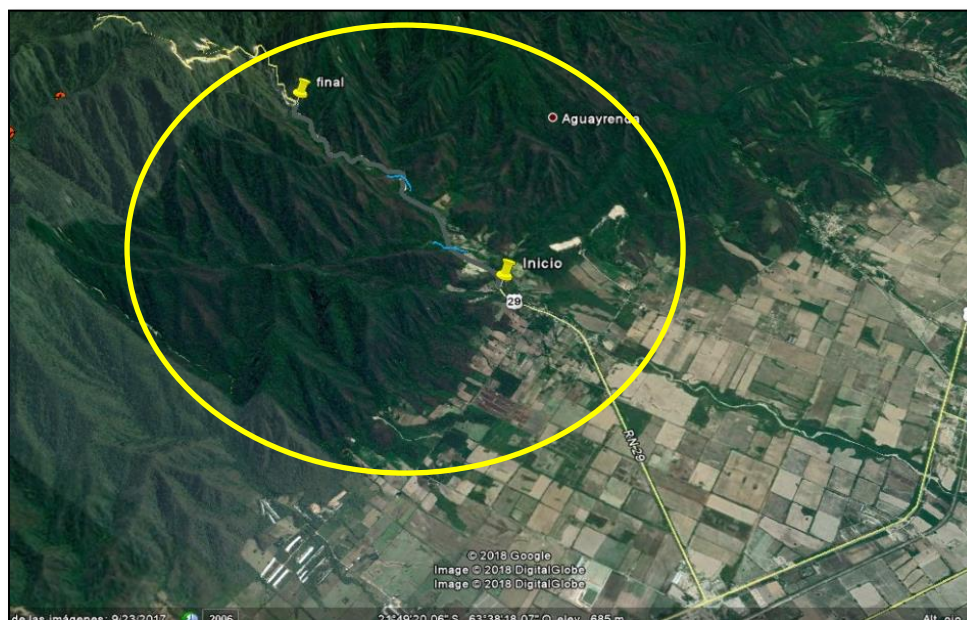
Figura 3.3. Imagen de inicio del tramo en estudio, letrero de ruta y distancia a Caraparí



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.3. se observa el letrero del inicio de la zona de estudio, que es campo pajoso, que a partir de este punto se evalúa las diferentes curvas horizontales hasta la culminación del tramo pavimentado el cual termina el cantón Ojo de Agua que es la subida del aguarangue.

Figura 3.4. Vista satelital del tramo en estudio



Fuente: Google earth

En la siguiente figura 3.4. se muestra una imagen satelital del tramo el cual se estudió, el cual se descartaron 4 curvas de 19 curvas en estudio quedando así 15 curvas a ser evaluadas, se descartaron las cuatro curvas debido a que estas se aproximan a la zona de peaje del inicio de la localidad de Ojo de Agua en el cual los vehículos bajan la velocidad al aproximarse a la zona de control, también un factor para descartar estas curvas es que estas cuentan con radio grandes de 260, 250, 330, y 300m respectivamente.

3.3. SELECCIÓN Y GEOMETRÍA DE VEHÍCULOS PESADOS A ESTUDIO

3.3.1. Selección de vehículos pesados de carácter de estudio

Los vehículos pesados a ser estudiados fueron los buses grandes, camiones grandes y camiones semirremolque y tracto camiones que son las que tienen mayor circulación en la carretera de estudio.

Figura 3.5. Camión grande tipo C2 mayor a 10 Ton de 2 ejes



Fuente: Elaboración propia

Este tipo de camión es uno de los más comunes en circulación del tramo en estudio, este tipo de camión son en la mayoría de la fábrica Volvo este tipo de camiones por lo general transportan cemento, verduras y materiales comestibles de la ciudad de Tarija y viceversa de Yacuiba a Cercado transportando carbón, frutas y otros.

Figura 3.6. Camión semirremolque (CSR)



Fuente: Elaboración propia

Este tipo de camión semirremolque uno de los más comunes en la zona de estudio, se tomó como tipo de camión ya que tiene varios antecedentes de accidentes en la zona.

Figura 3.7. Semirremolque tipo tractocamión (CSR)



Fuente: Elaboración propia

Este tipo de camión semirremolque tipo tractocamión es uno de los vehículos pesados de baja circulación según los aforos establecidos pero no de menor importancia puesto que este tipo de vehículos presentan velocidades altas respecto al vehículo pesado tipo semirremolque.

Figura 3.8. Buses más de 35 pasajeros de 3 ejes tipo C3



Fuente: Elaboración propia

Este tipo de vehículo es uno de los más conocidos puesto que estos buses son las que transportan a los pasajeros, llamadas también flotas y su circulación en la zona es de gran importancia pero compleja al momento de aforar puesto que estos vehículos circulan en su mayoría a altas horas de la noche, siendo complejo su aforo, por ende sólo se aforaron los buses que transitan en el día, siendo estas mínimas a comparación con los demás vehículos pesados pero no deja de ser importante para el estudio debido a que transportan personas, así como también a los antecedentes de accidentes ocurridos en la zona y además de presentar una geometría del bus de una trocha angosta y altura al centro de gravedad alta.

3.3.2. Geometría de los vehículos pesados

La geometría que presentan los cuatro tipos de vehículos pesados a estudio presentan las siguientes dimensiones.

Tabla 3.1. Propiedades inerciales de la suspensión de los vehículos pesados

Tipo de vehículo	C2,C3 Y T3S3	C2	C3	T3S3	T3S3
Tipo de eje	Simple	Simple	Tándem	Tándem	Tándem
Tipo de suspensión	Suspensión típica de resortes	Suspensión de aire típica	Suspensión de aire típica	Suspensión de aire típica	Suspensión de aire típica
Altura del centro de rotación con respecto al eje de las llantas (m)	0.100	0.190	0.190	0.187	0.190
Rigidez rotacional (Nm/deg)	3.720	13.261	26.523	11.124	39.784
Amortiguamiento rotacional (Ns/m)	5.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Espaciamiento entre los resortes (m)	0.425	0.916	0.916	0.916	0.916
Separación entre las llantas (m)	2.030	1.830	1.830	1.830	1.830

Fuente: Estos datos fueron obtenidas por la ARRB: Junta de investigación vial de Australia, por sus siglas en inglés.

En la tabla 3.1 mostrada se observa la altura del centro de rotación de la suspensión está referida con respecto a la altura del eje de las llantas, lo cual, basándose en mediciones

del diámetro de las llantas realizadas en los camiones de varios transportistas, se asumió que es de 0.52m en todo los casos.

Tabla 3.2. Propiedades inerciales de los camiones unitarios C2Y C3

Propiedad	Valor	
	C2	C3
Vehículo		
Masa amortiguadora total (kg)	13.483	19.426
Altura del centro de gravedad con respecto al suelo (m)	2.120	2.260
Ancho (m)	2.60	2.60
Masa amortiguadora en eje frontal (kg)	4.526	5.013
Masa amortiguadora en el eje tándem (kg)	8.956	14.412
Momento de inercia rotacional con respecto al centro de gravedad (kg/m ²)	19.483	28.253

Fuente: ARRB: Junta de investigación vial de Australia, por sus siglas en inglés

Las propiedades inerciales de los camiones unitarios C2Y C3 fueron calculadas a partir de la información del camión unitario de tres ejes utilizado por Fancher y otros (1986, pp. 163-183) y por Fancher y Mathew (1987, pp.58-59).

Tabla 3.3. Propiedades inerciales del camión unitario T3S3 vehículo de carga articulado que consta de un tractocamión de 3 ejes con un semirremolque de 3 ejes

Propiedad	Valor
Masa amortiguada de semirremolque con la carga útil (kg)	32.60
Masa amortiguada del tractocamión (kg)	6.400
Altura del centro de gravedad del semirremolque con respecto al suelo (m)	2.49
Altura del centro de gravedad del tractocamión con respecto al suelo (m)	1.30
Ancho total (m)	2.60
Masa no amortiguada en el eje frontal (kg)	600
Masa no amortiguada en el eje tándem (kg)	2.000
Masa no amortiguada en el eje tridem (kg)	27.846
Momento de inercia rotacional del tractocamión con respecto a su centro de gravedad (kg/m ²)	8.133

Fuente: Las propiedades del vehículo fueron aportadas por la ARRB: Junta de investigación vial de Australia, por sus siglas en inglés


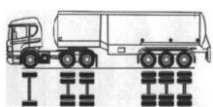
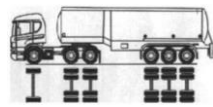

En el presente proyecto se utilizó la aplicación de la normativa australiana ARRB Investigación Vial de Australia, por sus siglas en inglés para la obtención de datos geométricos de vehículos pesados puesto que no existe ninguna normativa boliviana el cual haga énfasis del cálculo específicamente de la variable de la altura de centro de balanceo.

Luego de la medición del ancho de tocha de los vehículos pesados en estudio se constató la similitud de datos y por ende se aplicó todas las variables geométricas de la normativa australiana ARRB. Para proceder a la aplicación de los modelos de rollover estático.

3.3.3. Carga de los vehículos pesados

Según la ley n° 441, ley de 25 de noviembre de 2013 decreta el control de pesos y dimensiones vehiculares en la red vial fundamental, los pesos máximos de los vehículos a estudio son las mostradas en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Peso y dimensiones permitidas según configuración vehicular

Configuración vehicular	No de Ejes /llantas	Long. Max. metros	Peso bruto máximo permitido por eje o grupo de ejes en toneladas					Peso bruto total permitido Ton.
			Eje delantero	Eje traseros				
			Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	
Camión grande tipo C2 2ejes 	IRS-1RD	12	7	11				18
Camión semirremolque (CSR) 	IRS-2RD 3RD	18,6	7	18	25			45
Semirremolque tractocamión (CSR) 	IRS-2RD 3RD	18,6	7	18	25			45
Buses más de 35 pasajeros de 3 ejes tipo C3 	IRS-2RD	14	7	18				25

Fuente: ley n° 441, ley de 25 de noviembre de 2013 decreta el control de pesos y dimensiones vehiculares en la red vial fundamental

Como se puede observar en la tabla 3.4, los pesos máximos permitidos para vehículos pesados a evaluar el rollover son las siguientes:

Para el camión grande de 2 ejes C2 es de 18 ton, para semirremolque CSR es de 45 ton al igual que para los semirremolques tipo tractocamión es de 45 ton el peso máximo y para buses de 3 ejes C3 es de 25 ton.

Según el decreto de control de pesos ley n° 441 para cargas que superen los 45 ton a 55 toneladas se requiere de una solicitud de autorización para su transporte, caso contrario se realizara una multa que haciende de los 500 Bs. a 4.000 Bs si supera el exceso de peso por ejes

Al sacar los permisos de carga mayores a los 55 toneladas el propietario deberá acompañar de una boleta de garantía, que ampare posibles daños en la carretera, esta boleta haciende de 50.000 a 500.000 \$us y tiene una validez de 60dias.

3.4. DISEÑO FINAL ASFALTADO TRAMO VIAL “CAMPO PAJOSO – CARAPARÍ-PALOS BLANCOS “

3.4.1. Clasificación de la carretera

El Tramo Asfaltado Campo Pajoso – Caraparí – Palos Blancos, de acuerdo a nomenclatura adoptada por el SEPCAM (Servicio Prefectural de Caminos), es la Ruta D-402 de la Red Departamental de Carreteras de Tarija; es una vía de vinculación entre dos corredores de exportación constituidos por las Rutas Fundamentales.

Por ende la categoría asignada corresponde a la categoría II. Esta conclusión fue establecida con los resultados del estudio de tráfico vehicular, realizado en noviembre de 2001.

3.4.2. Parámetros de diseño

Tomando estos aspectos en consideración, el Consultor ha efectuado un análisis exhaustivo de las normas del Servicio Nacional de Caminos del año 1990, como de diversas normas de diseño vigentes tanto en Bolivia y en los países vecinos, eligiéndose las normas Bolivianas como el principal criterio y complementándose, cuando fuera

necesario, con otras normas que ya han sido utilizadas en el país en otros estudios realizados para dicha institución.

Tabla 3.4. Parámetros para el diseño geométrico planta y perfil longitudinal

Parámetros	Topografía			
	Plana	Ondulada	Montañosa	Muy montañosa
Velocidad Directriz (km/h)	100	70	50	30
Peralte Máximo (%)	6%	8%	10%	10%
Radio Mínimo Absoluto (m)	423	170	75	26
Pendiente Máxima (%)	5%	6%	7%	8%
Distancias mínimas de velocidad				
De Frenado (m)	210	111	63	30
De Sobrepaso (m)	770	466	291	144
Valores de “K” para curvas verticales				
Curvas Convexas	91	25	8	2
Curvas Cóncavas	52	24	12	4

Fuente: Carretera categoría II de normas del SNC

El ancho de carril de 3.50 m ha sido elegido de acuerdo a los siguientes Este ancho, normalmente utilizado en la mayor parte de las carreteras asfaltadas de nuestro país, responde perfectamente a un eficiente movimiento de vehículos pesados y garantiza los niveles de servicio y seguridad exigidos por la categoría de la carretera.

Los anchos de berma de 2.00 m (sectores de topografía plana) y 1.50 m (sectores de topografía ondulada y montañosa) han sido elegidos por el consultor.

El diseño del este tramo carretero fue diseñado según la normativa boliviana vigente en ese momento que es la SNC servicio nacional de caminos y otras normas como se especifica en el informe del diseño.

Según el diseño final asfaltado del tramo vial Campo Pajoso – Caraparí – Palos Blancos, se procede a la obtención de todas las variables geométricas de las curvas horizontales del tramo específico en estudio.

Estas variables son datos que se requieren para la aplicación del modelo de rollover estático.

3.5. IDENTIFICACIÓN Y GEOMETRÍA DE LAS CURVAS HORIZONTALES A ESTUDIO

3.5.1. Curvas horizontales a estudio

Las curvas horizontales que se analizaron fueron desde la progresiva desde 3+892.946 a 6+921.061 que tiene una longitud vial de 3.29km aproximadamente, el cual se muestra en los planos de diseño el cual se encuentra en el anexo B del plano y donde se detectaron 15 curvas horizontales a ser evaluadas del tramo de diseño carretero que tiene su origen en Yacuiba del tramo vial Campo pajoso- caraparí, terminado en la subida del aguarangue en la comunidad Ojo de agua.

