



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación Estudios de Posgrado

**METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE CONFIABILIDAD DE
FATIGA POR DAÑO ACUMULADO EN PUENTES
VEHICULARES BAJO CARGA CÍCLICA.**

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta:

Lino Adrián Meneses Rojas.

Director de tesis:

Dr. José Guadalupe Rangel Ramírez.

Puebla, Pue.

Marzo 2026.

OFICIO DE ACEPTACIÓN DE TESIS.



Oficio No. SIEP/1999/2025

C. Lino Adrián Meneses Rojas

Matrícula 224470081

Alumno de la Maestría en Ingeniería

con opción terminal en Estructuras, 12ª. gen.

Facultad de Ingeniería, BUAP.

Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema titulado: **Metodología de estimación de confiabilidad de fatiga por daño acumulado en puentes vehiculares bajo carga cíclica**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Estructuras. Asignándose como Director de tesis al Dr. José Guadalupe Rangel Ramírez y Codirector al M.I. Eduardo García Zenteno.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Zaragoza, 26 de noviembre de 2025

M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora

Director



C.c.p. Dr. José Guadalupe Rangel Ramírez y M.I. Eduardo García Zenteno, Director y Codirector del tema de tesis.

C.c.p. Archivo

JPHT/sco*

Facultad
de Ingeniería

Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
222 229 55 00 Ext. 7610

OFICIO DE IMPRESIÓN.



Oficio No. SIEP/096/2026

Asunto: Carta de autorización de impresión de Trabajo de Tesis.

Mtro. Alfredo Avendaño Arenaza
Director General de Bibliotecas
Presente

Por este medio me permito saludarle y, al mismo tiempo, me dirijo a usted para informarle que la tesis con título **“Metodología de estimación de confiabilidad de fatiga por daño acumulado en puentes vehiculares bajo carga cíclica”**, ha sido avalada bajo los preceptos de integridad académica; por tanto, se autoriza la impresión de tesis del alumno:

Nombre del alumno: **Lino Adrián Meneses Rojas**
Matrícula: **224470081**
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería con Opción Terminal en Estructuras

Sin más por el momento, agradezco la atención al presente.

Atentamente
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z., a 20 de febrero de 2026

Mtro. José María Álvarez Alarcón
Secretario de Investigación y Estudios de Posgrado.

José Gpe. Rangel Ruz
Dr. José Guadalupe Rangel Ramírez
Director del Trabajo de Tesis

Facultad
de Ingeniería

Bldv. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
222 229 55 00 Ext. 7610

*A mis abuelitos,
gracias por su apoyo y paciencia.*

AGRADECIMIENTOS.

A mi director de tesis, el Dr. José Guadalupe Rangel Ramírez, por su invaluable guía, su inmensa paciencia. Gracias por las revisiones, los consejos técnicos y las pláticas compartidas.

Al Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui, por su apoyo constante durante el posgrado. Le guardo un especial agradecimiento por haberme recomendado en mi primer trabajo profesional.

A mi familia, por ser mi soporte fundamental. Gracias, papá, mamá, Oscar, María y Rocko; por su compañía, su tolerancia y sobre todo su cariño.

A Shihan Rafael Flores Cruz, espero que sus consejos y enseñanzas perduren en mí, gracias por su guía. En la vida como en el karate.

Al M.I. Jorge Peniche y al M.I. Roberto López, gracias por sus enseñanzas y su apoyo.

A mis compañeros y amigos de la maestría.

Finalmente, a todas las personas que de una u otra forma cruzaron mi camino durante estos años y contribuyeron a que este proyecto hoy sea una realidad. ¡Gracias totales!

“No existe el miedo, la derrota ni el dolor”

RESUMEN.

La normativa mexicana vigente no establece de manera explícita una metodología para estimar el deterioro por fatiga en puentes carreteros de acero. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el nivel de seguridad de una sección estructural de acero mediante un análisis de confiabilidad. Para ello, se implementó un modelo probabilista que caracteriza el flujo vehicular a partir de registros oficiales de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). El daño acumulado anual se cuantificó mediante la regla de Palmgren-Miner, empleando un enfoque basado en las curvas S-N propuestas por los códigos DNV-GL. Posteriormente, mediante un modelo de simulación de Monte Carlo con un millón de iteraciones por año, se consideró la influencia de la incertidumbre asociada a las propiedades del material, los esfuerzos y el modelo analítico, desde el año 1 hasta una vida útil de 75 años. A partir de estos resultados, se estimó la Probabilidad de Falla anual y se determinó el índice de confiabilidad β , el cual cumple con los valores objetivo establecidos en la normativa DNV-GL. Los resultados obtenidos indican que la metodología propuesta satisface los criterios de diseño por fatiga y constituye una herramienta viable para la evaluación y el diseño de puentes de acero utilizando datos reales de tránsito vehicular.

ABSTRAC.

Current Mexican regulations do not explicitly establish a methodology to estimate fatigue deterioration in steel highway bridges. This study aims to evaluate the safety level of a steel structural section through a reliability analysis. For this purpose, a probabilistic model was implemented to characterize vehicular traffic flow based on official records from the *Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes* (SICT). The annual accumulated damage was quantified using the Palmgren-Miner rule, employing an approach based on the S-N curves proposed by the DNV-GL standards. Subsequently, using a Monte Carlo simulation model with one million iterations per year, the influence of uncertainties associated with material properties, stresses, and the analytical model was considered from year 1 up to a 75-year service life. Based on these results, the annual Probability of Failure was estimated, and the reliability index β was determined, which complies with the target values established in the DNV-GL standards. The obtained results indicate that the proposed methodology satisfies fatigue design criteria and constitutes a viable tool for the evaluation and design of steel bridges using real traffic data.

INDICE.

OFICIO DE ACEPTACIÓN DE TESIS.....	II
OFICIO DE IMPRESIÓN.....	III
DEDICATORIA.	IV
AGRADECIMIENTOS.	V
RESUMEN.	VI
ABSTRAC.	VI
INDICE.....	VII
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
2.1. APORTACIÓN METODOLÓGICA.....	12
2.2. OBJETIVOS.....	13
2.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	13
2.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2.3. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	14
3. MARCO TEÓRICO.	15
3.1. DEFINICIÓN VEHICULAR NORMATIVA.....	16
3.1.1. VARIABILIDAD DEL TRÁNSITO.....	16
3.1.2. TIPOS DE VEHÍCULOS.....	17
3.2. LÍNEAS DE INFLUENCIA E HISTORIA DE ESFUERZOS.....	19
3.2.1. PRINCIPIOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	19
3.2.2. OBTENCIÓN DE LA HISTORIA DE ESFUERZOS.....	21
3.3. FUNDAMENTOS DEL ESTADO LÍMITE DE FATIGA.....	23
3.3.1. CAUSAS DE LA FATIGA EN MATERIALES.....	23
3.3.2. CURVA ESFUERZO VS NÚMERO DE CICLOS S-N.....	24

3.3.3.	REGLA DE ACUMULACIÓN DE DAÑO DE PALMGREN-MINER.....	27
3.3.4.	CICLOS DE CARGA Y MÉTODOS DE CONTEO.....	29
3.4.	FUNDAMENTOS DE LA CONFIABILIDAD.	29
3.4.1.	VARIABLES ALEATORIAS.	30
3.4.2.	MODELO DE SIMULACIÓN DE MONTE CARLO.	32
3.4.3.	PROBABILIDAD DE FALLA E ÍNDICE DE CONFIABILIDAD.	32
4.	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.	33
4.1.	SISTEMA ESTRUCTURAL DEL PUENTE.....	34
4.2.	MODELADO DE VARIABLES DETERMINISTAS Y ALEATORIAS.	35
4.2.1.	VARIABLES DETERMINISTAS.....	35
4.2.2.	VARIABLES ALEATORIAS.	37
4.3.	CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA VEHICULAR.....	42
4.3.1.	CLASIFICACIÓN VEHICULAR.	42
4.3.2.	DISTRIBUCIÓN DE CARGAS POR CLASE VEHICULAR.....	46
4.3.3.	SIMULACIONES DE CARGAS VEHICULARES PARA DAÑO BASE.	52
4.3.4.	APLICACIÓN DE CARGAS AL MODELO ANALÍTICO.	53
4.4.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y OBTENCIÓN DE ESFUERZOS.	54
4.4.1.	DIAGRAMAS DE ELEMENTOS MECÁNICOS.	54
4.4.2.	HISTORIA DE ESFUERZOS.	57
4.5.	CONTEO DE CICLOS Y EVALUACIÓN DE DAÑO POR FATIGA.	59
4.5.1.	HISTOGRAMA DE ESFUERZOS.	60
4.5.2.	APLICACIÓN DE LA REGLA DE DAÑO ACUMULADO.	60
4.6.	ESTIMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD.....	61
4.6.1.	PROBABILIDAD DE FALLA.....	61
4.6.2.	ÍNDICE DE CONFIABILIDAD.....	62
5.	CASO DE ESTUDIO: PUENTE CALAPA.....	63
5.1.	SISTEMA ESTRUCTURAL DEL PUENTE.....	64

5.2.	DEFINICIÓN DE VARIABLES.....	64
5.3.	CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA VEHICULAR.....	67
5.4.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y OBTENCIÓN DE ESFUERZOS.....	69
5.5.	CONTEO DE CICLOS Y EVALUACIÓN DE DAÑO.....	73
5.6.	ESTIMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD.....	75
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	80
6.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA.....	80
6.2.	ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD.....	81
6.3.	EVOLUCIÓN DEL DAÑO ACUMULADO.....	83
6.4.	EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL.....	85
6.5.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARAMÉTRICA.....	86
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	93
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
	APÉNDICES.....	96
A.	DISTRIBUCIÓN PROBABILISTA DEL NÚMERO DE OCUPANTES.....	96
B.	DISTRIBUCIÓN PROBABILISTA DE CARGAS ADICIONALES.....	98
C.	TABLAS DE CARACTERÍSTICAS DE VEHÍCULOS LIGEROS.....	100
D.	TABLAS DE CARACTERÍSTICAS DE VEHÍCULOS PESADOS.....	102
E.	DISTRIBUCIÓN DE PESOS: CLASES C2, C3, T3S2, T3S3 Y T2S3R4.....	103

1. INTRODUCCIÓN.

El análisis, diseño y la evaluación estructural de los puentes vehiculares representan un tema de gran relevancia dentro del campo de la ingeniería estructural, especialmente en países donde el crecimiento del tránsito y la demanda sobre las infraestructuras existentes han aumentado. La movilidad terrestre depende en gran medida de la red carretera federal, por lo que el desempeño adecuado y la vida útil de los puentes resulta fundamental para garantizar la seguridad de los usuarios y la continuidad operativa de las vías terrestres.

Dentro de los diferentes mecanismos de deterioro que pueden presentarse en las estructuras metálicas, la fatiga se reconoce como uno de los fenómenos críticos debido a su carácter progresivo, acumulativo y, en muchos casos, silencioso, puesto que no siempre muestra señales evidentes de daño previo a alcanzar la condición de falla (Schijve, 2009).

En este contexto, el análisis de confiabilidad surge como una herramienta para incorporar de manera estimada la naturaleza aleatoria de las variables involucradas en la respuesta de la estructura y en los elementos críticos que tienden a presentar fracturas por fatiga (Chung, 2004). Por lo tanto, en lugar de utilizar enfoques deterministas tradicionales, los métodos basados en confiabilidad permiten evaluar la probabilidad de falla considerando la variabilidad del tránsito y el carácter estocástico del modelo analítico y de la aplicación de cargas. De esta manera, es posible obtener la probabilidad de falla de la estructura con respecto a los años de utilidad.

Para ello, en este trabajo se analiza la respuesta de una viga de acero representativa de un puente típico, incorporando modelos de carga obtenidos a partir de datos vehiculares reales, así como técnicas de conteo de ciclos, criterios de acumulación de daño y métodos probabilísticos que permiten evaluar la probabilidad de falla por fatiga en función del tiempo.

A través de esta investigación se busca establecer una contribución metodológica explícita para la evaluación de puentes de acero, superando las limitaciones de la práctica normativa mexicana. Al sustituir los modelos de carga deterministas por un enfoque probabilista que integra datos vehiculares reales y simulación estocástica, es posible cuantificar la evolución del daño acumulado y estimar la probabilidad de falla por fatiga a lo largo del tiempo.

La presente tesis se organiza de la siguiente manera:

Capítulo 1. Describe el contexto general del estudio y los fundamentos que enmarcan el desarrollo de la investigación.

Capítulo 2. Presenta el planteamiento del problema, en el cual se define el contexto específico del estudio, se justifica la necesidad de una metodología basada en confiabilidad para la evaluación de fatiga en puentes vehiculares, y se establecen los objetivos, alcances y limitaciones de la investigación.

Capítulo 3. Desarrolla el marco teórico, incluyendo los fundamentos de tránsito vehicular, líneas de influencia, conceptos de fatiga y bases de la confiabilidad estructural; los cuales se emplean en capítulos posteriores para el desarrollo de la metodología.

Capítulo 4. Detalla la metodología propuesta, desde la selección de un sistema estático para el puente, hasta la evaluación de la probabilidad de falla por daño acumulado.

Capítulo 5. Presenta la aplicación práctica de la metodología propuesta mediante el análisis del *Puente Calapa*, incluyendo la modelación estructural, la obtención de los historiales de esfuerzos, el cálculo del daño acumulado y la evaluación de la confiabilidad de falla por fatiga.

Capítulo 6. Expone el análisis de resultados y la discusión derivada de este trabajo de investigación.

Capítulo 7. Describe las conclusiones a las que se llegaron cumpliendo cada objetivo planteado, además, se proponen recomendaciones orientadas tanto a la práctica profesional, como a futuras líneas de investigación

Capítulo 8. Muestra las referencias bibliográficas consultadas para el desarrollo de la metodología.

Apéndices. Contiene la información complementaria de bases de datos, desarrollos analíticos y caracterización de las cargas para cada categoría vehicular.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El fenómeno de fatiga constituye uno de los principales mecanismos de deterioro en puentes vehiculares de acero sometidos a cargas cíclicas. A pesar de que las normativas de diseño y evaluación estructural contemplan criterios específicos para su revisión, dichos procedimientos se basan, en enfoques deterministas que emplean modelos de carga idealizados y valores nominales de las variables involucradas. En la práctica, el tránsito vehicular presenta una variabilidad significativa en términos de magnitud de cargas y frecuencias de paso. No obstante, los sistemas estructurales, las propiedades de los materiales y los propios modelos de diseño por fatiga están sujetos a incertidumbres inherentes.

Como consecuencia, las metodologías tradicionales proporcionan resultados que, si bien son útiles desde el punto de vista normativo, no permiten cuantificar de manera directa el nivel real de seguridad estructural ni la probabilidad de falla asociada al fenómeno de fatiga a lo largo de la vida útil de la estructura. Esto limita la capacidad de tomar decisiones informadas en relación con la gestión, mantenimiento y rehabilitación de puentes existentes.

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar una metodología que permita evaluar el comportamiento a fatiga de puentes vehiculares de acero desde un enfoque basado en confiabilidad estructural, incorporando explícitamente la naturaleza aleatoria de las cargas de tránsito y de los parámetros relevantes del problema, que permita estimar la probabilidad de falla asociada al daño acumulado.

2.1. APORTACIÓN METODOLÓGICA.

La principal contribución de la presente metodología radica en la transición de un enfoque de evaluación determinista tradicional hacia un esquema de análisis probabilista integral. A diferencia de las prácticas convencionales de la normativa vigente, las cuales se limitan a verificar estados límite mediante el uso de vehículos de diseño y factores de carga estáticos, esta propuesta integra de manera explícita la naturaleza estocástica del fenómeno.

Esta metodología se vuelve innovadora al acoplar historiales de carga derivados de aforos vehiculares de la red carretera mexicana. Este contraste permite no solo evaluar la seguridad de la estructura, sino cuantificar la evolución temporal del daño acumulado y estimar la probabilidad anual de falla y el índice de confiabilidad a lo largo de la vida útil proyectada.

Asimismo, una aportación relevante de esta investigación es la formalización de un modelo replicable. El estudio propone un procedimiento sistemático y estructurado que se organiza en etapas claramente definidas: caracterización del tránsito, modelación estructural, generación de historias de esfuerzo, conteo de ciclos, evaluación de daño y simulación probabilista. En este sentido, el enfoque probabilista adoptado no solo contribuye al análisis académico del fenómeno de fatiga, sino que también establece una base racional para la toma de decisiones en el ámbito de la administración y conservación de infraestructura carretera.

2.2. OBJETIVOS.

2.2.1. OBJETIVO GENERAL.

Desarrollar una metodología para estimar la probabilidad de falla asociada al fenómeno de fatiga por daño acumulado en puentes vehiculares sometidos a cargas cíclicas reales a lo largo de su vida útil proyectada, considerando de manera explícita la variabilidad del tránsito vehicular y las incertidumbres de cargas, concentración de esfuerzos y del modelo de daño.

2.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- 1) Definir un sistema estructural representativo de un puente vehicular de material de acero para la evaluación de los efectos debidos a cargas móviles.
- 2) Identificar y definir las variables deterministas y aleatorias que intervienen en la evaluación del daño por fatiga.
- 3) Caracterizar el tránsito vehicular mediante el análisis estadístico de datos reales, con el fin de obtener modelos probabilísticos de cargas móviles, y así simular diferentes condiciones para todos los casos vehiculares y aplicarlos a la estructura de estudio.
- 4) Resolver el análisis estructural para obtener los historiales de esfuerzos en los elementos críticos a partir de líneas de influencia y simulación del paso de vehículos.
- 5) Procesar los historiales de esfuerzos por medio del método de conteo de ciclos *Rainflow Counting* y evaluar el daño acumulado base del primer año a través de la Regla de Palmgren – Miner.
- 6) Estimar la confiabilidad por fatiga del miembro estructural a través del cálculo de la probabilidad de falla del puente estudiado utilizando el modelo probabilista de Monte Carlo para simular diferentes condiciones y variables del modelo analítico.

2.3. ALCANCES Y LIMITACIONES.

El alcance del trabajo comprende la modelación del tránsito a partir de datos reales, la simulación probabilista de las cargas, el análisis estructural de un elemento representativo y la evaluación del daño por fatiga mediante técnicas de conteo de ciclos y modelos lineales de acumulación de daño. Asimismo, en este estudio no se consideran los efectos asociados a acciones sísmicas, de viento, cambios volumétricos, procesos de corrosión ni asentamientos.

Cabe resaltar que, dado que la normativa mexicana vigente (N·PRY·CAR·6·01·003/25) indica explícitamente que las cargas por fatiga se definen por el convoy de fatiga de la norma AASHTO 2024, los parámetros de referencia y comparaciones serán tomados de ésta última.

Adicionalmente, el análisis se limita al estudio de un elemento tipo viga modelado estáticamente determinado con comportamiento elástico-lineal. La evaluación de la fatiga se realiza mediante un enfoque basado en esfuerzos y daño acumulado, sin considerar modelos de propagación de grietas ni análisis basados en mecánica de la fractura. Es importante establecer una discusión crítica sobre las implicaciones de estas idealizaciones en los resultados obtenidos. En primer lugar, la idealización del sistema como una viga estáticamente determinada no considera la capacidad de redistribución de momentos flexionantes en los apoyos, resultando en una estimación más severa de los esfuerzos al centro del claro. Por lo que los resultados serán válidos siempre y cuando el sistema estructural del puente coincida con esta idealización, en caso contrario se deberá ajustar la obtención de las fuerzas internas dentro de la metodología.

Por otro lado, la adopción de la regla de Palmgren-Miner implica una hipótesis de acumulación de daño lineal, este enfoque permite integrar de manera eficiente las historias de carga obtenidas mediante conteo de ciclos y su evaluación dentro de un marco probabilista. No obstante, el modelo no considera efectos de secuencia de carga, interacción entre ciclos de esfuerzo ni fenómenos explícitos de propagación de grieta basados en mecánica de fractura, por lo que los resultados deben interpretarse dentro del alcance de un modelo de probabilidad de falla calculada a la fase de iniciación del agrietamiento. Por lo tanto, los resultados representan el momento en que el elemento empieza a presentar daño por fatiga. No implica que el puente colapse ni que ocurra una falla frágil repentina, sino únicamente que se ha alcanzado un nivel de deterioro que requiere atención.

3. MARCO TEÓRICO.

El estudio del comportamiento de cualquier estructura ante cargas móviles inicia con la caracterización del tránsito, la clasificación vehicular proporciona el marco para entender qué tipos de unidades circulan sobre el puente, cuáles son sus configuraciones del número de ejes y qué distribución de pesos presentan en cada uno. Estas características, que aparentemente son simples datos descriptivos, constituyen la base para modelar el fenómeno real que generan sobre la estructura. Una vez definidas las características de los vehículos, es necesario comprender cómo estos interactúan con la estructura.

De primera instancia, las líneas de influencia se convierten en una herramienta analítica fundamental para analizar la respuesta de elementos sometidos a diferentes cargas simultáneas, ya que permiten determinar cómo se modifica el esfuerzo interno medido en un punto específico en cada instante cuando la carga cambia de posición. A partir de estas líneas, es posible generar el historial de esfuerzos que experimenta la estructura cuando los vehículos transitan por ella. Este historial de esfuerzos es el punto de partida para el análisis de fatiga, ya que describe de manera detallada la secuencia de esfuerzos alternantes que inducen daño progresivo en el material.

La fatiga es un mecanismo de deterioro acumulativo que se presenta incluso cuando los esfuerzos aplicados son menores que la resistencia estática del elemento y el fenómeno se enfoca directamente al comportamiento de un material específico. Este comportamiento se ha estudiado extensamente mediante curvas S-N, métodos de conteo de ciclos y reglas de acumulación de daño. Estos fundamentos permiten visualizar la degradación que produce cada ciclo ante un patrón determinado de cargas. Sin embargo, el enfoque determinista resulta insuficiente cuando se considera que las cargas vehiculares presentan incertidumbre y utilizar un vehículo de diseño resulta poco realista. Por ello, se recurre a la teoría de confiabilidad, mediante la cual podemos variar aleatoriamente las cargas móviles y estimar un tiempo determinado de la vida útil de la estructura de estudio.

En conjunto, los temas abordados en este capítulo constituyen los pilares necesarios para comprender y desarrollar una metodología de análisis de fatiga basada en enfoques probabilistas.

3.1. DEFINICIÓN VEHICULAR NORMATIVA.

De primera instancia es necesario conocer que tipos de vehículos se consideran para el análisis de estudio, esta información se encuentra en los reglamentos actuales y es facilitada por los organismos públicos de transporte como el IMT o la SICT.

3.1.1. VARIABILIDAD DEL TRÁNSITO.

El tránsito vehicular presenta una de las mayores fuentes de incertidumbre en el análisis, principalmente por la elevada densidad de vehículos que circulan diariamente. No obstante, esta variabilidad puede ser parcialmente conocida mediante estimaciones del flujo promedio de vehículos que transitan por una autopista específica.

Dichas estimaciones se obtienen a través de aforos vehiculares o mediante los reportes oficiales elaborados por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) en dónde se muestra el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA). Estos reportes no solo identifican las categorías vehiculares, sino que también proporcionan datos estadísticos sobre el volumen y la distribución del tránsito en una estación determinada. En resumen, el TDPA es un registro estadístico aproximado que realiza la Secretaría para llevar un conteo de los vehículos que pasan a través de una carretera que cuente con una estación de monitoreo.

La información del TDPA se encuentra publicada en los sitios oficiales de la SICT, actualmente solo se encuentran los datos actualizados del año 2024. A continuación, se presenta un ejemplo del TDPA 2023 de la carretera de cuota Cuacnopalan – Oaxaca:

22	CARR : Cuacnopalan - Oaxaca (Cuota)	CLAVE: 00109														RUTA: MEX-135D										AÑO: 2023	
LUGAR		ESTACION						CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCIENTO										COORDENADAS									
		KM	TE	SC	TDPA	M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2M	OTROS	A	B	C	K	D	LATITUD	LONGITUD						
T. C. Puebla - Acatzingo (Cuota)		0.00	3	0	12225	0.9	69.6	6.5	8.3	3.2	6.4	2.0	2.5	0.6	70.5	6.5	23.0	0.066	0.516	18.817421	-97.491090						
T. Der. Cuacnopalan		1.80	3	0	11609	0.6	72.2	5.2	9.5	2.8	5.2	1.4	2.5	0.6	72.8	5.2	22.0	0.061	0.511	18.811936	-97.490708						
Plaza de Cobro Tehuacán		40.00	2	0	11619	0.7	72.5	4.6	5.7	5.3	6.1	1.3	2.9	0.9	73.2	4.6	22.2	0.083	0.500	18.487088	-97.456196						
Plaza de Cobro Tehuacán		40.00	3	0	6620	4.0	63.8	8.8	6.2	3.7	5.5	2.8	4.3	0.9	67.8	8.8	23.4	0.061	0.517	18.483883	-97.456522						
X. C. Tehuacán - Huajuapán de León		48.00	3	0	6848	4.1	64.8	7.3	13.9	1.7	3.3	1.2	2.9	0.8	68.9	7.3	23.8	0.066	0.509	18.421766	-97.412077						
T. Izq. San Gabriel Chilac		61.00	3	0	5834	2.6	70.4	7.8	5.4	3.0	4.9	1.6	3.4	0.9	73.0	7.8	19.2	0.069	0.517	18.323531	-97.367623						
Plaza de Cobro Miahuatlán		70.70	2	0	5973	0.9	69.2	6.4	4.9	6.4	5.9	1.7	3.7	0.9	70.1	6.4	23.5	0.083	0.500	18.264632	-97.315617						
Plaza de Cobro Miahuatlán		70.70	3	0	5464	2.5	67.1	8.4	6.6	3.4	6.1	1.4	4.3	0.2	69.6	8.4	22.0	0.069	0.532	18.261232	-97.311996						
Lim. Edos. Terr. Pue. Ppla. Oax.		83.50																									
T. Izq. Tepelmeme		123.60	3	0	5351	1.5	62.8	7.6	11.6	3.8	5.0	3.5	3.9	0.3	64.3	7.6	28.1	0.066	0.517	17.860652	-97.377600						
X. C. Tlacoatepec - Tepelmeme		125.78	3	0	5674	3.0	61.7	7.9	9.3	4.6	5.2	3.6	4.4	0.3	64.7	7.9	27.4	0.070	0.516	17.884615	-97.373337						
Plaza de Cobro Coixtlahuacán		141.30	2	0	5055	0.8	66.3	7.1	5.1	7.1	6.6	1.7	4.4	0.9	67.1	7.1	25.5	0.083	0.500	17.729021	-97.353781						
T. Izq. Asunción Nochistlán		175.50	1	0	5318	1.9	65.5	8.3	8.1	3.7	5.5	2.9	3.8	0.3	67.4	8.3	24.3	0.064	0.528	17.465724	-97.248915						
T. Izq. Asunción Nochistlán		175.50	3	0	6974	1.6	67.0	4.6	12.4	3.5	5.2	2.5	3.0	0.2	68.6	4.6	26.8	0.061	0.518	17.457371	-97.242813						
Plaza de Cobro Huixtla		220.00	2	0	7117	1.3	76.6	4.5	4.3	4.6	4.3	0.9	2.9	0.6	77.9	4.5	17.6	0.083	0.500	17.275031	-96.915296						
Plaza de Cobro Huixtla		220.00	3	1	4229	2.3	74.4	5.3	7.8	2.5	3.2	1.3	2.3	0.9	76.7	5.3	18.0	0.087	0.520	17.272110	-96.911936						
Plaza de Cobro Huixtla		220.00	3	2	3907	2.2	74.4	5.2	7.9	2.6	3.3	1.2	2.4	0.6	76.6	5.2	18.2	0.092	0.520	17.272159	-96.911866						
T. C. Huajuapán de León - Oaxaca		242.70	1	1	4794	2.5	68.4	4.2	11.6	3.5	5.1	1.3	2.6	0.6	70.9	4.2	24.9	0.070	0.520	17.147278	-96.785087						
T. C. Huajuapán de León - Oaxaca		242.70	1	2	4425	2.5	67.5	4.5	12.0	3.7	5.1	1.4	2.6	0.7	70.0	4.5	25.5	0.093	0.520	17.147369	-96.785092						

Figura 1. TDPA muestreado de la Carretera Cuacnopalan-Oaxaca. Fuente: SICT 2023.

Como se observa, en la lista vienen diferentes datos que agrupan a los vehículos en porcentajes dependiendo sus características físicas. Las clases que se considerarán para este ejemplo corresponden a: Clase M, Clase A, Clase B, Clase C2, Clase C3, Clase T3S2, Clase T3S3 y T3S2R4 (Ver Tabla 1); asimismo, en la columna del TDPA se indica la cantidad promedio de los vehículos diarios que pasaron por las estaciones. Con ello se obtiene un panorama más claro del comportamiento esperado del tránsito, permitiendo estimar el intervalo de cargas que, de manera realista, actúan sobre una estructura existente.

3.1.2. TIPOS DE VEHÍCULOS.

Para acotar el campo de variables vehiculares se pueden definir grupos o clases con vehículos que tienen características físicas similares entre sí. De acuerdo con la Normativa Oficial Mexicana (NOM) y con artículos y manuales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en México se catalogan al menos 8 grupos de vehículos en dónde toman como referencia las dimensiones exteriores, el número de ejes, pesos en vacío y pesos brutos vehiculares.

En la siguiente tabla se muestra una clasificación de los vehículos indicada por la NOM-012-SICT-2017 que los divide por grupos denominados como Clases:

Tabla 1. Clasificación vehicular atendiendo a su clase. Fuente: NOM-012-SICT-2-2017.

CLASE	NOMENCLATURA
LIGERO	A / M
AUTOBÚS	B
CAMIÓN UNITARIO	C
TRACTOCAMIÓN	T
CONVERTIDOR	D
CAMIÓN REMOLQUE	C-R
TRACTOCAMIÓN ARTICULADO	T-S
TRACTOCAMIÓN DOBLEMENTE ARTICULADO	T-S-R / T-S-S

De acuerdo con la misma normativa referenciada (NOM-012-SICT-2-2017), la definición de los vehículos descritos en la Tabla 1 se presentan a continuación:

Vehículo ligero: Vehículo automotor, de los cuales el Peso Bruto Vehicular no excede un peso mayor a 3857 kg.

Autobús: Vehículo automotor de dos o tres ejes (B1 y B2), con seis o más llantas con capacidad de más de 30 personas.

Camión Unitario: Vehículo automotor de dos o tres ejes (C1 y C2), con seis o más llantas que tiene como finalidad el transporte de cargas pesadas y un PBV mayor a 4 toneladas.

Tractocamión: Vehículo automotor que no es de carga y tiene la finalidad de arrastrar a un semirremolque o remolque, ya sea individual o en conjunto.

Camión Remolque: Vehículo constituido por un camión unitario acoplado a un remolque por medio de un convertidor. Su finalidad es transportar cargas pesadas.

Tractocamión Articulado: Vehículo constituido por un tractocamión y un semirremolque, destinado a transporte de cargas pesadas.

Tractocamión doblemente Articulado: Vehículo constituido por un tractocamión, que, mediante mecanismos de articulación, se acoplan a un semirremolque y un remolque, en algunos casos puede ser doble semirremolque. Se le atribuyen uso para cargas pesadas.

Esta clasificación divide a los vehículos conforme al uso que se les asigna, y no necesariamente por el número de ejes o por su configuración geométrica. Esta distinción resulta útil ya que permite agrupar unidades con funciones operativas similares sin entrar aún en la especificación detallada de pesos por eje. Por lo anterior, dicha clasificación constituye el punto de partida para reducir el número de variables a considerar en el análisis.

Además, es importante señalar que la nomenclatura utilizada en la [Tabla 1](#) representa una forma estandarizada de abreviar cada tipo de vehículo. Esta nomenclatura coincide con la empleada en los reportes oficiales elaborados por la SICT, particularmente en los registros del TDPA.

3.2. LÍNEAS DE INFLUENCIA E HISTORIA DE ESFUERZOS.

Usualmente en un análisis de cargas estáticas se obtienen los diagramas de elementos mecánicos para conocer el punto crítico en donde se generan los esfuerzos máximos, sin embargo, en el caso de cargas móviles como es el tránsito vehicular, la respuesta de los elementos mecánicos va cambiando conforme el vehículo pasa por la estructura y en cada instante se van presentando diferentes puntos máximos. Para estos casos existe un concepto en el análisis estructural sujeto a cargas variables conocido como Líneas de Influencia, tal como menciona Kassimali (2015):

“Una línea de influencia es una gráfica de una función de respuesta de una estructura como una función de la posición de una carga unitaria moviéndose a través de una estructura.”

Como se observa, estas líneas de influencia están pensadas para una carga unitaria que pasa a lo largo de la estructura, y se puede obtener una línea de influencia para los casos de reacciones, cortantes, momentos y, si aplica, axiales; todas estas dependientes de una función de la posición de la carga.