3.5.2. Geometría de curvas horizontales

Para el estudio de rollover en curvas horizontales se precisa saber cómo dato la geometría de las curvas horizontales a ser estudiadas, del plano de diseño final del tramo vial Campo Pajoso – Caraparí – Palos Blancos, se obtuvo la geometría de las distintas curvas a estudio, en la siguiente planilla se muestra las distintas curvas con su respectiva geometría con la que se diseñó.

En la siguiente tabla 3.5 se muestra un resumen de la planilla de toda la geometría de las distintas curva a ser evaluadas para lo cual se rescata solo las 15, 14,7 y 5 curvas a ser de carácter de evaluación a rollover estático.

Esta planilla nos muestra las progresivas de inicio y fin de cada curva así como también la deflexión, radio de curvatura, longitud de curva, la externa y el peralte, para lo cual solo se hará uso solo de las variables de los radios de curvatura $R(m)$ y peraltes $p(\%)$ de las curvas que son carácter de evaluación.

Estas variables geométricas de curvas horizontales destacadas que son el radio y peralte, son datos que se requiere a la hora de aplicar los distintos modelos de rollover estático.

Tabla 3.5. Planilla de alineamiento horizontal de diseño

ALINEAMIENTO HORIZONTAL DE DISEÑO

Nº PI	PROGRESIVA	NORTE	ESTE	DELTA	TS	ST	RADIO	T1	T2	EXTERNA	IC	e	SA	Le
1	4+480,682	7 579 940,650	430 946,703	50°12'43,22"	4+323,509	4+621,364	260	157,173	157,173	27,993	157,855	6,0%	0,50	70,0
2	4+990,603	7 580 329,339	430 591,696	- 46°38'44,64"	4+825,983	5+140,219	300	164,62	164,62	27,435	174,236	6,0%	0,40	70,0
3	5+435,538	7 580 336,944	430 131,821	58°50'41,46"	5+320,416	5+534,472	150	115,121	115,121	23,358	94,055	8,0%	0,70	60,0
4	5+776,677	7 580 645,748	429 952,037	- 100°00'00,77"	5+695,615	5+822,882	50	81,062	81,062	29,849	47,267	10,0%	1,70	40,0
5	5+911,505	7 580 536,206	429 822,448	51°49'00,11"	5+874,070	5+945,245	40	37,435	37,435	5,878	1,175	9,0%	2,00	35,0
6	6+006,783	7 580 556,122	429 725,500	- 41°07'14,38"	5+949,051	6+060,820	100	57,732	57,732	7,514	31,769	7,5%	0,80	40,0
7	6+124,892	7 580 496,121	429 619,500	43°47'40,26"	6+082,388	6+164,428	55	42,504	42,504	5,577	2,040	10,0%	1,50	40,0
8	6+218,716	7 580 520,000	429 525,700	- 56°15'31,92"	6+168,755	6+262,760	55	49,961	49,961	8,734	14,005	10,0%	1,50	40,0
9	6+329,422	7 580 442,000	429 439,000	59°06'30,35"	6+282,093	6+370,580	47	47,329	47,329	8,650	8,487	10,0%	1,80	40,0
10	6+423,394	7 580 471,500	429 343,300	- 67°21'30,82"	6+371,255	6+466,509	47	52,14	52,14	11,173	15,255	10,0%	1,80	40,0
11	6+575,056	7 580 348,000	429 240,500	88°40'50,91"	6+507,869	6+620,614	47	67,187	67,187	20,686	32,745	10,0%	1,80	40,0
12	6+712,665	7 580 447,029	429 115,800	- 36°42'31,70"	6+646,073	6+775,769	140	66,592	66,592	8,005	49,697	6,0%	0,60	40,0
13	6+852,043	7 580 451,381	428 973,000	46°01'59,30"	6+776,615	6+921,061	130	75,428	75,428	11,801	64,446	6,0%	0,60	40,0
14	7+026,569	7 580 585,374	428 851,412	- 51°23'51,41"	6+983,392	7+065,554	47	43,176	43,176	6,723	2,162	10,0%	1,80	40,0
15	7+246,937	7 580 571,200	428 627,300	106°01'40,81"	7+172,608	7+284,181	43	74,329	74,329	30,115	47,573	8,5%	1,80	32,0

Fuente: Diseño final asfaltado tramo vial "Campo Pajoso – Carapari-Palos Blancos

De la tabla 3.6 de resumen mostrada obtenemos los datos geométricos de las distintas curvas horizontales, que para el estudio necesitamos como dato el radio de curvatura y peralte con la que fue diseñada cada curva horizontal.

Tabla 3.6. Radios y peraltes de las distintas curvas a ser evaluadas

Nro. de curva	TS	ST	Radio (m)	e (%)
1	4+323.509	4+621.364	260	6.0%
2	4+825.983	5+140.219	300	6.0%
3	5+320.416	5+534.472	150	8.0%
4	5+695.615	5+822.882	50	10.0%
5	5+874.070	5+945.245	40	9.0%
6	5+949.051	6+060.820	100	7.5%
7	6+082.388	6+164.428	55	10.0%
8	6+168.755	6+262.760	55	10.0%
9	6+282.093	6+370.580	47	10.0%
10	6+371.255	6+466.509	47	10.0%
11	6+507.869	6+620.614	47	10.0%
12	6+646.073	6+775.769	140	6.0%
13	6+776.615	6+921.061	130	6.0%
14	6+983.392	7+065.554	47	10.0%
15	7+172.608	7+284.181	43	8.5%

Fuente: Se obtuvo en base al diseño geométrico del tramo vial campo pajoso – caraparí – palos blancos

3.6. AFORO DE VELOCIDADES DE PUNTO EN CURVAS HORIZONTALES

El método de aforo que se utilizó en el presente proyecto es el método de aforo manual el cual consiste en el llenado de planillas elaboradas de acuerdo al tipo de datos a recabar en la vía, el cual estuvo a cargo de la recolección de datos de aforos varias personas.

3.6.1. Puntos de aforo

Los puntos de aforo fueron ubicados en lugares estratégicos en lugares que no fueran detectados por los vehículos pesados que transitan en las diferentes curvas de estudio, puesto que se observó que a la presencia de un personal de aforo los vehículos reducían su velocidad evitando así el aforo preciso de la velocidad de punto, estos puntos de aforo se ubican al inicio de cada curva y ocultos en la maleza.

Figura 3.9. Punto de aforo curva 6



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.9 se observa la visión del punto de aforo de la curva 6 el cual presenta un radio de curvatura de 100m y peralte de 7.5%, el cual es ideal para la ubicación del punto de aforo.

Figura 3.10. Punto de aforo de la curva 8



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.10 se observa la curva 8, el círculo presenta el punto ideal para ubicarse y tener una mayor precisión al momento de realizar los aforos de los vehículos pesados.

Figura 3.11. Punto de aforo de la curva 5



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.11 se observa el punto de aforo de la curva 5 y la visión de aforo que presenta esta, el cual nos presenta un fácil aforo debido a la ubicación por ende se toma como un punto de aforo.

Esta curva 5 es una de las más críticas el cual presenta el tramo en estudio, con una geometría de radio de curvatura de 40m y peralte de 9%, ubicado en las progresivas de inicio de curva y fin de curva de $TS= 5+874.070$, $ST= 5+945.245$.

Todos los puntos de aforo se ubican entre cada curva horizontal a ser aforadas, precisamente a una distancia de aforo de 25m del inicio de cada curva, para así tener una visión ideal a la hora de realizar el aforo de velocidades de los distintos vehículos pesados a ser evaluados.

3.6.2. Preparación previa para el aforo de velocidades

Una vez determinados los puntos de aforo se procede a la preparación de previa para realizar los aforos, los cuales son las siguientes.

Desmonte de poca magnitud en los puntos de aforo para así tener una mayor comodidad a la hora de aforar velocidades de los vehículos pesados que circulan por los puntos de aforo.

Figura 3.12. Imagen del punto de aforo de la curva 14



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.12 se observa el punto de aforo de la curva 14 el cual fue desmontada de poca magnitud como se observa el círculo, para evitar ser detectado de forma directa por los operadores de los vehículos pesados y así tomar un cronometrado de tiempo más preciso en los aforos.

Preparación previa de la planilla de aforo para los tipos de vehículos pesados a ser aforados, en la siguiente figura se muestra un el modelo de planilla a ser utilizado para realizar los aforos de velocidad.

Figura 3.13. Modelo de planilla de aforo

Aforo de carreteras				
Fecha	Día	Nº de curva	Estación de aforo	
Peralte %	Radio de curvatura(m)	TS=	Longitud de estudio	
		ST=	Hoja Nº	
Hora de aforo	Tipo de vehículo			
	Camiones semirremolque	Camiones semirremolque tractocamion	Camiones grandes 2ejes	Buses grandes 3ejes
	Tiempo cronometrado			
De 7:00 a 8:00				
De 9:00 a 10:00				
De 10:00 a 11:00				
De 11:00 a 12:00				
De 12:00 a 13:00				
De 13:00 a 14:00				
De 14:00 a 15:00				
De 15:00 a 16:00				
De 16:00 a 17:00				
De 17:00 a 18:00				

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.13 se observa el modelo de planilla de aforo que se utilizó para realizar los aforos de velocidad de los vehículos pesados que pasen por los puntos de aforos en las curvas horizontales a ser evaluadas.

Luego de detectadas y ubicadas los puntos de aforo se procede a la efectuar con el inicio de aforo en las 15 curvas horizontales a ser avaluadas, durante seis días, comenzando del día lunes 05/03/2018 y culminado el aforo el día sábado 10/03/2018, los horarios de aforo fueron todo el día de 7am a 6pm de cada día de aforo.

3.7. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS A SER UTILIZADOS

Los instrumentos utilizados para realizar los aforos fueron los siguientes:

Figura 3.14. Cronometro



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.14 se observa el cronometro que fue utilizado para realizar los aforos de cronometrado tiempo de los distintos vehículos pesados a estudiar.

Figura 3.15. Huincha de lona



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.15 se observa la huincha de lona el cual fue utilizado para la medición de la distancia de 25 m en todas las curvas horizontales a ser evaluadas y realizar los aforos de forma manual.

También se utilizó pintura en spray para marcar los límites de aforo de 25 metros y realizar los aforos de velocidad de vehículos pesados.

Equipo de montaña botas, machete y bolsa de protección contra la lluvia, el cual es indispensable para el tipo de zona de estudio puesto que se detectaba altas temperaturas como también excesiva humedad y dado la ubicación de aforo la subida del aguaragüe el cual es una serranía en la cual la precipitación de lluvia se da en cualquier instante, con ese equipo se evitara accidentes tanto de persona como a la hora de tomar los aforos.

3.8. VELOCIDADES DE PUNTO AFORADAS

Los cálculos del anexo C de aforos de cronometrado de tiempo se realizaron luego de la eliminación de datos de tiempo extremadamente bajas y se mantuvieron los cronometrado de tiempo con un margen de tiempo de desviación aceptable, luego se realizó el análisis estadístico de todas las planillas de aforo hallando la media y desviación estándar de los datos obtenidos mostrados en el anexo C, para luego realizar el muestreo aleatorio sin reposición a todas las planillas de aforo mediante la calculadora de muestreo aleatorio obtenidas de la web (<http://www.generarnumerosaleatorios.com/>) mostrados el anexo D y así trabajar con un tamaño de muestra adecuado a un nivel de confianza del 90%.

Una vez realizado el análisis estadístico y muestreo aleatorio sin reposición se procedió al cálculo de la velocidad mediante la ecuación $V=d/t$, y hallar la velocidad media en cada curva de todos los vehículos en estudio, dando como resultado las siguientes tablas de resumen de velocidad mostradas a continuación.

Estas tablas de velocidades se obtienen a partir del análisis estadístico el cual se encuentran en unidades de km/hr, con estas velocidades de punto se obtiene las velocidades de distribución normal.

Tabla 3.7. Velocidades medias (lunes)

Lunes	Velocidad media (km/h)						
	Semirremolque		Tractocamión		C2		C3
No curva	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
15	26.2	22.3	29.7	30.2	33.2	38.1	38.5
14	24.5	24.9	29.1	23.7	38.7	39.6	43.9
13	23.7	23.0	33.9	39.8	35.0	32.3	38.8
12	28.8	26.0	29.1	30.9	35.3	27.4	32.5
11	24.8	23.9	28.4	30.2	32.3	31.7	31.6
10	24.8	22.6	29.9	32.0	32.8	31.1	32.6
9	26.2	23.7	27.7	29.5	30.3	30.2	30.2
8	25.1	24.7	24.1	25.9	33.2	31.4	34.2
7	24.2	20.6	24.7	26.2	28.0	31.0	31.5
6	24.7	26.5	28.8	24.9	34.1	36.5	39.7
5	17.8	22.4	28.7	25.0	36.2	30.9	39.1
4	24.2	26.1	29.7	30.0	26.5	29.0	40.4
3	26.6	26.6	32.0	30.4	37.3	39.0	35.9
2	29.3	31.3	46.8	39.6	43.3	40.8	45.1
1	24.2	27.5	33.1	32.8	47.9	49.0	39.8

Fuente: Elaboración propia

Donde:

↑ = Subida de vehículos pesados

↓ = Bajada de vehículos pesados

Camión semirremolque CSR, peso máximo 45 ton.

Camión semirremolque CSR tractocamión, peso máximo 45 ton.

C2 = Camión grande tipo mayor a 10 Ton de 2 ejes, peso máximo 18 ton.

C3 = Buses más de 35 pasajeros de 3 ejes, peso máximo 25 ton.

Tabla 3.8. Velocidades medias (martes)

Martes	Velocidad media V (km/h)						
	Semirremolque		Tractocamión		C2		C3
No curva	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
15	27.3	23.6	32.0	30.0	35.3	36.5	37.3
14	27.0	26.1	32.3	34.4	36.2	25.1	31.4
13	20.9	22.7	35.2	32.6	35.0	32.6	40.7
12	29.5	28.7	31.6	29.5	31.9	31.1	36.7
11	25.8	25.2	27.7	30.6	28.8	28.7	33.1
10	26.3	25.3	32.5	36.1	30.3	32.5	37.0
9	24.0	23.0	28.9	31.9	30.8	32.3	31.5
8	26.8	20.7	28.1	27.2	32.1	32.9	36.8
7	27.4	22.1	29.9	29.5	31.8	37.0	34.5
6	26.8	26.9	34.4	26.6	47.6	47.4	37.0
5	24.1	22.6	28.2	29.3	41.3	35.8	40.2
4	22.8	23.7	30.0	33.6	30.0	34.0	40.5
3	27.5	30.6	29.6	32.3	49.2	37.8	41.3
2	31.6	33.1	45.0	44.0	48.1	51.5	46.3
1	28.2	25.4	33.5	39.1	41.3	51.6	44.3

Fuente: Elaboración propia

Donde:

↑ = Subida de vehículos pesados

↓ = Bajada de vehículos pesados

Camión semirremolque CSR, peso máximo 45 ton.

Camión semirremolque CSR tractocamión, peso máximo 45 ton.

C2 = Camión grande tipo mayor a 10 Ton de 2 ejes, peso máximo 18 ton.

C3 = Buses más de 35 pasajeros de 3 ejes, peso máximo 25 ton.

Tabla 3.9. Velocidades medias (miércoles)

Miércoles	Velocidad media V (km/h)						
	Semirremolque		Tractocamión		C2		C3
No curva	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
15	23.0	26.3	38.7	33.3	31.9	33.3	42.1
14	26.0	27.6	27.4	27.8	32.1	32.1	42.1
13	22.1	27.2	29.3	32.3	38.1	31.1	47.6
12	24.4	32.2	30.5	29.5	31.7	29.4	45.9
11	24.0	27.9	28.3	27.7	34.2	34.7	37.5
10	24.7	25.4	31.8	27.0	34.5	28.3	42.0
9	24.2	28.6	32.8	29.5	28.9	32.0	37.6
8	22.0	24.4	24.8	29.5	32.0	28.9	36.3
7	24.2	25.0	26.8	25.6	32.7	33.7	34.6
6	29.2	29.6	30.9	30.0	46.0	41.9	47.4
5	20.7	20.8	27.9	31.3	34.5	38.6	36.8
4	24.5	24.3	27.1	25.7	26.9	30.4	33.9
3	26.5	31.1	29.9	29.5	38.3	32.3	37.1
2	30.3	34.2	46.4	44.7	43.2	44.3	67.2
1	29.9	28.3	37.6	35.6	45.2	52.3	50.8

Fuente: Elaboración propia

Donde:

↑ = Subida de vehículos pesados

↓ = Bajada de vehículos pesados

Camión semirremolque CSR, peso máximo 45 ton.

Camión semirremolque CSR tractocamión, peso máximo 45 ton.

C2 = Camión grande tipo mayor a 10 Ton de 2 ejes, peso máximo 18 ton.

C3 = Buses más de 35 pasajeros de 3 ejes, peso máximo 25 ton.

Tabla 3.10. Velocidades medias (jueves)

Jueves	Velocidad media V (km/h)						
	Semirremolque		Tractocamión		C2		C3
No curva	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
15	28.2	23.5	30.1	31.9	33.7	36.4	35.7
14	27.5	25.6	25.8	29.6	38.4	37.6	36.9
13	27.8	23.2	38.0	35.8	33.1	32.8	35.2
12	30.3	32.1	31.9	28.7	33.9	31.1	31.6
11	25.3	22.3	29.5	25.1	33.7	33.8	28.4
10	27.4	23.0	28.6	28.6	33.6	28.4	32.8
9	24.1	22.8	33.7	29.4	33.3	31.7	29.3
8	25.3	24.4	28.5	25.2	27.1	30.8	34.5
7	23.7	21.2	26.4	32.3	31.5	33.3	28.9
6	30.7	29.0	34.7	30.6	46.3	40.9	36.8
5	23.3	23.1	27.3	28.7	34.9	33.2	40.7
4	24.5	26.6	25.8	28.7	28.2	25.0	34.2
3	30.9	23.7	31.8	36.1	34.6	35.6	38.3
2	45.0	31.2	43.5	40.5	49.7	48.9	42.3
1	26.3	32.6	34.5	31.9	55.6	49.3	40.0

Fuente: Elaboración propia

Donde:

↑ = Subida de vehículos pesados

↓ = Bajada de vehículos pesados

Camión semirremolque CSR, peso máximo 45 ton.

Camión semirremolque CSR tractocamión, peso máximo 45 ton.

C2 = Camión grande tipo mayor a 10 Ton de 2 ejes, peso máximo 18 ton.

C3 = Buses más de 35 pasajeros de 3 ejes, peso máximo 25 ton.

Tabla 3.11. Velocidades medias (viernes)

Viernes	Velocidad media V (km/h)						
	Semirremolque		Tractocamión		C2		C3
No curva	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
15	27.3	25.1	31.6	33.5	35.4	31.9	34.2
14	24.9	30.8	24.7	27.9	33.0	35.3	38.2
13	24.13	20.99	31.0	34.4	30.2	29.7	31.5
12	29.0	26.2	32.4	31.7	34.2	37.6	33.3
11	24.9	24.8	25.8	25.1	29.7	28.0	28.8
10	26.9	22.9	35.6	30.8	30.9	31.3	33.8
9	26.7	24.1	28.6	30.1	29.2	32.1	31.5
8	24.4	26.1	30.6	23.8	30.4	31.2	30.5
7	24.8	20.4	26.3	26.3	36.4	31.7	32.8
6	25.4	23.3	27.0	31.8	40.0	38.6	37.3
5	24.8	23.4	28.0	25.5	28.9	32.3	38.5
4	28.4	23.9	27.3	28.5	24.7	27.4	31.3
3	27.2	26.0	29.5	33.7	33.8	35.0	37.1
2	32.9	31.3	43.0	41.4	41.6	47.2	50.0
1	27.9	27.8	33.0	34.8	44.6	46.3	43.3

Fuente: Elaboración propia

Donde:

↑ = Subida de vehículos pesados

↓ = Bajada de vehículos pesados

Camión semirremolque CSR, peso máximo 45 ton.

Camión semirremolque CSR tractocamión, peso máximo 45 ton.

C2 = Camión grande tipo mayor a 10 Ton de 2 ejes, peso máximo 18 ton.

C3 = Buses más de 35 pasajeros de 3 ejes, peso máximo 25 ton.

Tabla 3.12. Velocidades medias (sábado)

Sábado	Velocidad media V (km/h)						
	Semirremolque		Tractocamión		C2		C3
No curva	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
15	25.4	26.2	31.9	28.0	32.6	33.2	39.1
14	25.4	28.4	28.1	31.1	30.8	29.2	38.6
13	26.0	23.7	30.3	29.3	35.6	36.7	31.3
12	33.8	27.0	34.0	33.5	30.9	31.1	39.0
11	29.0	30.4	32.8	29.5	31.9	31.1	30.7
10	24.5	23.1	24.4	29.7	29.4	36.2	32.1
9	23.2	24.0	30.9	33.8	34.6	28.0	36.0
8	26.1	25.3	34.4	30.3	31.2	26.9	32.1
7	24.9	29.2	32.0	30.6	33.4	36.9	33.3
6	26.7	25.1	28.6	33.1	38.9	35.7	31.6
5	21.8	23.9	29.9	30.0	34.1	35.5	33.2
4	23.7	22.4	24.7	25.7	31.6	28.6	29.4
3	31.3	25.8	28.9	32.0	35.6	32.6	39.1
2	36.6	33.8	43.3	42.9	37.1	35.4	47.4
1	25.7	26.4	37.5	38.1	43.8	43.7	41.3

Fuente: Elaboración propia

Donde:

↑ = Subida de vehículos pesados

↓ = Bajada de vehículos pesados

Camión semirremolque CSR, peso máximo 45 ton.

Camión semirremolque CSR tractocamión, peso máximo 45 ton.

C2 = Camión grande tipo mayor a 10 Ton de 2 ejes, peso máximo 18 ton.

C3 = Buses más de 35 pasajeros de 3 ejes, peso máximo 25 ton

En las tablas mostradas se muestra el resumen de velocidades en las curvas horizontales luego de hacer el análisis estadístico y muestreo aleatorio sin reposición mostrados en el anexo C aplicados a las planillas de aforos.

3.9. PROCESAMIENTO DE DATOS

3.9.1. Funciones de estado límite

La función de estado límite (FEL) corresponde a la ecuación 3.1, en donde a_c es la aceleración de operación y $a_{c,lim}$ es la aceleración límite tal que ocurra rollover. La condición límite de la Ecuación 3.1 corresponde a la condición la cual $G(X) = 0$.

$$G(X) = a_{c,lim} - a_c \quad (3.1)$$

Considerando las ecuaciones 2.3 a 2.4 se definieron 4 FEL (ecuaciones 3.2 a 3.3). En las funciones $G_1(x)$ y $G_2(x)$ se usaron los modelos $SRT_{RIG-EXT}$ (ecuación 2.5) y $SRT_{RIG-INT}$ (Ecuación 2.6). En las funciones $G_3(x)$ y $G_4(x)$ se usaron los modelos SRT_{AM-EXT} (ecuación 3.4) y SRT_{AM-INT} (ecuación 3.5).

$$G_1(x) = \frac{\frac{t}{2h} + p}{1 - \frac{t}{2h}p} - \left(\frac{v^2}{gR} - p \right) \quad (3.2)$$

$$G_2(x) = \frac{\frac{t}{2h} - p}{1 + \frac{t}{2h}p} - \left(\frac{v^2}{gR} - p \right) \quad (3.3)$$

$$G_3(x) = \frac{\frac{t}{2h} + p}{\left[r_\phi \left(1 - \frac{h_\phi}{h} \right) + 1 - \frac{t}{2h}p \right]} - \left(\frac{v^2}{gR} - p \right) \quad (3.4)$$

$$G_4(x) = \frac{\frac{t}{2h} - p}{\left[r_\phi \left(1 - \frac{h_\phi}{h} \right) + 1 + \frac{t}{2h}p \right]} - \left(\frac{v^2}{gR} - p \right) \quad (3.5)$$

3.9.2. 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 semirremolque CSR

Vehículo Tipo 2 (T2)=Camión semirremolque CSR tipo tractocamión

Vehículo Tipo 3 (T3)=Camión grande 2 ejes C2

Vehículo Tipo 4 (T4)=Bus grande 3 ejes C3

La tabla 3.13 resume las características geométricas del tipo de vehículo utilizados en el análisis. En el caso de la trocha, centro de balanceo y centro de gravedad se consideraron como variables aleatorias. Todas las demás variables se consideran determinadas por sus respectivos valores.

Tabla 3.13. Variables geométricas de los tipos de vehículos pesados

Tipo de vehículo pesados	Centro de Gravedad C.G. (m)	Suspensión de resortes		Suspensión de aire	
		Centro de Balanceo C.B. (m)	Ancho trocha t (m)	Centro de Balanceo C.B. (m)	Ancho trocha t (m)
(T1)	2.49	0.62	2.03	0.71	1.83
(T2)	1.3	0.62	2.03	0.71	1.83
(T3)	2.12	0.62	2.03	0.707	1.85
(T4)	2.26	0.62	2.03	0.71	1.86

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.14 muestra las variables geometrías de las curvas horizontales las cuales fueron obtenidas en base al diseño final del tramo vial “Campo Pajoso – Caraparí-Palos Blancos “.

Tabla 3.14. Variable geométrica de curvas horizontales

Nro. curva	Radio de curvatura (m)	Peralte (%)
15	43	8.5
14	47	10
13	130	6
12	140	6
11	47	10
10	47	10
9	47	10
8	55	10
7	55	10
6	100	7.5
5	40	9
4	50	10
3	150	8
2	300	6
1	260	6

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.15 muestra un resumen de velocidades medias de punto consideradas. Éstas se obtuvieron del aforo de velocidades, el cual pasaron por un análisis estadístico y muestreo aleatorio sin reposición.

Al final se obtuvieron velocidades en cada curva el cual está definido por una distribución normal el cual posee una media μ_v y desviación estándar σ_v y se la designa de la siguiente manera $N(\mu_v ; \sigma_v)$, tal como se muestra en la tabla 3.15 de distribución normal de velocidades.

Tabla 3.15. Distribución normal de velocidades de punto

Nro. curva	T1		T2		T3		T4	
	N (μ_v ; σ_v)		N (μ_v ; σ_v)		N (μ_v ; σ_v)		N (μ_v ; σ_v)	
15	25.54	0.81	31.70	2.39	34.07	1.54	37.81	2.76
14	26.48	0.94	28.53	2.73	34.01	3.80	38.52	4.35
13	23.39	1.41	33.34	2.70	33.35	2.04	37.51	6.25
12	29.00	1.56	31.41	1.74	32.53	2.45	36.51	5.37
11	24.90	0.79	28.30	1.68	31.37	2.59	31.70	3.34
10	24.53	0.94	30.07	2.41	30.69	1.21	35.06	3.80
9	24.31	1.10	31.40	1.59	30.71	0.89	32.68	3.33
8	24.71	0.97	27.40	2.52	30.39	1.66	34.06	2.42
7	23.89	1.98	27.89	2.25	32.91	1.82	32.60	2.14
6	27.12	2.12	29.88	2.00	39.79	3.42	38.31	5.17
5	22.25	1.52	27.85	0.92	34.39	2.35	38.09	2.76
4	24.45	1.20	28.39	2.42	28.10	2.11	34.95	4.65
3	27.27	1.00	31.45	1.12	35.61	1.67	38.13	1.91
2	32.21	1.51	42.68	1.01	44.84	4.98	49.70	8.93
1	27.47	1.07	35.16	2.16	47.29	2.62	43.26	4.12

Fuente: Elaboración propia

3.10. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE LA CONFIABILIDAD

3.10.1. Aplicación del método de primer orden FORM

Para hallar las probabilidades de falla es necesario usar el programa "solver" de la planilla Excel el cual itera valores en función al estado límite y nos permite determinar la velocidades de estado límite.