3.2.1. PRINCIPIOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

Previo a obtener las líneas de influencia, es necesario resolver el equilibrio externo e interno del sistema estructural que se revise. Dado que la estructura de estudio es un puente vehicular, es válido idealizar el modelo estructural como una viga estáticamente determinada, o simplemente apoyada; en la cual las ecuaciones de la estática son capaces de resolver el equilibrio al tener un máximo de tres incógnitas en dos extremos “i” y “j”; en dónde el extremo “i” tiene dos Grados de Libertad (GDL) libres permitiendo una reacción horizontal y una vertical, mientras que el extremo “j” únicamente tiene un GDL vertical:

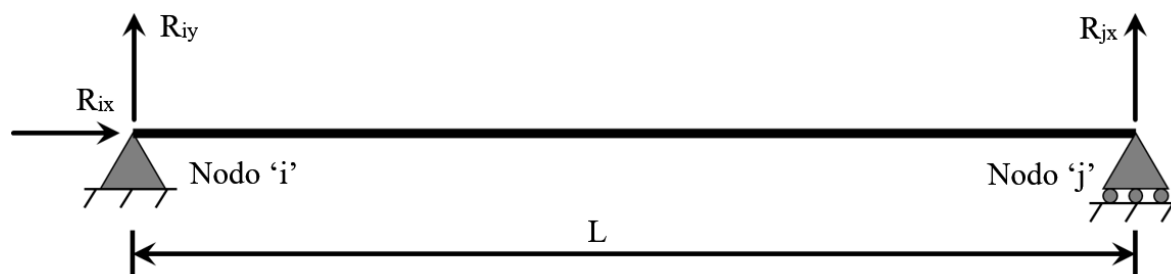


Figura 2. Modelo analítico considerado (Viga simplemente apoyada). Fuente: Propia.

Una viga simplemente apoyada es considerada una estructura plana ya que es un elemento prismático, largo y recto con cargas aplicadas en un solo plano (Kassimali, 2015); por lo que se espera un trabajo interno que se visualice en esfuerzos flexionantes y axiales, o también llamado esfuerzos normales. Los esfuerzos normales son producto del par flector en la sección transversal del elemento y se obtienen por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_M = \frac{My}{I} \quad \sigma_N = \frac{P}{A}$$

Dónde:

- σ_M es el esfuerzo normal a flexión.
- σ_N es el esfuerzo normal axial.
- M es el Momento Actuante en un punto de interés.
- y es la distancia del centroide de la sección a la fibra más alejada en compresión.
- I es la Inercia de la sección en la dirección de análisis.
- P es la fuerza longitudinal aplicada a la sección.
- A es el área de la sección.

Tal como se observa, es necesario conocer los elementos mecánicos (M, N) para obtener los esfuerzos actuantes en la sección. Estos se calculan con las ecuaciones de equilibrio interno dependiendo de las cargas que se le apliquen, ya que el tránsito vehicular se idealiza como un tren de cargas se utiliza el principio de superposición con la finalidad de obtener diferentes reacciones y esfuerzos en un solo punto con cargas aplicadas simultáneamente.

El principio de superposición establece que el efecto de diferentes cargas aplicadas al mismo tiempo es igual a la suma de cada una de ellas analizada de manera aislada, además de que simplifica la resolución del análisis estructural (Kassimali, 2015). Es decir, si se revisa un vehículo de 3 ejes, es necesario resolver 3 veces la misma viga con una carga P aplicada en diferentes puntos. Esto, aunque suene complejo, es más fácil ya que la obtención de momentos y axiales para cada carga P puede realizarse con una simple ecuación.

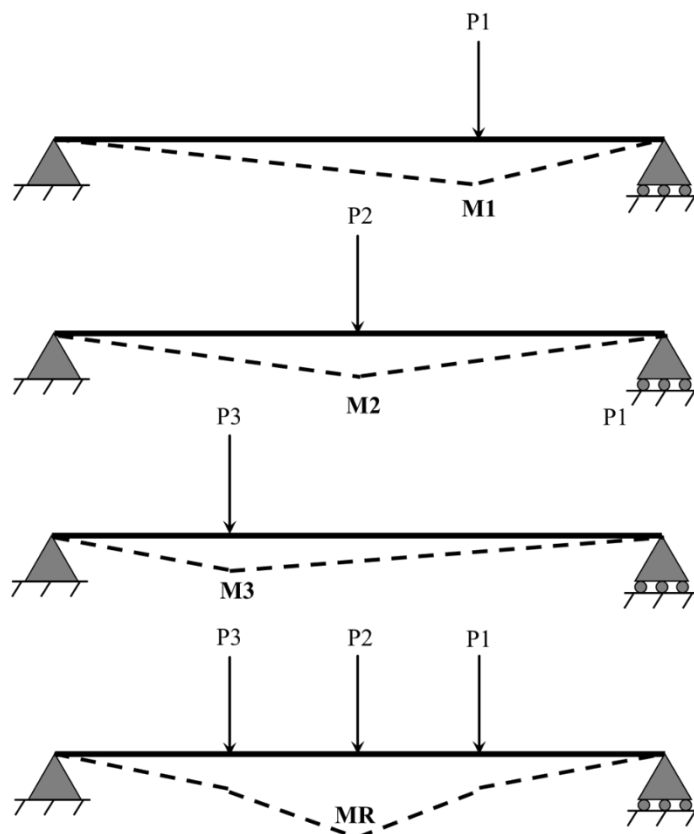


Figura 3. Ejemplo de Principio de Superposición de cargas P y momentos M .

3.2.2. OBTENCIÓN DE LA HISTORIA DE ESFUERZOS.

Como se explicó en el apartado anterior, el presente documento se centra en el estudio de una serie de cargas concentradas separadas a una distancia determinada entre sí y no se puede obtener una línea de influencia única, sino que se debe llegar al valor de una función de respuesta en una posición dada de un tren de cargas. Para abordar este escenario, se selecciona un punto crítico de análisis, que para vigas simplemente apoyadas suele ubicarse a la mitad del claro $L/2$, aunque dependiendo del sistema estructural pueden aparecer otros puntos relevantes; para cada posición del vehículo sobre la estructura, se determinan los efectos internos en dicho punto, generando así un historial de respuesta que describe la interacción entre la estructura y el tránsito móvil.

De esta forma, al desplazar las configuraciones de carga, cuyas magnitudes y espaciamientos dependen de la tipología vehicular analizada, se registra la magnitud del momento en el punto

$L/2$ para cada posición del vehículo. La recopilación de estos datos permite construir la historia de esfuerzos completa, necesaria para el posterior conteo de ciclos:

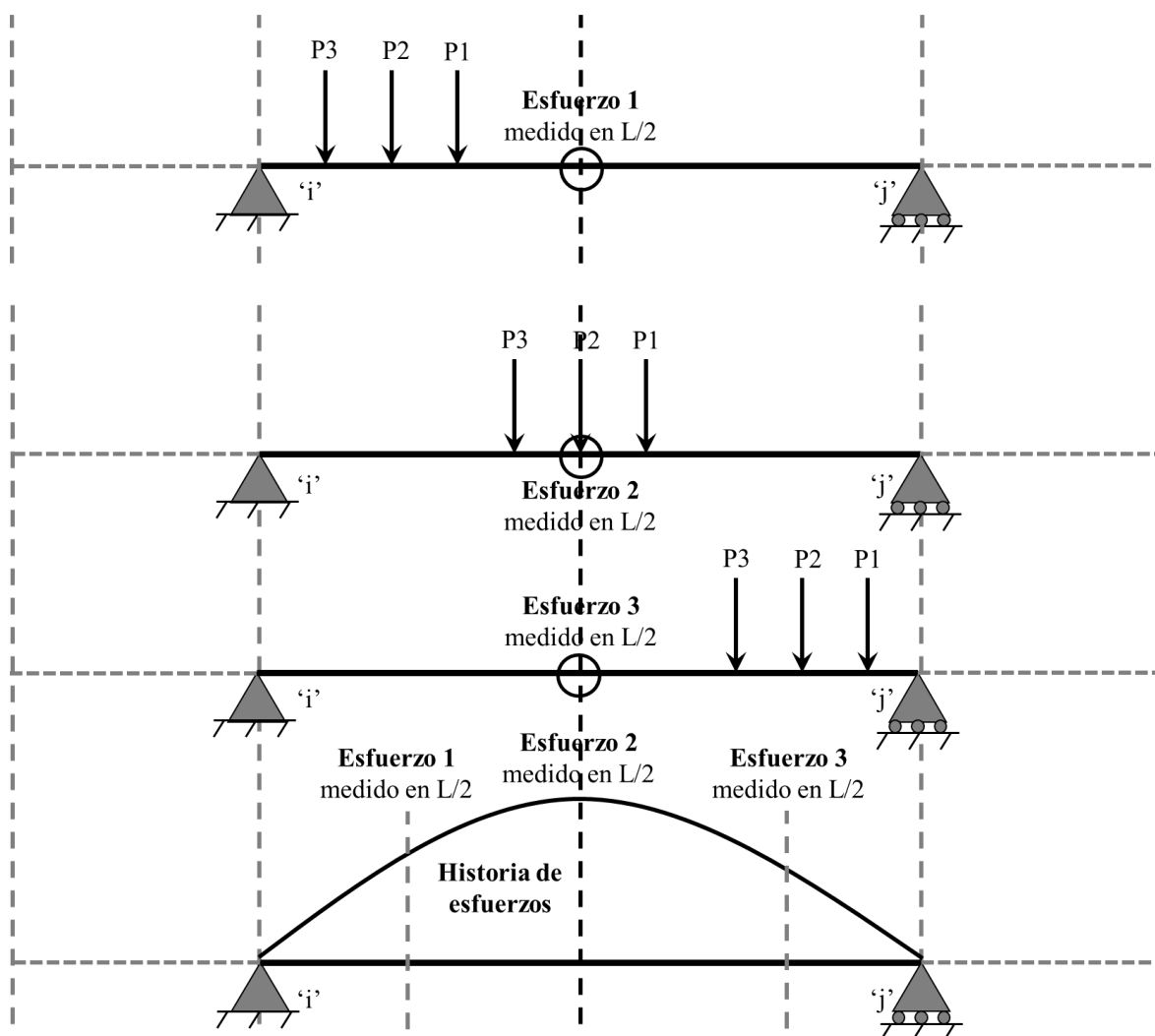


Figura 4. Gráfica esperada de la historia de esfuerzos medidos en punto de interés $L/2$.

Tal como se muestra en la Figura 4, se escogen puntos arbitrarios de aplicación de las cargas y para cada caso se miden los esfuerzos en la zona crítica ubicada a la mitad del claro $L/2$. Como resultado final, se obtiene una curva que representa la historia de esfuerzos en el punto crítico de la estructura. En esta gráfica, el primer valor, denominado “**Esfuerzo 1**”, corresponde al esfuerzo desarrollado en la mitad del claro cuando la carga se encuentra próxima al apoyo izquierdo. El punto “**Esfuerzo 2**” representa el esfuerzo generado cuando la carga se ubica precisamente en la mitad de la viga. Finalmente, el punto “**Esfuerzo 3**” refleja el esfuerzo obtenido en la mitad del claro cuando la carga se aproxima al apoyo

derecho. Este mismo procedimiento es el que se plantea para la obtención de la respuesta de la estructura ante la variación del tránsito, en el ejemplo se mostraron tres posibles cargas, pero pueden representar el número necesario de ejes de los vehículos existentes.

3.3. FUNDAMENTOS DEL ESTADO LÍMITE DE FATIGA.

La fatiga en los materiales es un fenómeno mecánico causado por un elevado número de ciclos de carga que actúan sobre un elemento, en este caso específico, de acero. La falla comienza a generar pequeñas grietas en un punto del material que se van incrementando conforme pasa el tiempo mientras que la carga se aplica y se retira, en este proceso se genera una inversión de esfuerzos de tensión, esfuerzos de compresión y esfuerzos nulos que van deteriorando el material hasta generar grietas que conducen a una falla súbita por fractura.

3.3.1. CAUSAS DE LA FATIGA EN MATERIALES.

“Al parecer, la naturaleza de esta falla deriva de la existencia común de imperfecciones microscópicas en la superficie del elemento, donde el esfuerzo localizado se vuelve mucho mayor que el esfuerzo promedio que actúa sobre la sección transversal” (Hibbeler, 2011).

De esta forma, se distingue que la falla por fatiga se debe principalmente a las cargas cíclicas y a deterioros del material desde su origen, mas no por su vida útil ante una carga máxima o deformaciones en el miembro. En este punto se puede cuestionar lo que indica la NTCDEA (2023) en su apartado de diseño por fatiga cuando se menciona que esta falla se considera como un estado límite de servicio.

Conforme a lo indicado en la Norma Técnica Complementaria de Criterios y Acciones (2023), un estado límite de servicio corresponde a aquellas condiciones que presentan daños que afectan la funcionalidad de una construcción, como deflexiones excesivas, vibraciones u otros efectos que comprometen el uso adecuado sin implicar colapso. Por su parte, la fatiga no necesariamente presenta estas características, sino que puede conducir a una falla súbita, semejante a un estado límite último o de falla.

Entonces, ¿la falla por fatiga realmente un estado límite de servicio? La respuesta es sí, siempre y cuando se tome como guía la filosofía de funcionalidad y de seguridad de las estructuras a largo plazo. Sin embargo, una falla por fatiga presenta daños más graves que una falla de servicio por lo que también puede asimilarse a un estado límite de falla con la

condicionante de que la fractura se presenta a causa de esfuerzos a largo plazo y no de manera inmediata como una falla de diseño.

En consecuencia, en este documento no se referirá a la falla por fatiga como un estado límite de servicio o falla, sino una falla mecánica propia del material y a la naturaleza de sus esfuerzos cíclicos, por lo que se nombra estado límite de fatiga.

3.3.2. CURVA ESFUERZO VS NÚMERO DE CICLOS S-N.

A mediados del siglo XVIII, en Francia ocurrió un evento catastrófico que marcó un punto de inflexión en el estudio de la fatiga en materiales. Exactamente el 8 de mayo de 1842 un tren de pasajeros con dirección rumbo a la ciudad de Versalles se descarriló por fallas locales en las vías ferroviarias. Años después, el alemán August Wöhler estudió la causa de las fallas súbitas en estos mecanismos visualizando que se generaban grietas en la superficie de los ejes, que cuando alcanzaban un espesor considerable fallaban de inmediato sin alcanzar su resistencia última.

En consecuencia, Wöhler desarrolló una maquina rotatoria para simular cargas cíclicas en materiales que, en ese entonces, se descubrió que la velocidad con la que se aplicaban las cargas no impactaba en la resistencia, sino que solo afectaba la cantidad de ciclos aplicados, y de esta hipótesis es como él partió para que en la Exhibición Universal de Paris de 1867 presentara por primera vez las curvas S-N.

Las curvas S-N o también conocidas como curvas de Wöhler, son representaciones gráficas que describen la relación entre el esfuerzo aplicado, S, y el número de ciclos a la falla, N, de un material sometido a cargas cíclicas.

Estas curvas son fundamentales en el análisis de fatiga, ya que permiten predecir la vida útil de un componente estructural bajo cargas repetitivas. Cada material tiene su propia curva S-N, la cual se determina experimentalmente mediante ensayos de fatiga controlados en laboratorio.

La forma típica de la curva muestra que, a mayores niveles de esfuerzo, la cantidad de ciclos que el material puede soportar antes de fallar disminuye. Generalmente, en un eje logarítmico para el número de ciclos, la relación es aproximadamente lineal en muchas regiones.

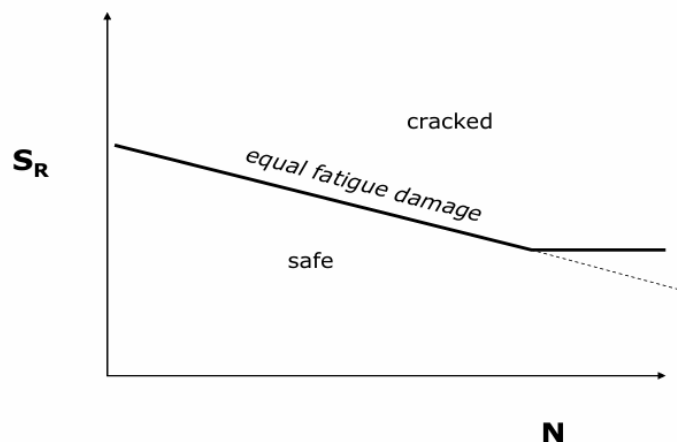


Figura 5. Gráfica S-N tipo. Fuente: *Steel Bridge Design Handbook (2012)*.

La figura anterior corresponde a una curva S-N idealizada. El eje vertical corresponde al rango de esfuerzos, S_R , y el eje horizontal al número de ciclos hasta la falla, N . Si las combinaciones de rango de esfuerzos y ciclos se encuentran por debajo de la curva representan diseños seguros, es decir, que teóricamente pueden tener un número infinito de cargas cíclicas sin presentar daños por fatiga. La región por encima de la curva representa combinaciones de rango de esfuerzos y número de ciclos que se espera resulten en grietas de una longitud superior al tamaño aceptable y tienden a conducir a la falla. La curva principal indica que en diferentes puntos de la gráfica se tienen distintos valores de ciclos y esfuerzo que generan daños por fatiga similares. Esto demuestra que rangos de esfuerzo más altos para un menor número de ciclos sufrirán un daño por fatiga equivalente al de rangos de esfuerzo más bajos para un mayor número de ciclos.

Es importante mencionar que para construir una curva S-N se requieren varios resultados de laboratorio para obtener las constantes del material. Como menciona (Chung, 2004), una expresión que describe la curva S-N de manera lineal es la siguiente:

$$N_f = A * S_R^{-m}$$

Donde:

- N_f es el número de ciclos hasta la falla.
- A y m son constantes propias del material.
- S_R es la amplitud del rango de esfuerzo.

Adicionalmente, se puede visualizar que la curva se encuentra modelada de manera bilineal por lo que el valor de N_f puede determinarse a partir de dos expresiones distintas, dependiendo del nivel de esfuerzo considerado. El primer tramo corresponde a esfuerzos elevados asociados con un número reducido de ciclos, mientras que el segundo tramo representa esfuerzos menores vinculados a un mayor número de ciclos. El punto de transición entre ambos segmentos está definido por el Límite de Fatiga (LFT), el cual establece el umbral que separa ambos modelos de comportamiento:

$$N_1 = A_1 * S_R^{-m_1}$$

$$N_2 = A_2 * S_R^{-m_2}$$

El Límite de Fatiga se encuentra en el punto en donde ambas gráficas son iguales y está dado por la siguiente relación:

$$\begin{aligned} A_1 * S_R^{-m_1} &= A_2 * S_R^{-m_2} \rightarrow \frac{A_1}{A_2} = \frac{S_R^{-m_2}}{S_R^{-m_1}} \rightarrow \frac{A_1}{A_2} = S_R^{(m_1-m_2)} \\ \rightarrow S_R &= LFT = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{\frac{1}{m_1-m_2}} \end{aligned}$$

Estas expresiones se utilizan para graficar la Curva S-N, por otro lado, para obtener el número de ciclos a la falla N_i de cada rango de esfuerzos (Δs) que se esté aplicando en una estructura se utilizan las mismas ecuaciones variando la amplitud de esfuerzos. Este cálculo puede presentar variaciones con respecto a los valores de los esfuerzos y las constantes del material, en dónde el esfuerzo se ve afectado por el espesor de la sección y la constante A tiende a presentar incertidumbre con los modelos físicos con los que se desarrolló (DNV, 2016).

Si $\Delta s \geq LFT$, entonces:

$$N_1 = K_1 * \left(\frac{Q_i}{Z} \right)^{-m_1}$$

Si $\Delta s \leq LFT$, entonces:

$$N_2 = K_2 * \left(\frac{Q_i}{Z} \right)^{-m_2}$$

Donde Δs es el rango de esfuerzos de la demanda; K_1, K_2, m_1 y m_2 son constantes del material, z es un parámetro de diseño por fatiga y Q_i es el rango de esfuerzos efectivo de la demanda, dado por:

$$Q_i = \Delta s (d/d_{ref})^{\alpha_d}$$

Las variables d y d_{ref} son el espesor del miembro analizado y el espesor de referencia igual a 25 mm, respectivamente. El valor α_d y el parámetro de diseño z varían de acuerdo con el número de ciclos y a la categoría de detalle que se revise (DNV, 2016).

A través de las expresiones mostradas es posible obtener el número de ciclos a la falla por fatiga N_i , mismo que se utiliza para obtener la acumulación de daño por medio de la regla de Palmgren-Miner.

3.3.3. REGLA DE ACUMULACIÓN DE DAÑO DE PALMGREN-MINER.

En estructuras sometidas a cargas repetitivas o variables en el tiempo, como puentes bajo tránsito vehicular o componentes expuestos a vibraciones, el fenómeno de fatiga se vuelve un mecanismo de falla importante. Como se mencionó, la fatiga no ocurre por una sola carga extrema, sino por la acumulación de pequeños daños en el material a lo largo de millones de ciclos. Para evaluar este tipo de deterioro, se emplean los llamados criterios de acumulación de daño que permiten estimar que tan cerca está un miembro de alcanzar su límite de vida útil.

El criterio más ampliamente utilizado es la regla lineal de daño acumulado propuesta por Palmgren (1924) y Miner (1945), también conocida como hipótesis de Miner. Este modelo asume que el daño total producido por una secuencia de cargas cíclicas puede estimarse como la suma de los daños individuales provocados por cada rango de esfuerzo. Su expresión general es:

$$D_i = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}$$

Dónde:

- n_i es el número de ciclos aplicados con un rango de esfuerzo específico.
- N_i es el número de ciclos que causaría falla si se aplicara únicamente ese rango de esfuerzo.
- D es el índice de daño acumulado.

Cuando $D \geq 1$, se asume que el componente ha alcanzado su vida útil por fatiga, es decir, que ha ocurrido la falla por acumulación de daño. Si bien este modelo es simplificado, su facilidad de implementación lo hace útil para evaluaciones dentro de simulaciones más complejas. Bajo este enfoque, es posible considerar un número elevado de ciclos de carga, como los generados por el tránsito vehicular, y estimar el daño acumulado a lo largo de un periodo de n años.

Por otro lado, retomando el cálculo del número de ciclos a la falla N_i , se tienen dos casos para la obtención del daño acumulado:

$$D_i = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i * Q_i^{m_j}}{K_j * Z^{m_j}} = \frac{1}{K_j * Z^{m_j}} \sum_{i=1}^n n_i * Q_i^{m_j}$$

Si $\Delta s \geq LFT$, entonces:

$$D_i = \frac{1}{K_1 * Z^{m_1}} \sum_{i=1}^n n_i * Q_i^{m_1}$$

Si $\Delta s \leq LFT$, entonces:

$$D_i = \frac{1}{K_2 * Z^{m_2}} \sum_{i=1}^n n_i * Q_i^{m_2}$$

Se puede observar que los valores constantes son independientes de la demanda y del conteo de los rangos de esfuerzo, por lo que estos pueden variarse de acuerdo con la incertidumbre de cada una, esto se profundiza en el Apartado 3.4.

3.3.4. CICLOS DE CARGA Y MÉTODOS DE CONTEO.

Los esfuerzos que se consideran para obtener el número de ciclos permitidos a la falla por fatiga también son conocidos como ciclos de carga. Se estima que se cumple un ciclo cuando la amplitud del esfuerzo inducido en una estructura tiende a presentar picos máximos y mínimos, la diferencia entre estos valores se le conoce como rango de esfuerzo (Schijve, 2009). La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) establece en la norma ASTM E1049-85 (2005) diferentes técnicas de conteo de ciclos en el análisis de fatiga, incluyendo el procedimiento para la aplicación del método *Rainflow Counting*, el cual permite identificar y clasificar los ciclos de esfuerzo a partir de una historia de carga variable.

El método de conteo Rainflow es una técnica utilizada en el análisis de fatiga para contar y clasificar ciclos de carga en una señal de esfuerzos o deformaciones que varía con el tiempo. Es especialmente útil cuando se trabaja con cargas aleatorias o variables, como aquellas generadas por el tráfico vehicular. Este método permite descomponer una historia compleja de carga en ciclos individuales equivalentes de carga, cada uno con su respectiva amplitud y valor medio. La información obtenida se puede procesar a través de las curvas S-N debido a que indica cuantos ciclos completó un determinado rango de esfuerzo.

3.4. FUNDAMENTOS DE LA CONFIABILIDAD.

Antes de abordar el tema de la confiabilidad aplicada a la ingeniería, primero se debe de conocer que es la confiabilidad en su estado natural, de acuerdo con la Real Academia Española, este término se le atribuye a un sinónimo de fiable, mismo que se refiere a la probabilidad del buen funcionamiento de algo. Es decir, la confiabilidad se resume a la probabilidad de asegurar una operabilidad satisfecha en un tiempo determinado de algún producto, un mecanismo o, en este caso, un miembro estructural.

Aplicando este concepto, se puede decir que la confiabilidad se refiere a la probabilidad de que una estructura cumpla con su función esperada durante un periodo determinado y bajo condiciones específicas, en otras palabras, es una métrica sobre qué tan seguro es un sistema ante la ocurrencia de fallos, esto implica que una estructura soporte las cargas previstas sin colapsar ni presentar daños críticos durante su vida útil.

En el contexto de la ingeniería estructural el análisis de confiabilidad implica el tratamiento riguroso de las incertidumbres presentes tanto en las acciones que actúan sobre la estructura, como en la capacidad de la misma. Estas incertidumbres se modelan mediante variables aleatorias, lo que convierte el diseño y análisis estructural en un problema estocástico, y no solo determinista. A diferencia del enfoque tradicional basado en factores de seguridad fijos, el análisis de confiabilidad permite cuantificar la probabilidad de falla de un sistema estructural mediante modelos matemáticos y estadísticos. Esta probabilidad se puede estimar usando diferentes metodologías como la simulación Monte Carlo (Chung, 2004).

La confiabilidad en el estado límite de fatiga busca estimar la probabilidad de que una estructura o elemento no alcance un nivel crítico de daño acumulado antes del final de su vida útil prevista. Para esto, se definen funciones de desempeño específicas del tipo:

$$g(x) = D_{\text{limite}} - D_{\text{acumulado}}(x)$$

Dónde $D_{\text{acumulado}}(x)$ depende de las cargas aplicadas, la concentración de esfuerzos en el miembro y la resistencia del material. Cuando $g(x) \leq 0$, se considera que ocurre una falla por fatiga. Finalmente, la integración de estos modelos probabilistas permite no solo estimar el nivel de seguridad de una estructura, sino también que se pueden planificar estrategias de mantenimiento o inspección preventiva (Chung, 2004).

3.4.1. VARIABLES ALEATORIAS.

Las variables aleatorias representan parámetros físicos cuyo valor exacto no puede conocerse de forma determinista debido a la presencia de incertidumbre, condiciones operacionales cambiantes o la falta de información precisa. Estas variables se modelan estadísticamente mediante funciones de densidad de probabilidad que tienen la intención de estimar el comportamiento real de fenómenos físicos (P. Bertsekas & N. Tsitsiklis, 2002).

Existen dos tipos de variables aleatorias importantes, las discretas y las continuas. Si el conjunto de valores de la muestra que pueda tomar una variable aleatoria es contable, se denomina como discreta. Por otro lado, si la variable tiene un rango infinito de valores que pueden ser calculados a través de una Función de Densidad de Probabilidad (PDF), entonces se trata de una variable aleatoria continua (P. Bertsekas & N. Tsitsiklis, 2002).

En el contexto de estudio, estas variables se pueden atribuir a tres principales factores que intervienen en la revisión del estado límite de fatiga, la incertidumbre de un material perfecto, la concentración de esfuerzos y el modelo analítico de daño acumulado. Estas variables se catalogan como continuas dado que representan propiedades físicas y geométricas que pueden asumir cualquier valor dentro de un intervalo real.

Además, en este estudio se considera la carga como una variable aleatoria discretas cuyos valores varían en cada ciclo, representando el paso de distintos vehículos con pesos y configuraciones diferentes, mismos que pueden ser contables en cada simulación. El modelado adecuado de las variables aleatorias requiere la selección de distribuciones de probabilidad que representen con precisión el comportamiento estocástico esperado:

Distribución normal.

Esta distribución se considera simétrica y es un modelo probabilístico que, debido a su simplificada analítica, surge como una herramienta estadística. Además, está fundamentada por el Teorema del Límite Central en donde se establece que la suma de un gran número de variables aleatorias independientes tiende a aproximarse a una distribución normal. Una variable aleatoria continua sigue una distribución normal si su PDF está dada por la siguiente expresión:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right], -\infty < x < \infty$$

Dónde μ es la media de distribución, que define el eje de simetría de la campana; y σ es la desviación estándar, que cuantifica la dispersión de los datos respecto a la media.

Distribución lognormal.

A diferencia de la distribución normal, esta distribución se considera un modelo asimétrico con una dispersión que tiende hacia la derecha, además es adecuada para variables siempre positivas. La Función de Densidad de Probabilidad para una distribución lognormal se detalla como:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \bar{\sigma} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \bar{\mu}}{\bar{\sigma}} \right)^2 \right], 0 < x$$

Dónde $\bar{\mu}$ y $\bar{\sigma}$ son los parámetros de la distribución lognormal y se establecen de la siguiente forma:

$$\bar{\mu} = \ln(\mu_s) - \frac{\bar{\sigma}_s^2}{2} \text{ y } \bar{\sigma} = \sqrt{\ln\left(\left(\frac{\sigma_s}{\mu_s}\right)^2 + 1\right)}$$

3.4.2. MODELO DE SIMULACIÓN DE MONTE CARLO.

Se considera una técnica estadística para modelar fenómenos variables mediante simulaciones repetitivas basadas en datos aleatorios (P. Robert & Casella, 2004). Para fines de la investigación, este enfoque se emplea para generar una gran cantidad de posibles historias de carga o condiciones que representen la variabilidad inherente de los sistemas reales. En particular, se utiliza para simular una cantidad “n” de eventos de carga a lo largo del tiempo, aplicando aleatoriamente distintos escenarios de tránsito vehicular sobre un puente, y posteriormente evaluar cómo varía la vida útil por fatiga bajo cada escenario. Este procedimiento permite obtener múltiples escenarios de los cuales se puede evaluar la cantidad de casos los que el daño acumulado exceda el límite permisible. Con base en esta información, se puede estimar la probabilidad de falla de una estructura.

3.4.3. PROBABILIDAD DE FALLA E ÍNDICE DE CONFIABILIDAD.

En un rango en donde existan diferentes variables aleatorias para definir la función de un estado límite se utiliza una función de PDF para un vector $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ que representa todo el conjunto de variables aleatorias de las cuáles se obtiene la Probabilidad de Falla:

$$P_F = P[g(X) \leq 0]$$

Esto quiere decir, que la Probabilidad de Falla de un estado límite ocurre cuando la función $g(X)$ es menor a cero, lo que se traduce como una falla de la demanda contra la capacidad.

Este valor de P_F es directamente proporcional al índice de confiabilidad β que se calcula como la distancia, en el espacio normal estándar, entre el punto medio de la distribución y el punto asociado a dicha probabilidad:

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

Donde Φ^{-1} es la función inversa de la distribución normal estándar.

4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.

Como se ha mencionado, la finalidad del trabajo es proponer una metodología que estime con cargas reales aproximadas la vida útil de un puente de acero ante el fenómeno de fatiga, por lo que en este apartado se presenta paso a paso como llegar al resultado esperado.

El método propuesto inicia con la recopilación de cargas vehiculares a partir de estadísticas oficiales. Posteriormente, el historial de carga de cada tipo de vehículo se procesa para obtener los diagramas de los elementos mecánicos y, a partir de estos, los esfuerzos totales y sus respectivos rangos. Con esta información se realiza un posprocesamiento en el que, mediante el método de *Rainflow Counting*, se efectúa el conteo de ciclos para aplicar la regla de daño acumulado de Palmgren–Miner y evaluar el nivel de daño. Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se determina la probabilidad de falla y el índice de confiabilidad.

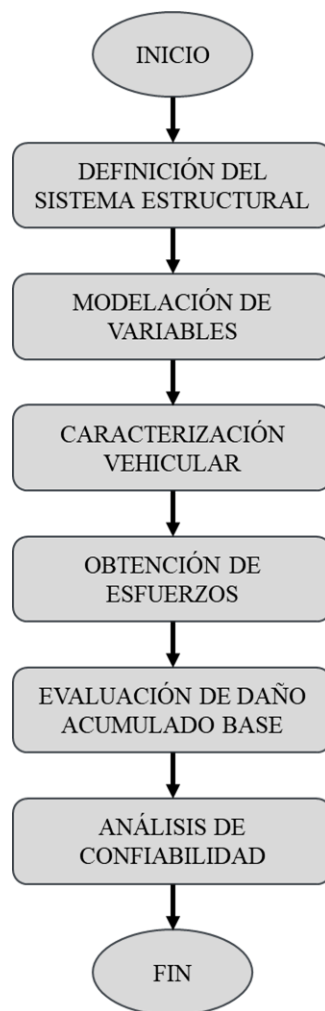


Figura 6. Diagrama de flujo del desarrollo de la metodología.

4.1. SISTEMA ESTRUCTURAL DEL PUENTE.

Dado que la investigación se centra en la evaluación del Estado Límite de Fatiga, el análisis se restringe a los elementos portantes principales de la superestructura. Por consiguiente, no se considera la interacción global de todo el sistema del puente, como son diafragmas, losa, subestructura; sino que se modelará únicamente la viga longitudinal, aislada como un elemento lineal representativo para la revisión del daño acumulado.