Tabla 3.16 Velocidades de estado límite para vehículos pesados T1

Nro. de curva	T1 Suspensión aire				T1 Suspensión resorte			
	Modelo Kühn		Modelo Gillespie		Modelo Kühn		Modelo Gillespie	
	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior
15	55	44	55	44	57	47	56	46
14	59	46	59	46	61	49	60	48
13	91	77	90	76	94	81	93	80
12	94	80	94	79	98	84	96	83
11	59	46	59	46	61	49	60	48
10	59	46	59	46	61	49	60	48
9	59	46	59	46	61	49	60	48
8	64	50	64	49	66	53	65	52
7	64	50	64	49	66	53	65	52
6	82	68	82	67	85	71	84	70
5	54	43	53	42	56	45	55	44
4	61	48	61	47	63	50	62	49
3	102	83	101	82	106	87	104	86
2	138	117	137	115	143	123	141	122
1	128	109	128	107	134	115	131	113
Vmin=	54	43	53	42	56	45	55	44

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.16 se observa que la velocidad límite para que empiece a presentar la probabilidad de ocurrencia de rollover al interior es de 42 km/h, el cual ocurre en la curva 5 el cual presenta un radio de 40 m y peralte de 9%, esto se da para el modelo de rollover estático al interior de Gillespie, para vehículos con suspensión de aire.

La tabla 3.16 se observa también las diferentes iteraciones de velocidades límites para las distintas curvas y modelos a ser aplicados. Se puede observar que la velocidad límite

más crítica es de 44km/h, dado en la curva 5, para el modelo de Gillespie, que presentan vehículos con suspensión de resorte.

Tabla 3.17. Velocidades de estado límite para vehículos pesados T2

Nro. de curva	T2 Suspensión aire				T2 Suspensión resorte			
	Modelo Kühn		Modelo Gillespie		Modelo Kühn		Modelo Gillespie	
	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior
15	71	60	69	59	74	63	73	62
14	76	63	74	62	79	66	78	65
13	119	106	116	104	125	111	122	109
12	124	110	121	108	129	115	126	113
11	76	63	74	62	79	66	78	65
10	76	63	74	62	79	66	78	65
9	76	63	74	62	79	66	78	65
8	82	68	80	67	86	72	84	70
7	82	68	80	67	86	72	84	70
6	107	92	104	91	112	97	109	95
5	69	58	67	57	72	61	71	60
4	78	65	77	64	82	68	80	67
3	132	113	129	111	138	119	135	116
2	181	161	177	157	190	169	185	165
1	168	150	164	147	176	157	172	154
V _{min} =	69	58	67	57	72	61	71	60

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.17 se observan las iteraciones de vehículos pesados T2 para sistema de suspensión de aire, el cual se observa que la velocidad crítica a ocurrir la presencia de rollover es de 57km/h el cual se da en la curva 5 que presenta una geometría de radio de curvatura 40m y peralte de 9% .

Observando las iteraciones de velocidades de la tabla 3.17 para los distintos modelos de rollover para vehículos pesados de suspensión de resorte la velocidad crítica a ocurrir rollover es de 60km/h, esto ocurre en la curva 5 y al interior de la curva, para vehículos tipo T2.

De la tabla 3.17 se observa que ambos presentan velocidades elevadas para que ocurra una probabilidad de rollover tanto interno como externo para radios de 150m, 300m y 260m y peraltes de 8%, 6% y 6% respectivamente, esto se da en las curvas 3, 2 y 1 de las curvas evaluadas, para ambos tipos de vehículos tanto con suspensión de resorte como de aire.

Tabla 3.18. Velocidades de estado límite para vehículos pesados T3

Nro. de curva	T3 Suspensión aire				T3 Suspensión resorte			
	Modelo Kühn		Modelo Gillespie		Modelo Kühn		Modelo Gillespie	
	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior
15	59	48	57	47	61	50	60	50
14	63	50	62	50	65	53	64	52
13	97	84	95	84	101	88	99	86
12	101	87	99	87	105	91	103	90
11	63	50	62	50	65	53	64	52
10	63	50	62	50	65	53	64	52
9	63	50	62	50	65	53	64	52
8	68	54	67	54	70	57	69	56
7	68	54	67	54	70	57	69	56
6	88	73	86	73	91	77	89	76
5	57	46	56	46	59	49	58	48
4	65	52	64	52	67	54	66	53
3	108	90	106	90	112	94	110	93
2	147	128	144	128	153	133	150	131
1	137	119	135	119	143	124	140	122
Vmin=	57	46	56	46	59	49	58	48

Fuente: Elaboración propia

Las tablas 3.18 nos muestra que la velocidad critica a ocurrir la probabilidad de rollover estático al interior es 46km/h el cual se presenta en la curva 5 con características geométricas de radio de curvatura de 40m y peralte de 9%, para vehículos de tipo T3 de suspensión de aire .

De la tabla 3.18 se observa velocidades iteradas de los modelos a estado límite, el cual se observa que la velocidad crítica es de 48km/h, al interior de la curva del modelo de Gillespie, para vehículos pesados de suspensión de resorte, el cual se da también en la curva 5 para el vehículo tipo T3.

También se observa que para que exista rollover al exterior las velocidades máximas son de 106 a 140 km/h para las curvas 1, 2 y 3 de radios 260m, 300m y 260m respectivamente.

Tabla 3.19. Velocidades de estado límite para vehículos pesados T4

Nro. de curva	T4 Suspensión aire				T4 Suspensión resorte			
	Modelo Kühn		Modelo Gillespie		Modelo Kühn		Modelo Gillespie	
	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior	V(km/h) Exterior	V(km/h) Interior
15	57	47	56	46	59	49	58	48
14	62	49	60	48	64	51	62	50
13	95	82	93	80	98	85	96	84
12	98	85	96	83	102	88	100	87
11	62	49	60	48	64	51	62	50
10	62	49	60	48	64	51	62	50
9	62	49	60	48	64	51	62	50
8	67	53	65	52	69	55	68	54
7	67	53	65	52	69	55	68	54
6	86	71	84	70	89	75	87	73
5	56	45	55	44	58	47	57	46
4	63	50	62	50	66	53	64	52
3	106	87	104	86	110	91	108	90
2	144	124	141	122	149	129	146	127
1	134	115	131	113	139	120	136	118
Vmin=	56	45	55	44	58	47	57	46

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.19 se observa que la curva más crítica para el vehículo T4 es la curva 5 y 15 con velocidad de 44km/h y 46km/h respectivamente, al rollover interior éstas se da para el modelo de Gillespie, esto se da para vehículos con suspensión de aire.

Para la tabla 3.19 se observa que la velocidad mínima crítica a que ocurra la probabilidad de falla es de 46km/h ocurridas en la curva 5, esto se da para vehículos pesados tipo T4 de suspensión de resorte.

Las velocidades críticas para que exista rollover al exterior son elevadas, más en radios grandes que comprenden radios de 260m, 300m y 260m que son de las curvas 1, 2 y 3 respectivamente.

3.10.2. Aplicación del índice de confiabilidad de Hasofer-Lind y probabilidad de falla

Para la aplicación del índice de confiabilidad de Hasofer- Lind se requiere de una iteración de la ecuación al estado limite $G^*(x)=0$ respecto a la variables para así obtener la velocidad limite y con esta aplicar la ecuación de Hasofer- Lind sujeto al estado limite y obtener la confiabilidad.

$$\beta_{HL} = \text{minimo}_{xi} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu_{xi}}{\sigma_{xi}} \right)^2}$$

Sujeto a:

$$G_x^*(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

Con el índice de confiabilidad se procede a aplicar probabilidades de distribución normal así obtener las probabilidades de falla ocurridas en cada curva respecto a cada tipo de vehículo y así como también al tipo de modelo de rollover a aplicar.

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

Donde:

β_{HL} = Índice de confiabilidad de Hasofer Lind

P_f = Probabilidad de falla

Del anexo F de Índice de seguridad global, probabilidades de falla y confiabilidad rescatamos un resumen en las siguientes tablas a mostrar, la aplicación de la teoría de confiabilidad de primer orden FORM y probabilidades de falla para las diferentes curvas.

Tabla 3.20. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T1 suspensión de aire modelo Kühn

Nro. de curva	Modelo Kühn			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf
15	36%	0.64	23%	0.77
14	35%	0.65	21%	0.79
13	48%	0.52	38%	0.62
12	42%	0.58	33%	0.67
11	43%	0.57	27%	0.73
10	37%	0.63	23%	0.77
9	32%	0.68	20%	0.80
8	41%	0.59	26%	0.74
7	20%	0.80	13%	0.87
6	26%	0.74	19%	0.81
5	21%	0.79	13%	0.87
4	30%	0.70	19%	0.81
3	74%	0.26	55%	0.45
2	70%	0.30	57%	0.43
1	94%	0.06	76%	0.24
Max. parcial Pf=		0.80		0.87
Min. parcial Pf=		0.06		0.24

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T1 suspensión aire modelo Gillespie

Nro. de curva	Modelo Gillespie			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf
15	36%	0.64	22%	0.78
14	35%	0.65	20%	0.80
13	48%	0.52	37%	0.63
12	42%	0.58	32%	0.68
11	43%	0.57	26%	0.74
10	37%	0.63	22%	0.78
9	31%	0.69	19%	0.81
8	40%	0.60	25%	0.75
7	20%	0.80	13%	0.87
6	26%	0.74	19%	0.81
5	20%	0.80	13%	0.87
4	30%	0.70	19%	0.81
3	74%	0.26	54%	0.46
2	70%	0.30	55%	0.45
1	94%	0.06	74%	0.26
Max. parcial Pf=		0.80		0.87
Min. parcial Pf=		0.06		0.26

Fuente: Elaboración propia

En las tablas 3.20 y 3.21 se muestra la aplicación de la teoría de confiabilidad, método de primer orden FORM el cual establece un estado límite $G(X) = 0$, a través de está utilizando el programa "solver" se estiman los límites de velocidad y con esta estimar la probabilidad de falla que ocurre en cada curva horizontal, la probabilidad de falla se encuentra a través del índice de confiabilidad de Hasofer-Lind a un estado límite.

Luego de hallado el coeficiente de seguridad global que presenta cada modelo en cada curva horizontal el cual este coeficiente estima la seguridad de cada modelo de rollover

a aplicarse su valor se estima de 0 que es el estado limite a ocurrir rollover a 1 que es el margen de seguridad máxima, también se puede apreciar que las curvas 7 y 5 presentan la alta probabilidad de ocurrencia de falla en ambos modelos de rollover estático.

Tabla 3.22. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T1 suspensión resorte modelo Kühn

Nro. de curva	Modelo Kühn			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf
15	39%	0.61	26%	0.74
14	37%	0.63	23%	0.77
13	50%	0.50	41%	0.59
12	44%	0.56	36%	0.64
11	46%	0.54	30%	0.70
10	39%	0.61	26%	0.74
9	34%	0.66	22%	0.78
8	43%	0.57	29%	0.71
7	21%	0.79	15%	0.85
6	28%	0.72	21%	0.79
5	22%	0.78	15%	0.85
4	32%	0.68	21%	0.79
3	78%	0.22	59%	0.41
2	74%	0.26	61%	0.39
1	99%	0.01	81%	0.19
Max. parcial Pf=		0.79		0.85
Min. parcial Pf=		0.01		0.19

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.23. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T1 suspensión resorte
modelo Gillespie

Nro. de curva	Modelo Gillespie			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf
15	38%	0.62	25%	0.75
14	36%	0.64	23%	0.77
13	49%	0.51	40%	0.60
12	43%	0.57	35%	0.65
11	45%	0.55	29%	0.71
10	38%	0.62	25%	0.75
9	33%	0.67	21%	0.79
8	42%	0.58	28%	0.72
7	21%	0.79	14%	0.86
6	27%	0.73	20%	0.80
5	21%	0.79	14%	0.86
4	31%	0.69	21%	0.79
3	76%	0.24	58%	0.42
2	72%	0.28	59%	0.41
1	97%	0.03	80%	0.20
Max. parcial Pf=		0.79		0.86
Min. parcial Pf=		0.03		0.20

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.22 y 3.23 se observa la probabilidad de falla para vehículos pesados T1 con suspensión de resorte el cual representan un ancho de trocha 2.03m, centro de balanceo respecto el piso 0.62m y centro de gravedad de 2.49m respecto el piso. En el cual se puede observar que las que tienen alta probabilidad de falla son las curvas horizontales 7 y 5.

Las probabilidad máxima de falla es de 0.86 al interior del modelo de Gillespie el cual se da en curvas 7y5, el cual presenta una geometría de radios 55, 50 m respectivamente con peralte de 10% en ambas curvas, así como también se observa que la probabilidad mínima ocurre en la curva 1 el cual presenta un radio 260m y peralte de 6%.

Tabla 3.24. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T2 suspensión aire modelo de Kühn

Nro. de curva	Modelo Kühn			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf %	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf %
15	16%	0.84	12%	0.88
14	17%	0.83	13%	0.87
13	32%	0.68	27%	0.73
12	53%	0.47	45%	0.55
11	28%	0.72	21%	0.79
10	19%	0.81	14%	0.86
9	28%	0.72	20%	0.80
8	22%	0.78	16%	0.84
7	24%	0.76	18%	0.82
6	39%	0.61	31%	0.69
5	45%	0.55	33%	0.67
4	21%	0.79	15%	0.85
3	89%	0.11	73%	0.27
2	100%	0.00	100%	0.00
1	62%	0.38	53%	0.47
Max. parcial Pf=		0.84		0.88
Min. parcial Pf=		0.00		0.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.25. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T2 suspensión aire modelo de Gillespie

Nro. de curva	Modelo Gillespie			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf %	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf %
15	16%	0.84	12%	0.88
14	17%	0.83	12%	0.88
13	31%	0.69	26%	0.74
12	51%	0.49	44%	0.56
11	27%	0.73	20%	0.80
10	18%	0.82	13%	0.87
9	27%	0.73	19%	0.81
8	21%	0.79	16%	0.84
7	23%	0.77	17%	0.83
6	37%	0.63	30%	0.70
5	43%	0.57	32%	0.68
4	20%	0.80	15%	0.85
3	87%	0.13	71%	0.29
2	100%	0.00	100%	0.00
1	60%	0.40	52%	0.48
Max. parcial Pf=		0.84		0.88
Min. parcial Pf=		0.00		0.00

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.24 y 3.25 se observa la probabilidad de falla para vehículos pesados T2 con suspensión de aire el cual representan un ancho de trocha 1.83m, centro de balanceo respecto el piso 0.62m y centro de gravedad de 1.3m respecto el piso. En el cual se puede observar que las que tienen alta probabilidad de falla son las curvas horizontales 15 y 14, con probabilidades de falla 0.88 al interior de la curva tanto para el modelo Kuhn y de Gillespie.

Estas curvas presentan un radio de curvatura de 43 y peralte 8.5% en la curva 15 y en la curva 14 presenta un radio de curvatura de 47m con un peralte de 10%, siendo estas curvas las más críticas a sufrir rollover.

Tabla 3.26. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T2 suspensión resorte modelo Kuhn

Nro. de curva	Modelo Kuhn			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf
15	18%	0.82	13%	0.87
14	19%	0.81	14%	0.86
13	34%	0.66	29%	0.71
12	56%	0.44	48%	0.52
11	30%	0.70	22%	0.78
10	20%	0.80	15%	0.85
9	30%	0.70	22%	0.78
8	23%	0.77	17%	0.83
7	26%	0.74	19%	0.81
6	41%	0.59	34%	0.66
5	48%	0.52	36%	0.64
4	22%	0.78	16%	0.84
3	95%	0.05	78%	0.22
2	100%	0.00	100%	0.00
1	66%	0.34	57%	0.43
Max. parcial Pf=		0.82		0.87
Min. parcial Pf=		0.00		0.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.27. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T2 suspensión resorte
modelo Gillespie

Nro. de curva	Modelo Gillespie			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf
15	17%	0.83	13%	0.87
14	18%	0.82	13%	0.87
13	33%	0.67	28%	0.72
12	55%	0.45	47%	0.53
11	29%	0.71	22%	0.78
10	20%	0.80	14%	0.86
9	29%	0.71	21%	0.79
8	22%	0.78	17%	0.83
7	25%	0.75	19%	0.81
6	40%	0.60	33%	0.67
5	46%	0.54	35%	0.65
4	21%	0.79	16%	0.84
3	92%	0.08	76%	0.24
2	100%	0.00	100%	0.00
1	64%	0.36	55%	0.45
Max. parcial Pf=		0.83		0.87
Min. parcial Pf=		0.00		0.00

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.26 y 3.27 se puede observar las probabilidades de falla que sobre pasan el 0.5 al interior y son máximas en las curvas 15 y 14 que presentan radios de curvatura y peraltes de 43m, 47m, 8.5% y 10% respectivamente. Las probabilidad de falla máxima es de 0.87 al interior del modelo de Kuhn y Gillespie, para vehículos de tipo T2 con ancho de trocha 1.83m, altura de centro de balanceo 0.71m y centro de gravedad de 1.3m.

También se observa que la máxima probabilidad de falla al exterior de 0.83 esto se da en la curva 15 del modelo de Gillespie.

Tabla 3.28. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T3 suspensión aire modelo Kühn

Nro. de curva	Modelo Kühn			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf %	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf %
15	16%	0.84	9%	0.91
14	8%	0.92	4%	0.96
13	31%	0.69	25%	0.75
12	28%	0.72	22%	0.78
11	12%	0.88	7%	0.93
10	27%	0.73	16%	0.84
9	36%	0.64	22%	0.78
8	23%	0.77	14%	0.86
7	19%	0.81	12%	0.88
6	14%	0.86	10%	0.90
5	10%	0.90	5%	0.95
4	17%	0.83	11%	0.89
3	44%	0.56	33%	0.67
2	21%	0.79	17%	0.83
1	34%	0.66	27%	0.73
Max. parcial Pf=		0.92		0.96
Min. parcial Pf=		0.56		0.67

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.29. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T3 suspensión aire modelo Gillespie

Nro. de curva	Modelo Gillespie			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf %	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf %
15	15%	0.85	9%	0.91
14	7%	0.93	4%	0.96
13	30%	0.70	25%	0.75
12	27%	0.73	22%	0.78
11	12%	0.88	7%	0.93
10	26%	0.74	16%	0.84
9	35%	0.65	22%	0.78
8	22%	0.78	14%	0.86
7	19%	0.81	12%	0.88
6	14%	0.86	10%	0.90
5	9%	0.91	5%	0.95
4	17%	0.83	11%	0.89
3	42%	0.58	33%	0.67
2	20%	0.80	17%	0.83
1	33%	0.67	27%	0.73
Max. parcial Pf=		0.93		0.96
Min. parcial Pf=		0.58		0.67

Fuente: Elaboración propia

El tabla 3.28 y 3.29 nos muestra un resumen de las probabilidades de falla obtenidas de las curvas analizadas, el cual presenta una probabilidad de falla máxima de 0.96 y 0.95 en la curva 14 y 5 respectivamente para vehículos tipo T3 con una geometría de radio de curvatura y peralte de 47m, 10% y 40m, 9% respectivamente de la curvas mencionadas. La probabilidad máxima hacia el exterior es de 0.93 en la curva 14, el cual se da para el modelo de Gillespie.

Las probabilidades de falla mínimas ocurren en la curva 3 con una probabilidad de 0.58 hacia el exterior del modelo de Gillespie y 0.56 en el modelo de Kühn para vehículos pesados con suspensión de aire, la curva de mínima probabilidad presenta una geometría de radio de 150m y peralte de 8%.

Tabla 3.30. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T3 suspensión resorte modelo Kuhn

Nro. de curva	Modelo Kühn			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf
15	17%	0.83	11%	0.89
14	8%	0.92	5%	0.95
13	33%	0.67	27%	0.73
12	29%	0.71	24%	0.76
11	13%	0.87	8%	0.92
10	29%	0.71	18%	0.82
9	39%	0.61	25%	0.75
8	24%	0.76	16%	0.84
7	21%	0.79	13%	0.87
6	15%	0.85	11%	0.89
5	10%	0.90	6%	0.94
4	18%	0.82	12%	0.88
3	46%	0.54	35%	0.65
2	22%	0.78	18%	0.82
1	36%	0.64	29%	0.71
Max. parcial Pf=		0.92		0.95
Min. parcial Pf=		0.54		0.65

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.31. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T3 suspensión resorte
modelo Gillespie

Nro. de curva	Modelo Gillespie			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf
15	16%	0.84	10%	0.90
14	8%	0.92	5%	0.95
13	32%	0.68	26%	0.74
12	29%	0.71	23%	0.77
11	13%	0.87	8%	0.92
10	28%	0.72	17%	0.83
9	37%	0.63	24%	0.76
8	23%	0.77	15%	0.85
7	20%	0.80	13%	0.87
6	14%	0.86	10%	0.90
5	10%	0.90	6%	0.94
4	18%	0.82	12%	0.88
3	45%	0.55	34%	0.66
2	21%	0.79	17%	0.83
1	35%	0.65	29%	0.71
Max. parcial Pf=		0.92		0.95
Min. parcial Pf=		0.55		0.66

Fuente: Elaboración propia

En las tablas 3.30 y 3.31 se observan el resumen de probabilidades de falla el cual la máxima probabilidad de falla se da hacia el interior, en las curvas 14 y 5, con probabilidades de fallas de 0.95 de la curva 14 y 0.94 de la curva 5, para vehículos de tipo T3 con sistema de suspensión de resorte. Esto se da para el modelo de rollover de Gillespie.

Para la probabilidad de falla máxima al exterior se da en la curva 14 con una probabilidad de falla de 0.92.

Tabla 3.32. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T4 suspensión aire modelo Kühn

Nro. de curva	Modelo Kühn			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf
15	7%	0.93	3%	0.97
14	5%	0.95	2%	0.98
13	9%	0.91	7%	0.93
12	12%	0.88	9%	0.91
11	9%	0.91	5%	0.95
10	7%	0.93	4%	0.96
9	9%	0.91	5%	0.95
8	13%	0.87	8%	0.92
7	16%	0.84	9%	0.91
6	9%	0.91	6%	0.94
5	6%	0.94	3%	0.97
4	6%	0.94	3%	0.97
3	36%	0.64	26%	0.74
2	11%	0.89	8%	0.92
1	22%	0.78	17%	0.83
Max. parcial Pf=		0.95		0.98
Min. parcial Pf=		0.64		0.74

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.33. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T4 suspensión aire modelo Gillespie

Nro. de curva	Modelo Gillespie			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf
15	0.07	0.93	3%	0.97
14	0.05	0.95	2%	0.98
13	0.09	0.91	7%	0.93
12	0.11	0.89	9%	0.91
11	0.09	0.91	5%	0.95
10	0.07	0.93	3%	0.97
9	0.08	0.92	5%	0.95
8	0.13	0.87	7%	0.93
7	0.15	0.85	9%	0.91
6	0.09	0.91	6%	0.94
5	0.06	0.94	2%	0.98
4	0.06	0.94	3%	0.97
3	0.34	0.66	25%	0.75
2	0.10	0.90	8%	0.92
1	0.21	0.79	17%	0.83
Max. parcial Pf=		0.95		0.98
Min. parcial Pf=		0.66		0.75

Fuente: Elaboración propia

El resumen de probabilidades de la tabla 3.32 y 3.33 muestra una máxima probabilidad de falla en la curva 14 y 5 con una probabilidades de 0.98, esto ocurre al interior del modelo de rollover estático descrita por Gillespie. Esto se da para vehículos pesados de tipo T4 con un ancho de trocha de 1.86m, altura de centro de balanceo de 0.71 y centro de gravedad 2.26m, para vehículos pesados con suspensión de aire.

Por otra parte la máxima probabilidad de falla al exterior se da en la curva 14 con una probabilidad de 0.95 esto en el modelo de rollover de Gillespie.

También se puede observar que el coeficiente de seguridad global de 0.14 se acerca al estado límite $G(x)=0$ en la curvas 14, el cual ayuda a la interpretación de resultados de probabilidades de falla.

Tabla 3.34. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T4 suspensión resorte modelo Kühn

Nro. de curva	Modelo Kühn			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf
15	8%	0.92	4%	0.96
14	6%	0.94	3%	0.97
13	10%	0.90	8%	0.92
12	12%	0.88	10%	0.90
11	10%	0.90	6%	0.94
10	7%	0.93	4%	0.96
9	9%	0.91	5%	0.95
8	14%	0.86	9%	0.91
7	17%	0.83	11%	0.89
6	10%	0.90	7%	0.93
5	7%	0.93	3%	0.97
4	7%	0.93	4%	0.96
3	37%	0.63	28%	0.72
2	11%	0.89	9%	0.91
1	23%	0.77	19%	0.81
Max. parcial Pf=		0.94		0.97
Min. parcial Pf=		0.63		0.72

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.35. Estimación de la probabilidad de falla del vehículo T4 suspensión resorte modelo Gillespie

Nro. de curva	Modelo Gillespie			
	Exterior		Interior	
	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf	Índice de confiabilidad $\beta\%$	Probabilidad de falla Pf
15	7%	0.93	4%	0.96
14	5%	0.95	3%	0.97
13	9%	0.91	7%	0.93
12	12%	0.88	9%	0.91
11	9%	0.91	6%	0.94
10	7%	0.93	4%	0.96
9	9%	0.91	5%	0.95
8	14%	0.86	8%	0.92
7	16%	0.84	10%	0.90
6	9%	0.91	7%	0.93
5	7%	0.93	3%	0.97
4	6%	0.94	4%	0.96
3	36%	0.64	27%	0.73
2	11%	0.89	9%	0.91
1	23%	0.77	18%	0.82
Max. parcial Pf=		0.95		0.97
Min. parcial Pf=		0.64		0.73

Fuente: Elaboración propia

En las tablas 3.34 y 3.35 también se observan las distintas probabilidades de falla que ocurren en las distintas curvas evaluadas, las cuales se puede destacar las máximas el cual ocurren en las curvas 14 y 5 del análisis de curva esta vez para vehículos pesados de tipo T4 con sistema de suspensión resorte.

La geometría de la curva 14 es de 47m de radio de curvatura, peralte de 10% y de la curva 5 es de 40m de radio y 9% de peralte.

Por otro lado la probabilidad de rollover al exterior máxima se da en la curva 14, el cual es de 0.95 para el modelo de rollover estático del modelo de Gillespie.

3.11. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS PROBABILIDADES OBTENIDOS

Las probabilidades de ocurrencia de rollover se calcularon mediante la aplicación del análisis de confiabilidad de primer orden FORM que en inglés (First Order Reliability Method), aplicando el índice de confiabilidad de Hasofer – Lind para variables aleatorias, las gráficas de curvas de fragilidad de los distintos modelos se realizaron utilizando el software STATGRAPHICS. El análisis de probabilidad se realizó para toda las funciones de estado límite de forma individual utilizando como entrada las variables velocidades de punto, variable geométricas de curvas horizontales evaluadas y variables geométricas de los distintos tipos de vehículos pesados de estudio. En todos los casos se grafican los estados límites para los cuatro modelos de falla.

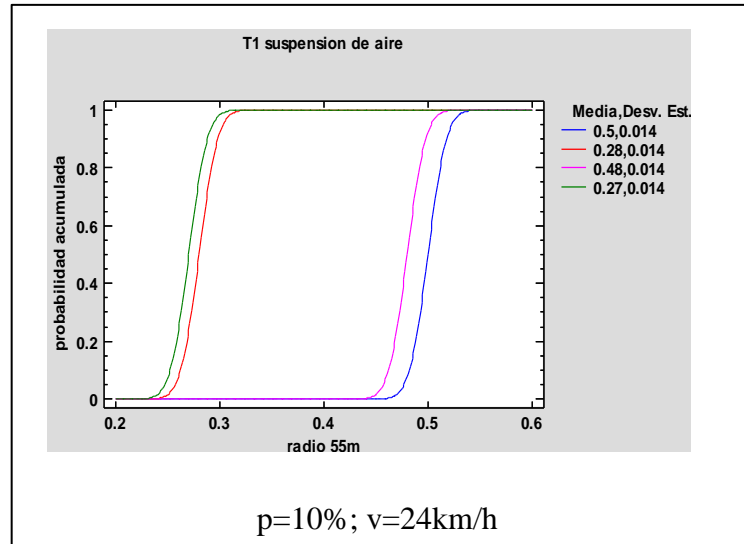
Según las evaluaciones que se realizaron a las distintas curvas, se percibió que para velocidades menores a 42km/h se observó que no hay probabilidad de falla para los diferentes modelos aplicados, para radios mayores a 40m para los distintos tipos de vehículos evaluados.

También se observó que la velocidad de punto media de 32km/h de radio 300m, peralte 6% para los vehículos T2 con sistema de suspensión de aire y resorte la probabilidad de falla es 0 esto ocurre en la curva 2 de evaluación del tramo en estudio.