Para efectos de la simulación de fuerzas internas y el cálculo de líneas de influencia, el modelo analítico se idealiza como un elemento unidimensional estáticamente determinado tipo viga simplemente apoyada. Se adopta este sistema estático debido a que representa la configuración típica de tableros de puentes conformados por claros independientes, lo cual permite aislar el comportamiento de cada tramo ante las cargas móviles para evaluar el caso crítico al centro del claro.

Asimismo, esta idealización permite optimizar la eficiencia del algoritmo durante las simulaciones probabilísticas en donde se requieren millones de iteraciones, evitando el costo computacional de resolver sistemas hiperestáticos complejos. Bajo este esquema, el elemento se delimita por los nodos extremos 'i' y 'j' separados a una longitud 'L', cuyas condiciones de frontera se definen de la siguiente manera:

- Nodo 'i' (Apoyo Articulado): Restricción de GDL traslacionales, generando dos reacciones ortogonales y permitiendo un GDL rotacional.
- Nodo 'j' (Apoyo Simple): Restricción del GDL traslacional vertical, permitiendo el desplazamiento horizontal y la rotación en el plano.

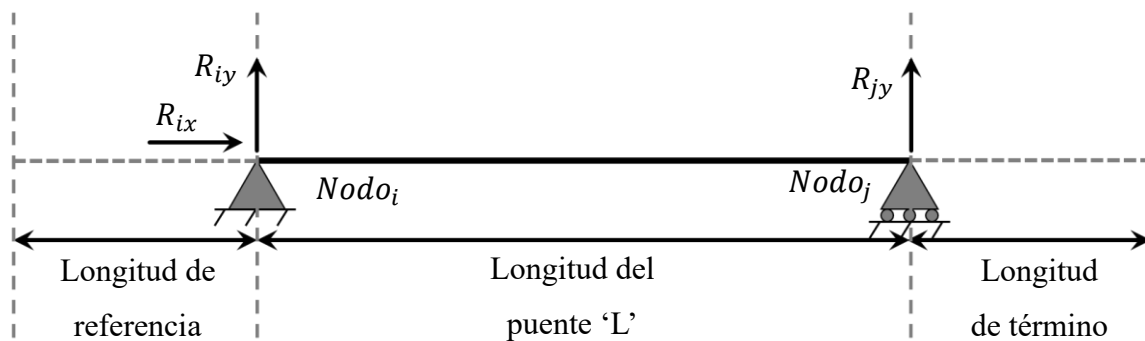


Figura 7. Longitudes consideradas del sistema global. Fuente: Propia.

Para definir el sistema global de la simulación, se establece una longitud de recorrido que excede los límites físicos de la viga. Se considera una 'Longitud de referencia' previo al nodo 'i' para asegurar que el análisis inicie con el vehículo totalmente fuera de la estructura. Del mismo modo, se incluye una 'Longitud de término' posterior al nodo 'j', lo cual permite cuantificar las demandas mecánicas generadas por los ejes traseros aun cuando los ejes delanteros ya hayan salido del claro total.

4.2. MODELADO DE VARIABLES DETERMINISTAS Y ALEATORIAS.

Previo a comenzar con la revisión por fatiga se definen las variables deterministas y aleatorias. Dentro del problema se caracterizan dos campos en los que se pueden separar cada una de las variables, las del tránsito y las del puente.

4.2.1. VARIABLES DETERMINISTAS.

De acuerdo con lo mencionado, las variables deterministas se catalogan de la siguiente manera:

Variables deterministas del tránsito.

- Pesos Brutos Vehiculares.
- Longitud entre ejes de los vehículos.
- Número de ejes de cada clase vehicular.
- Capacidad máxima de carga.
- Número de vehículos por año.

Como se observa, los datos vehiculares se establecen como variables deterministas y con estas se alimenta la base de datos del algoritmo. Como se ha mencionado en el marco teórico, estos registros corresponden a información oficial existente.

Por otro lado, el número de vehículos por año también se considera como un valor determinista, si bien el flujo de tráfico posee una naturaleza estocástica, para fines de esta evaluación se adopta el registro del TDPA como línea base y se estima su crecimiento en el tiempo mediante un modelo de progresión geométrica acumulativa:

$$TDPA(t) = TDPA_0 * (1 + \alpha)^t$$

Dónde:

- $TDPA(t)$ es el Tráfico Diario Promedio Anual proyectado en el tiempo (t).
- $TDPA_0$ es igual al Aforo vehicular base.
- α es la tasa de crecimiento anual vehicular (constante).

El $TDPA_0$ se puede tomar como el primer registro de la estación de monitoreo o el TDPA estimado para el año en el que se comenzó a utilizar el puente. Mientras que la tasa de crecimiento se determina a partir del análisis histórico de las variaciones de aforo, calculándose mediante la Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (TCAC) definida por la siguiente expresión:

$$\alpha = \left(\frac{TDPA_{final}}{TDPA_{inicial}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Los valores del $TDPA_{final}$ y del $TDPA_{inicial}$ corresponden a los registros de tráfico mas reciente y el más antiguo, respectivamente; y n es el número de años transcurrido entre ambos aforos.

Variables deterministas del puente.

- Longitud del puente (L).
- Sección transversal (Dimensiones, inercia, módulo de sección, área, etc.).
- Constantes del material (K_1 , K_2 , m_1 y m_2).
- Curva S-N del material.

Estas variables serán constantes durante el desarrollo de la metodología, a excepción de los valores de K_1 y K_2 , que serán deterministas para establecer la curva S-N y, posteriormente, se tomarán como variables aleatorias para determinar el daño parcial de cada esfuerzo, por lo que se les asignará la nomenclatura K_{a1} y K_{a2} .

4.2.2. VARIABLES ALEATORIAS.

Los valores asociados a la incertidumbre del problema se muestran a continuación:

Variables aleatorias del tránsito.

- Incidencia de la clase vehicular.
- Cantidad y peso de ocupantes.
- Cargas adicionales en vehículos.

La cantidad de vehículos por año a lo largo de la vida útil de la estructura es una variable determinista limitada por el TDPA. No obstante, la asignación de cada vehículo a una clase vehicular se modela como una variable aleatoria y corresponde a una distribución categórica, si bien se dispone de porcentajes de ocurrencia definidos para cada clase, su selección en cada simulación se realiza mediante un algoritmo probabilístico, por lo que la secuencia y frecuencia de aparición de las distintas clases vehiculares puede variar entre simulaciones, respetando en términos globales las proporciones establecidas.

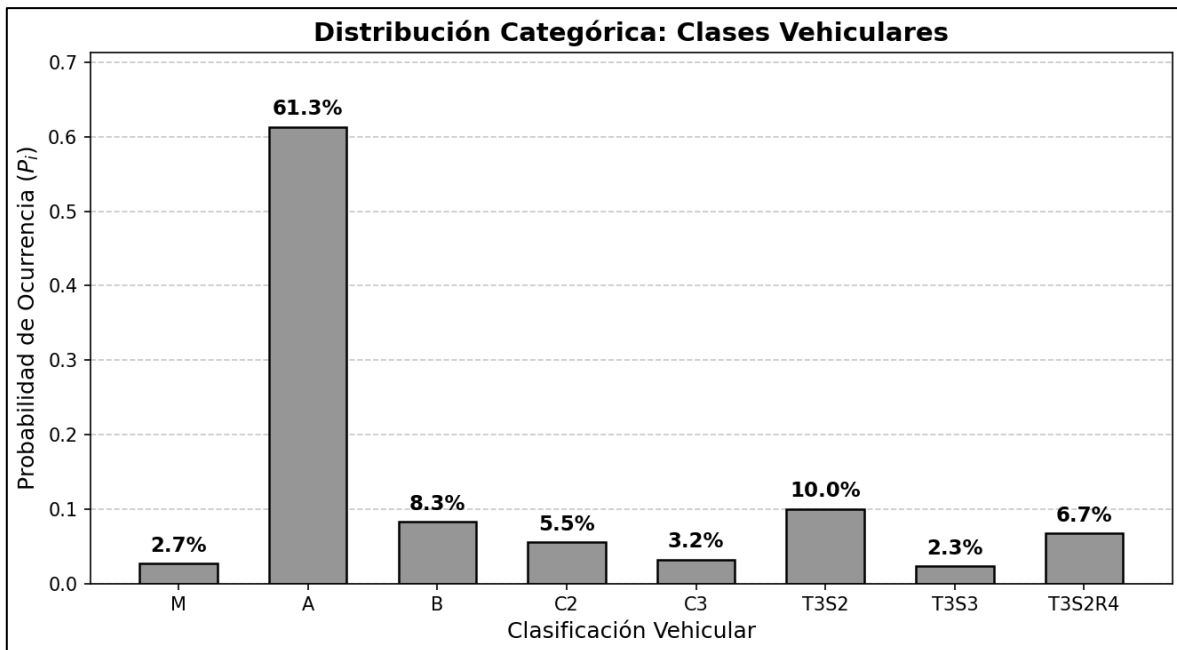


Figura 8. Distribución Categórica de la probabilidad de Incidencia de una Clase Vehicular en una estación arbitraria.

De la misma forma, la cantidad de ocupantes por vehículo se determina mediante una variable aleatoria discreta. A continuación, se presenta la distribución categórica de número de ocupantes para la Clase A, para las demás clases visualizar el [Apéndice A](#).

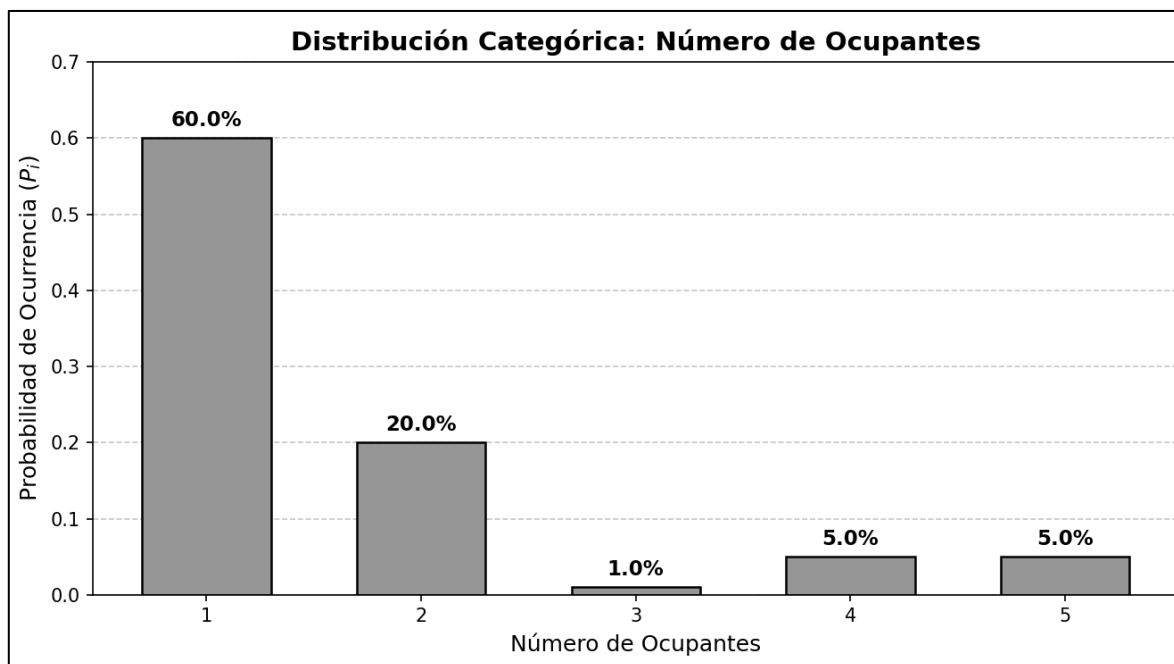


Figura 9. Distribución Categórica de la probabilidad de Incidencia del Número de Ocupantes – Clase A.

Respecto al peso de ocupantes, resulta poco probable conocer con exactitud la carga total que estos generan en conjunto. Por esta razón, el peso de cada ocupante se modela mediante una distribución lognormal, con una media de 72 kg, correspondiente al peso promedio de una persona, y una desviación estándar de 20 kg.

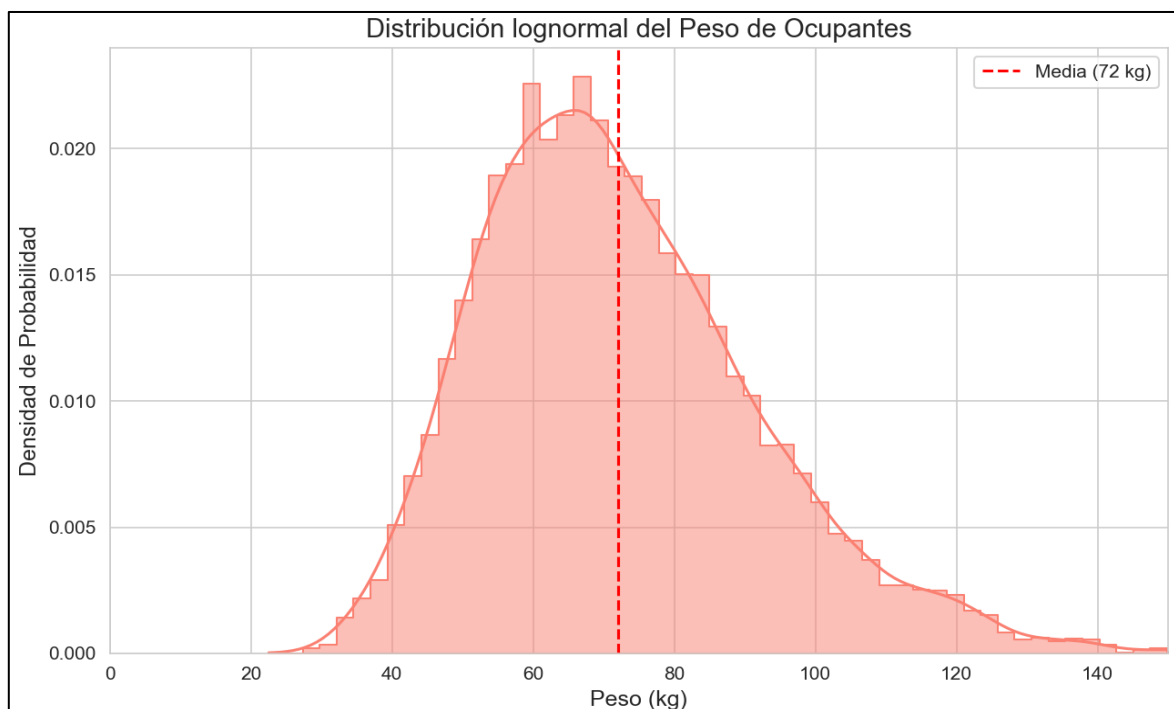


Figura 10. Función de Densidad de Probabilidad del Peso de ocupantes $\sim LN(\mu = 72, \sigma = 20)$.

Respecto a las cargas adicionales de cada vehículo, se presentan diferentes distribuciones de acuerdo con la clase vehicular. Para la Clase A se omite esta carga adicional debido a que el peso generado es despreciable en comparación al peso vehicular y de los ocupantes. En el Apéndice 0, se describe la distribución de las demás Clases.

Variables aleatorias del puente.

- Modelo de Miner FCM.
- Constantes del material K_{a1} y K_{a2} .
- Esfuerzos resultantes X_s .

Al existir incertidumbre en el modelo de daño acumulado de Palmgren-Miner se dispone de un factor de aleatoriedad que varíe en cada iteración. De acuerdo con lo indicado por el DNV-GL, el modelo tiene una media de $\mu = 1$ y un Coeficiente de Variación $CoV = 0.30$ y tiende a una distribución lognormal, por lo que:

$$FCM \sim LN(\bar{\mu}, \bar{\sigma})$$

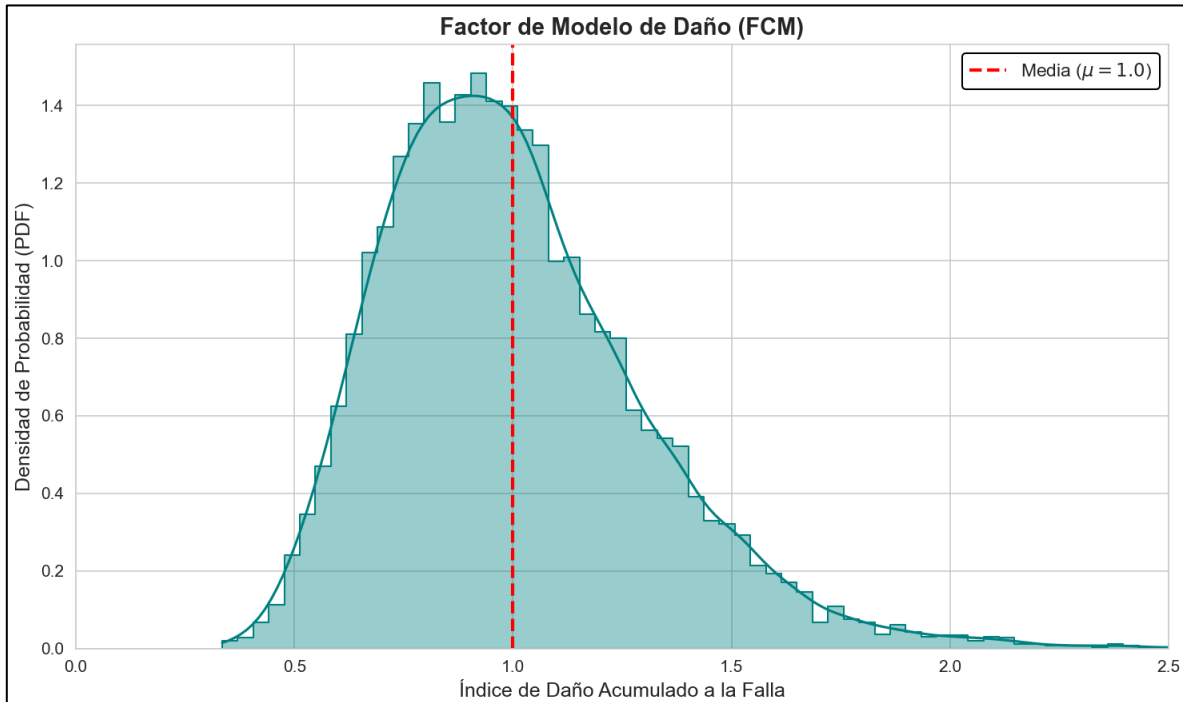


Figura 11. Distribución lognormal del Factor de Modelo FCM.

La variación de las constantes del material K_{a1} y K_{a2} , se da en un factor X_k que afecta directamente a la desviación estándar del $\log(K)$ y obedece a una media $\mu_k = 0$ y $\sigma_k = 1$:

$$K_{a1} = 10^{\mu_{\log(K_1)} - (X_k \cdot \sigma_{\log(K_1)})} \text{ y } K_{a2} = 10^{\mu_{\log(K_2)} - (X_k \cdot \sigma_{\log(K_2)})}$$

Dónde:

$$X_k \sim N(0,1)$$

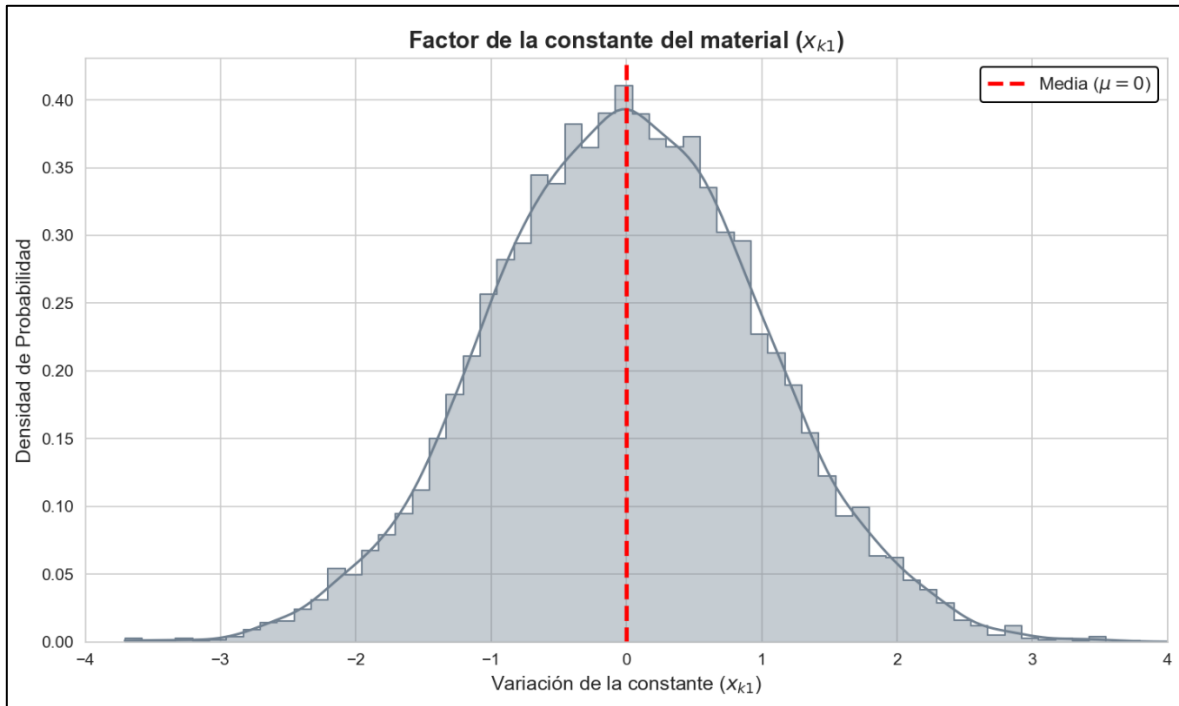


Figura 12. Distribución Normal de la constante del material X_k .

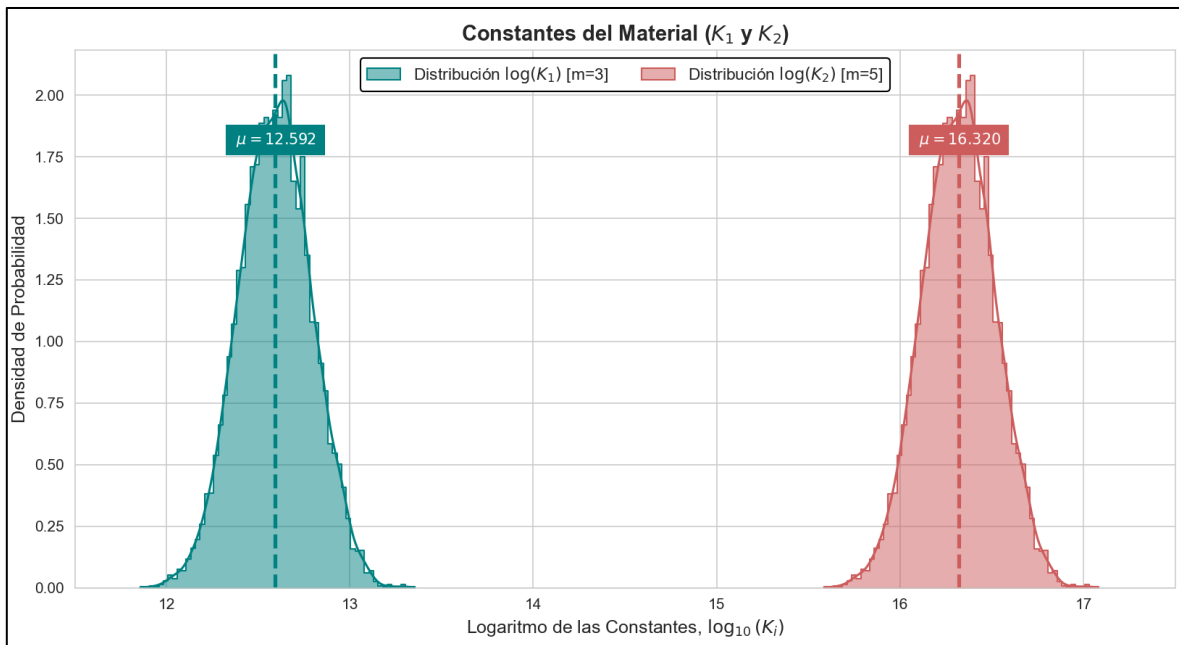


Figura 13. Distribución de las constantes del material K_{a1} y K_{a2} .

Como se observa en la figura anterior, al variar por medio de una distribución normal el factor X_k , la dispersión de las constantes del material K_{a1} y K_{a2} tiende a tomar valores aleatorios a partir de la media constantes y la desviación estándar aleatoria.

Por último, la incertidumbre relacionada a la carga y a la concentración de esfuerzos SCF afecta directamente a la demanda y se modela con una distribución lognormal con una media $\mu_s = 1$ y una desviación estándar $\sigma_s = \mu_s \cdot CoV_s$. Dónde:

$$CoV_s = \sqrt{CoV_{carga}^2 + CoV_{SCF}^2}$$

Los Coeficientes de Variación son del orden de $CoV_{carga} = 0.15$ y $CoV_{SCF} = 0.05$, considerando que la mayor parte de la incertidumbre se le atribuye a la demanda. Por lo tanto:

$$X_s \sim LN(\bar{\mu}_s, \bar{\sigma}_s)$$

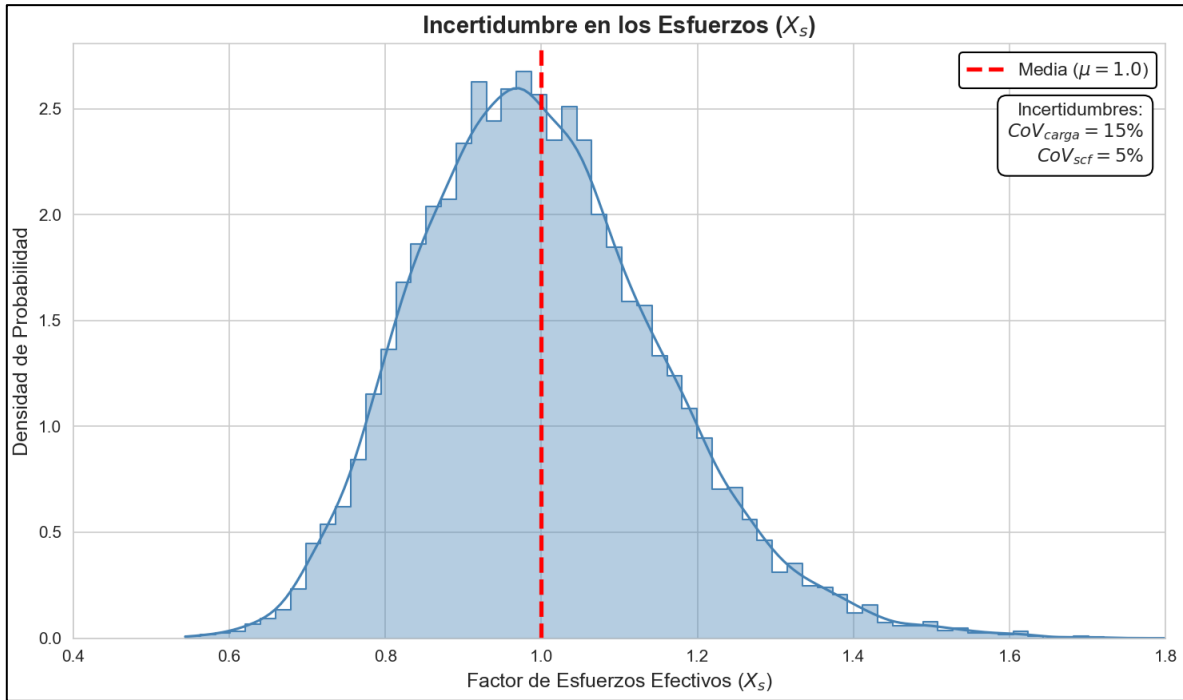


Figura 14. Distribución Normal de la incertidumbre en los esfuerzos X_s .

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA VEHICULAR.

La clasificación del tránsito vehicular es el proceso con menores constantes directas para un análisis de cargas debido a los diferentes tipos de vehículos y de modelos que existen circulando dentro del país. Por lo tanto, en los apartados posteriores se muestra la manera en la que se agruparon y tipificaron estas variables y la distribución de sus cargas.

4.3.1. CLASIFICACIÓN VEHICULAR.

Para este alcance se consultaron los reportes estadísticos de los vehículos más vendidos dentro del país que facilita la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Dentro de estos reportes se alcanza a conocer los porcentajes de los segmentos mayormente vendidos y los modelos más comercializados dentro de cada uno. A la fecha de este estudio, únicamente se identificaron los registros del año 2023, sin embargo, no se identificaba una variación importante entre porcentaje de ventas entre los años anteriores, por lo que los datos se consideran aceptables tomando en cuenta que lo que se busca con estos datos es idealizar diferentes tipos de vehículos con características similares. Para ejemplificar el proceso de categorización de los vehículos, se muestra cómo se tipificaron los vehículos de la Clase A:

VEHÍCULOS LIGEROS – CLASE A.

Los tipos de vehículos ligeros o “Clase A” se dividen en 6 segmentos, los cuales son:

- › Compactos.
- › Subcompactos.
- › SUV’s.
- › Deportivos/de lujo.
- › Pick Ups.
- › Minivanes.

De esta manera, se realizó un estudio con base en los registros del AMIA contemplando los modelos de vehículos más vendidos y se consultaron las fichas técnicas de cada modelo con la finalidad de que los datos utilizados sean lo más realistas posibles. A continuación, se resumen las variables de los vehículos más comerciales, comenzando con los compactos:

Tabla 2. Características físicas de los vehículos ligeros compactos. Fuente: AMIA 2023.

COMPACTOS – A1						
Marca	Modelo	Porcentaje	Largo	Longitud entre ejes	Peso Bruto Vehicular	Peso en Vacío
		(%)	(mm)	(mm)	(kg)	(kg)
Nissan	Versa	45.80%	4495	2620	1644	1126
Nissan	Sentra	17.90%	4646	2710	1762	1368
KIA	Forte	9.40%	4641	2700	1720	1319
Chevrolet	Onix	9.30%	4474	2600	1497	1152
Mazda	Mazda 3	7.80%	4662	2662	1870	1415
Volkswagen	Jetta	7.50%	4720	2686	1880	1418
Otros		2.30%	4606	2663	1729	1300

Como se aprecia en la tabla anterior, la tercera columna presenta valores porcentuales que representan la participación de ventas anuales dentro del segmento de vehículos compactos. Dichos valores suman el 100%, ya que únicamente describen la distribución interna de este segmento específico. De manera similar, cada uno de los demás segmentos cuenta con su propia subdivisión, cuya suma también corresponde al total del 100%, de acuerdo con los datos reportados por la AMIA. En el Apéndice C se muestran las características para los demás tipos de vehículos ligeros “Clase A”.

Es importante hacer hincapié en que los porcentajes reportados de los modelos corresponden a los autos más vendidos de cada segmento, ya que, el conjunto de los segmentos son parte de otra jerarquía que corresponde a la Clase vehicular, en donde nuevamente la suma de todos los segmentos es igual al 100% de las ventas anuales reportadas, estos mismos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Porcentaje de ventas anuales de cada segmento de vehículos Clase A. Fuente: AMIA 2023.

Segmento	Ventas anuales (%)
Compactos	34.60
Subcompacto	24.20
SUV's	18.50
Deportivos	0.30
Pick Up	22.10
Minivan	0.30
Total	100.00

De esta forma, se observa que, para el caso de los vehículos ligeros, se tiene una categoría general Clase A, a partir de esta se tiene una subcategoría para los segmentos comerciales en donde se encuentran los modelos más vendidos. Por lo tanto, se puede extraer el siguiente diagrama de flujo para ejemplificar esta categoría:

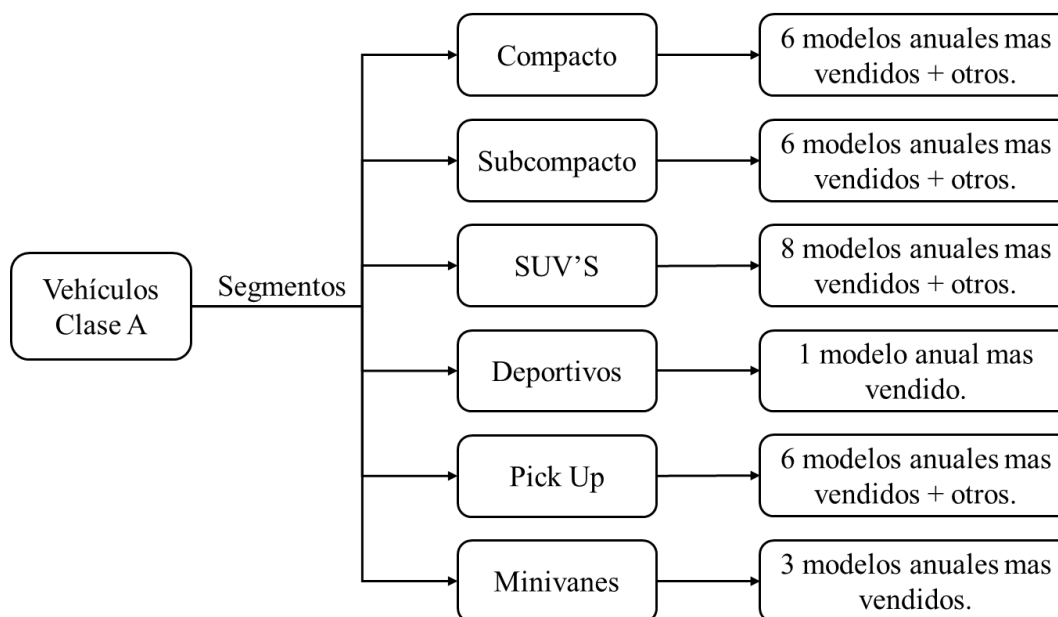


Figura 15. Diagrama de flujo de categorización de vehículos Clase A.