Para el vehículo T1 se observó que la probabilidades mínimas de fallas ocurridas son de 0.06 exterior, 0.24 interior del modelo de Kuhn y 0.06 exterior, 0.26 interior del modelo de Gillespie, esto ocurre en la primera curva el cual tiene un radio de 260m, peralte 6% a velocidad de punto media de 27km/h. La máxima probabilidad de ocurrencia de falla ocurre al interior de 0.87 para el vehículo T1, esto se da en la curva 5 de radio 40m, peralte 9% y curva 7 de radio 55m, peralte 10% y ancho de trocha angosta de 1.83m, altura de centro de balanceo de 0.71m para el sistema de suspensión de aire en ambos modelos de tanto de Kühn y de Gillespie. Esto se puede interpretar en la curva de fragilidad, que el modelo G4 de Gillespie, la función de seguridad se aproxima más al estado límite del modelo.

A continuación se observa las curvas de fragilidad críticas de las curvas con alta probabilidad de falla y su interpretación respectiva.

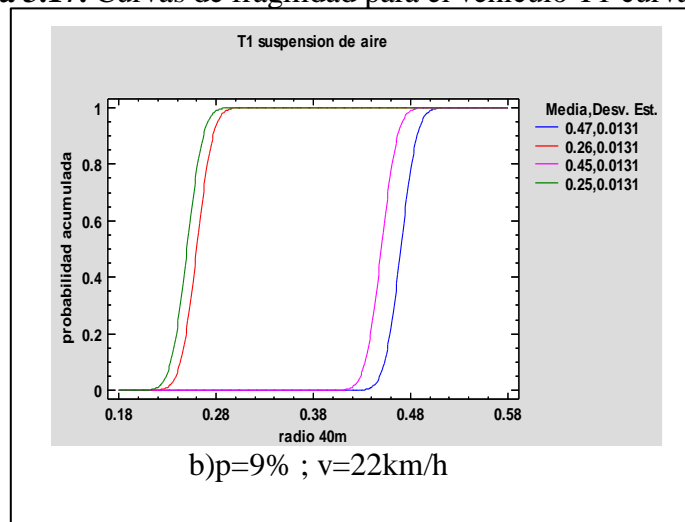
Figura 3.16. Curvas de fragilidad para el vehículo T1 curva 7



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.16 se observa la curva de fragilidad para el vehículo pesado T1 camión semirremolque de suspensión de aire de la curva 7, el cual se grafica los modelos de Kühn y de Gillespie tanto rollover al interior como al exterior, obteniendo una curva de probabilidad acumulada. De la curva de fragilidad interpretando se observa claramente que el modelo de Gillespie de rollover al interior se aproxima al estado límite aceptando así que el modelo de Gillespie al interior tiene una alta probabilidad de falla de 0.87.

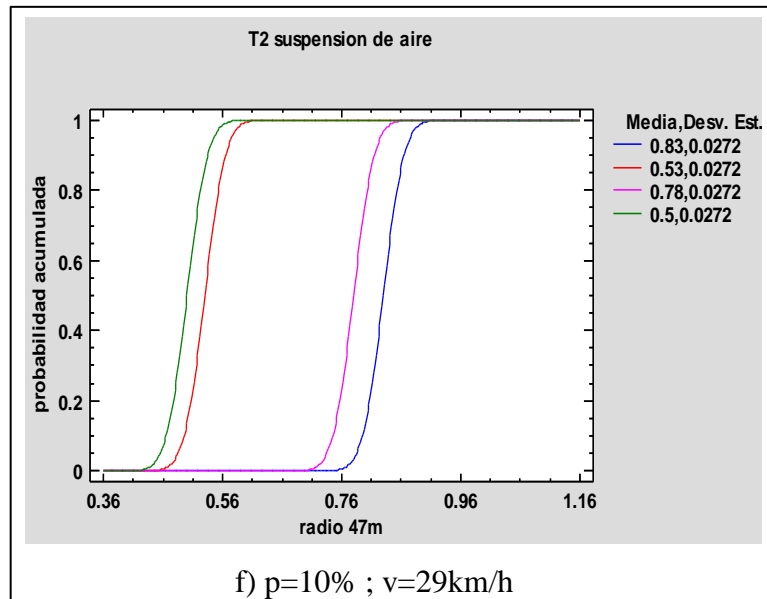
Figura 3.17. Curvas de fragilidad para el vehículo T1 curva 5



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.17 se observa la curva de fragilidad para el vehículo pesado T1 camión semirremolque de suspensión de aire en la curva 5, graficados los modelos de Kühn y de Gillespie tanto rollover al interior como al exterior se obtiene la interpretación de los cuatro modelos, el cual se observa claramente que el modelo de Gillespie de rollover al interior se aproxima al estado límite aceptando así que el modelo de Gillespie al interior tiene una alta probabilidad de falla de 0.87.

Figura 3.18. Curva de fragilidad para el vehículo T2 curva 14



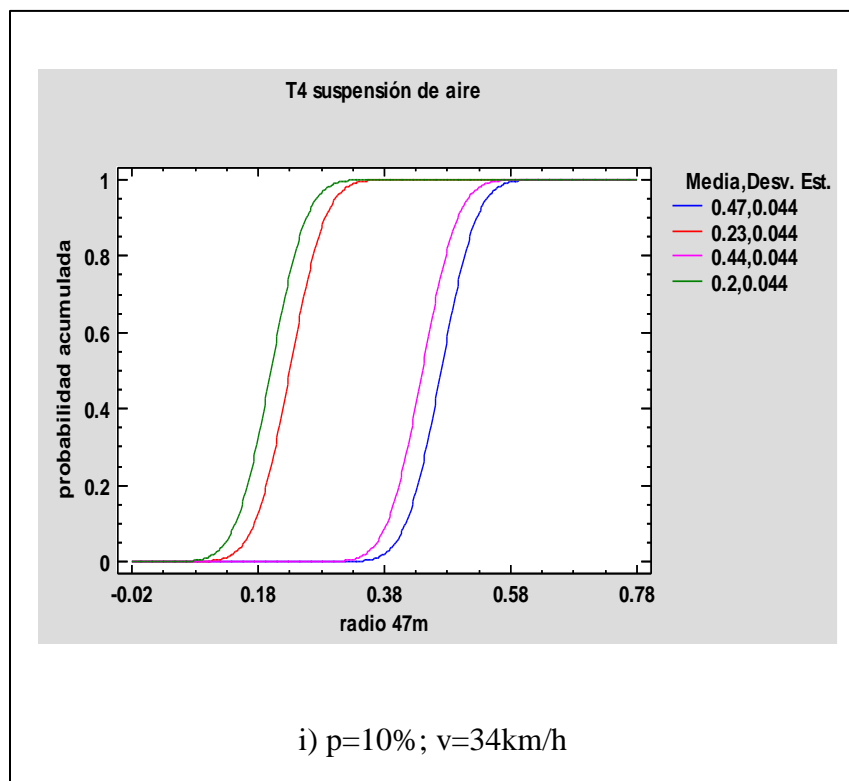
Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.18 se observa la curva de fragilidad para el vehículo pesado T2 camión semirremolque tractocamión de suspensión de aire en la curva 14, graficados los modelos de Kühn y de Gillespie tanto rollover al interior como al exterior se obtiene la interpretación de los cuatro modelos, el cual se observa claramente que el modelo de Gillespie de rollover al interior se aproxima al estado límite aceptando así que el modelo de Gillespie al interior tiene una alta probabilidad de falla de 0.88.

Para el vehículo T2 se observó que la máxima probabilidad de ocurrencia de falla es de 0.88 que ocurre al interior para ambos modelos tanto como Kühn y Gillespie, esto se da en la curva 15 y 14 de radio 43m, 47m con peralte 8.5%, 10% respectivamente con

ancho de trocha angosta de 1.83m, altura de centro de balanceo de 0.71m y centro de gravedad 1.3m, para el sistema de suspensión de aire y una velocidad de punto media de 29km/h respectivamente. La segunda máxima probabilidad de falla ocurrida es al exterior es de 0.84 en la curva 15 con una velocidad de punto media de 32km/h para ambos modelos y sistemas de suspensión. Esto se puede interpretar en la curva de fragilidad mostrada en la figura 3.18 que el modelo G4 de Gillespie, y el modelo G2 descrito por Kühn la función de seguridad se aproxima más al estado límite del modelo.

Figura 3.19. Curvas de fragilidad para el vehículo T3 curva 14

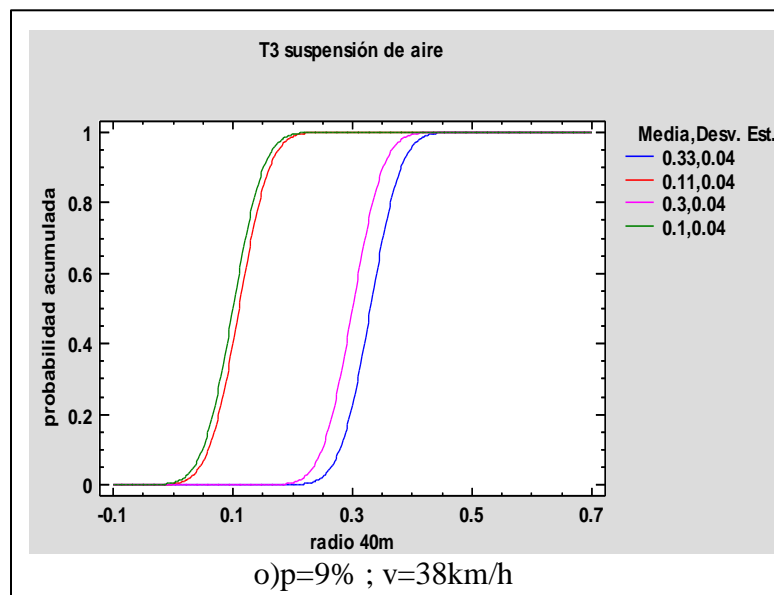


Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.19 se observa la curva de fragilidad para el vehículo pesado T3 camión grande de 2 ejes C2 de suspensión de aire en la curva 14, graficados los modelos de Kühn y de Gillespie tanto rollover al interior como al exterior se obtiene la interpretación de los cuatro modelos, el cual se observa claramente que el modelo de Gillespie de rollover al interior se aproxima al estado límite aceptando así que el modelo de Gillespie al interior tiene una alta probabilidad de falla.

Para el vehículo T3 se observó en la figura 3.19 que el modelo de Gillespie al interior es próximo al estado límite el cual evidentemente la máxima probabilidad de ocurrencia de falla es de 0.96 ocurridas al interior para ambos modelos tanto como Kühn y Gillespie, esto se da en la curva 14 de radio 47m con peralte 10% respectivamente con ancho de trocha angosta de 1.85m, altura de centro de balanceo de 0.707m y centro de gravedad 2.12m, para el sistema de suspensión de aire y una velocidad de punto media de 34km/h.

Figura 3.20. Curvas de fragilidad para el vehículo T4 curva 5



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.20 se observa la curva de fragilidad para el vehículo pesado T4 buses grandes de tres ejes C3 de suspensión de aire en la curva 5, graficados los modelos de Kühn y de Gillespie tanto rollover al interior como al exterior se obtiene la interpretación de los cuatro modelos, el cual se observa claramente que el modelo de Gillespie de rollover al interior se aproxima al estado límite seguido del modelo de Kühn al interior, aceptando así que el modelo de Gillespie al interior tiene una alta probabilidad de falla.

Para el vehículo T4 se observó que la máxima probabilidad de ocurrencia de falla es de 0.98 que ocurre al interior para el modelo de Gillespie, esto se da en la curva 5 de radio 40m con peralte 9% con ancho de trocha angosta de 1.86m, altura de centro de

balanceo de 0.701m y centro de gravedad 2.26m, para el sistema de suspensión de aire con una velocidad de punto media de 39km/h. Al exterior la máxima probabilidad de falla se dio de 0.95 para ambos sistemas de suspensión de aire y resorte.

3.11.1. Propuesta de acción

Luego de analizado las probabilidades de falla y determinar las velocidades límite que presentan los vehículos pesados de estudio, la acción que se sugiere para evitar accidentes por rollover es la implementación de reductores de velocidad en las curvas más críticas así como también la respectivas señalizaciones.

Los elementos reductores de velocidad, corresponden a dispositivos cuya función es lograr una efectiva reducción en la velocidad de los vehículos motorizados que transitan por un determinado tramo o sector de una vía

Una de las propuestas de reductores es los reductores de velocidad reflectivo mostrado en la figura 3.22, puesto que estos no deterioran la suspensiones de los vehículos a diferencia de los reductores de velocidad de resalto tipo rompe muelles que se encuentran en zonas urbanas.

Estos reductores ayudaran en una parte a reducir la velocidad de los vehículos, también será complementada con letreros de señalización de velocidad límite y pintura vial antideslizante.

Estos dispositivos se aplicaran a las curvas más críticas a sufrir rollover, en nuestro caso debido al estudio es posible aplicar a la curva 5 de radio 40 m y peralte 9% así como también en la curva 14, con radio de 47m y peralte 10%, Complementariamente con la señalización de velocidad máxima de circulación que debido al estudio realizado es de 42km/h, tomando como velocidad máxima redondeado de 40 km/h.