Toda esta información no solamente nos ayuda a categorizar los vehículos, sino que con estos valores se generó la biblioteca de información con la que se alimenta el algoritmo principal, esto se detallará en los capítulos posteriores. Se recalca que la cantidad y los modelos presentados corresponden a la información existente, y que todos tienen únicamente dos ejes.

VEHÍCULOS DE LAS CLASES: M, B, C2, C3, T3S2, T3S3 Y T3S2R4.

De la misma manera que para la Clase A, se obtienen los datos de las demás clases de vehículos, estos valores se muestran en el Apéndice D. Es importante notar que únicamente para los vehículos Clase A se realizó una división local de cada segmento para después sortear la clasificación completa con las demás. La recopilación de datos se realizó de esta manera debido a las limitaciones de la información disponible en fichas técnicas, bibliografías y referencias oficiales debido a que para las demás clases de vehículos no se identificaron registros de ventas por cada segmento y únicamente se tomaron una serie de vehículos de la clase de los cuales se pudieran garantizar la veracidad de la información.

En consecuencia, el diagrama de flujo que muestra el número de vehículos con el que se alimentó la base de datos para todas las clases se puede observar a continuación:

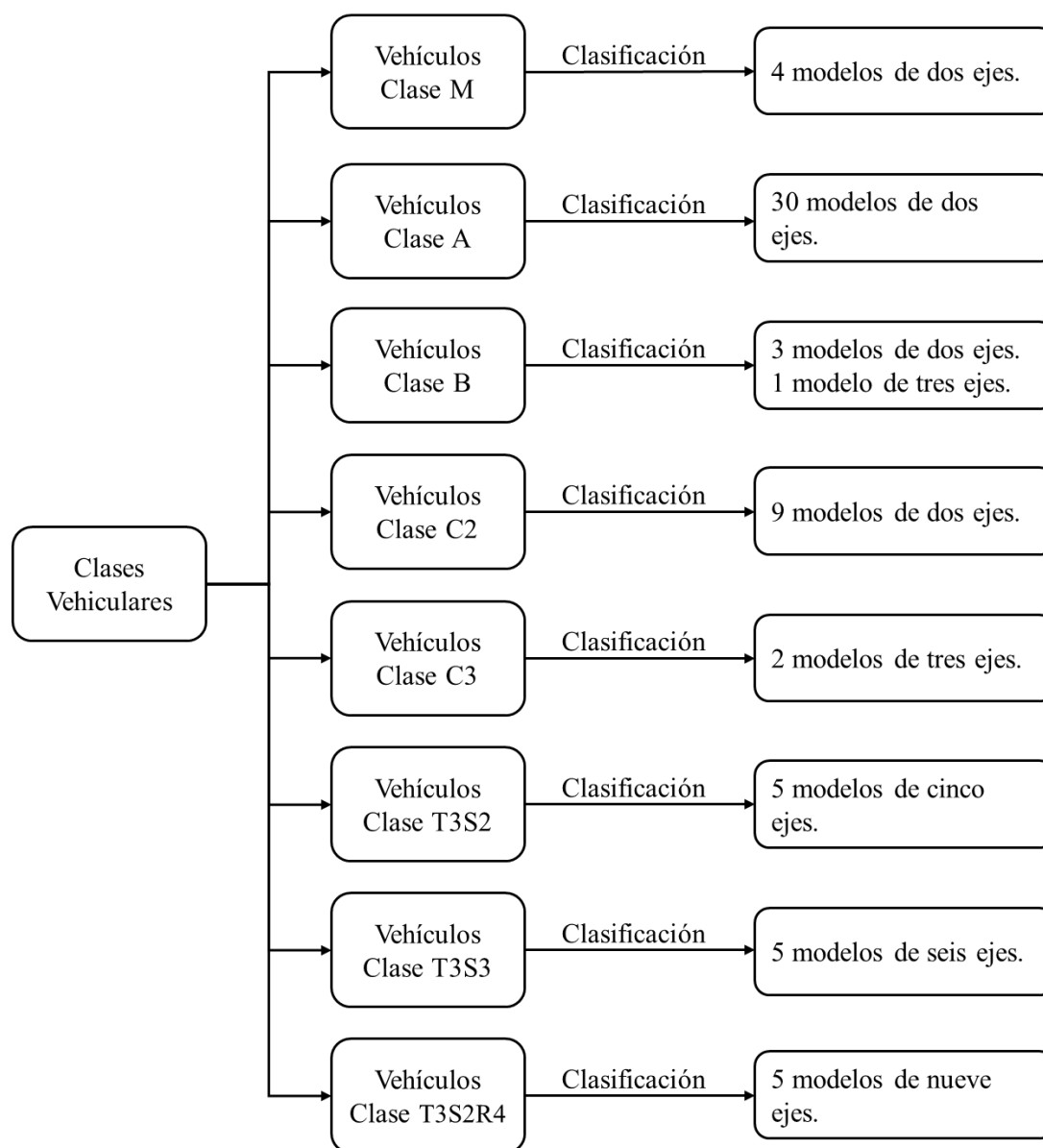


Figura 16. Diagrama de flujo de clasificación de vehículos.

RESUMEN DE LA CATEGORIZACIÓN VEHICULAR.

Se catalogan 8 tipos de clases que coinciden con los datos viales oficiales de la SICT, a partir de estos se consideran modelos comerciales de cada clase en donde varían el número de ejes, dimensiones y pesos. Solamente para la Clase A se tiene una matriz de datos mayor debido a la información oficial disponible, además, esta clase vehicular presenta una mayor densidad de tránsito en todas las estaciones a nivel nacional, por lo que se le considera prioritaria.

4.3.2. DISTRIBUCIÓN DE CARGAS POR CLASE VEHICULAR.

Una vez mencionada la manera en que se clasifican los vehículos y como se puede estimar su variabilidad de incidencia de acuerdo con los registros oficiales; se procede a describir la forma en la que se distribuirán las cargas para cada Clase vehicular.

Si se considera que un vehículo se encuentra en estado estático, las cargas que se idealizan en cada eje para cualquier tipo de vehículo están en función de diferentes parámetros, como es la longitud entre ejes, el número de ocupantes, peso del vehículo y cargas adicionales. Sin embargo, al analizar un vehículo en movimiento, las propiedades dinámicas cambian la respuesta dependiendo los efectos aerodinámicos, la estabilidad propia del vehículo, las fuerzas horizontales resultantes del mismo, etcétera (Gillespie, 2021).

Por lo tanto, para reducir todas las variables y generar un caso único para cada tipo de vehículo, se propondrán proporciones de la carga total aplicadas a cada eje de acuerdo con las ecuaciones de la estática.

Es importante mencionar que para cada tipo de vehículo se tendrán diferentes distribuciones de carga representadas en porcentajes del peso total, y se estimarán para los siguientes casos:

- I. Peso en vacío del vehículo.
- II. Peso de ocupantes.
- III. Cargas adicionales.

La manera en que se distribuyen las cargas no es la misma en los tres casos enlistados, sino que para cada uno se tendrán proporciones diferentes.

Vehículos Ligeros (Clase A):

I. Peso en vacío del vehículo.

Atendiendo lo indicado por Gillespie (2021), cuando un vehículo se encuentra en un estado sin movimiento las ecuaciones del equilibrio dinámico se simplifican y únicamente es necesario conocer la longitud entre ejes, el centro de masas del vehículo y las longitudes a cada eje a partir de este. Además, la manera en la que se obtienen los pesos correspondientes a cada eje es por medio del equilibrio estático. La distribución se puede visualizar en la siguiente figura:

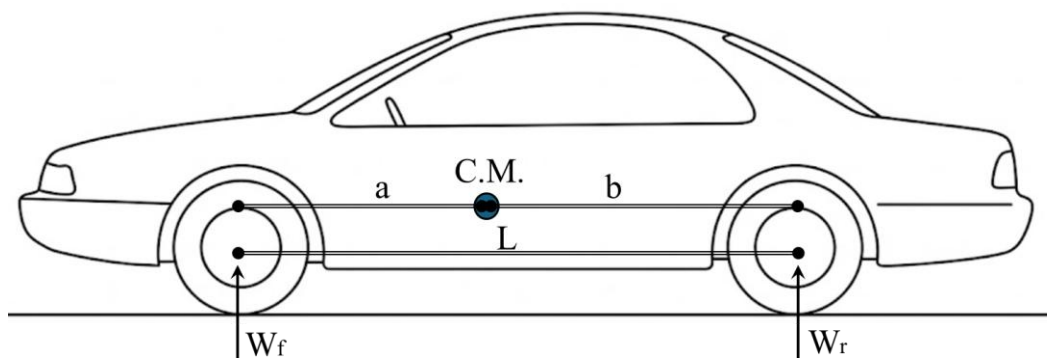


Figura 17. Dimensionamiento de las cargas por eje en un vehículo estático. Fuente: (Gillespie, 2021).

Dónde:

$$W_f = W \frac{b}{L} \text{ y } W_r = W \frac{a}{L}$$

- W es igual al peso vacío del vehículo.

Como se observa, las reacciones se obtienen como si se tratara de un sistema estático de una viga simplemente apoyada. En consecuencia, se tomará como ejemplo un vehículo Clase A arbitrario para ejemplificar la manera en que se distribuirán las cargas:

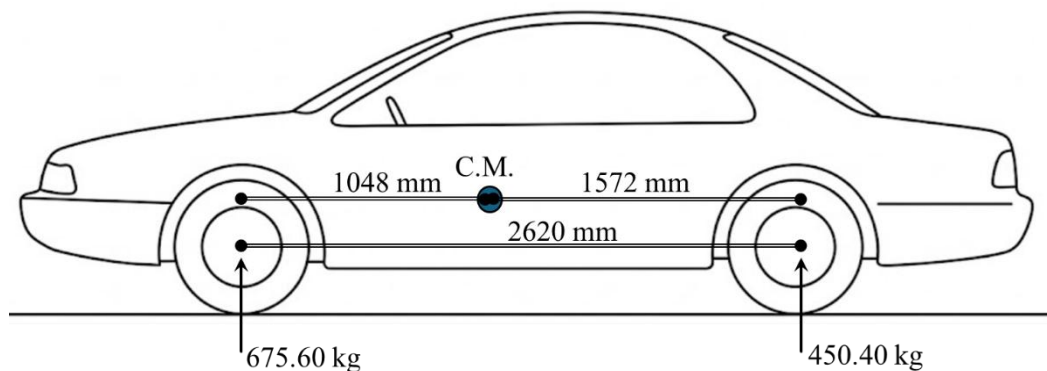


Figura 18. Ejemplo de distribución de las longitudes de referencia y carga aplicada a cada eje de Vehículo Clase A.

Dónde:

$$W_f = W \frac{b}{L} = (1126 \text{ kg}) \frac{1572 \text{ mm}}{2620 \text{ mm}} = 676.60 \text{ kg}$$

$$W_r = W \frac{a}{L} (1126 \text{ kg}) \frac{1048 \text{ mm}}{2620 \text{ mm}} = 450.40 \text{ kg}$$

Si se obtiene un porcentaje de carga en cada eje, la distribución es igual a:

$$W_{f\%} = \frac{W_f}{W} = \frac{676.60 \text{ kg}}{1126 \text{ kg}} = 0.60\%$$

$$W_{r\%} = \frac{W_r}{W} = \frac{450.40 \text{ kg}}{1126 \text{ kg}} = 0.40\%$$

En consecuencia, la distribución de peso del vehículo será del 60% del peso total en el eje delantero y el 40% en el eje trasero.

II. Peso de ocupantes.

Por otro lado, se tiene el peso del número de ocupantes, para esta clasificación de vehículos se estima que la cantidad máxima de usuarios permitida es de 5 personas, esto de acuerdo con la Normativa vigente y las fichas técnicas consultadas.

De esta forma, para simplificar la distribución de cargas en cada eje por número de ocupantes se tomará el siguiente criterio:

- El peso de los pasajeros delanteros se le atribuirá al eje delantero.
- El peso de los pasajeros traseros se le atribuirá al eje trasero.

Esto se ilustra en la siguiente figura:

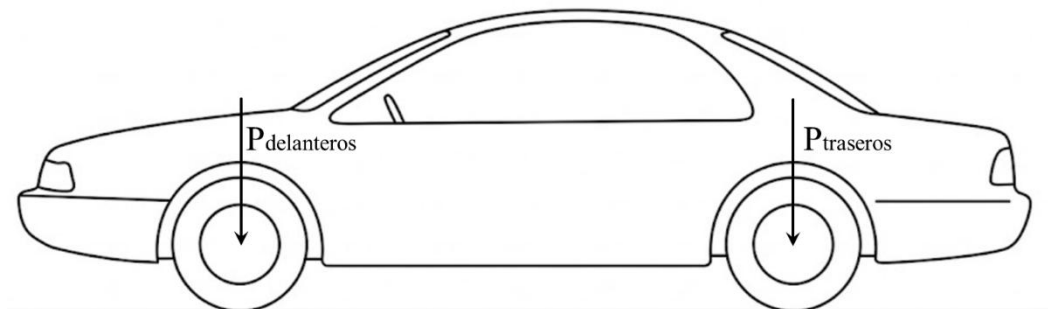


Figura 19. Distribución del peso de ocupantes de un Vehículo Clase A.

Dónde:

- $P_{delanteros} = P_{ocupante1} + P_{ocupante2}.$
- $P_{traseros} = P_{ocupante3} + P_{ocupante4} + P_{ocupante5}.$

III. Cargas adicionales.

Respecto a las cargas adicionales de los vehículos Clase A, esta carga se despreciará ya que no tiene un incremento importante con respecto al peso del vehículo y de los ocupantes.

Vehículos tipo Autobús (Clase B):

Por su naturaleza, en este tipo de vehículos el número de ocupantes máximo cambia de acuerdo con el modelo y su capacidad, además, la distribución se realiza en dos o tres ejes.

I. Peso en vacío del vehículo.

Para conocer la proporción de carga sobre cada eje, nos redirigimos a las fichas técnicas de los vehículos en donde extraemos los datos del peso bruto vehicular y el peso máximo autorizado para cada eje:

Tabla 4. Distribución de pesos en cada eje de acuerdo con las fichas técnicas de cada modelo – Vehículo Clase B.

DISTRIBUCIÓN DE PESOS MÁXIMOS POR EJE EN VEHÍCULOS TIPO "B" - AUTOBUSES							
ID	Ejes	Marca	Peso Bruto Vehicular	Peso máximo eje delantero	Peso máximo eje trasero	Porcentaje delantero respecto a W	Porcentaje trasero respecto a W
			(kg)	(kg)	(kg)	(%)	(%)
B1	2	HINO	9000	3150.00	5850.00	0.35	0.65
B2	2	International	14968	5443.11	9525.44	0.36	0.64
B3	2	International	14968	5443.11	9525.44	0.36	0.64
B4	3	Mercedez Benz	24750	7500.00	17250.00	0.30	0.70

Como se observa en la tabla anterior, para los autobuses de dos ejes se tiene un aproximado del 35% para el eje delantero y del 65% para el eje trasero si se redondean los porcentajes, mientras que para el autobús de tres ejes la distribución aumenta a un 30% y 70%, respectivamente, por lo que está será la configuración utilizada:

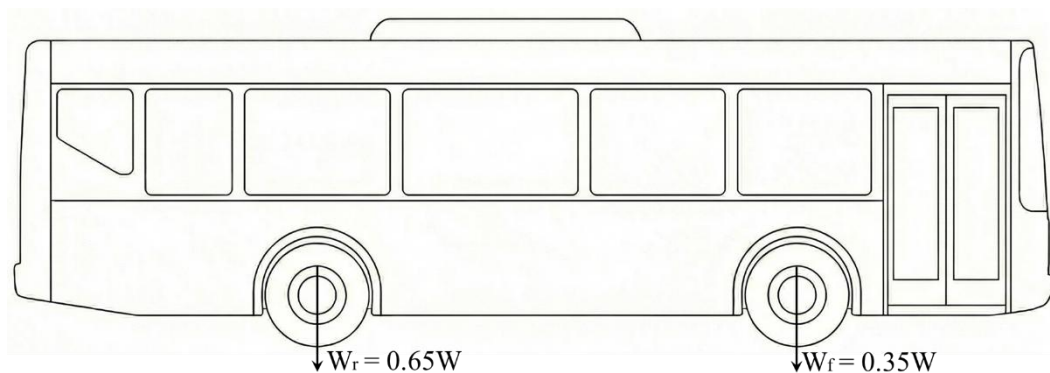


Figura 20. Distribución de la carga aplicada a cada eje por peso del vehículo en Vehículos Clase B – 2 ejes.

Una consideración importante es que, para el autobús de 3 ejes, los ejes traseros no cargan la misma proporción, sino que consultando de la misma manera las fichas técnicas se concluye que el eje propulsor tiene un 49% del peso total y el eje de arrastre del 21% de W:

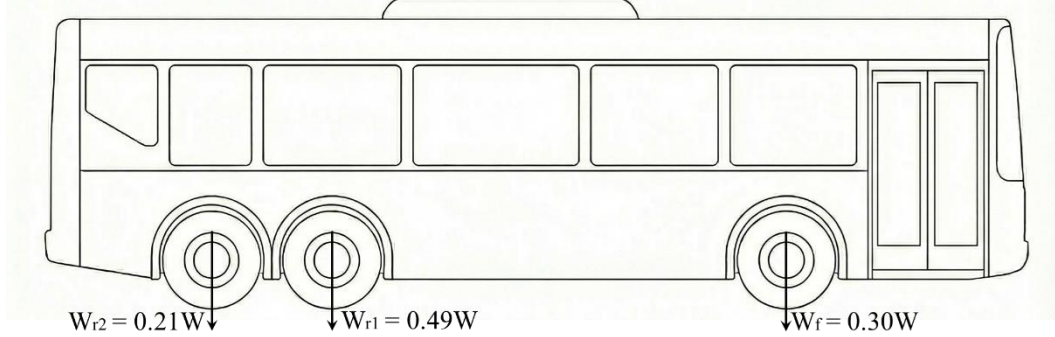


Figura 21. Distribución de la carga aplicada a cada eje por peso del vehículo en Vehículos Clase B – 3 ejes.

II. Peso de ocupantes.

Dado que el acomodo de los usuarios que abordan un autobús no se puede parametrizar, la carga por usuarios se considerará como uniformemente distribuida y las proporciones se obtendrán a partir de las ecuaciones de la estática:

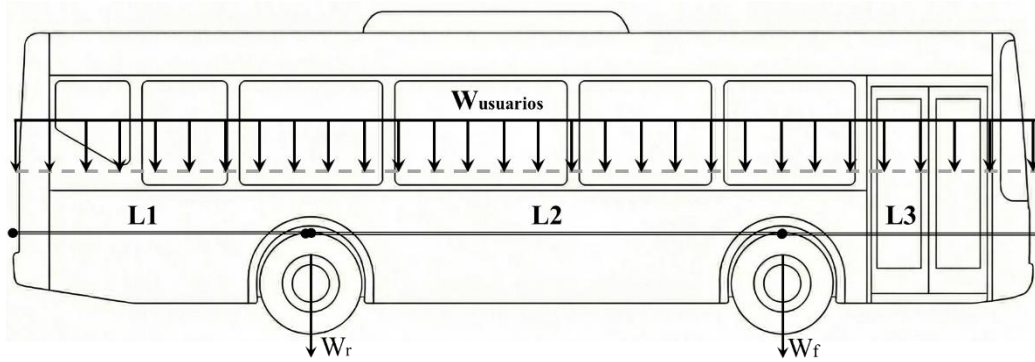


Figura 22. Distribución de la carga aplicada a cada eje por peso de ocupantes en Vehículos Clase B – 2 ejes.

Donde:

$$W_r = \frac{W_{usuarios}}{L2} \left((L1L2) + \frac{1}{2} (L1^2 + L2^2 - L3^2) \right)$$

$$W_f = \frac{W_{usuarios}}{L2} \left((L3L2) + \frac{1}{2} (L3^2 + L2^2 - L1^2) \right)$$

Para el caso del autobús de tres ejes se sigue la misma lógica, únicamente que, para evitar resolver un sistema hiperestático, se considera una reacción general a la mitad de los ejes traseros y posteriormente se divide entre dos esta reacción resultante:

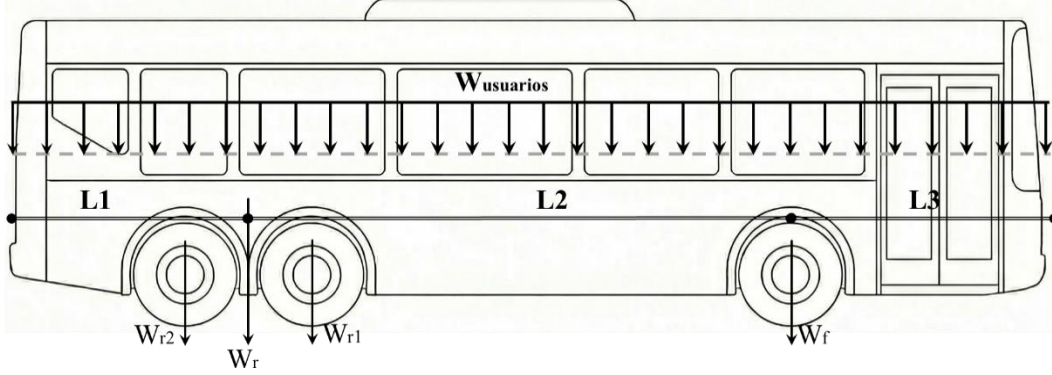


Figura 23. Distribución de la carga aplicada a cada eje por peso de ocupantes en Vehículos Clase B – 3 ejes.

Donde:

$$W_f = \frac{W_{usuarios}}{L2} \left((L3L2) + \frac{1}{2} (L3^2 + L2^2 - L1^2) \right)$$

$$W_{r1} = \frac{W_{usuarios}}{2 * L2} \left((L1L2) + \frac{1}{2} (L2^2 + L2^2 - L3^2) \right)$$

$$W_{r2} = \frac{W_{usuarios}}{2 * L2} \left((L1L2) + \frac{1}{2} (L2^2 + L2^2 - L3^2) \right)$$

III. Cargas adicionales.

Por último, las cargas adicionales se distribuirán de la misma manera que la carga por ocupantes, la variación en este caso es el valor de carga. Es decir, no hay una manera establecida de conocer el equipaje que lleva cada pasajero, por lo que se realizará una correlación entre el número de usuarios y un peso adicional estimado por persona. Si se considera que el peso promedio de una maleta es de 20 kg y se piensa que un solo usuario puede llevar hasta dos maletas, se estimará que por cada usuario se tendrá un peso de 40 kg adicionales y esta variable se podrá distribuir probabilísticamente.

La distribución de pesos para los vehículos Clase C2, C3, T3S2, T3S3 Y T3S2R4 se encuentra en el Apéndice E.

4.3.3. SIMULACIONES DE CARGAS VEHICULARES PARA DAÑO BASE.

Tal como se mencionó en el Apartado 3.1, los vehículos se pueden categorizar de acuerdo con las estadísticas oficiales de la SICT y los registros del TDPA. Por lo tanto, con la finalidad de que la historia de cargas tenga datos reales se toman los porcentajes de incidencia que indica el TDPA y se consideran como probabilidad de ocurrencia. Por ejemplo, se tiene el siguiente reporte de una estación arbitraria en donde se indica un registro de un TDPA de 9063 vehículos:

E S T A C I O N			CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCIENTO														
KM	TE	SC	TDPA	M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS	A	B	C	K'	D
62.70	3	0	9063	2.7	61.3	8.3	5.5	3.2	10.0	2.3	5.8	0.9	64.0	8.3	27.7	0.092	0.526

Figura 24. Registro de TDPA de estación arbitraria. Fuente SICT.

Se pueden observar las clases ya mencionadas anteriormente: M, A, B, C2, C3, T3S2, T3S3 y T3S2R4; además se presenta el porcentaje registrado de cada clase para dicha estación arbitraria. En consecuencia, el número de simulaciones que se deben realizar corresponden al registro arrojado por el TDPA, es decir, se idealizará el paso de esta cantidad de vehículos (9063) por día en donde la probabilidad de ocurrencia de cada clase de vehículo está dada por su respectivo porcentaje.

Es importante señalar que los porcentajes del TDPA dejan de considerarse valores deterministas y pasan a interpretarse como variables aleatorias ya que en este proceso se utiliza el modelo de Monte Carlo para sortear el vehículo que se analizará. Esto implica que, en la muestra total de simulaciones, las cantidades asociadas a cada categoría vehicular no necesariamente coincidirán de manera exacta con los porcentajes registrados. Por ejemplo, un valor de 1% sugeriría, de forma determinista, la obtención de 90.63 simulaciones correspondientes a dicha clase vehicular; no obstante, bajo un enfoque probabilístico, dicha cantidad puede variar en función de los resultados generados por el algoritmo. Esta variabilidad es inherente al proceso de simulación y refleja de manera más realista la naturaleza estocástica del tránsito vehicular.

4.3.4. APLICACIÓN DE CARGAS AL MODELO ANALÍTICO.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, las simulaciones de carga que se aplicarán a la estructura corresponden a las clases vehiculares que registra el TDPA, por lo que el modelo analítico se somete a un tren de cargas diferente para cada clase, tal como se observa a continuación:

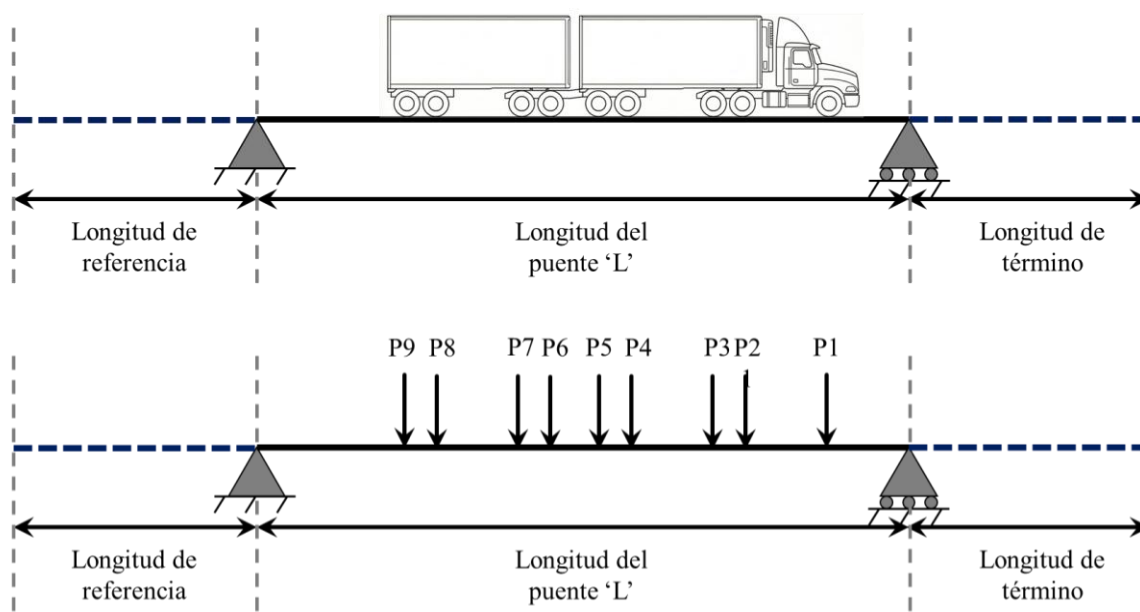


Figura 25. Ejemplo de tren de cargas para vehículo Clase T3S2R4.

De esta forma es posible ver que el número de ejes del vehículo es igual al número de cargas puntuales P que se aplicarán al modelo en el sentido vertical. Adicionalmente, se consideran las cargas horizontales generadas por la fuerza de frenado igual al 25% de la reacción horizontal de cada eje

Para el modelo analítico, se tomará la lectura de los elementos mecánicos en el punto intermedio del puente ($L/2$) desplazando el tren de cargas a cada 50 cm, es decir, desde que la primera carga $P1$ se encuentra en el punto del primer apoyo se tomarán los datos de momentos y axiales, posteriormente avanzará medio metro y nuevamente se registran los esfuerzos, y así sucesivamente hasta que la última carga $P9$ se encuentre dentro de la longitud de término.

4.4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y OBTENCIÓN DE ESFUERZOS.

Primeramente, se debe de resolver el sistema estático del modelo analítico para obtener sus reacciones a través del principio de superposición y utilizando el método de las secciones tomando como punto de análisis la mitad del claro $L/2$.

4.4.1. DIAGRAMAS DE ELEMENTOS MECÁNICOS.

Para una viga simplemente apoyada con una carga P aplicada en un punto cualquiera las reacciones se calculan como el producto de la carga P por la fracción de la distancia de aplicación de la carga entre la longitud del puente, y el momento generado por estas (M_{Riy}) es igual a la reacción por la distancia al punto de análisis:

$$R_{iy} = \frac{P * b}{L} \quad R_{jx} = \frac{P * a}{L} \quad M_{Riy} = R_{iy} * \frac{L}{2}$$

Dónde:

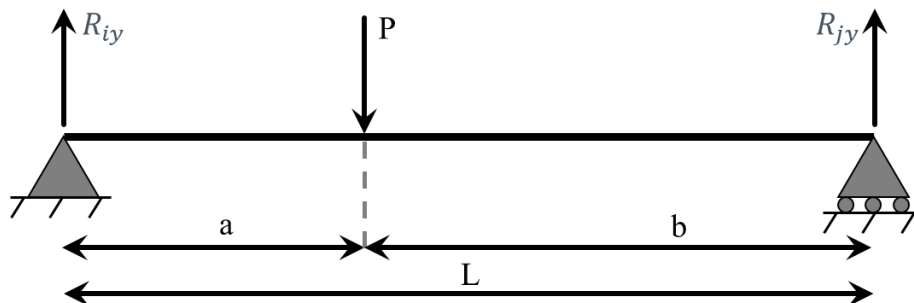


Figura 26. Aplicación de carga P en punto arbitrario.

Por otro lado, para la obtención de los momentos flexionantes debidos a la carga P (M_{Pi}), se tienen dos posibles casos, cuando la carga está antes del punto de análisis y cuando se encuentra en una posición mayor:

Si $a \leq L/2$ entonces:

$$M_{Pi} = P * \left(\frac{L}{2} - a \right)$$

Si $a > L/2$ entonces:

$$M_{Pi} = 0.00$$

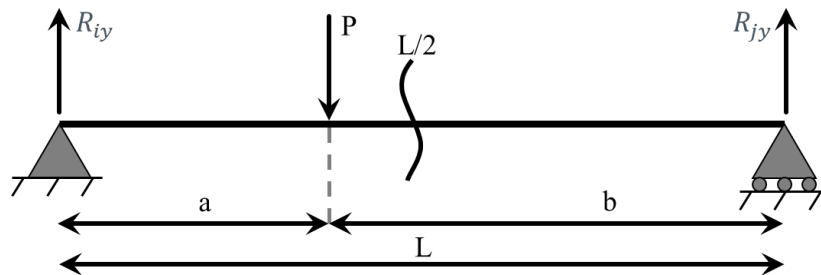


Figura 27. Aplicación de carga P antes del punto de análisis.

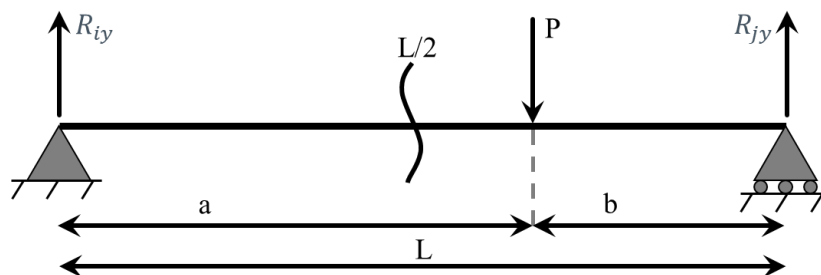


Figura 28. Aplicación de carga P después del punto de análisis.