3.11.2. Señales horizontales

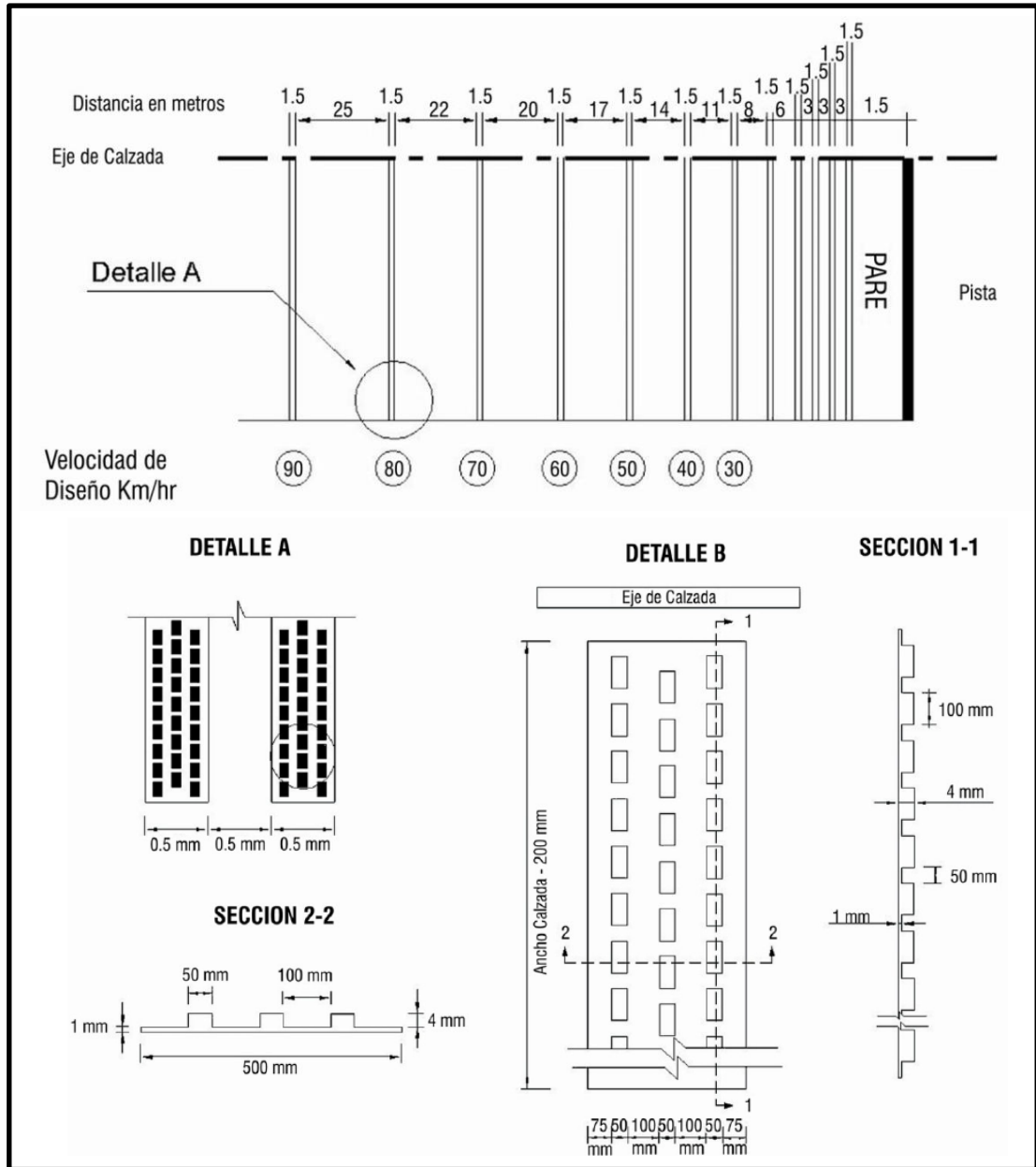
3.11.2.1. Bandas alertadoras

Las bandas alertadoras, corresponden a una franja dentada instalada sobre la calzada en forma de baterías o agrupadas con otras bandas alertadoras, las que según su diseño,

permiten disminuir la velocidad y alertar al conductor de situaciones de riesgo que quieren de su atención.

En general, tiene una altura de 4 mm y un ancho de 50 cm, debiéndose instalar en líneas de dos bandas alertadoras, separadas entre sí por una distancia de 50 cm. Estas bandas alertadoras son señalizaciones de tránsito horizontal.

Figura. 3.21. Bandas alertadoras



Fuente: Manual de carreteras, dispositivos de transito de la ABC

Estos dispositivos, tiene la función de reducir la velocidad del vehículo de los vehículos en la figura 3.21 se observa los detalles de la colocación de las bandas alertadoras que para este proyecto se llegó como velocidad límite de 40 km/hr, que según la normativa se requiere de 2 bandas alertadoras separadas a 14 metros para reducir la velocidad a 40km/hr. Esto se observa según normativa de la ABC en la figura 3.21.

Figura 3.22. Reductores de velocidad con tachones



Fuente:<https://www.google.com/search?q=reductores+de+velocidad+reflectivo+ojo+de+gato+para+carreteras&rlz>

3.11.2.2. Pintura vial para velocidad máxima

Este símbolo indica la velocidad máxima permitida en la pista en que se ubica. Puede utilizarse para reforzar la señal vertical velocidad máxima o en sitios tales como túneles o puentes. Su color es blanco.

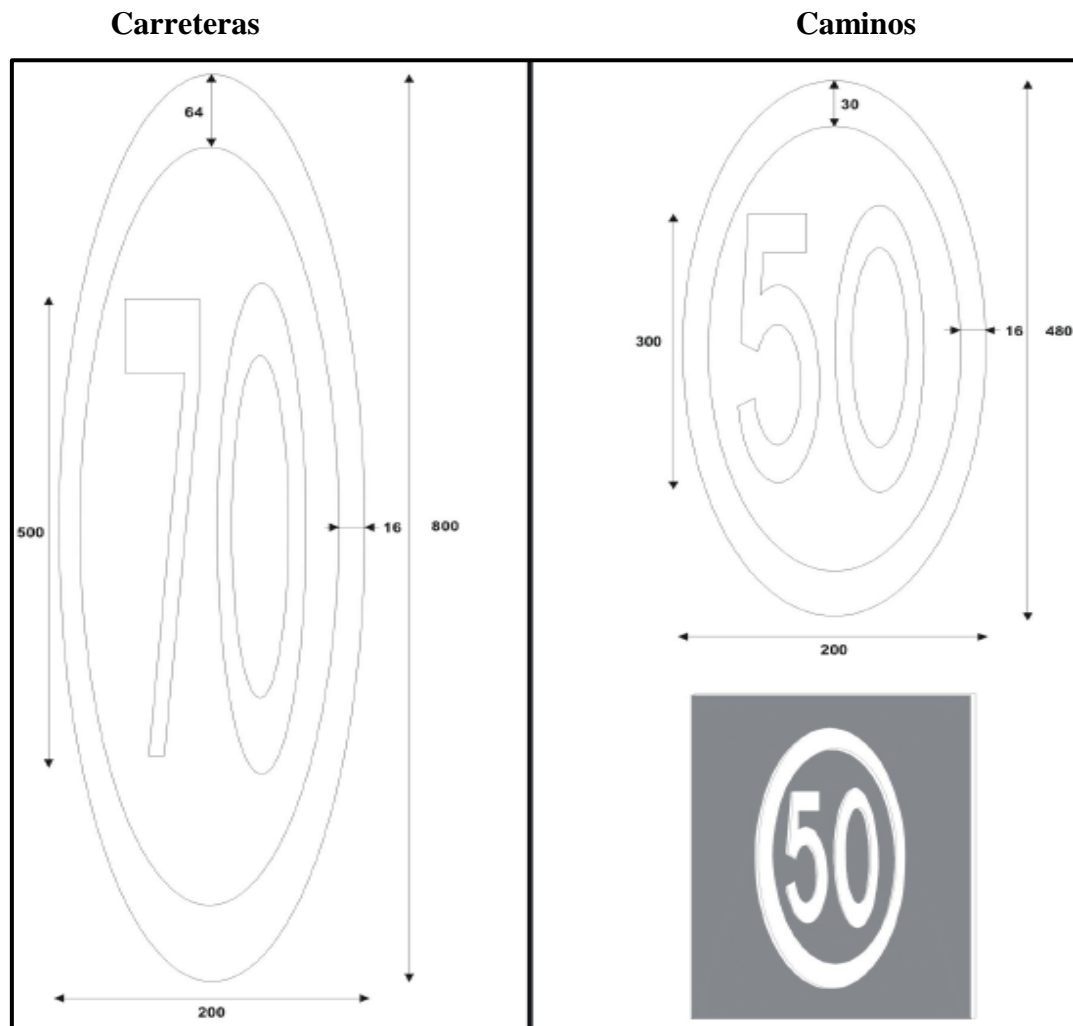
En cuanto a las formas y dimensiones, en función del tipo de vía, este símbolo debe cumplir con las características señaladas en la siguiente figura.

Figura 3.22. Pintura vial



Fuente:<http://www.circulaseguro.com/la-pintura-vial-antideslizante-tambien-puede-ser-un-problema-para-los-coches/>

Figura 3.23. Dimensiones en centímetros de la pintura vial



Fuente: Manual de carreteras, dispositivos de tránsito de la ABC

3.11.3. Señales verticales

3.11.3.1. Señales preventivas

Tienen como propósito advertir a los usuarios la existencia y naturaleza de riesgos y/o situaciones especiales presentes en la vía o en sus zonas adyacentes, ya sea en forma permanente o temporal.

Estas señales persiguen que los conductores tomen las precauciones del caso, ya sea reduciendo la velocidad o realizando las maniobras necesarias para su propia seguridad, la del resto de los vehículos y la de los peatones. Su empleo debe reducirse al mínimo

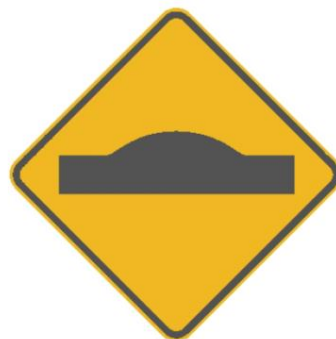
posible, porque el uso innecesario de ellas, tiene a disminuir el respeto y obediencia a toda la señalización en general.

La forma que presentan de advertencia de peligro, tienen la forma de un cuadrado con una de sus diagonales colocada verticalmente.

Su color de fondo es amarillo. Los símbolos, leyendas y orlas son de color negro. Para el caso de este tipo de señales, todos los elementos, tales como; fondo, caracteres, orlas, símbolos, leyendas, pictogramas, excepto aquellos de color negro, deberán cumplir con un nivel de retrorreflexión mínimo.

Las señales de advertencia deben ubicarse con la debida anticipación, de tal manera que los conductores tengan tiempo adecuado para percibir, identificar, tomar la decisión y ejecutar con seguridad la maniobra que la situación requiere. Este tiempo puede variar de 3 segundos, como en el caso de las señales de advertencia más sencillas, curvas pronunciadas o pendientes fuertes de bajada, hasta 10 segundos en el caso de señales de advertencia de situaciones complejas como cruces o bifurcaciones.

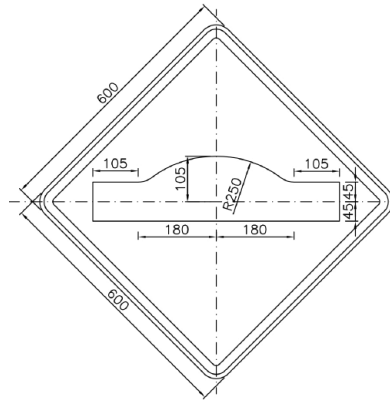
Figura 3.24 Señal preventiva de reductor de velocidad



SP-14
RESALTO

Fuente: Manual de carreteras, dispositivos de tránsito de la ABC

Por lo tanto, la distancia requerida entre la señal y la situación que advierte queda determinada por la velocidad máxima de la vía y el tiempo a que se refiere el párrafo anterior ($\text{distancia} = \text{tiempo} * \text{velocidad máxima}$), no pudiendo ser dicha distancia menor a 50 m. Estas pueden ser ajustadas, hasta en un 20% dependiendo de factores tales como: geometría de la vía, accesos, visibilidad, tránsito y otros.

Figura 3.25 dimensiones de señal de resalto

Fuente: Manual de carreteras, dispositivos de tránsito de la ABC

Esta señal se emplea para advertir la proximidad de un resalto o de un reductor de velocidad en la superficie de la calzada. Este último se refiere sólo a los reductores de velocidad de tipo bandas alertadoras.

Entonces con la velocidad máxima de 42km/hr y un tiempo para la identificación de la señal preventiva será de 4 segundos, reemplazando a la ecuación $d=v*t$, se obtiene que la distancia a colocar la señal preventiva será a 46m que por norma se colocará a 50 m de los reductores de velocidad.

3.11.3.2. Señales reglamentarias

Las señales reglamentarias tienen por finalidad notificar a los usuarios de las vías, las prioridades en el uso de las mismas, así como las prohibiciones, restricciones, obligaciones y autorizaciones existentes.

Se deberá evitar, de no ser estrictamente necesario, la inscripción de leyendas o mensajes adicionales en las señales verticales reglamentadas estas señales se lo identifican como código SR.

En general, su forma es circular y sólo se aceptará inscribir la señal en un rectángulo cuando lleve una leyenda adicional.

Su color de fondo es blanco, aunque excepcionalmente puede ser rojo o azul. La orla será de color rojo. Cuando las señales sean rectangulares, la orla exterior será de color

negro. Finalmente, los símbolos y leyendas serán de color negro o blanco y ocasionalmente gris.

Las señales reglamentarias deberán instalarse al lado derecho de la vía en el lugar preciso donde se quiera establecer la regulación

Figura 3.26 Señal reglamentaria de velocidad máxima



Fuente: Manual de carreteras, dispositivos de tránsito de la ABC

Para implementar los reductores de velocidad es indispensable la implementación un letrero de alerta que indique la existencia de los reductores, un modelo de alerta de reductores se muestra en la figura 3.26.

3.11.4. Especificaciones técnicas

3.11.4.1. Construcción de señales verticales

a. Placas.- Las placas de señalización vertical lateral se confeccionarán con planchas de acero laminado en caliente, de 2.5 mm de espesor. Los cortes deberán efectuarse con guillotina y los circulares en maquinarias tijera; los vértices deberán despuntarse con un radio variable según el tamaño de la placa. Todas las aristas deberán pulirse.

Se podrán utilizar bastidores si las dimensiones de las placas lo requieren. Si el proyecto así lo especifica, se podrá usar figuras de aluminio en la confección de las placas.

Las placas deberán cubrirse por el anverso con figuras retrorreflectantes. Estas figuras, incluyendo los requisitos de tipo, color, contraste y niveles mínimos de

retroreflectancia, y los requisitos de texto, ribetes, número, flechas y símbolos, deberán cumplir con lo establecido en la norma ASTM D 4956.

b. Postes.- Los postes deberán estar constituidos por un perfil de acero laminado, tipo Ω de 110 mm de ancho, 38 mm de alto y 2,5 mm de espesor, su lardo deberá ser de 3.00 mm y será reforzada con una figura de acero de 2,5 mm de espesor, 80 mm de ancho y 1.750 mm de longitud, de tipo E-6011 de 3 mm, ubicados en los extremos. En la zona central se alternarán tres cordones de 70 mm de lardo cada lado, hasta completar seis cordones intermedios en total.

c. Pernos.- Las placas se deberán fijar a los postes con pernos zincados de 6 x 64 mm. Las tuercas también deberán se zincadas.

d. Hormigón.- El relleno de las excavaciones para empotrar los postes se sustentación deberán efectuarse con hormigón grado H-20.

e. Procedimiento.- Toda la señalización caminera se instalará en la ubicación y con la mínima altura señalada en la profundidad y área mínima de las excavaciones para la instalación de portes sustentadores de señalización vertical lateral, se ajustarán a lo señalado en el proyecto, debiendo cumplir con los mínimos indicado en las láminas tipo. El hueco no ocupado por los postes deberá rellenarse con hormigón grado H-20 como indica la siguiente figura 3.27.