Y el momento resultante para ambos casos es igual a:

$$M_{Ri} = M_{Riy} - M_{Pi}$$

Este momento resultante corresponde únicamente a una carga P , por lo que se deben adicionar los efectos de las demás cargas aplicadas para obtener una historia de momentos tomando como referencia el punto de análisis $L/2$. Por lo que:

$$M_{RTotal} = M_{Ri} + M_{Rj} + \dots + M_{Rn}$$

Adicionalmente, se considera la carga muerta debida al peso propio del puente, esta se conoce a través de su respectivo análisis de cargas y se aplica al modelo analítico como una carga uniformemente distribuida (w), por lo que el momento al centro del claro es igual a:

$$M_{CM} = \frac{w * L^2}{8}$$

El momento flector inducido por las cargas puntuales P se incrementa al considerar la contribución del momento generado por las cargas muertas del tablero del puente. Cabe destacar que el momento debido a carga muerta permanece constante en cualquier punto de análisis y el valor inicial del historial de momentos es distinto de cero, dando lugar a una gráfica similar a la que se muestra a continuación:

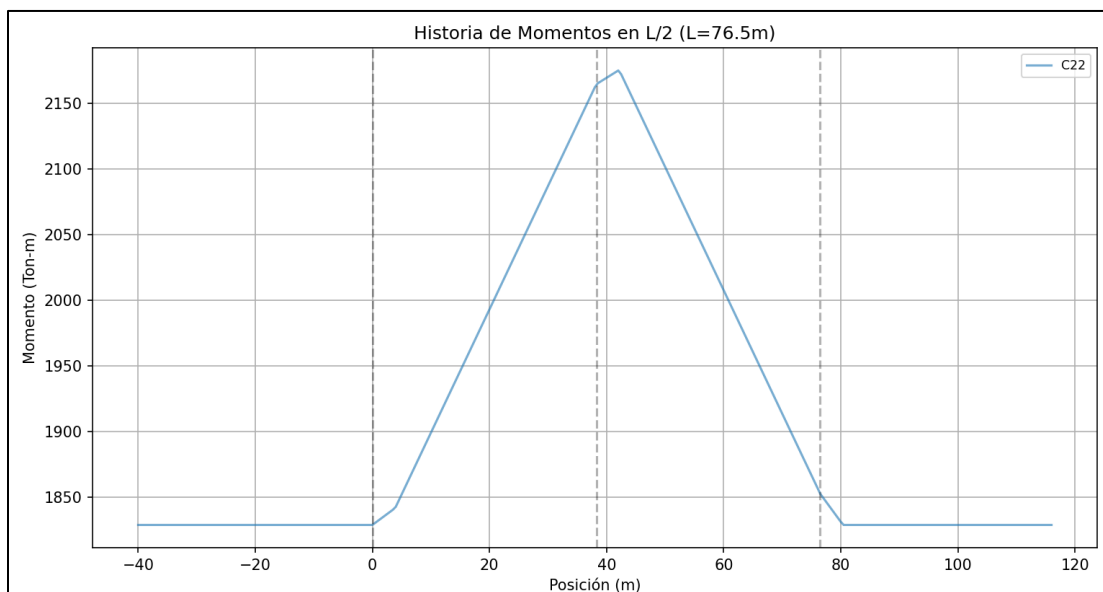


Figura 29. Gráfica de historia de momentos esperada.

Dado que se consideran los efectos de las componentes horizontales igual al 25% de la carga vertical es necesario calcularlos mediante la siguiente ecuación:

$$N_i = 0.25P_i + 0.25P_j + \dots + 0.25P_n$$

Es importante mencionar que, al tener un punto de análisis a mitad del claro, la fuerza axial comienza a incrementarse únicamente cuando el primer eje del vehículo cruza dicho punto.

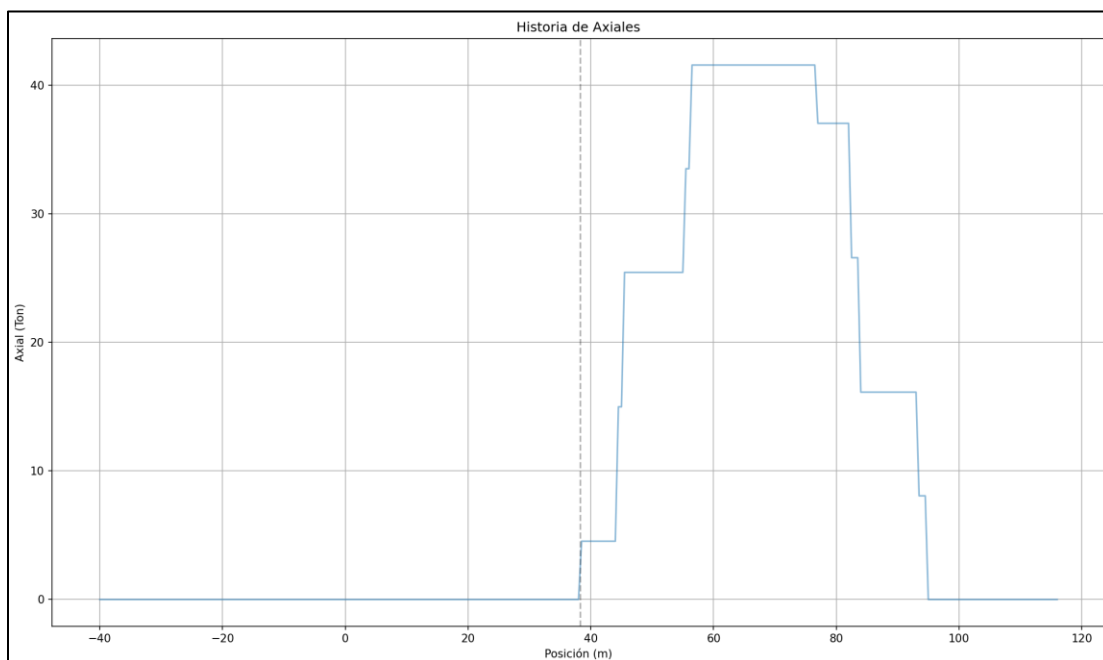


Figura 30. Gráfica de historia de axiales esperada.

4.4.2. HISTORIA DE ESFUERZOS.

En los apartados anteriores se menciona la manera en la que se pueden utilizar las líneas de influencia para obtener los esfuerzos máximos que se generan por un vehículo aleatorio. Este pico de esfuerzos cambia con el paso de diferentes vehículos, es decir, no es lo mismo el esfuerzo que genera un T3S2R4 que uno Clase A, no solo en magnitud, sino también en el comportamiento de sus elementos mecánicos por el número de cargas P que se aplican.

Para este estudio se consideran tres esfuerzos existentes en los puentes vehiculares: Esfuerzo a flexión por peso propio del puente, esfuerzo a flexión por carga vehicular y esfuerzo axial por fuerzas longitudinales de frenado. Por lo que el esfuerzo máximo esta dado por:

$$\sigma_{Max} = \sigma_{Peso Propio} + \sigma_{Carga Vehicular} + \sigma_{Frenado}$$

$$\sigma_M = \frac{M_{Peso Propio}}{S_x} + \frac{M_{Carga Vehicular}}{S_x} + \frac{P_{Frenado}}{A}$$

De manera similar a las fuerzas internas (Momentos y Axiales), se considera la contribución del Peso propio y el esfuerzo total siempre será mayor que cero, aunque no exista un vehículo pasando por el puente, tal como se observa en la siguiente gráfica:



Figura 31. Gráfica de historia de esfuerzos flexionantes.

Es posible visualizar que el esfuerzo flexionante aumenta conforme pasa el vehículo y la parte en la que desciende la historia de esfuerzos es cuando el vehículo va saliendo del tramo del puente hasta que el esfuerzo es igual al inicial.

Por otro lado, los esfuerzos axiales son menores ya que representan una proporción de la carga de cada eje del vehículo y en su gráfica los esfuerzos empiezan a presentarse hasta que el primer eje pasa por el punto de monitoreo de la historia de respuesta. La siguiente gráfica corresponde al comportamiento del puente cuando pasa un vehículo de nueve ejes, es importante visualizar que cada escalonamiento coincide con la magnitud de la fuerza P y la distancia entre cada eje:

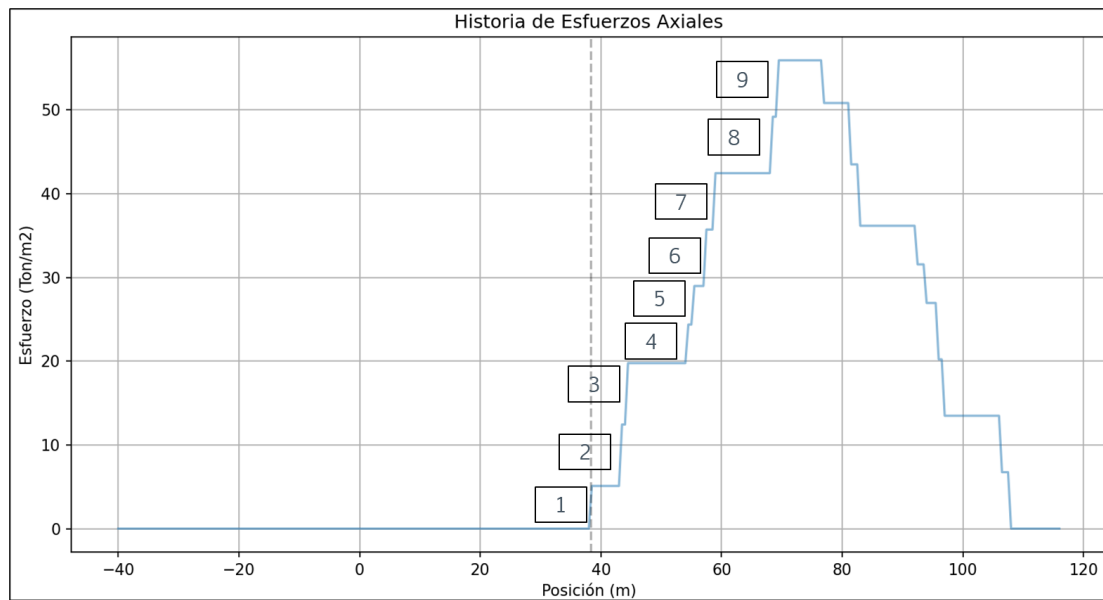


Figura 32. Gráfica de historia de esfuerzos axiales.

De esta forma, se observa que cada caso contribuye al incremento del pico máximo de esfuerzos; sin embargo, siempre existe un instante en el que el esfuerzo es igual al esfuerzo inicial. Con el paso de cada vehículo, los esfuerzos aumentan y disminuyen, definiendo un rango de esfuerzos compuesto por un valor mínimo y uno máximo, el cual varía con el tiempo. El rango de esfuerzos entre el valor máximo y el inicial es el que se contabiliza mediante el método de *Rainflow Counting*.

4.5. CONTEO DE CICLOS Y EVALUACIÓN DE DAÑO POR FATIGA.

En esta sección se desarrolla un procedimiento integral junto con el Apartado 4.6, en donde los datos de entrada corresponden a los rangos de esfuerzo de la demanda, Δs , los cuales son procesados mediante un algoritmo de conteo (*Rainflow Counting*) para determinar el número de ciclos asociados n_i . Posteriormente, con base en la regla de acumulación de daño se calcula el daño anual considerando inicialmente variables deterministas, obteniendo así un daño base. Este valor se incorpora dentro del modelo de simulación de Monte Carlo, en el cual se realizan " n " simulaciones a lo largo de la vida útil esperada del puente, introduciendo la variabilidad de los parámetros aleatorios del modelo (K , SCF y FCM). A partir de los daños acumulados se estima la probabilidad de falla de cada año, lo que permite construir la curva de confiabilidad correspondiente. Finalmente, con base en la probabilidad de falla obtenida, se determina el índice de confiabilidad β asociado.

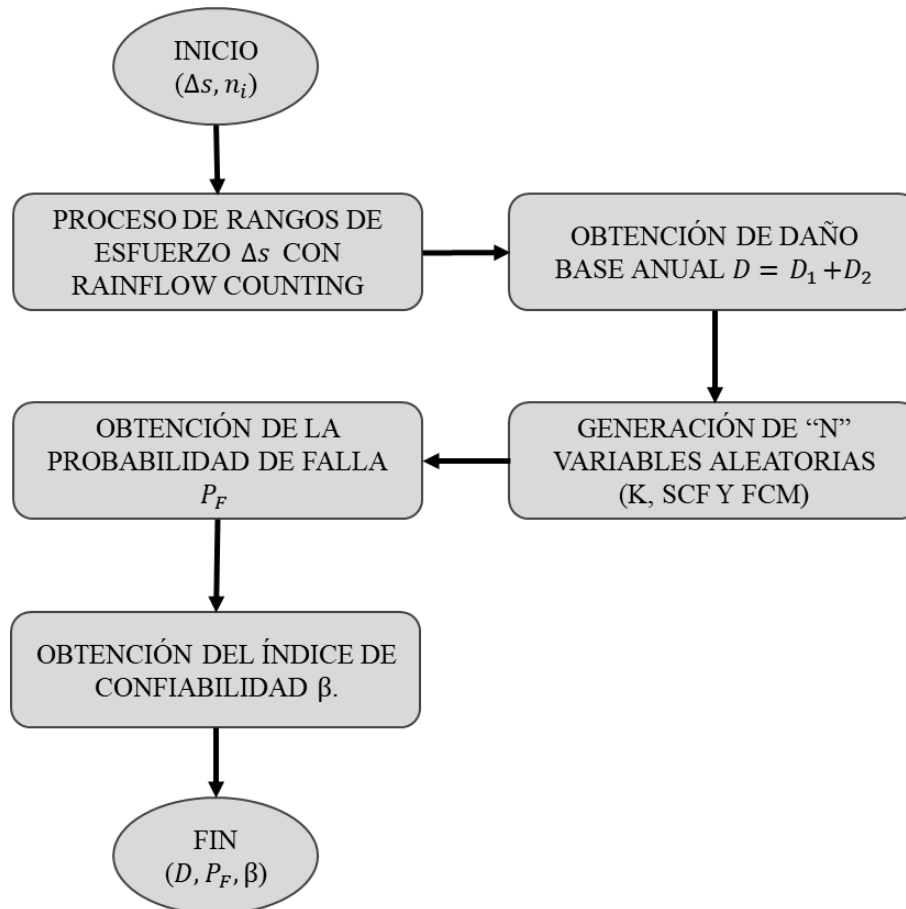


Figura 33. Diagrama de flujo del proceso de evaluación de daño.

4.5.1. HISTOGRAMA DE ESFUERZOS.

A través del método *Rainflow Counting*, es posible calcular la cantidad de ciclos completos o medios ciclos que se generan con cada paso de los vehículos y así obtener el espectro de fatiga o histograma de esfuerzos en donde se visualiza el número de ciclos o vehículos que generan un rango de esfuerzos similares:

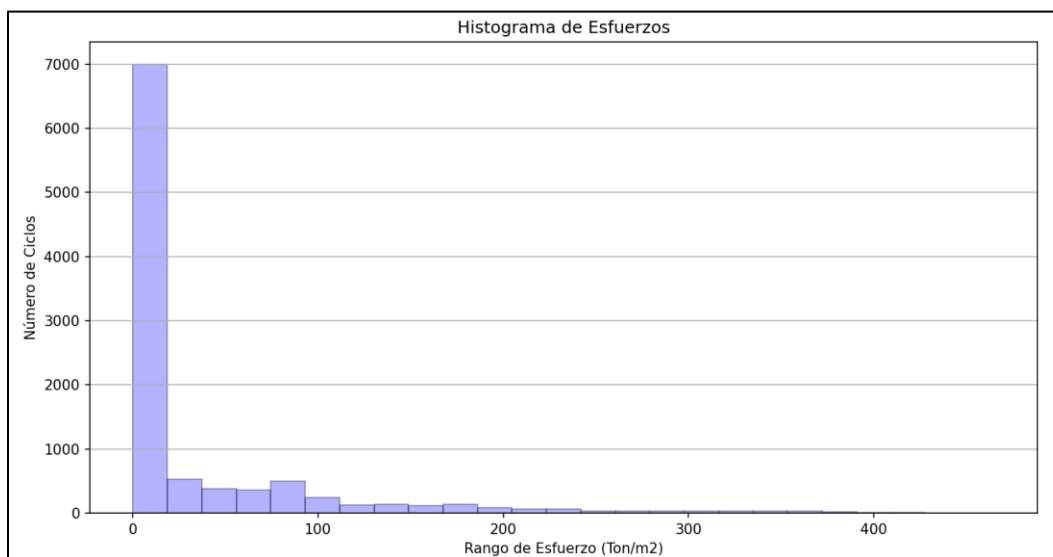


Figura 34. Histograma de Esfuerzos esperado.

Notar que el histograma coincide con el comportamiento esperado de la estructura debido a que los vehículos Clase A, los de menores demanda, son los que tienen una mayor probabilidad de incidencia y, por lo tanto, una mayor cantidad de ciclos a un menor rango de esfuerzos.

4.5.2. APLICACIÓN DE LA REGLA DE DAÑO ACUMULADO.

A través de la curva de esfuerzos y número de ciclos (Curva S-N), es posible aplicar la regla de daño acumulado de Palmgren-Miner mediante la siguiente ecuación:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \leq 1.0$$

Como primer paso se obtiene el Daño Anual Base con todas las variables deterministas. Para el cálculo del número de ciclos a la falla N_i se considerará la curva bilineal para los esfuerzos mayores y menores al Límite de Fatiga, por lo que:

$$D_{\text{anual base}} = D_1 + D_2$$

Si $\Delta s \geq LFT$, entonces:

$$D_1 = \frac{1}{K_1 * z^{m_1}} \sum_{i=1}^n n_i * Q_i^{m_1}$$

Si $\Delta s \leq LFT$, entonces:

$$D_2 = \frac{1}{K_2 * z^{m_2}} \sum_{i=1}^n n_i * Q_i^{m_2}$$

4.6. ESTIMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD.

A partir del daño base, se generan diferentes escenarios en múltiples iteraciones en dónde se modifican tres principales variables que se le atribuyen a la incertidumbre del problema:

- Factor del modelo de Miner FCM.
- Factor de concentración de esfuerzos SCF.
- Factor de variabilidad del material K_1 y K_2 .

4.6.1. PROBABILIDAD DE FALLA.

La probabilidad de falla para el modelo de daño acumulado de Miner es de la forma:

$$P_F = P[D(t) \geq 1]$$

Lo que significa que todos aquellos valores en donde el Daño acumulado en el tiempo $D(t)$ sean mayores a 1 presentan una distribución de falla. De manera práctica esto se puede reducir a la siguiente expresión:

$$P_F = \frac{\text{Fallas}}{\text{Simulaciones}}$$

En dónde la P_F es igual al cociente de las *Fallas*, en donde el daño sea igual o mayor a 1, y las *Simulaciones*, que hacen referencia al número total de la muestra. Para el caso de estudio, el número de simulaciones es igual a la cantidad anual de vehículos que transitan, calculados a partir del TDPA. Para esto se utiliza la metodología del modelo de Monte Carlo con la finalidad de generar una cantidad considerable de muestras.

La Probabilidad de Falla se deberá calcular para cada año de la vida útil proyectada del elemento estructural. Posteriormente, con estos valores anuales se grafica la curva de P_F . En donde en el eje horizontal se representa el tiempo en años y el eje vertical corresponde a la P_F para cada año correspondiente.

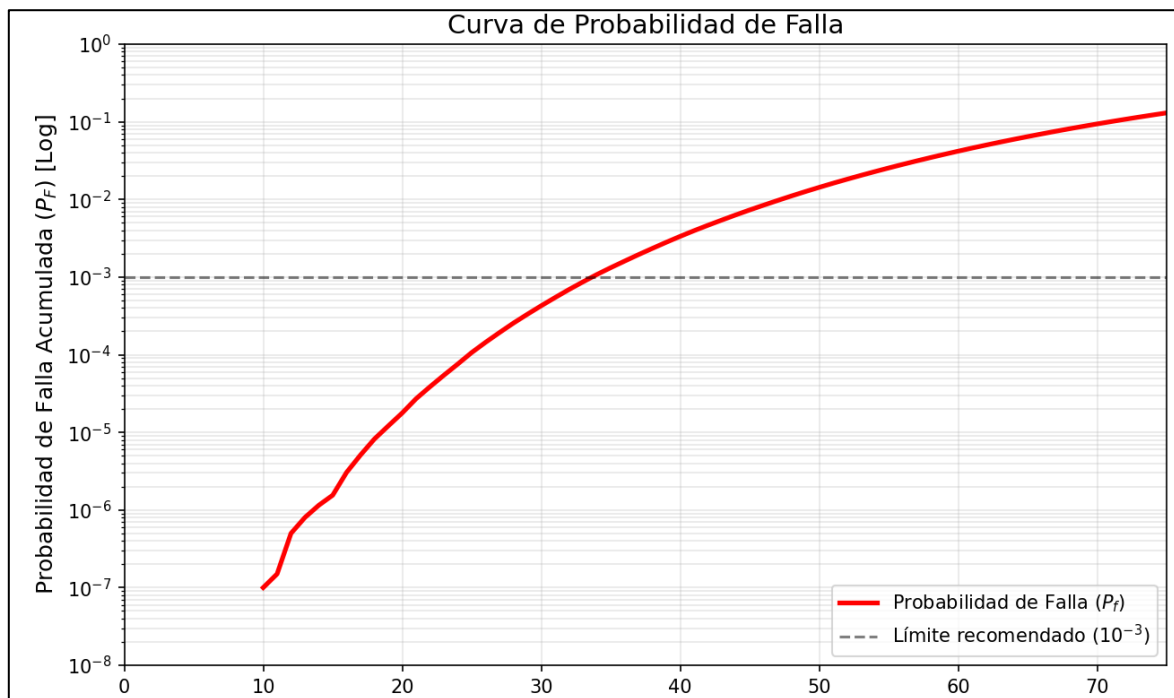


Figura 35. Curva de Probabilidad de Falla esperada.

De acuerdo con lo indicado por el DNV-GL y la AASHTO, un nivel de seguridad adecuado ronda entre una $P_F = 10^{-3}$.

4.6.2. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD.

El índice de confiabilidad β se determina a partir de la probabilidad acumulada de falla obtenida mediante la simulación de Monte Carlo. Ambos parámetros están directamente relacionados dado por la siguiente expresión matemática:

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

Donde Φ^{-1} es la función inversa de la distribución normal estándar. Además, el valor recomendado para una $P_F = 10^{-3}$ es de $\beta = 3.09$.

5. CASO DE ESTUDIO: PUENTE CALAPA.

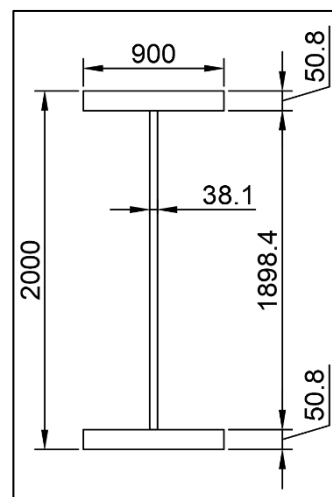
La metodología está planteada para poder ejecutarse sobre cualquier puente de acero que tenga una estación de monitoreo del TDPA, para esta investigación se toma como caso de estudio el Puente Calapa, ubicado en el kilómetro 83 de la Carretera Cuacnopalan – Oaxaca y a una altura aproximada de 1100 m.s.n.m.

Este puente se encuentra a 13 km de la Plaza de cobro Miahuatlán, ubicada en el kilómetro 70.70 de la misma carretera, en donde se ubica una estación de muestreo TDPA. Dicha información es necesaria para relacionar un estimado de los vehículos que pasan por el puente y las cargas que se pueden considerar de acuerdo con los datos estadísticos de los muestreos.

La estructura principal es a base de diafragmas de acero que unen a las dos traveses metálicas principales que soportan el tablero de la superestructura a través de un sistema de cimbra perdida tipo Steel Deck. Tiene una longitud total de 342 metros, aproximadamente, de los cuales se dividen en 5 claros soportados por medio de columnas de concreto. Los tres claros centrales tienen una longitud de 76.50 metros, mientras que los extremos son de 57.60 metros.

Dado que no existen planos o especificaciones oficiales de la estructuración del puente, se opta por escalar la sección de acero para identificar las medidas aproximadas de los elementos que componen a la trabe principal:

- Altura = 2000 mm.
- Patines = 900x50.8 mm.
- Alma = 1898.4x38.1 mm.
- Acero A-36 (250 Mpa).



Con la información presentada, se comienza con la aplicación de la metodología:

5.1. SISTEMA ESTRUCTURAL DEL PUENTE.

Como se ha mencionado, se propone la revisión del claro central del puente con una longitud de 76.50 metros modelado como una viga simplemente apoyada:

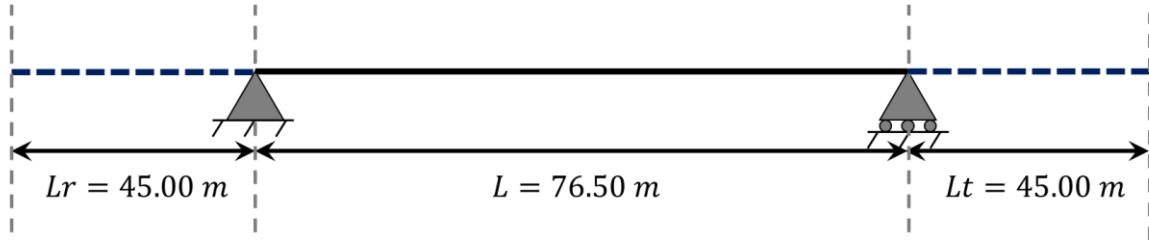


Figura 36. Modelo analítico del caso de estudio.

5.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES.

A continuación, se definen las variables deterministas y aleatorias dadas por el tránsito vehicular y las características locales del puente.

Variables deterministas del tránsito.

- Pesos Brutos Vehiculares = Dados por la caracterización vehicular.
- Longitud entre ejes de los vehículos = Dados por la caracterización vehicular.
- Número de ejes de cada clase vehicular = Dados por la caracterización vehicular.
- Capacidad máxima de carga = Dados por la caracterización vehicular.
- Número de vehículos por año = Año base TDPA = 2771, Tasa de crecimiento = 2.9%.

A partir del TDPA del daño base y la Tasa de crecimiento se obtienen los vehículos simulados en cada año de estudio durante 75 años:

$$TDPA(t) = TDPA_0 \cdot (1 + \alpha)^t = 2771 \cdot (1 + 0.029)^t$$

Esta ecuación se aplica en cada año (t) de la proyección de la vida útil del puente y los resultados se complementan con los registros disponibles del TDPA de cada año. Es posible notar que en el año 2020 y 2021 tuvo un decrecimiento en la cantidad de vehículos, esto obedece a las incertidumbres del crecimiento poblacional que no se contemplan en esta investigación.

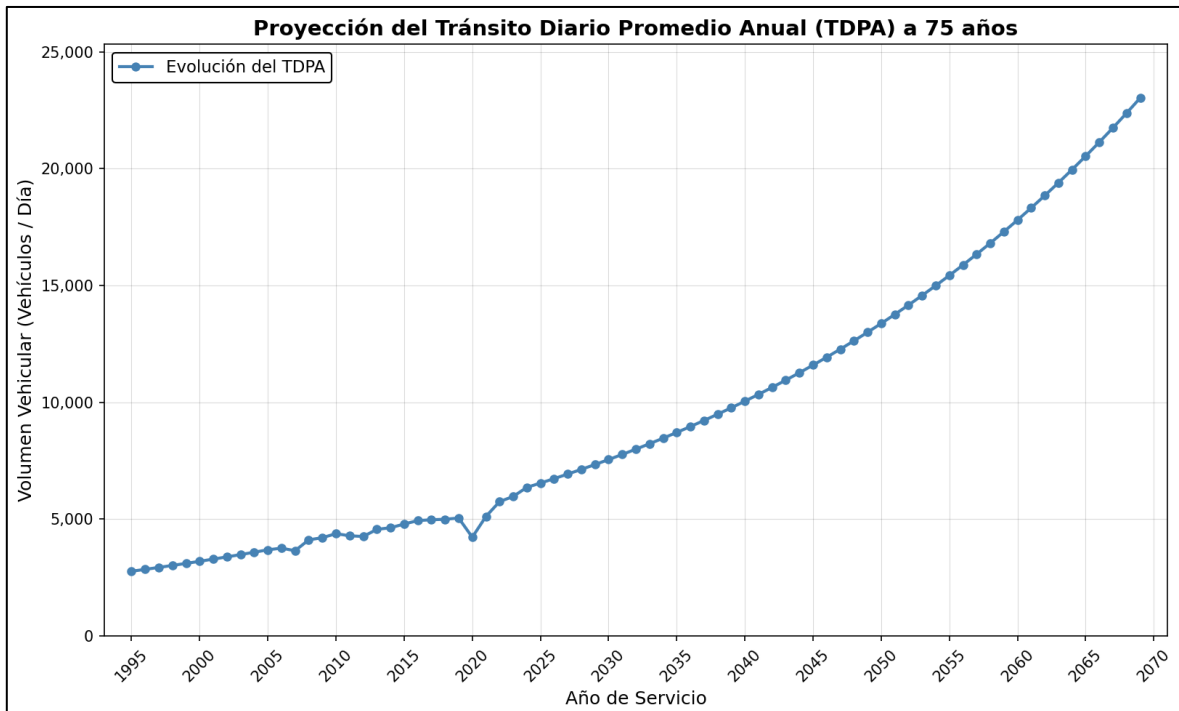


Figura 37. Proyección del TDPA a 75 años.

Variables deterministas del puente.

- Longitud del puente (L) = 76.50 metros.
- Sección transversal = Dadas por la sección propuesta, de los cuales destacan:
 - $I_x = 0.1086 \text{ m}^4$.
 - $S_x = 0.1086 \text{ m}^3$.
 - $A = 0.163 \text{ m}^2$.
 - $t_{\text{patín}} = 0.0508 \text{ m}$.
- Constantes del material = Estos valores se especifican de acuerdo con el modelo de curva S-N elegido, para este caso se considera una categoría C y las constantes son las indicadas en la guía de diseño DNV-RP-C203-2011:
 - $K_1 = 12.592$.
 - $K_2 = 16.320$.
 - $m_1 = 3.00$.
 - $m_2 = 5.00$.

Por lo que la curva S-N base se muestra a continuación:

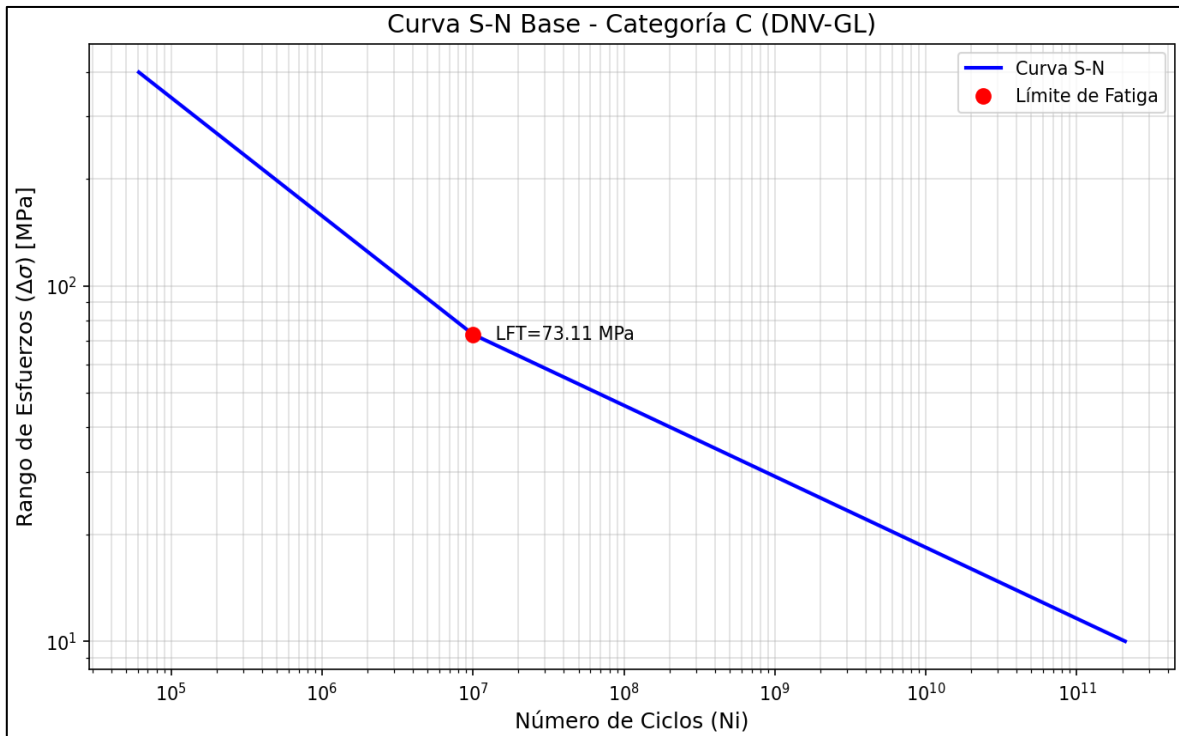


Figura 38. Curva S-N base para el caso de estudio.

Variables aleatorias del tránsito y del puente.

- Incidencia de la clase vehicular.
- Cantidad y peso de ocupantes.
- Cargas adicionales en vehículos.
- Modelo de Miner FCM.
- Constantes del material K_{a1} y K_{a2} .
- Esfuerzos resultantes X_s .

Todas estas variables aleatorias se modelarán de acuerdo con el procedimiento descrito en el Apartado 4.2.

5.3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA VEHICULAR.

Dado que la clasificación de la demanda vehicular se realizó con los datos existentes de estadísticas de México, se utiliza la misma base de datos descrita en el apartado anterior y se resumen a continuación:

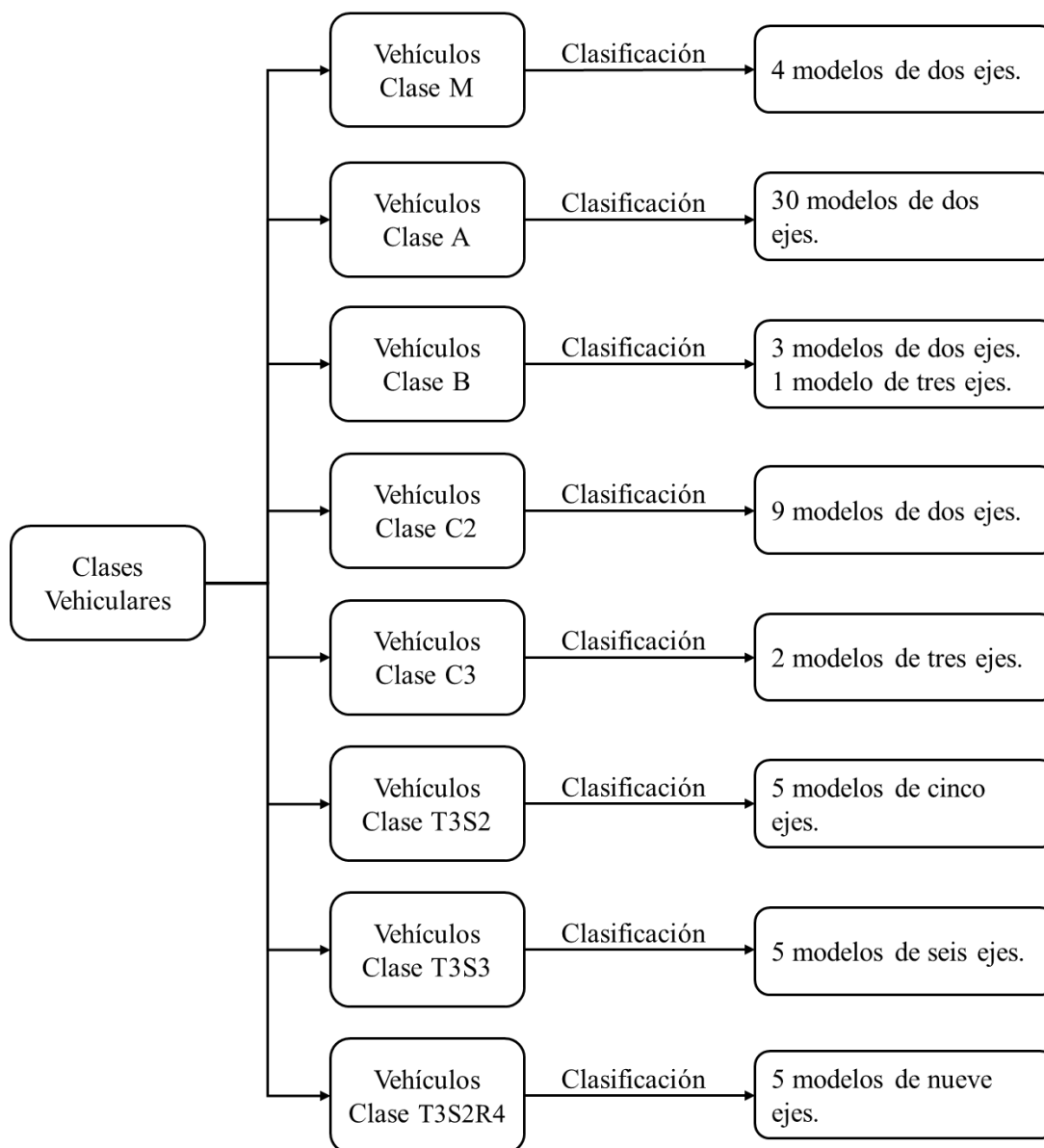


Figura 39. Base de datos de la categorización vehicular.

Asimismo, la distribución de las cargas se realiza de la misma manera de la que se estipuló en la metodología.

Por otro lado, las diferentes clases tienen un registro porcentual de acuerdo con el TDPA en el cual se puede observar que tipos de vehículos transitan más por la estación de interés. De esta forma, los valores del TDPA correspondientes a la caseta de Miahuatlán se resumen de la siguiente manera:

Tabla 5. Porcentaje de probabilidad de incidencia de vehículos en la caseta de Miahuatlán. Fuente: SICT.

Clasificación	No. Ejes	Probabilidad (%)
M	2	0.90%
A	2	69.20%
B	2	6.40%
C2	2	4.90%
C3	3	6.40%
T3S2	5	5.90%
T3S3	6	1.70%
T3S2R4	9	3.70%
Otros	Var.	0.90%
TOTAL		100.00%

Con el fin de obtener valores más representativos de los vehículos que circulan realmente y de los rangos de esfuerzos que generan sobre la viga analizada, se adoptarán los porcentajes registrados como la probabilidad de ocurrencia asociada a cada clase vehicular, es decir, el algoritmo elige de manera aleatoria que vehículo se simulará con la probabilidad que se indica en la tabla anterior; se puede notar que los vehículos ligeros tienen un mayor registro estando por encima de los demás, por lo que se espera que en la mayoría de las simulaciones se encuentre esta Clase de vehículos con esfuerzos bajos.

Por otro lado, el número de simulaciones está directamente relacionado con el TDPA, como la intención es planear la vida útil del puente desde que se comenzó a utilizar, se utilizarán los registros del año 1995 con un dato de 2771 vehículos diarios, por lo tanto, el número de simulaciones del año base que realizará el algoritmo es igual a:

$$TDPA_1 = (2771 \text{ veh\acute{u}culos/d\acute{a}a})(365 \text{ d\acute{a}as}) = 1,011,415 \text{ veh\acute{u}culos}$$

5.4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y OBTENCIÓN DE ESFUERZOS.

Las cargas se aplican por medio del principio de superposición idealizando que el vehículo avanza a una distancia de análisis (Δ) para la generación de la historia de elementos mecánicos y a su vez, los esfuerzos. Además, la elección del vehículo en cada simulación se genera por medio del algoritmo alimentado con las estadísticas del TDPA. Por ejemplo:

SIMULACIÓN 1.

1. Clase vehicular: Clase A con dos ejes.
2. Segmento: Tipo Compacto (PBV = 1126 kg, LV = 262 cm).
3. Ocupantes: 3 Ocupantes con un peso total de 248 kg.
4. Cargas Totales: P1= 824.40 kg, P2= 549.60 kg.
5. Aplicación de cargas del vehículo ($\Delta = 50$ cm):



Figura 40. Ejemplo de aplicación de cargas de dos ejes.

Las cargas P1 y P2 avanzan a cada 50 centímetros generando la siguiente historia:

Tabla 6. Historia de Momentos y Esfuerzos Flexionantes al centro del claro (De 0 a 4 metros).

Posición (m)	Ray (Ton)	Mx (Ton-m)	Nx (Ton)	σ_{Mx} (Ton/m ²)	σ_{Nx} (Ton/m ²)
0.00	0.824	0.000	0.000	0.000	0.000
0.50	0.819	0.206	0.000	1.585	0.000
1.00	0.814	0.412	0.000	3.171	0.000
1.50	0.808	0.618	0.000	4.756	0.000
2.00	0.803	0.824	0.000	6.342	0.000
2.50	0.797	1.031	0.000	7.927	0.000
3.00	1.339	1.341	0.000	10.316	0.000
3.50	1.330	1.685	0.000	12.958	0.000
4.00	1.321	2.028	0.000	15.600	0.000

Con la finalidad de no saturar el documento, únicamente se presenta en la tabla anterior la evolución desde el punto 0 hasta los 4 metros, mientras que en la siguiente se muestra el cambio de magnitudes en cuanto la carga P1 llega al centro del claro (38.25 metros):

Tabla 7. Historia de Momentos y Esfuerzos Flexionantes al centro del claro (De 36 a 40.50 metros).

Posición (m)	Ray (Ton)	Mx (Ton-m)	Nx (Ton)	σ_{Mx} (Ton/m ²)	σ_{Nx} (Ton/m ²)
36.00	0.746	24.012	0.000	184.708	0.000
36.50	0.737	24.356	0.000	187.350	0.000
37.00	0.728	24.699	0.000	189.992	0.000
37.50	0.719	25.043	0.000	192.635	0.000
38.00	0.710	25.386	0.206	195.277	1.096
38.50	0.701	24.083	0.206	185.257	1.096
39.00	0.692	24.015	0.206	184.729	1.096
39.50	0.683	23.946	0.206	184.201	1.096
40.00	0.674	23.877	0.206	183.672	1.096
40.50	0.665	23.809	0.344	183.144	1.827

Como se observa, cuando la carga P1 alcanza el centro del claro, que corresponde al punto en donde se realizan las lecturas, los valores del Momento y esfuerzo flexionante alcanzan su valor máximo y posteriormente comienzan a descender. Por otro lado, la fuerza axial representa el 25% de la carga P1, sin embargo, cuando la carga P2 pasa por el punto de interés, tanto la fuerza como el esfuerzo axial se incrementan en proporción directa a la magnitud de dicha carga P2. Este comportamiento es el esperado en todas las simulaciones. Además, se debe de incluir el esfuerzo debido al Peso Propio del tablero, por lo que se obtiene de la siguiente manera la carga distribuida representativa:

Tabla 8. Carga Muerta considerada para el análisis.

Carga muerta (CM)					
Elemento	γ kg/m ³	L cm	b cm	h cm	w kg/m ²
Losa de concreto	2400	100	100	15.00	360.00
Capa de desgaste	2200	100	100	5.00	110.00
Densidad de acero	---	---	---	---	60.00
Carga Muerta			C_M	530.00	kg/m²

Los pesos y características fueron extraídos de la norma N·PRY·CAR·6·01·003/25.

Se estima un ancho de calzada de 13.00 metros que se distribuye entre las dos trabes principales, por lo que la carga distribuida W es igual a:

$$W = \frac{A_{calzada}}{2} * w = \frac{13.00 \text{ m}}{2} * 530 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 3445 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 3.45 \frac{\text{Ton}}{\text{m}}$$

Es importante mencionar que esta carga se idealiza como constante a lo largo de toda la trabe, por lo que el momento y el esfuerzo flexionante son iguales a:

$$M_x = \frac{W * L^2}{8} = \frac{(3.45 \text{ Ton/m}) * (76.50 \text{ m})^2}{8} = 2523.78 \text{ Ton} - \text{m}$$

$$\sigma_x = \frac{M_x}{S_x} = \frac{2520.13 \text{ Ton} - \text{m}}{0.130 \text{ m}^3} = 19,413.76 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}$$

Al sumar el esfuerzo máximo del peso propio más el del vehículo se tiene que:

$$M_x = M_{pp} + M_{veh} = (2523.78 \text{ Ton} - \text{m}) + (25.39 \text{ Ton} - \text{m}) = 2549.17 \text{ Ton} - \text{m}$$

$$\sigma_x = \sigma_{pp} + \sigma_{veh} = (19,413.76 \text{ Ton/m}^2) + (195.277 \text{ Ton/m}^2) = 19,609.04 \text{ Ton/m}^2$$

Estos valores se pueden asimilar en las siguientes gráficas:

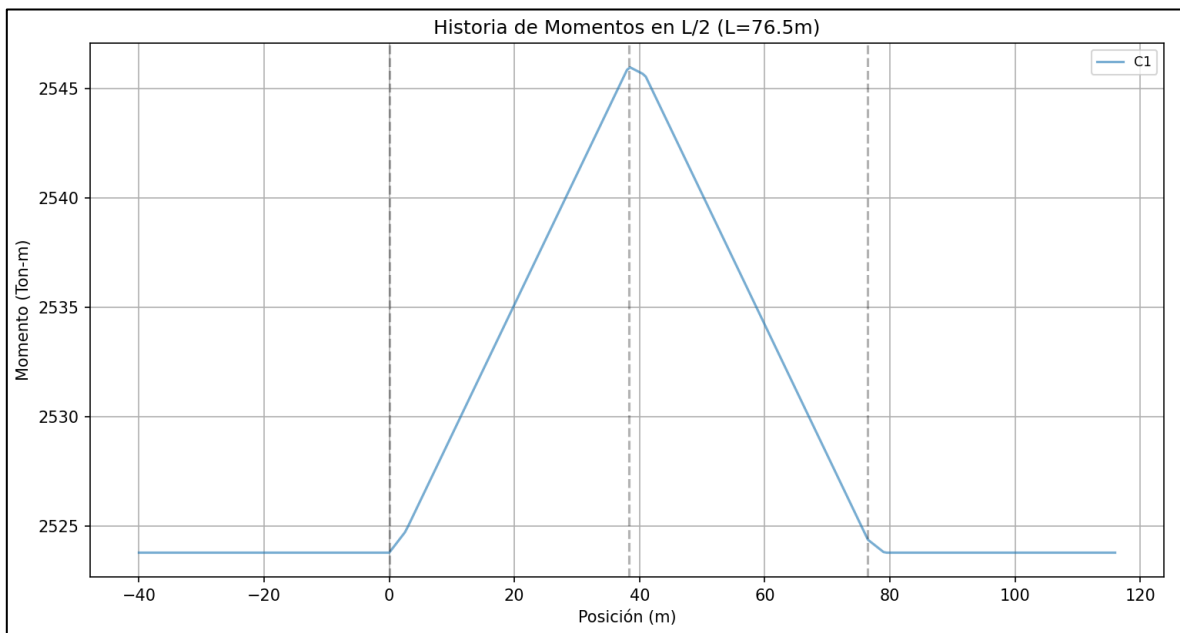


Figura 41. Momento resultante.

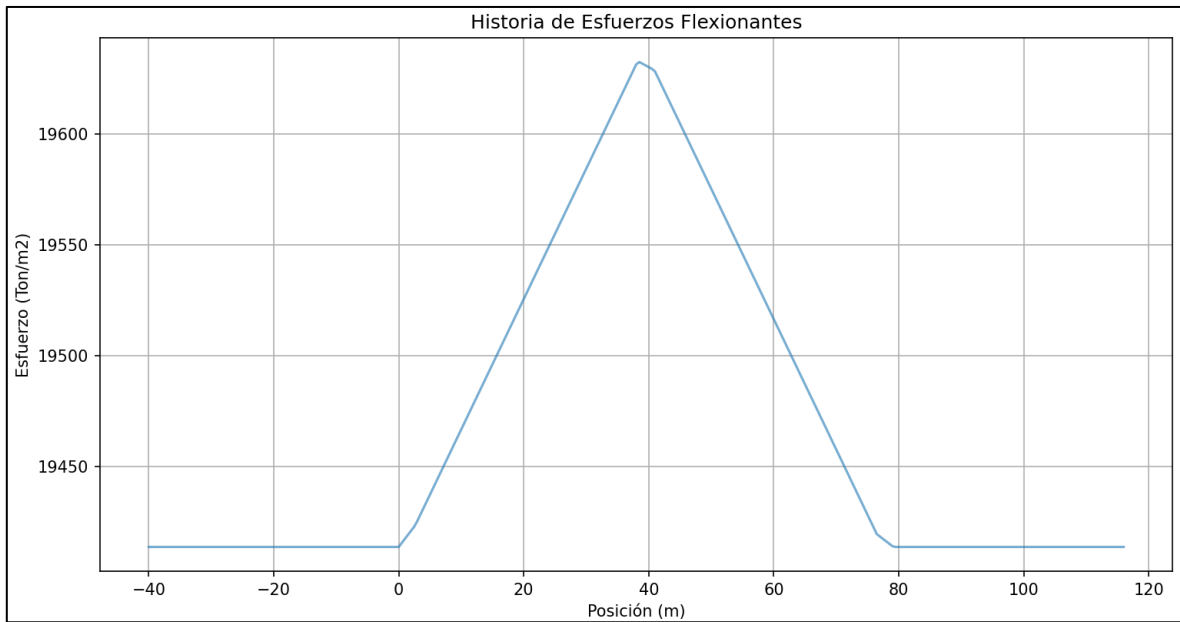


Figura 42. Esfuerzo resultante.

Notar que las gráficas no comienzan con un valor en 0, sino que con el valor del momento y esfuerzo generado por el peso propio del puente. De esta forma, se observa que el algoritmo arroja resultados esperados respecto a la historia de elementos mecánicos y de esfuerzos resultantes. Este procedimiento se debe realizar las simulaciones mencionadas, que son iguales al TDPA anual con las variaciones de vehículos de acuerdo con el procedimiento estocástico. En la siguiente gráfica se muestran los resultados de 10 simulaciones:

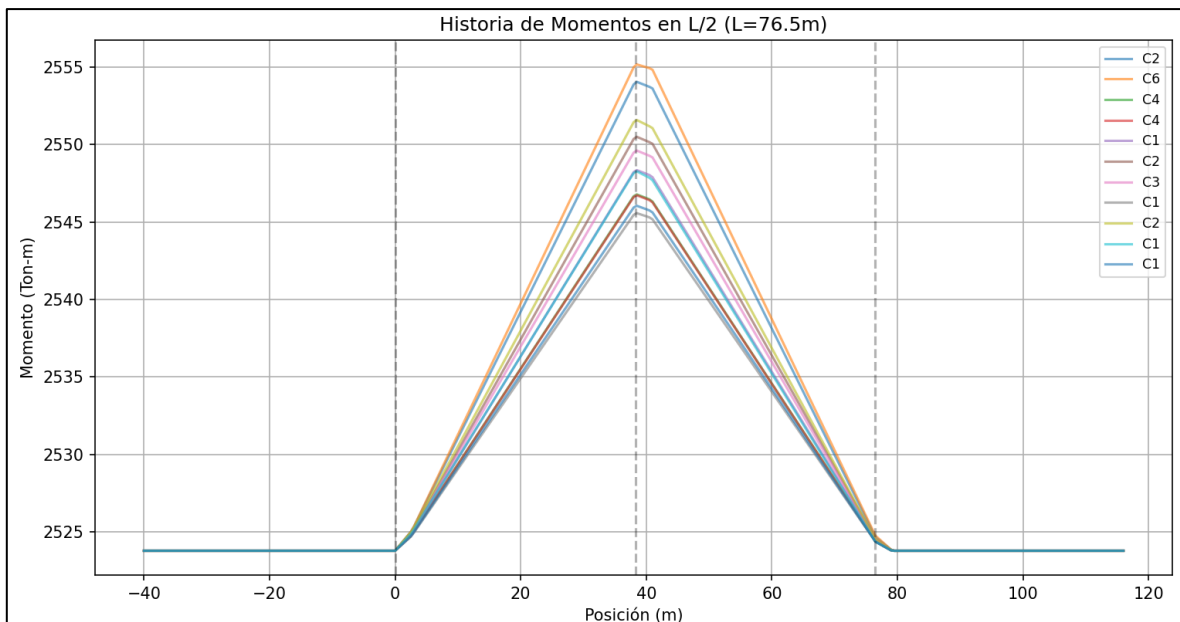


Figura 43. Gráfica de Historia de momentos de 10 simulaciones aleatorias.

5.5. CONTEO DE CICLOS Y EVALUACIÓN DE DAÑO.

Siguiendo la metodología descrita en el Apartado 4, con los esfuerzos arrojados por la recopilación de la historia se realiza la clasificación de rangos de esfuerzo por medio del método *Rainflow Counting*. Es importante mencionar que, como primer paso, se evaluarán únicamente los esfuerzos que se generan en el año base $TDPA_1$.

1. Procesamiento de rangos de esfuerzo.

El algoritmo clasifica los rangos de esfuerzo de la siguiente forma:

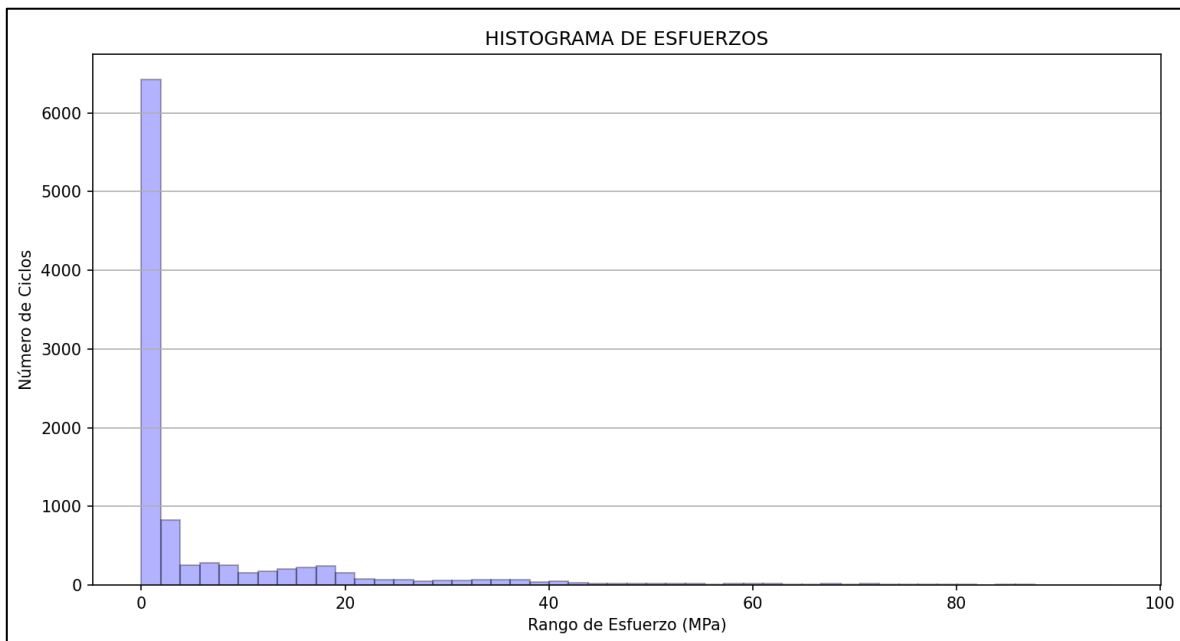


Figura 44. Histograma de esfuerzos del $TDPA_1$.

Este histograma o espectro de fatiga nos indica que el algoritmo arroja un resultado esperado al tener una mayor densidad de ocurrencia de esfuerzos bajos con ciclos altos.

Además, se realiza la conversión de unidades de Ton/m^2 a MPa con la finalidad de que exista compatibilidad entre los esfuerzos contemplados y los establecidos en la curva S-N.

2. Obtención de daño base anual.

Por medio de la regla de daño acumulado se obtienen los ciclos permitidos para cada esfuerzo identificado por medio del algoritmo. Por ejemplo, se realiza la recopilación de esfuerzos de los primeros 10 vehículos simulados;

Tabla 9. Clasificación de esfuerzos con respecto al LFT.

Vehículo	$\sigma_{\text{Vehículo}}$ (MPa)	Mayor a LFT	Clasificación (D ₁ , D ₂)	Ciclos (ni)
1	3.81	No	D ₂	1
2	20.97	No	D ₂	1
3	76.25	Si	D ₁	1
4	36.22	No	D ₂	1
5	95.31	Si	D ₁	1
6	53.46	Si	D ₁	1
7	7.63	No	D ₂	1
8	5.72	No	D ₂	1
9	66.72	Si	D ₁	1
10	45.76	No	D ₂	1

Posteriormente se aplica la regla de daño acumulado. Para los esfuerzos mayores al LFT:

$$D_1 = \frac{1}{K_1 * z^{m_1}} \sum_{i=1}^n n_i * Q_i^{m_1} = \frac{1}{10^{12.164} * 1^3} \sum_{i=1}^n n_i * Q_i^{m_1}$$

Dónde:

$$\sum_{i=1}^n n_i * Q_i^{m_1} = (76.25 \text{ MPa})^3 + (95.31 \text{ MPa})^3 + (53.46 \text{ MPa})^3 + (66.72 \text{ MPa})^3$$

$$\therefore D_1 = \frac{1}{10^{12.592} * 1^3} (1758913.07) = 0.000000450 = 4.500^{-7}$$

Para esfuerzos menores al LFT:

$$D_2 = \frac{1}{K_2 * z^{m_2}} \sum_{i=1}^n n_i * Q_i^{m_2} = \frac{1}{10^{16.320} * 1^5} \sum_{i=1}^n n_i * Q_i^{m_2}$$

Dónde:

$$\sum_{i=1}^n n_i * Q_i^{m_2} = (3.81 \text{ MPa})^5 + (20.97 \text{ MPa})^5 + (36.22 \text{ MPa})^5 + (7.63 \text{ MPa})^5 \\ + (5.72 \text{ MPa})^5 + (45.76 \text{ MPa})^5 = 267070073.89 \text{ MPa} \\ \therefore D_2 = \frac{1}{10^{16.320} * 1^5} (267070073.89) = 0.0000000128 = 1.280^{-8}$$

Por lo que:

$$D_{base - 10 \text{ veh\u00edculos}} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = D_1 + D_2 = 4.500^{-7} + 1.280^{-8} = 4.630^{-7} \leq 1.0$$

Es importante considerar que el esfuerzo Q_i est\u00e1 afectado por el factor de correcci\u00f3n de espesor del miembro analizado. Esta ejemplificaci\u00f3n de los primeros 10 veh\u00edculos de la simulaci\u00f3n tiene la intenci\u00f3n de detallar la manera en la que el algoritmo recopila y procesa la informaci\u00f3n. El procedimiento se realiza 1, 011, 415 veces, que es el total de veh\u00edculos del a\u00f1o base, obteniendo un da\u00f1o anual de:

$$D_{anual \text{ base}} = 0.014094 \leq 1.0$$

Se observa que el da\u00f1o del primer a\u00f1o se encuentra por debajo del l\u00edmite permisible.

5.6. ESTIMACI\u00d3N DE LA CONFIABILIDAD.

1. Obtenci\u00f3n de la Probabilidad de Falla.

Una vez que se tiene el da\u00f1o base anual, se realizan 1 mill\u00f3n de simulaciones por cada a\u00f1o de vida \u00fatil del puente, para este caso se proyecta a 75 a\u00f1os y en cada a\u00f1o que avanza se aplica el modelo de progresi\u00f3n acumulativa para simular el crecimiento del tr\u00e1nsito anual. Dentro de estas simulaciones, se var\u00edan los valores del modelo de da\u00f1o detallados en el Apartado 5.2 y enlistados a continuaci\u00f3n:

- Factor del modelo de Miner FCM.
- Factor de concentraci\u00f3n de esfuerzos SCF.
- Factor de variabilidad del material K.

Retomando los datos de los primeros 10 vehículos, se obtuvo el daño acumulado y el daño parcial para los esfuerzos mayores y menores al LFT. A partir de estos, para cada simulación se le atribuirán diferentes valores de las variables aleatorias.

Dado que las condiciones iniciales dividen el Daño 1 y el Daño 2 con relación al límite de fatiga LFT, la sumatoria de ambos daños nos dan el resultante al agregar un factor multiplicativo para cada daño parcial en cada simulación, por lo que:

$$D_n = \sum_{i=1}^2 D_{parcial\ i} * \left(\frac{SCF^{m_i}}{K_i} \right) * FCM$$

Dónde D_n es igual a la suma de los Daños 1 y 2 en cada simulación:

$$D_1 = 4.500^{-7} \quad y \quad D_2 = 1.280^{-8}$$

$$\therefore D_n = D_1 * \left(\frac{SCF^{m_1}}{K_1} \right) * FCM + D_2 * \left(\frac{SCF^{m_2}}{K_2} \right) * FCM$$

En cada simulación se tendrá un valor de SCF, K y FCM, mismos que se observan en las siguientes tablas:

Tabla 10. Daños parciales D1 de las primeras 10 simulaciones.

SIMULACIONES PARA DAÑO $D_1 = 4.500^{-7}$				
Simulaciones	Material k	Esfuerzos SCF	Miner FCM	Daño/Sim
1	16.00	0.60	1.03	6.29E-09
2	2.98	1.46	1.57	7.37E-07
3	7.37	0.66	0.58	1.03E-08
4	35.46	1.06	0.71	1.08E-08
5	7.31	1.49	0.71	1.45E-07
6	82.39	1.32	0.82	1.03E-08
7	1.92	1.25	1.04	4.77E-07
8	6.53	0.74	0.57	1.58E-08
9	25.26	1.04	0.57	1.14E-08
10	2.32	0.79	0.81	7.75E-08

Tabla 11. Daños parciales D2 de las primeras 10 simulaciones.

SIMULACIONES PARA DAÑO $D_2 = 1.280^{-8}$				
Simulaciones	Material k	Esfuerzos SCF	Miner FCM	Daño/Sim
1	14.38	0.60	1.03	7.21E-11
2	2.68	1.46	1.57	4.97E-08
3	6.62	0.66	0.58	1.41E-10
4	31.86	1.06	0.71	3.83E-10
5	6.57	1.49	0.71	1.01E-08
6	74.02	1.32	0.82	5.69E-10
7	1.72	1.25	1.04	2.36E-08
8	5.87	0.74	0.57	2.74E-10
9	22.69	1.04	0.57	3.89E-10
10	2.08	0.79	0.81	1.53E-09

Y el daño resultante de ambos daños parciales para cada simulación es el siguiente:

Tabla 12. Daños totales D1 + D2 de las primeras 10 simulaciones.

Simulaciones	Daño Total/Sim	Diferencia	Comparación
1	6.36E-09	4.56E-07	Menor
2	7.87E-07	-3.24E-07	Mayor
3	1.04E-08	4.52E-07	Menor
4	1.12E-08	4.52E-07	Menor
5	1.55E-07	3.08E-07	Menor
6	1.09E-08	4.52E-07	Menor
7	5.01E-07	-3.78E-08	Mayor
8	1.61E-08	4.47E-07	Menor
9	1.18E-08	4.51E-07	Menor
10	7.90E-08	3.84E-07	Menor

Si comparamos estos resultados con el daño base de 4.630^{-7} se nota que en la mayoría de las 10 simulaciones se obtienen valores inferiores, sin embargo, esto puede cambiar al realizar un millón de simulaciones por cada año, además este daño es únicamente de los primeros diez vehículos, este procedimiento se debe de realizar con la muestra total del primer año igual al $TDPA_1$.

Del ejemplo completo se obtiene que el primer año tiene un daño base igual a 0.015806, este valor se simula con variables aleatorias 1, 000, 000 de veces, de las cuales ninguna alcanza un valor de daño mayor a 1, por lo que la probabilidad de falla es igual a 0 dada la ecuación:

$$P_F = P[D(t) \geq 1] \rightarrow P_{F-Año1} = \frac{Fallas}{Simulaciones} = \frac{0}{1,000,000} = 0$$

Para la evaluación del segundo año se conserva la estructura del modelo. Las propiedades de los vehículos simulados y el daño generado en cada iteración se mantienen constantes respecto a la simulación base. Sin embargo, el daño total acumulado de cada simulación se amplifica en función de la tasa de crecimiento vehicular. En consecuencia, la formulación para el daño base del año dos se define de la siguiente manera:

$$D_{Año2-Sim1} = D_{Año1-Sim1} * \alpha_A$$

Dónde:

$$\alpha_A = \frac{(1 + TC)^t - 1}{TC}$$

La tasa de crecimiento TC es del 2.90% y el tiempo t corresponde al año 2; mientras que $D_{Año1-Sim1}$ es el daño de la primera simulación del año 1 = 0.015806. Por lo tanto:

$$D_{Año2-Sim1} = (0.014094) * \frac{(1 + 0.029)^2 - 1}{0.029} = 0.0286$$

Este procedimiento de acumulación de daño se itera 1, 000, 000 de veces, correspondientes al tamaño de la muestra de la simulación establecida para el año 1. Posteriormente, se evalúa el vector de resultados para cuantificar las incidencias donde el daño acumulado alcanza o supera la unidad ($D \geq 1$). Al analizar todas las simulaciones en este periodo, se identificó que ningún escenario excedió el límite, por lo que la Probabilidad de Falla se mantiene nula.

$$P_{F-Año2} = \frac{Fallas}{Simulaciones} = \frac{0}{1,000,000} = 0$$

El proceso se realiza a lo largo de los 75 años proyectados obteniendo la Probabilidad de Falla de cada año y con estos resultados se puede graficar la curva de PF:

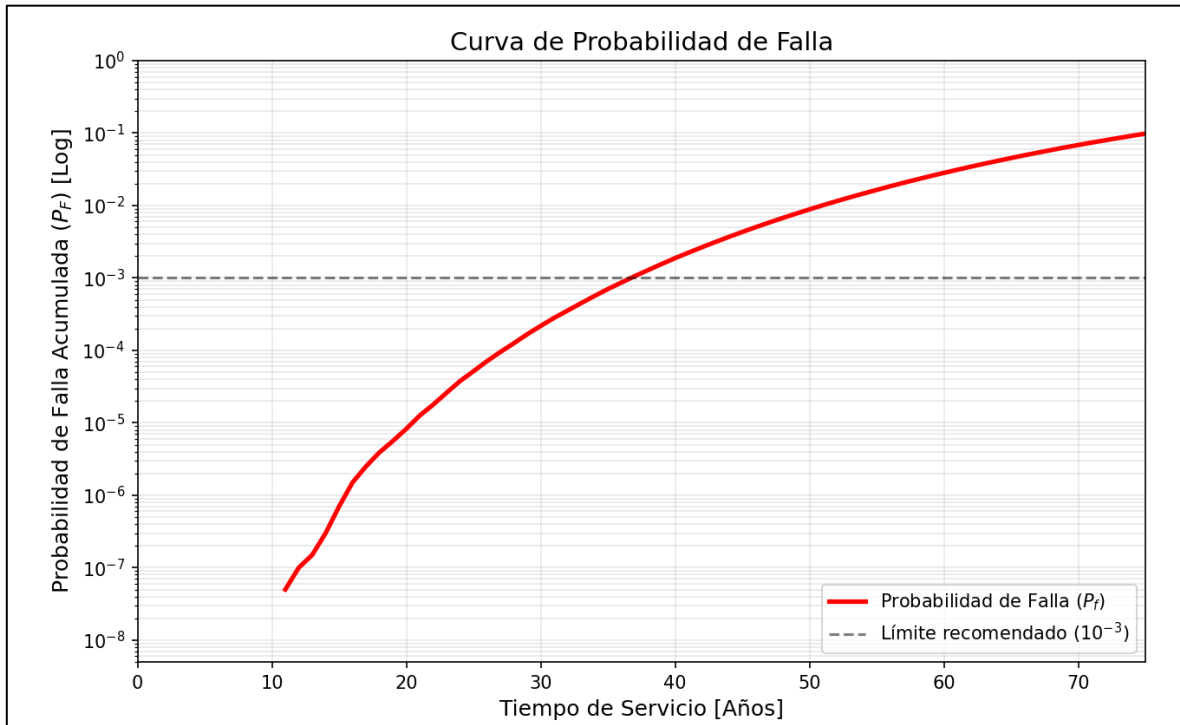


Figura 45. Curva de Probabilidad de Falla.