Figura 3.27 Dimensiones de una señal vertical

Superficie Sp m ²	Sustentación		Fundación		
	N° Postes	Perfil Tipo	B (cm)	L (cm)	h (cm)
Sp ≤ 0.5	1	Ω ó L40x40x5	40	40	40
Sp ≤ 1	1	Ω ó \square 50x50x4	60	60	60
1 < Sp ≤ 2	2	Ω ó \square 80x40x3	70	60	60
2 < Sp ≤ 3	2	\square 80x40x3	80	60	60
3 < Sp ≤ 7	2	\square 100x100x4	100	80	80
7 < Sp ≤ 12	2	\square 150x100x5	140	100	100

Sp : corresponde a la superficie dada por la señal

Fuente: Manual de carreteras, dispositivos de transito de la ABC

3.11.4.2. Construcción de señales horizontales

A. Tachones

Los tachones deben ser de tipo reflector prismático. El área reflectante debe estar moldeada de material metil metacrilato o policarbonato. La base, debe ser plana sin desviaciones mayores que 1,3 mm.

a. Resistencia a la compresión.- La tacha deberá soportar un peso de 2727 kg sin quebrarse o deformarse significativamente. Entendiendo como desviación significativa de 3,3 mm.

b. Resistencia al desprendimiento.- Deberá tener una resistencia al desprendimiento mayor o igual a 3.4 MPa (500Psi).

c. Color.- El color deberá caer de las coordenadas cromáticas indicadas.

d. Dimensiones.- Altura $\leq 20,3$ mm, ancho ≤ 13 mm y ángulo entre la cara de marca y la base $\leq 45^\circ$.

e. Resistencia a flexión.- Para tachas de largo y anchos mayores o iguales a 102 mm debe resistir 909 kgf sin deformación mayor que 3,3 m.

f. Retrorreflectancia.- Para ángulo de entrada 0° y de observación $0,2^\circ$ en mcd/lx deben cumplir con los valores indicados en la tabla.

g. Procedimiento de trabajo.- Las tachas se ubicarán de acuerdo a los detalles del proyecto.

El área del pavimentado donde se colocara la tacha deberá estar libre de polvo, compuestos de curado, grasa, aceite, pintura o cualquier otra materia extraña que pudiere afectar negativamente la acción ligante del adhesivo. Para estos efectos, la superficie indicada se deberá limpiar con un disco esmerilador de grano grueso, mediante chorro de arena o mediante un procedimiento de similar efectividad.

El adhesivo epóxico se deberá preparar de acuerdo con las instrucciones del fabricante, considerando que las cantidades requeridas dependen de la textura de la superficie del

pavimento. En todo caso, no se deberá preparar más mezcla adhesiva que la que se pueda utilizar en 10 min.

Las mezclas adhesivas se deberá aplicar mediante una espátula a la base de la tacha o a la superficie del pavimento, en una cantidad tal, que cubra totalmente la superficie de contacto, sin presentar huecos, más un leve exceso.

B. Pintura

a. Requisitos de los materiales base.- Los requisitos que deberán presentar los materiales base empleados en la confección de las demarcaciones son:

b. Resistencia al sangrado.- Se entenderá por sangrado la reacción química que se origina entre el sustrato asfáltico con los componentes solventes de la pintura, lo cual produce en la superficie de la pintura un descoloramiento o teñido que afecta la relación de contraste. De ahí la conveniencia en especificar un producto que no reaccione con el asfalto. El requerimiento solicitado es la diferencia en el factor de luminancia sea menor o igual a 0,05 y el color resultante quede dentro del polígono de colectores definido.

La relación de contraste, entre el factor de luminancia de la película seca de pintura blanca sobre cuadro blanco, respecto al factor de luminancia de la película seca de pintura blanca sobre cuadro negro, no será inferior al 95% y en el caso de la pintura amarilla no deberá ser menor al 90%.

El tiempo de secado deberá ser menor o igual a 30 minutos, pero lo suficientemente alto de manera que permita sembrar las microesferas cuando sea necesario y de éstas se puedan incorporar a la demarcación.

De acuerdo a exigencias, se solicita que el aquietamiento no deberá ser a 12 mm de acuerdo a la flexibilidad.

La demarcación debe resistir como mínimo una fuerza de 1,96 MPa empleando un espesor de película húmeda de 500 μm sobre una probeta normalizada.

3.1.1.5. Costo de la propuesta de acción

Propuesta económica

Proyecto: Instalación de señales verticales y horizontales

Item N°	Descripción	Unidad	Cantidad	P. U. Total	Costo p/item
Señales horizontales					
1	Tachones reflectivos	[PZA]	288.00	100.00	28800.00
2	Pintura acrílica para demarcación de carreteras, base agua- Blanca (balde 18 Litros)	[PZA]	1.00	795.00	795.00
3	Adhesivo bituminoso (Caja 50 LB.)	[PZA]	2.00	1050.00	2100.00
Señales verticales					
4	Señales preventivas (señal de resalto) 60 x 60 cm	[PZA]	2.00	1239.00	2478.00
5	Señales reglamentarias (señal de velocidad máxima) 75 x 110 cm	[PZA]	2.00	1702.26	3404.52

Costo total en Bs = 37577.52

Treinta y siete mil ciento setenta y siete 52/00
Bs. (Literal)

Costo total en \$us. = 5391.32

El costo de la propuesta de acción de implementación de señales horizontales y verticales en las curvas críticas será de Treinta y siete mil ciento setenta y siete 52/Bs. (Literal).

3.11.6. Comparación de las normativas de diseño geométrico del SNC con la ABC

Tabla 3.36 Sectores topográficos

Tramo	Topografía	Progresivas			Distan. Total
		Desde	Hasta	Distancia	
Campo Pajoso – Caraparí	Plana	0+000	2+420	2,420	2,420
	Ondulada	2+420	5+260	2,840	
		17+000	20+000	3,000	5,840
	Montañosa	5+260	17+000	11,740	11,740

Fuente: Diseño geométrico

Haciendo una comparación de la norma de diseño geométrico de la ABC, se puede ver que las velocidades de diseño aumentan en comparación al servicio nacional de caminos SNC, según el tipo de topografía.

Tabla 3.37 Parámetros para diseño geométrico SNC

Parámetros	Topografía			
	Plana	Ondulada	Montañosa	Muy Montañosa
Velocidad Directriz (km/h)	100	70	50	30
Peralte Máximo (%)	6%	8%	10%	10%
Radio Mínimo Absoluto (m)	423	170	75	26
Pendiente Máxima (%)	5%	6%	7%	8%

Fuente: Servicio nacional de camino SNC

Tabla 3.38 Parámetros de diseño geométrico ABC.

Carreteras -Autopistas, Autorrutas-Primarios			
V _p (km/h)	e _{masx.} (%)	f	R _{min} (m)
80	8	0.122	250
90	8	0.114	330
100	8	0.105	425
110	8	0.096	540
120	8	0.087	700

Fuente: Manual de diseño geométrico de la Administradora Boliviana de Carreteras
ABC

También se puede ver que el peralte máximo disminuye de un 10% de la norma del servicio nacional de caminos SNC, a 8 % de peralte en el manual de diseño de la

administradora boliviana de carreteras ABC, en cuanto a los radios de curvatura subieron poco en la norma ABC.

3.11.6.1. Radios mínimos para curvas horizontales

El criterio tradicionalmente empleado por la norma del SNC con anterioridad establecía que para una velocidad de proyecto dada, correspondían peraltes decrecientes a medida que crecían los radios utilizados.

Dichos criterios entran en contradicción con la realidad observada en cuanto a que mientras más amplio es el trazado, mayores son las velocidades que tienen que emplear los usuarios según lo definido anteriormente. En consecuencia, las tendencias actuales del diseño de la ABC mantienen peraltes relativamente altos para un rango amplio de radios, independizándose de la velocidad de proyecto, con lo cual las curvas de radio mayor que el mínimo, aceptan una velocidad específica mayor que la de proyecto, lo que permite mantener la seguridad por criterio de deslizamiento, para aquel grupo de usuarios que tiende a circular a velocidades más elevadas que las de proyecto.

Radios mínimos, calculados bajo criterios de seguridad ante el deslizamiento está dado por la expresión

El coeficiente de fricción se calcula con la expresión:

Tabla 3.39 Valores máximos para el peralte y la fricción transversal según ABC

	e_{max}	f
Caminos V_p 30 a 80 km/h	7%	$0,265 - V_p/602,4$
Carreteras V_p 80 a 120 km/h	8%	$0,193 - V_p/1134$

Fuente: Manual de diseño geométrico de la Administradora Boliviana de Caminos ABC

Tabla 3.40 Fricción lateral según SNC

f
$0,196 - 0,0007V$

Fuente: Servicio Nacional de Caminos SNC

Para el cálculo de radios mínimos se empleó la expresión:

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127(e_{\max} + f)}$$

Donde:

R_{\min} =Radio mínimo absoluto (m)

V =Velocidad de proyecto (km/h)

e_{\max} =Peralte máximo (m/m)

f = Coeficiente de fricción, adimensional

Para el cálculo del coeficiente de fricción, en comparación del SNC y ABC. Las ecuaciones varían una de la otra en valores mínimos.

Tabla 3.41 Radios mínimos en curvas horizontales según la ABC

V (km/h)	e_{\max} (%)	f	R_{\min} (m)
30	7	0.215	25
40	7	0.198	50
50	7	0.165	80

Fuente: Manual de diseño geométrico de la Administradora Boliviana de Caminos ABC

La velocidad límite a no sufrir probabilidad de rollover que se llega a la conclusión es de 40 km/hr para un radio de 40 m, que haciendo una comparación ante la seguridad al deslizamiento según la normas de diseño geométrico de la administradora boliviana de carreteras ABC, para velocidades de 40 km/hr el radio mínimo es de 50m podemos llegar a concluir que para criterios de diseño según la nueva normativa subieron en comparación al SNC, con esto podemos concluir que la seguridad al deslizamiento ante la normativa de la ABC cumple a la seguridad al rollover.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Según las evaluaciones de estimación de rollover estático que se realizaron a las distintas curvas, se percibió que para velocidades menores a 42km/h se observó que no hay probabilidad de falla para los diferentes modelos aplicados, para radios mayores a 40m para los distintos tipos de vehículos T1, T2, T3 y T4 de evaluación.

Analizando las diferentes curvas a diferentes velocidades de punto media obtenida se llegó a la conclusión que el vehículo T4 tiene una alta probabilidad de falla de 0.98 esto se debe a la velocidad de circulación 39km/h en subida.

También se llegó a la conclusión de que los vehículos con ancho de trocha angosta de 1.83m; y altura de centro de gravedad de 2.26m y altura centro de balanceo de 0.71m tienen un alto potencial de sufrir una probabilidad de falla, esto se da sólo para los vehículos de suspensión de aire puesto que éstos cuentan con lo anterior mencionado.

Entonces los vehículos pesados con trocha ancha y altura de centro de gravedad baja la probabilidad de que ocurra rollover estático es baja esto se da solo para los vehículos pesados con suspensión con resorte en este caso de ancho de trocha 2.03m, altura de centro de balanceo 1.3m y altura centro de balanceo 0.62m.

En conclusión se determinó que los vehículos pesados con suspensión de resorte presentan una mayor seguridad que los de suspensión de aire, puesto que presentan una geometría de vehículo más adecuada a no sufrir el efecto del potencial de rollover estático.

Observando las probabilidades de falla de las diferentes curvas horizontales a velocidades media de punto, para el sistema de suspensión aire y resorte de los cuatro tipos de vehículos pesados de estudio, se llega a la conclusión que las curvas 15, 14, 7 y 5 son las que presentan un alto potencial de rollover estático.

Determinando así que la curva 14 y 5 son las curvas más críticas a sufrir el potencial de rollover estático puesto que posee una probabilidad de fallo de 0.98 al interior.

También se verificó que una de las causas de accidentes en la zona de estudio se puede dar por la desestabilización del vehículo debido a su geometría, el cual provoca el accidente por rollover.

En lo general observando los resultados de ambos modelos a aplicar tanto como W. Kühn y Thomas D.Gillespie se observa el modelo de Gillespie se efectúan valores de probabilidad de falla más altas, llegando a la conclusión que este modelo es más preciso puesto que evalúa más variables a comparación del modelo de Kühn.

Por otra parte también se llega a la conclusión que para que los modelos sean aplicados al diseño de carreteras se es muy complejo por la diversidad de vehículos pesados que poseen diversas geometrías que circulan, pero si se puede aplicar a la seguridad a rollover y evaluar parámetros de diseño mínimos.

El parámetro de diseño al que se llega a conclusión es que para radios de curvatura de 40m y peraltes 9% presentan altas probabilidades a sufrir rollover en los modelos de Kühn (Germany) y Thomas D.Gillespie.

Haciendo una comparación con los parámetros de diseño de curvas horizontales del manual de la Administradora Boliviana de Caminos ABC vigente y la norma no vigente ya del Servicio Nacional de Caminos SNC, se puede llegar a la conclusión que los parámetros de diseño subieron en la norma vigente de tal manera que no afecta en gran magnitud al efecto del fenómeno de rollover.

4.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda el análisis de rollover dinámico para así comparar con el rollover estático que fue en estudio en este proyecto.

Prolongar el estudio a más tipos de vehículos pesados, como así también incluir el estudio de rollover a los vehículos livianos.

Ampliar el estudio a otros factores que intervienen a las causas de accidentes tránsito de vehículos pesados en las zonas de mayor accidente de las carreteras de Tarija.

Definir otros dispositivos de tránsito para reducir la velocidad de los vehículos pesados en las carreteras diseñadas según la norma no vigente del servicio nacional de caminos SNC.