De acuerdo con los resultados de las iteraciones en el tiempo, en el año 75 se tiene una Probabilidad de Falla de $P_F = 1.302^{-01}$.

2. Obtención del Índice de Confiabilidad.

A través de la Probabilidad de Falla del último año de vida proyectado, se estima el índice de confiabilidad que obedece la siguiente ecuación:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) = -\Phi^{-1}(1.302^{-01})$$

$$\therefore \beta = 1.290$$

La obtención de estos dos valores paramétricos se discutirá en el siguiente apartado.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la implementación de la metodología propuesta para la evaluación de la confiabilidad por fatiga en una sección de acero representativa de un puente carretero sometido a cargas reales.

Los resultados se organizan en cinco ejes fundamentales. De primera instancia, se caracteriza la variabilidad de la demanda vehicular estocástica. En segundo lugar, se evalúa la capacidad resistente del material considerando con base en la curva S-N correspondiente. Después se analiza la evolución del daño acumulado mediante la aplicación de la regla de Palmgren-Miner. Posteriormente, se estima el nivel de seguridad del puente a través del cálculo de la Probabilidad de Falla y el Índice de Confiabilidad. Finalmente, se presenta un análisis de sensibilidad comparando diferentes escenarios al cambiar los parámetros del modelo.

6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA.

Para considerar adecuadamente las solicitaciones vehiculares que actúan sobre el miembro estructural a lo largo de su vida útil, se modeló la clase vehicular como una variable aleatoria discreta con una distribución categórica, donde cada categoría representa un vehículo arbitrario y su probabilidad está en función de su frecuencia de ocurrencia en el tránsito real.

Al observar la gráfica de la historia de esfuerzos se corrobora que los rangos de esfuerzos medidos siempre van desde un esfuerzo inicial igual al ocasionado por el peso propio de la estructura y alcanzan un límite máximo debido a un vehículo arbitrario. Asimismo, tal como se visualiza en la Figura 44, el espectro de fatiga se comporta de manera esperada al tener una mayor demanda de esfuerzos menores adjudicados a mayores ciclos dados por vehículos ligeros, y a su vez, una cantidad mínima ciclos correspondiente a esfuerzos altos debidos a vehículos pesados.

Esta consideración de cargas es adecuada para una revisión detallada del estado límite de fatiga ya que no se toma un vehículo de diseño conservador que siempre se encontrará por debajo del umbral de fatiga, sino que puede implementarse para optimizar el diseño de las secciones y poder establecer un programa de inspección basado en cargas reales, algo que no es posible con un vehículo único.

6.2. ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD.

La resistencia del material ante el estado límite de fatiga se definió a partir de las curvas SN establecidas en el código del DNV-GL. Las constantes del material $K_1 = 12.592$ y $K_2 = 16.320$ se seleccionaron mediante una comparación con las curvas S-N especificadas en el manual de la AASHTO, en dónde se definen ocho categorías de detalle diferentes en función de las características del elemento o conexión revisados. A diferencia de que el AASHTO únicamente reconoce un modelo de curva lineal, el modelo propuesto por el DNV-GL considera una pendiente adicional. Al sobreponer las gráficas del AASHTO con la que se utilizó para el desarrollo del Caso de Estudio, se verificó que el modelo de curva S-N utilizado para la obtención del daño se asimilara a una curva adecuada para una categoría vehicular considerando que el DNV-GL está orientado hacia el diseño de estructuras marítimas. Esta comparación se presenta en la siguiente gráfica:

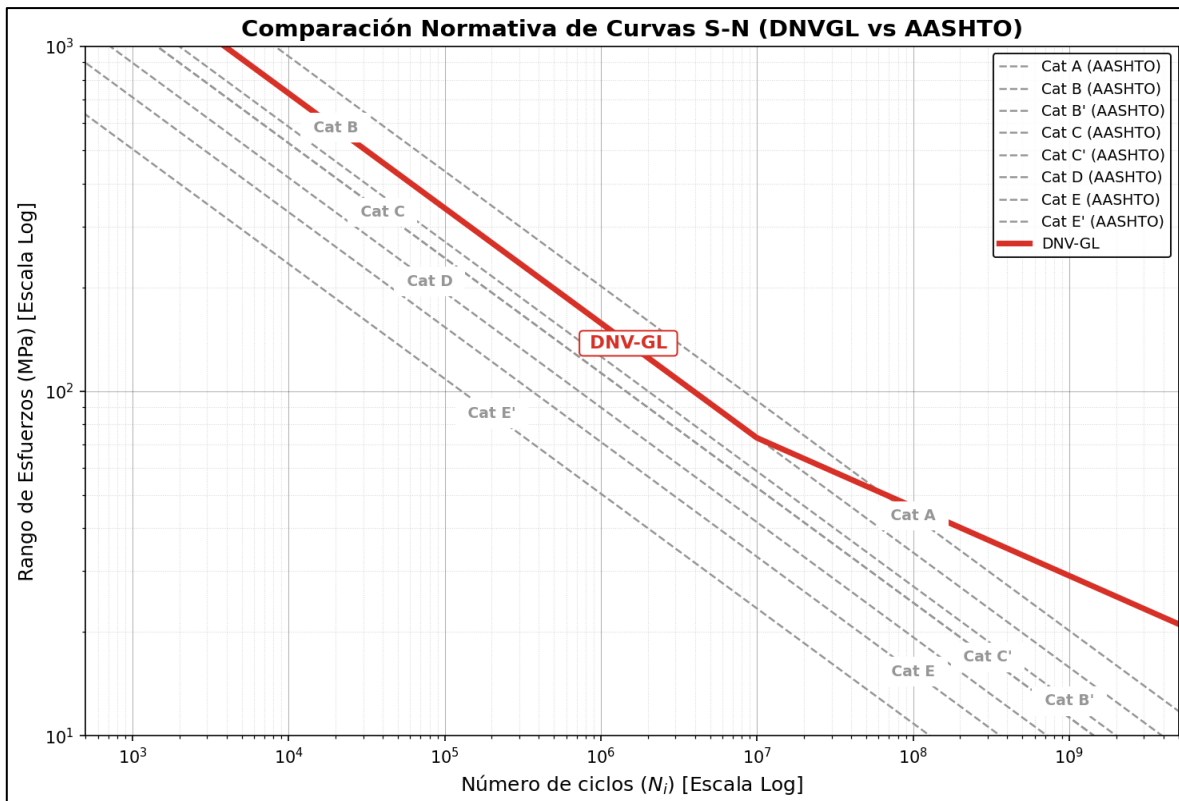


Figura 46. Comparación de Curva S-N (DNV-GL vs AASHTO).

A partir de esta comparación, se observa que para una categoría C del DNV-GL, la curva equivalente corresponde a una categoría B del AASHTO, misma que se reconoce para miembros planos, tal como la sección analizada en este estudio.

Asimismo, del análisis numérico con las constantes del material se determinó que en el punto de cambio de pendiente (LFT) ocurre naturalmente en la intersección de la curva bilineal a un rango de esfuerzo de 73.11 MPa, valor que coincide con el especificado en el DNV-GL. Este resultado confirma la coherencia del modelo de resistencia adoptado y su adecuada representación del comportamiento a fatiga del elemento estructural evaluado.

Por otro lado, las dimensiones reales de la sección exigen una consideración especial dado que el espesor de la placa principal es de 50.80 mm, lo que incrementa las concentraciones de esfuerzo. Por lo tanto, se aplicó el factor de corrección por espesor dictado por la norma DNV-GL. Es importante mencionar que en el enfoque de este estudio no se modificó la curva S-N nominal, dado que se alterarían las propiedades del modelo del material base, por lo que se determinó que la solución más congruente es aplicar este factor de corrección directamente en la demanda en el cálculo del daño acumulado. Esta separación entre la capacidad del material y los esfuerzos efectivos garantiza que no haya un incremento adicional en el modelo analítico base ni en el Límite de Fatiga, sino que se aumente el esfuerzo y, por lo tanto, se reduzcan los ciclos permisibles, tal como se observa a continuación:

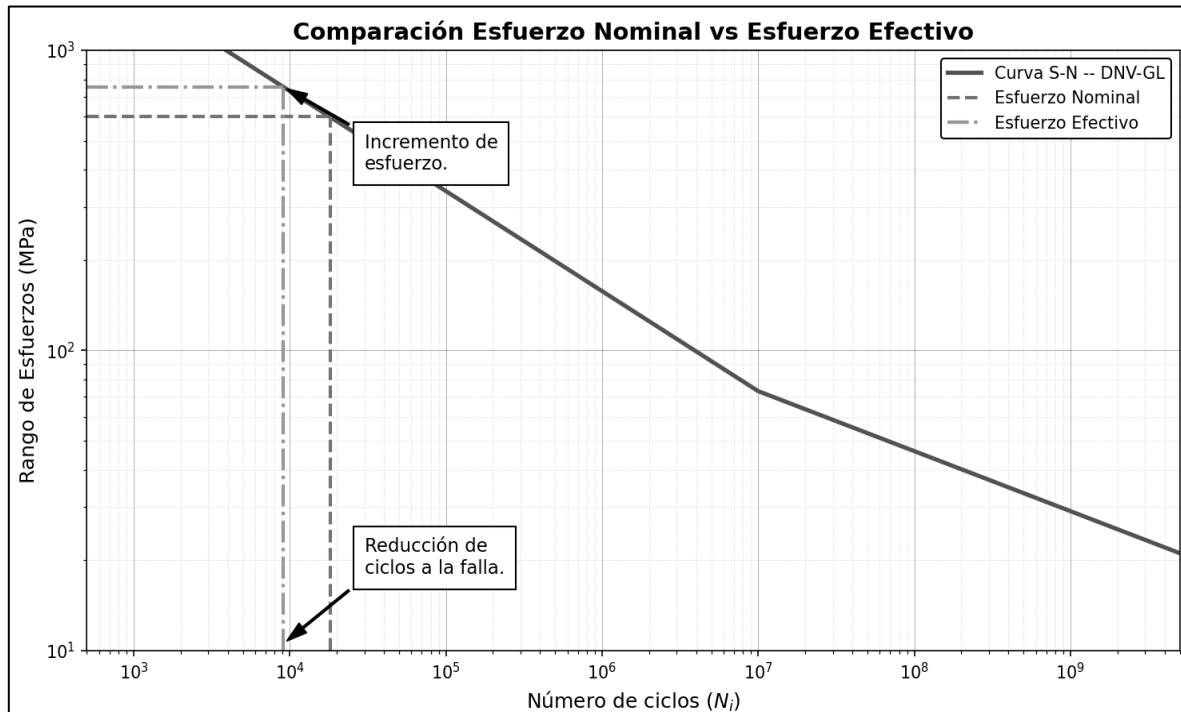


Figura 47. Comparación de Esfuerzo Nominal vs Esfuerzo Efectivo.

Finalmente, al comparar este enfoque con las especificaciones de diseño de la AASHTO, se evidencia una ventaja analítica del modelo. Mientras que la AASHTO aborda este factor de escala de manera implícita mediante saltos discretos entre categorías similares, pero con diferentes espesores, la formulación del DNV-GL permite entender esta amplificación de esfuerzos y así proponer diferentes dimensiones de una sección para la etapa de diseño, en dónde un incremento del espesor del elemento revisado no siempre es favorable.

6.3. EVOLUCIÓN DEL DAÑO ACUMULADO.

Con la finalidad de evaluar el deterioro estructural a lo largo de 75 años de vida útil del puente, se generó un gráfico de trayectorias aleatorias derivado del modelo de simulación de Monte Carlo. En la siguiente figura se ilustra la acumulación del daño en función del tiempo para una muestra arbitraria de simulaciones, conformando un espectro de dispersión estadística con una media del daño acumulado en cada año:

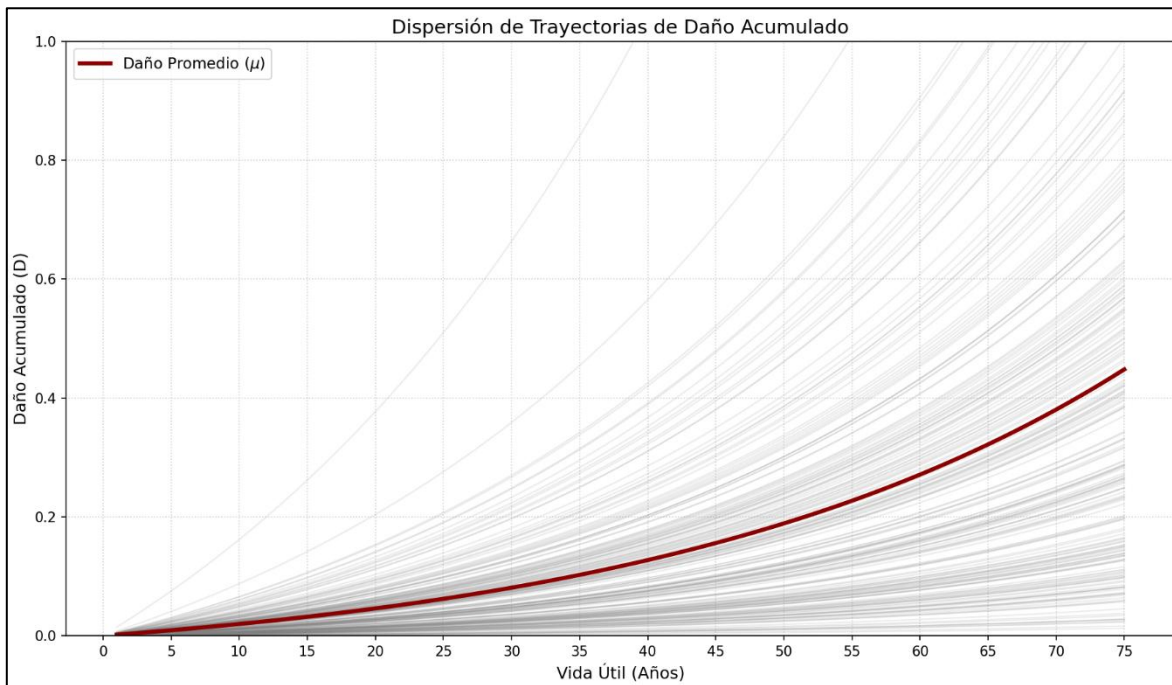


Figura 48. Gráfica de dispersión de trayectorias de Daño Acumulado.

Como se observa en la gráfica anterior, el daño acumulado presenta un incremento progresivo a lo largo del tiempo, evidenciando la naturaleza acumulativa del daño por fatiga, además, la curva ascendente también obedece a la contribución de la tasa de crecimiento anual del tránsito vehicular del 2.90%.

Si bien en algunos escenarios simulados se alcanzan valores de daño superiores al límite permisible, la media del daño acumulado se mantiene por debajo de la unidad. Esto indica que en la mayoría de las simulaciones no se alcanza el límite de falla por fatiga, por lo que estos resultados reflejan que la estructura conserva un nivel de seguridad adecuado en el tiempo de estudio. Esta evolución de daño también puede analizarse por medio de la distribución de los valores de daño acumulado. Para esto, se construyeron histogramas para diferentes años de referencia, permitiendo visualizar la dispersión y concentración de los resultados. En las siguientes figuras se presentan los histogramas correspondientes a los años 1, 25, 50 y 75, los cuales permiten evaluar la progresión del daño acumulado:

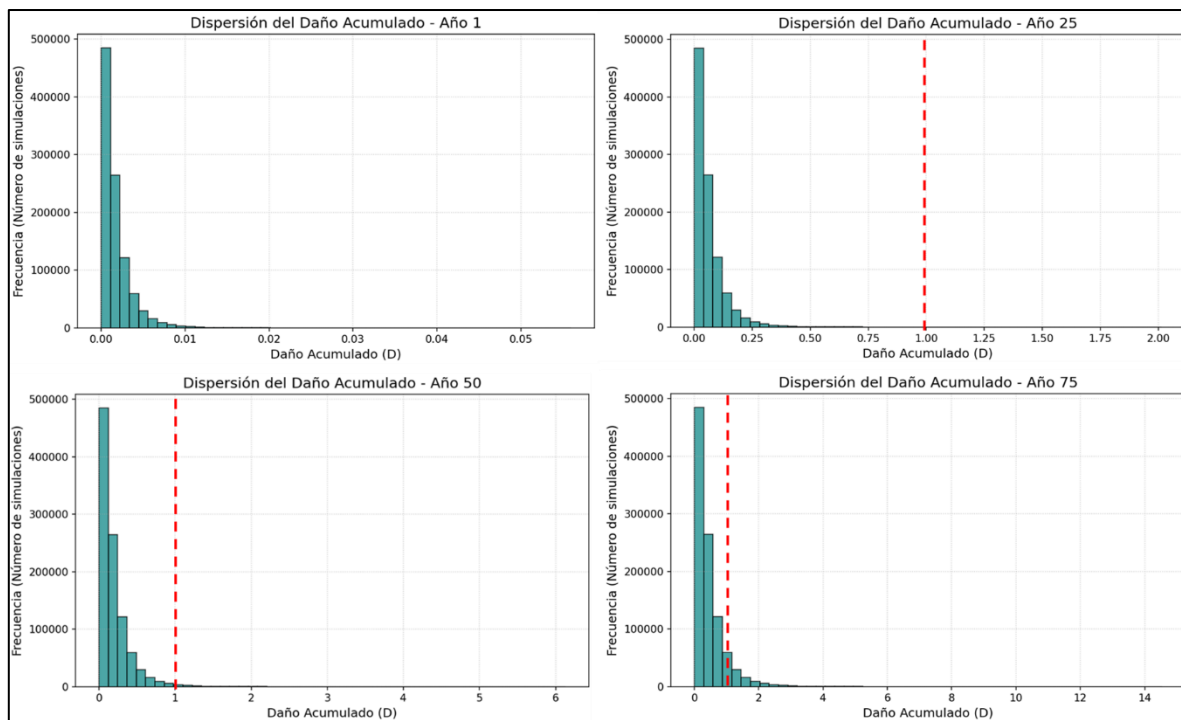


Figura 49. Dispersión del Daño Acumulado en los años 1, 25, 50 y 75.

Como se observa, durante el periodo entre el primer año y el año 25, el daño acumulado no super el estado límite en ninguna de las iteraciones. Posteriormente, en el año 50 se registra una frecuencia de escenarios que rebasan el límite permisible. Por último, al alcanzar el año 75, la incidencia de valores críticos se acentúa debido al efecto compuesto con el crecimiento vehicular. No obstante, pese a que existen escenarios críticos con daño superior al límite, la distribución muestral se sigue presentando en un rango de daño seguro. Esta proporción entre los escenarios que exceden la capacidad y el total de las iteraciones es el fundamento probabilista que se refleja directamente en la curva de Probabilidad de Falla.

6.4. EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL.

En cada incremento del daño en el tiempo, la Probabilidad de Falla P_F , se cuantificó como la relación directa entre el número de simulaciones que superaron el límite permitido y el tamaño total de la muestra evaluada. El valor recomendado de Probabilidad de Falla en aplicaciones que recomienda la AASHTO es de $P_F = 10^{-3}$.

Tal como se visualiza en la [Figura 45](#), al graficar la evolución de la P_F a lo largo de su vida útil proyectada se corrobora el comportamiento observado en los histogramas de dispersión. Durante los primeros años de servicio del puente, la Probabilidad de Falla se mantiene en niveles de seguridad altos al tener que $P_F < 10^{-3}$. Es a partir del año 36 en donde la curva representa que $P_F > 10^{-3}$, indicando que las variaciones en el modelo analítico bajo condiciones desfavorables comienzan a reducir la resistencia a fatiga del miembro estructural. Posteriormente, en el año 75, que es el último proyectado, se alcanza una Probabilidad de Falla máxima de $P_F = 9.82^{-2}$.

Esta probabilidad fue transformada al espacio normal estandarizado para obtener el Índice de Confiabilidad β , mismo que se grafica en función del tiempo de vida proyectado:

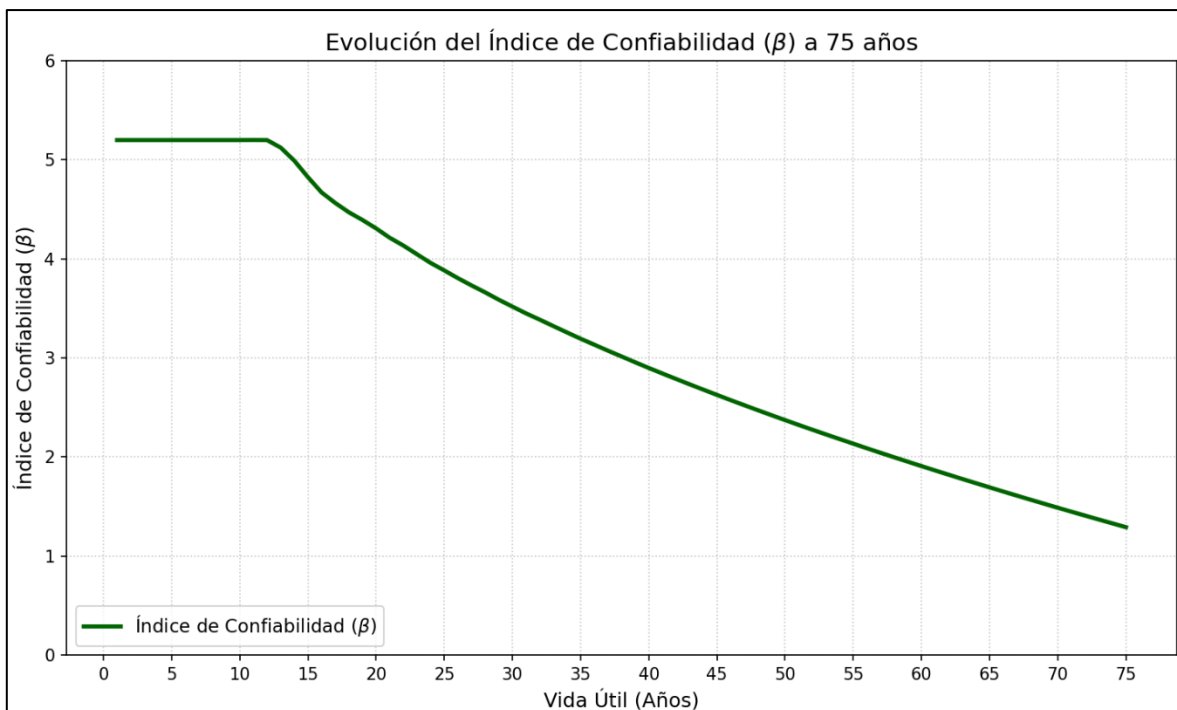


Figura 50. Gráfica de evolución del Índice de Confiabilidad.

Como se observa en la figura anterior, dada la relación inversa entre las dos métricas (P_F y β), la evolución de β presenta una tendencia descendente a lo largo del periodo de análisis. El valor inicial alcanza un índice de confiabilidad $\beta = 5.20$, el cual corresponde a probabilidades de falla del orden de 10^{-7} , de acuerdo con los niveles de seguridad recomendados por la AASHTO. Posteriormente, los valores de β disminuyen conforme se acumula el daño a lo largo de la vida útil proyectada hasta el año 75, en donde el modelo arroja un Índice de Confiabilidad de $\beta = 1.29$.

Al comparar estos resultados con los criterios de aceptación establecidos por la AASHTO para el estado límite de fatiga, se identifica que a partir del año 36 el índice de confiabilidad desciende por debajo del valor objetivo. Este punto representa un umbral crítico en dónde la probabilidad de falla alcanza niveles que justifican la implementación de medidas de evaluación estructural del elemento. En consecuencia, se recomienda que a partir de este año se realice una primera inspección de la sección analizada con el fin de detectar la posible iniciación de grietas por fatiga.

6.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARAMÉTRICA.

El modelo estocástico desarrollado en los apartados anteriores se fundamenta en variables aleatorias y deterministas calibradas para representar las condiciones operativas más probables a los que se somete la sección estudiada. No obstante, la evaluación de la confiabilidad a largo plazo posee un grado de incertidumbre, dado principalmente por las consideraciones socioeconómicas que alteran el volumen de tránsito y por las limitaciones de los modelos de daño acumulado.

Con el propósito de evaluar la robustez de los resultados obtenidos y cuantificar el impacto individual de los parámetros de entrada sobre el Índice de Confiabilidad y la Probabilidad de Falla, se ejecutó un análisis de sensibilidad paramétrica. Este procedimiento consistió en aislar y modificar variables críticas del modelo, manteniendo el resto de los parámetros constantes. Para esta comparación, se definieron los siguientes escenarios de variación que representan las mayores fuentes de incertidumbre en el ciclo de vida del puente:

- **Escenario A: Cambio en la estadística del TDPA.** Se varía el volumen inicial de vehículos pesados. Simula un cambio drástico en la clasificación logística y capacidad de la vía.
- **Escenario B: Tasa de Crecimiento Vehicular nula.** Se quita la tasa de crecimiento (0% anual). Cuantifica la sobreestimación de la seguridad al asumir un flujo de tránsito constante a 75 años.
- **Escenario C: Reducción de la incertidumbre en la Regla de Miner.** Se modifica el coeficiente de variación (CoV) del índice de daño. Evalúa el impacto de disminuir las incertidumbres en el modelo de acumulación de daño.
- **Escenario D: Omisión del factor de reducción por espesor.** Se omite del efecto de la corrección por espesor (t/t_{ref}). Muestra cómo afecta este incremento de los esfuerzos en el cálculo de número de ciclos a la falla.
- **Escenario E: Factor de concentración de esfuerzos nulo.** Se reduce en factor de penalización por concentración de esfuerzos. Considera una sección sin imperfecciones y una carga sin incertidumbre.
- **Escenario F: Cambio a curva lineal de la AASHTO.** Se sustituye el modelo DNVGL por la curva lineal S-N. Contrasta la probabilidad de falla frente a los estándares de diseño de la AASHTO.

En la siguiente tabla se muestra el resumen de las variables que se modifican en cada escenario y a que categoría de revisión corresponde:

Tabla 13. Tabla de resumen de variaciones para el Análisis de Sensibilidad.

Categoría de Análisis	Escenario	Variable Modificada
Curva de Referencia	Modelo Base	N/A.
1. Variación en la Demanda.	A	TDPA.
	B	Tasa de Crecimiento.
2. Variación en el Modelo.	C	Regla de Miner y material FCM, K1 y K2.
3. Variación en los Esfuerzos.	D	Relación (t/t_{ref}).
	E	Acumulación de esfuerzos X_s .
4. Comparación Normativa.	F	Constantes m y K.

Dado que la Probabilidad de Falla P_F y el Índice de Confiabilidad β son métricas estadísticamente dependientes, los resultados del análisis de sensibilidad se presentan exclusivamente en términos de la evolución de la Probabilidad de Falla.

1. Variación en la Demanda.

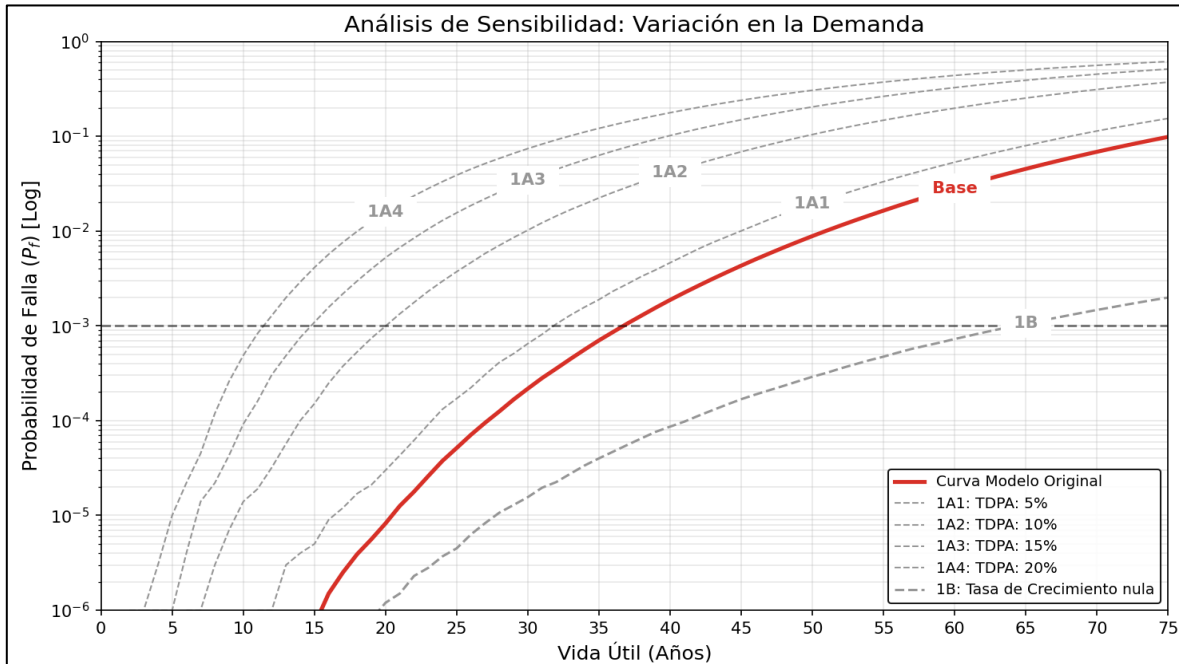


Figura 51. Comparación de Probabilidad de Falla por variación en la demanda.

La curva base del modelo original contempla una probabilidad de ocurrencia del 3.70% para vehículos pesados T3S2R4, sin embargo, si cuestionamos que pasaría si este porcentaje incrementa dadas las demandas económicas de la zona, por lo tanto, en la gráfica anterior se muestran cuatro valores diferentes de porcentajes (5%, 10%, 15% y 20%), estos hacen referencia a dicha cuestión. De la que podemos mencionar que el modelo es altamente sensible a esta variable ya que desde un valor del 5% la curva alcanza un valor de $P_F = 10^{-3}$ en el año 32, aproximadamente. De esta forma se concluye que para los porcentajes posteriores la sección ya presentaría niveles de seguridad bajos, por lo que esta proyección de uso es un dato importante que verificar en la etapa de diseño.

Por otro lado, en la curva llamada “1B”, se muestra cómo se comporta el modelo sin un incremento acumulativo de vehículos año con año, es decir, que la tasa de crecimiento sea igual a cero. Se puede observar que la curva tiene un comportamiento adecuado al alcanzar un valor de $P_F = 10^{-3}$ hasta el año 65.

2. Variación en el Modelo.

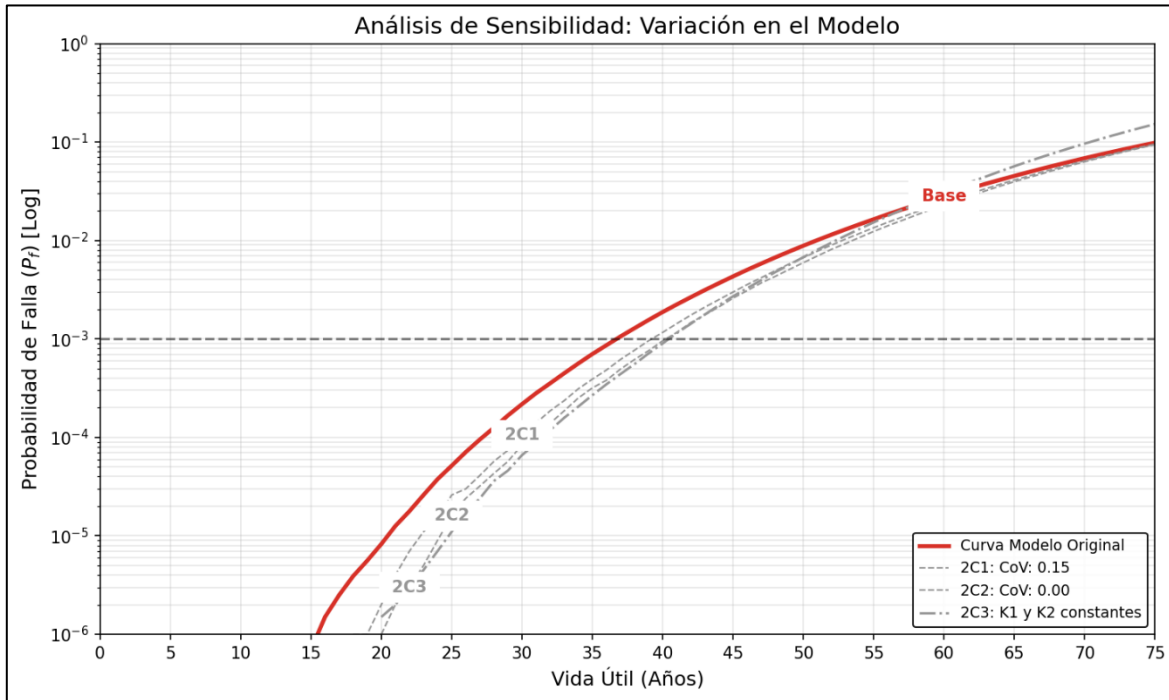


Figura 52. Comparación de Probabilidad de Falla por variación en el Modelo.

Al reducir el Coeficiente de Variación (CoV) en el modelo de daño de Palmgren-Miner, se observa un ligero incremento en los niveles de confiabilidad del sistema. Esto confirma que una parte de la probabilidad de falla calculada en el modelo base proviene de la incertidumbre matemática que describe el fenómeno. Sin embargo, la sensibilidad del puente ante este parámetro resulta mínimo en el contexto global. En términos cuantitativos, asumir un modelo de daño determinista apenas extiende la vida útil proyectada en aproximadamente 4 años, extendiendo el límite recomendando ($P_F = 10^{-3}$) hasta el año 40. Por lo tanto, se concluye que la variabilidad inherente al modelo de acumulación de daño no representa un factor gobernante en la evaluación de la seguridad estructural.

Asimismo, se observa que al proponer los valores de K1 y K2 constantes, el modelo se vuelve más conservador, esto se acepta al considerar que bajo un análisis determinista, estos valores tienden a estar del lado de la seguridad sin la varianza.

3. Variación en los Esfuerzos.

Al momento de variar la amplificación de los esfuerzos dada por el factor de reducción por espesor se visualiza que la curva de P_F no tiene una influencia importante para aumentar la resistencia de la sección, por lo que la aplicación de este factor no se considera un método conservador, sino un fenómeno real dado por posibles deficiencias en espesores de placa mayores.

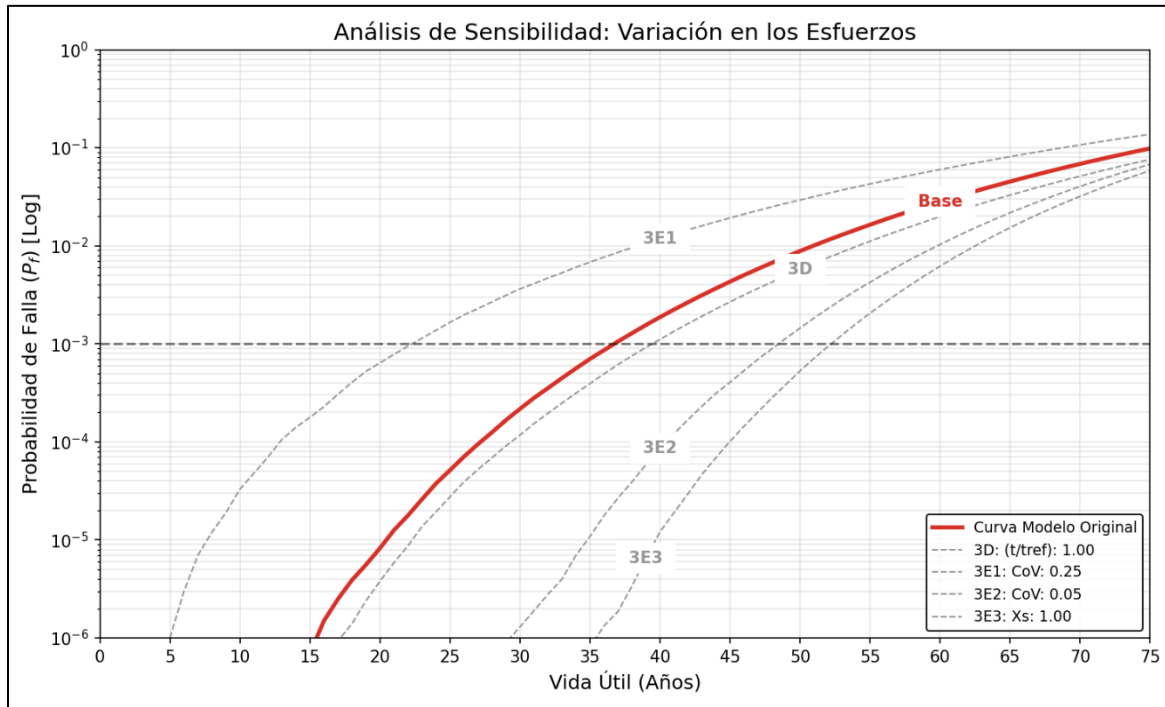


Figura 53. Comparación de Probabilidad de Falla por variación en los Esfuerzos.

Por otro lado, para el caso de la variación del factor de esfuerzos X_s se tienen tres curvas de comparación. La curva del modelo original incluye un Coeficiente de Variación $CoV = 0.15$, si este coeficiente se distribuye a 0.25 se nota que la Probabilidad de Falla aumenta en aproximadamente 14 años cuando ($P_F = 10^{-3}$). En caso contrario, con un valor $CoV = 0.05$ la curva disminuye y da un resultado más conservador. Esto mismo pasa si se ignora por completo el X_s y a lo largo de las millones de iteraciones se iguala a la unidad.

De esta manera, se demuestra la necesidad de aplicar estas penalizaciones que indican los códigos y normativas. Además, es necesario respetar los valores que la literatura recomienda para cada categoría constructiva, ya que se observa que si el CoV aumenta o disminuye en 0.10 unidades, la diferencia entre curvas de falla es importante.

4. Comparación Normativa.

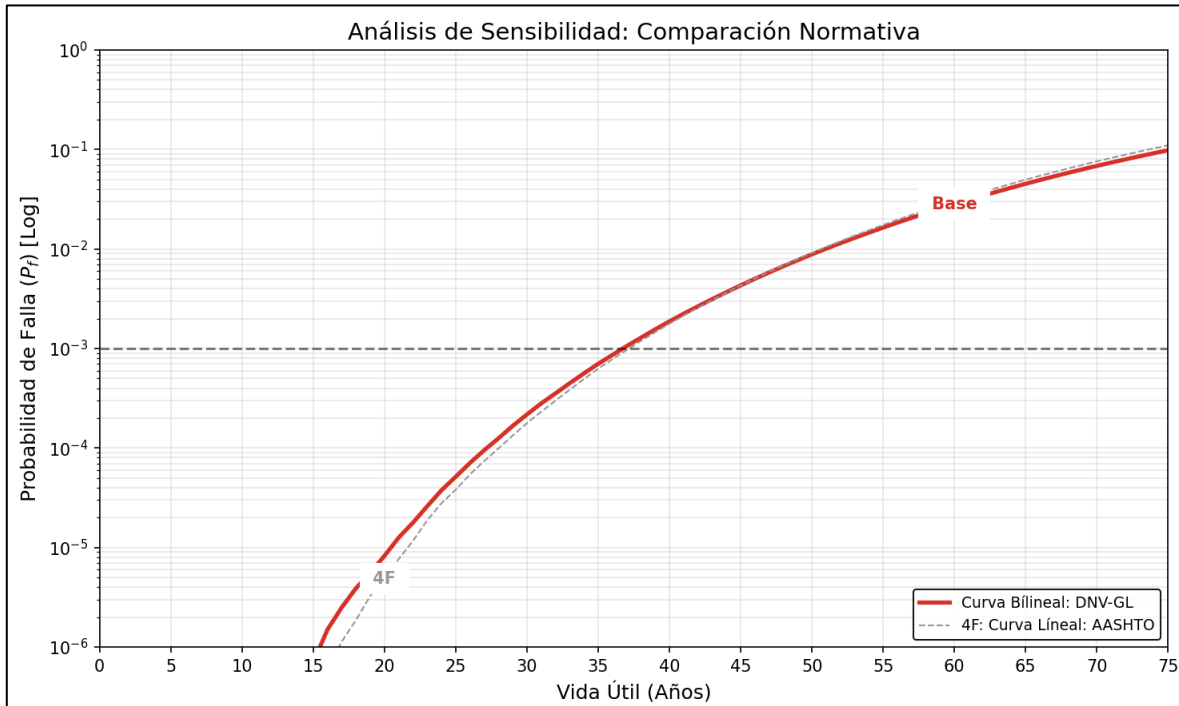


Figura 54. Comparación de Probabilidad de Falla Normativa.

Por último, la implementación de la curva lineal de una sola pendiente no representó una variación importante en comparación con el modelo bilineal del DNV-GL. Esto se debe a que los esfuerzos altos que exceden el LFT arrojan los mismos ciclos a la falla en ambas normativas. Y, aunque exista una mayor densidad de esfuerzos menores, los ciclos alcanzados con una pendiente $m=3$ no representan un incremento importante. Al momento de visualizar los daños base del primer año generados por ambas modelos se tiene que:

- Daño Acumulado 1 (DNV-GL): 0.010303.
- Daño Acumulado 2 (DNV-GL): 0.001932.
- Daño Acumulado 1 (AASHTO): 0.010303.
- Daño Acumulado 2 (AASHTO): 0.003445

De esta forma, se observa una diferencia de 0.0015, este valor se considera mínimo en comparación, lo que indica que la equivalencia entre ambos modelos de curva S-N es aceptable para las revisiones, siempre y cuando se utilice la categoría correspondiente.

Con el propósito de comprender la estructura interna de la incertidumbre del modelo, se desarrolló un análisis de sensibilidad paramétrica jerarquizado con los datos arrojados en cada análisis individual.

Se evaluó el impacto de las principales fuentes de incertidumbre utilizando como métrica de control el tiempo, en años, necesario para que la estructura alcance una probabilidad de falla recomendada de $P_F = 10^{-3}$

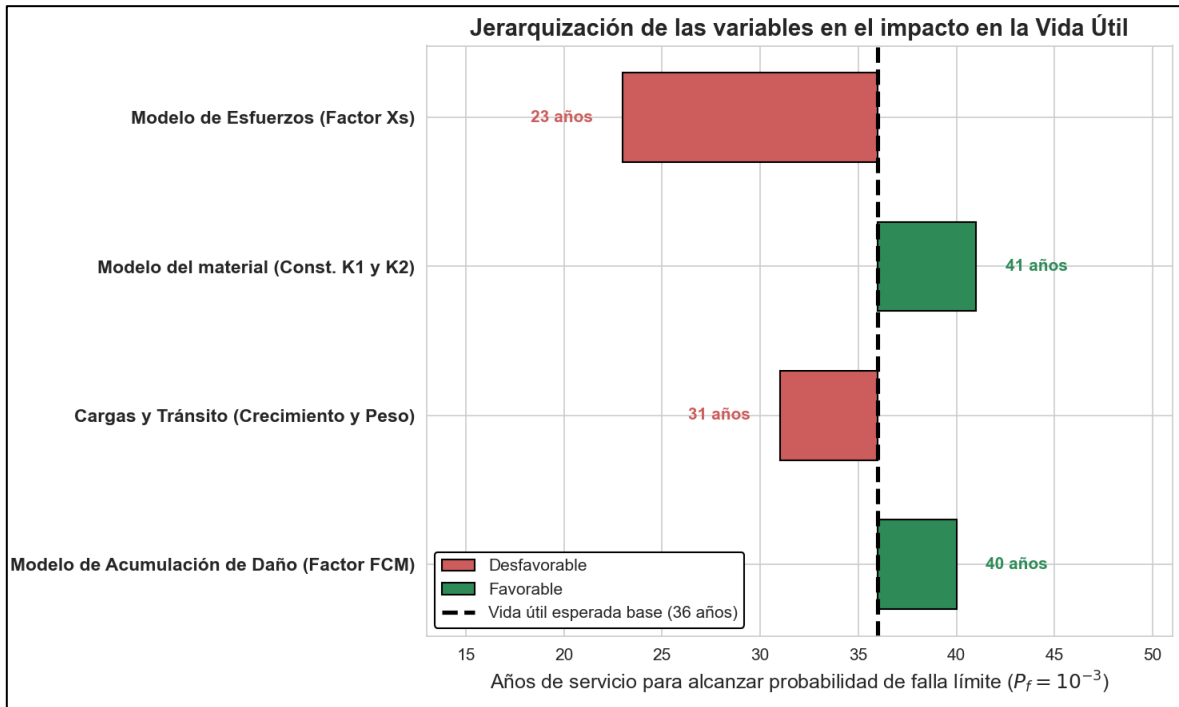


Figura 55. Gráfica comparativa sobre la jerarquización de las variables.

Los resultados, evidencian que el parámetro que ejerce mayor control sobre la probabilidad de falla de la vida útil de la estructura de estudio es el Modelo de Esfuerzos X_s . Este hallazgo resulta fundamental para la toma de decisiones en la gestión de infraestructura, ya que demuestra que variaciones en este parámetro pueden reducir o extender la vida útil del puente en más de 10 años respecto al escenario base. En consecuencia, las futuras estrategias de mantenimiento e inspección deben priorizar la caracterización precisa de esta variable para optimizar los recursos y garantizar la seguridad estructural.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A partir de los resultados obtenidos en la evaluación de daño por fatiga de la sección de acero estudiada, se derivan las siguientes conclusiones:

1. Se logró definir y calibrar un sistema estructural estáticamente determinado representativo de un tramo de un puente vehicular. Mediante el desarrollo de una herramienta computacional se implementó el principio de superposición junto con líneas de influencia para resolver de manera eficiente el equilibrio interno de la estructura.
2. A través de códigos y normativas se identificaron y modelaron las principales variables deterministas y aleatorias que influyen en la acumulación de daño por fatiga, incluyendo cargas vehiculares, propiedades del material y los parámetros del modelo analítico. Esto permitió incorporar explícitamente la variabilidad inherente del problema. Concluyendo que el SCF tiene una mayor influencia en el comportamiento del modelo analítico.
3. El análisis estadístico de datos reales y la caracterización del tránsito demostraron que la demanda vehicular es el factor gobernante en la resistencia por fatiga de la estructura. Se identificó que asumir condiciones de crecimiento nulo a lo largo de la vida útil proyectada sobreestima la capacidad del puente. De esta forma, la variabilidad del TDPA y la tasa de crecimiento anual dictan directamente el tiempo en el que la Probabilidad de Falla P_F alcanza los límites recomendados.
4. Por medio del algoritmo desarrollado, se permitió obtener los diagramas de elementos mecánicos y los esfuerzos actuantes en un punto crítico, esto con la finalidad de generar una historia de esfuerzos medidos en la posición de estudio.
5. La implementación del algoritmo de *Rainflow Counting* fue fundamental para contabilizar los ciclos de esfuerzo. Al aplicar la regla de daño de Palmgren-Miner, se logró cuantificar el daño acumulado del primer año. Asimismo, se concluye que las curvas S-N bilineales que indica el DNV-GL y el sistema lineal de la AASHTO modelan de forma equivalente la tolerancia del material ante un conjunto de rangos de esfuerzo,
6. La estimación de la confiabilidad por fatiga mediante la simulación de Monte Carlo proyectó la Probabilidad de Falla de la estructura a 75 años considerando la incertidumbre del problema. De esta forma se identificó que a partir del año 36 es recomendable realizar un programa de inspección para la detección de posibles grietas.

A partir de los hallazgos y limitaciones identificadas durante el desarrollo de la investigación, se formulan las siguientes recomendaciones orientadas tanto a la práctica profesional, como a futuras líneas de investigación:

1. Implementar procedimientos estocásticos en los reglamentos de instituciones normativas para proporcionar un panorama más realista sobre la degradación del nivel de seguridad a lo largo del tiempo, permitiendo programar mantenimientos preventivos basados en riesgo.
2. Aplicar correctamente los factores locales del modelo analítico, dictados por normativas especializadas, para cada categoría o detalle estructural, con el fin de evitar la sobreestimación de la vida útil de la estructura.
3. Proyectar la demanda vehicular considerando una tasa de crecimiento y posibles cambios en la clasificación logística de las vías carreteras. Además, es recomendable verificar estos datos con las estadísticas poblacionales para estimar en que año la tasa de crecimiento tenderá a estabilizarse, reduciendo la amplificación constante a lo largo de los 75 años de uso.
4. Evaluar los efectos combinados del daño por fatiga y la exposición ambiental. Una línea de investigación consistiría en acoplar modelos probabilísticos de la pérdida de rigidez de la sección a la metodología de daño acumulado expuesta.
5. Expandir la metodología probabilística a otros sistemas estructurales y someter los resultados a un análisis comparativo frente a enfoque deterministas y estocásticos de normativas internacionales especializadas. Esto con la finalidad de calibrar el modelo analítico integrando nuevas variables y consideraciones adicionales.
6. Calibrar probabilísticamente el factor de incertidumbre del modelo de esfuerzos X_s a partir de literatura especializada, con el fin de cuantificar la variabilidad asociada a la idealización de las cargas y a los efectos de concentración de esfuerzos locales.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Alain Nussbaumer, L. B. (2011). *Fatigue Design of Steel and Composite Structures*. ECCS.
- ASTM. (s.f.). *¿Qué es la confiabilidad?* Obtenido de <https://www.astm.org/es/what-is-reliability.html>
- ASTM, I. (2005). *Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*.
- Chung, H.-Y. (2004). *Fatigue Reliability and Optimal Inspection Strategies for Steel Bridges*. The University of Texas.
- DNV-GL. (2015). *Probabilistic methods for planning of inspection for fatigue cracks in offshore structures*. DNV-GL.
- DNV-GL. (2016). *Fatigue design of offshore steel structures*. DNV-GL.
- Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mecánica de Materiales*. México: PEARSON EDUCATION.
- Kassimali, A. (2015). *Análisis Estructural*. CENGAGE Learning.
- Mexicana, N. O. (2017). Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. *NOM-012-SCT-2-2017*.
- P. Bertsekas, D., & N. Tsitsiklis, J. (2002). *Introduction to Probability*. Athena Scientific.
- P. Robert, C., & Casella, G. (2004). *Monte Carlo Statistical Methods*. Springer Science.
- RAE. (s.f.). *Confiabilidad*. Obtenido de Diccionario de la lengua española: <https://dle.rae.es/confiabilidad>
- Schijve, J. (2009). *Fatigue of Structures and Materials*. Springer.

APÉNDICES.

A. DISTRIBUCIÓN PROBABILISTA DEL NÚMERO DE OCUPANTES.

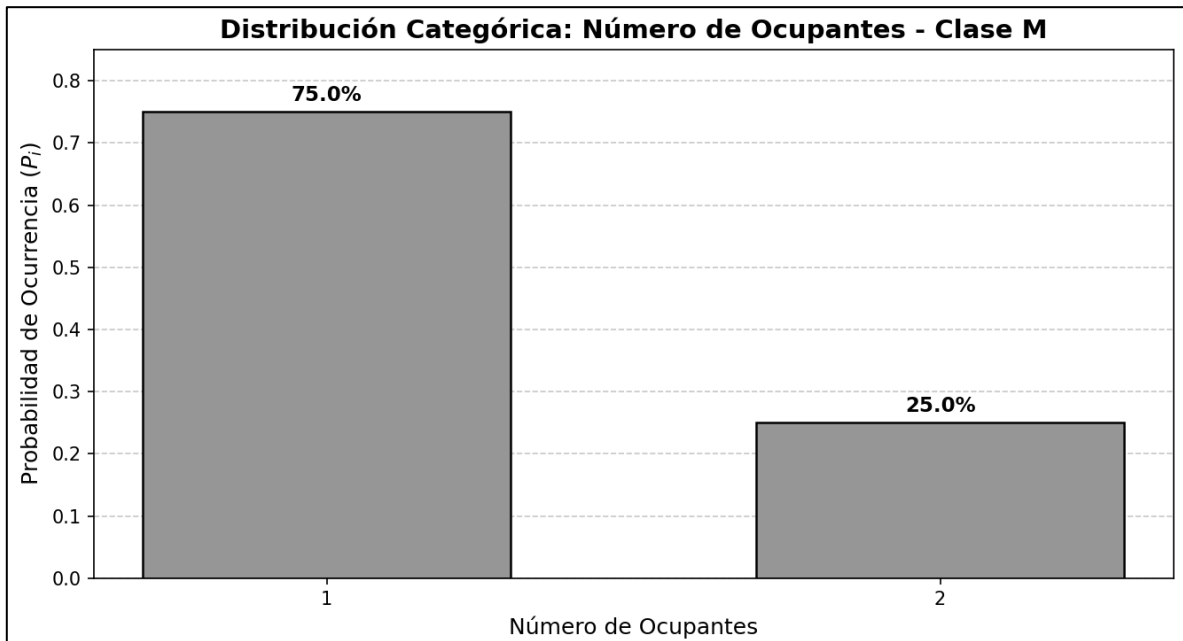


Figura 56. Distribución probabilista del número de ocupantes - Clase M.

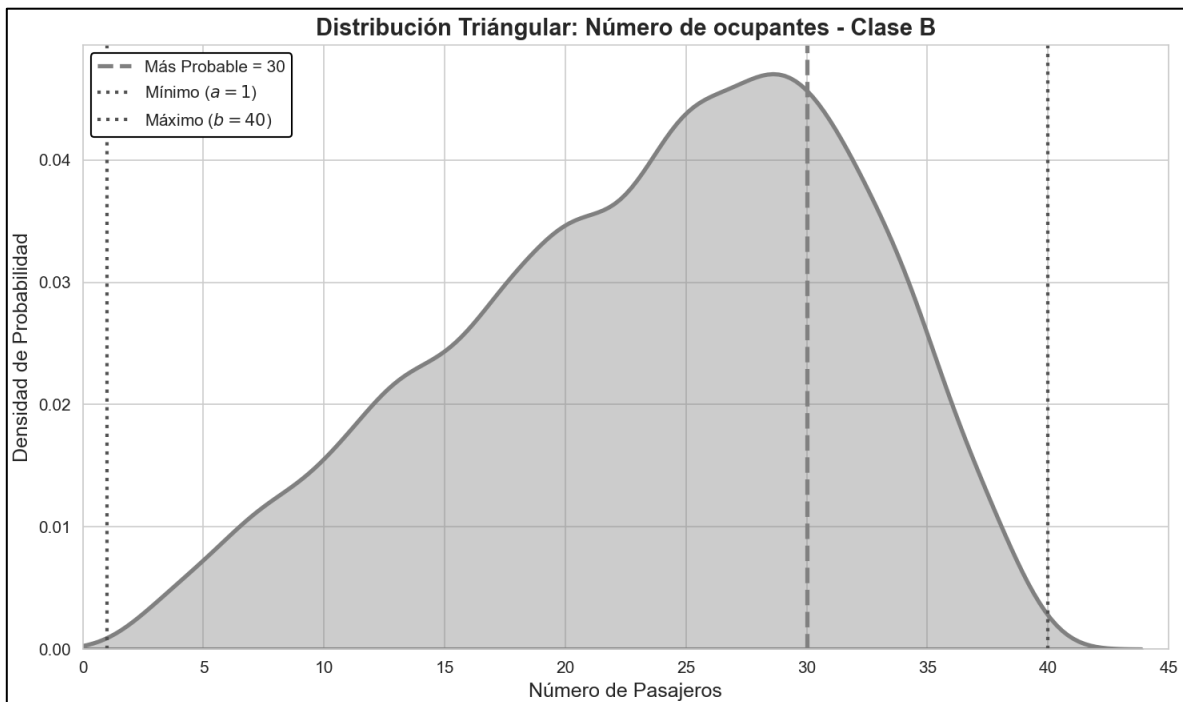


Figura 57. Distribución probabilista del número de ocupantes - Clase B.

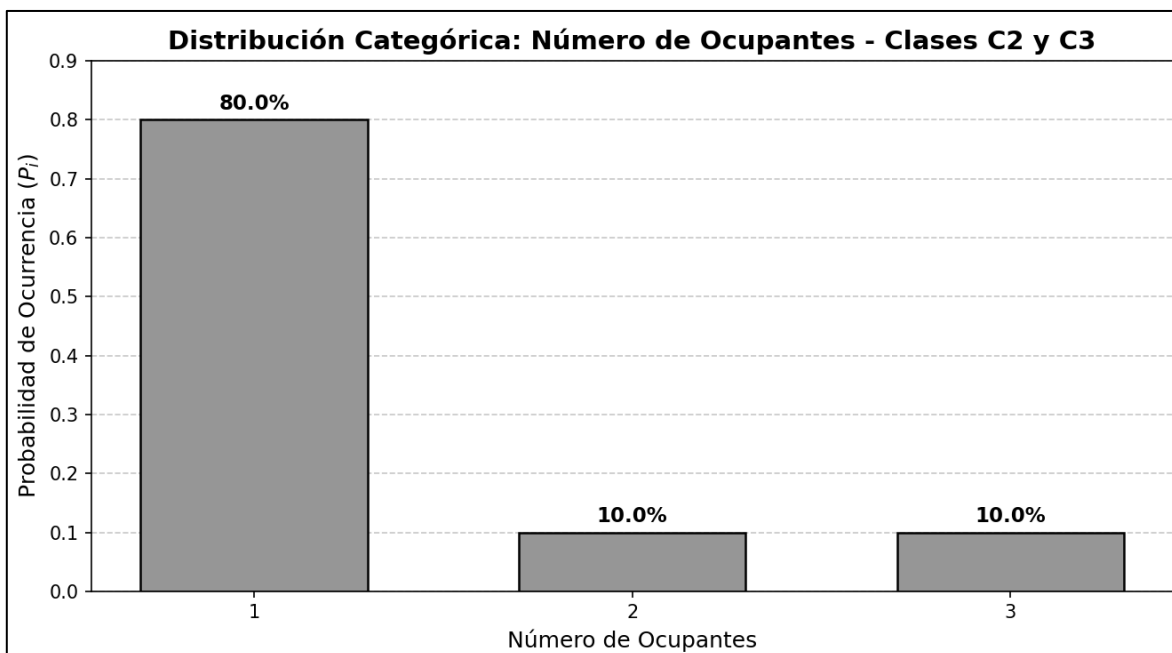


Figura 58. Distribución probabilista del número de ocupantes - Clases C2 y C3.

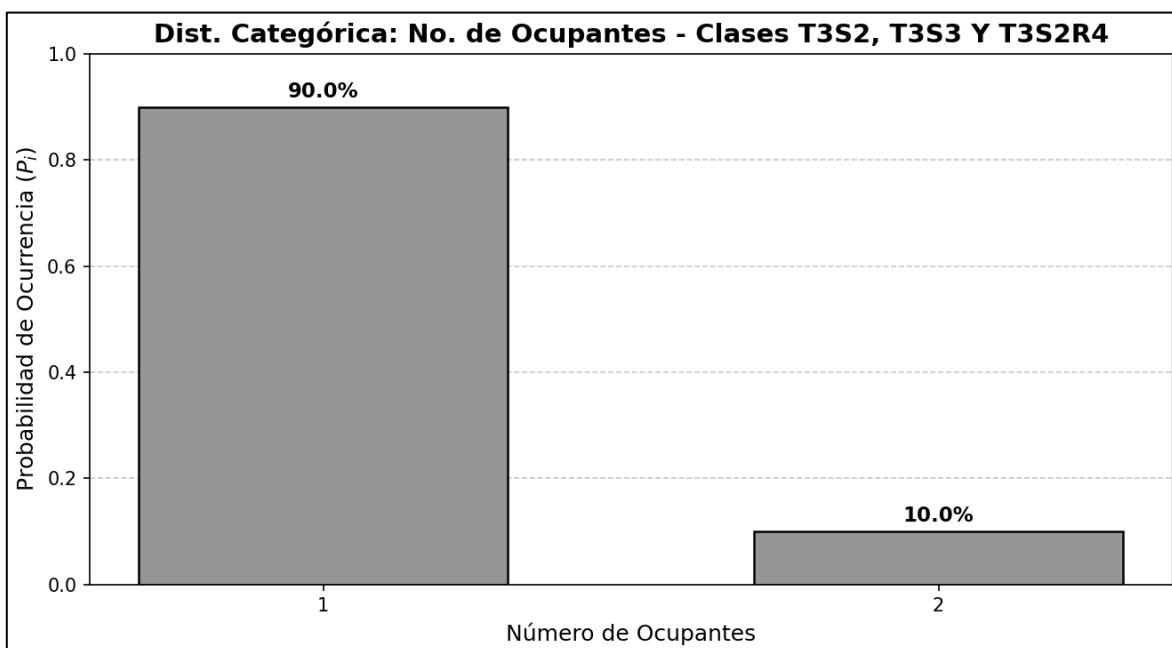


Figura 59. Distribución probabilista del número de ocupantes - Clases T3S2, T3S3 y T3S2R4.

Para estimar el número de ocupantes en cada iteración se utiliza una distribución categórica para casi todas las clases. Únicamente en la Clase B, de autobuses, se optó por utilizar una distribución triangular con una moda al 75% de la capacidad máxima del vehículo, esto con la finalidad de representar el comportamiento real de esta variable.

B. DISTRIBUCIÓN PROBABILISTA DE CARGAS ADICIONALES.

Por medio de una distribución triangular se estiman las cargas adicionales. Para el caso de los vehículos Clase B, se estima que cada ocupante puede llevar hasta dos maletas de 20 kg y el peso jamás será negativo. Por lo tanto, el valor más probable se centra en un peso de 20 kg y la distribución triangular puede ir en un intervalo de 0 a 40 kg.

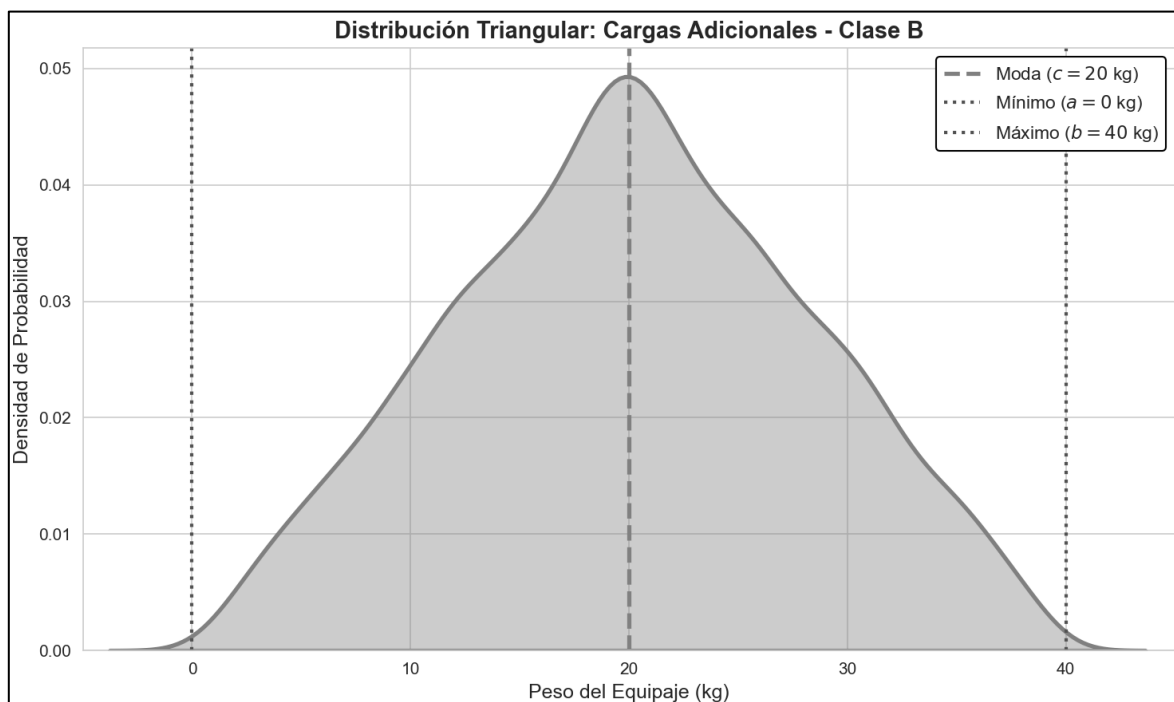


Figura 60. Distribución probabilista de Carga adicional - Clase B.

De acuerdo con la clase que se revise los parámetros del modelo cambian, para los vehículos Clase C2 y C3 se dice que la moda es igual al 65% de la capacidad máxima. Mientras que para los vehículos pesados T3S2, T3S3 y T3S2R4, la moda se estimó al 80% de la capacidad máxima; esta condición asume que predominan los viajes con el vehículo a una capacidad alta, ya que este comportamiento obedece a la logística de transporte y la eficiencia económica.

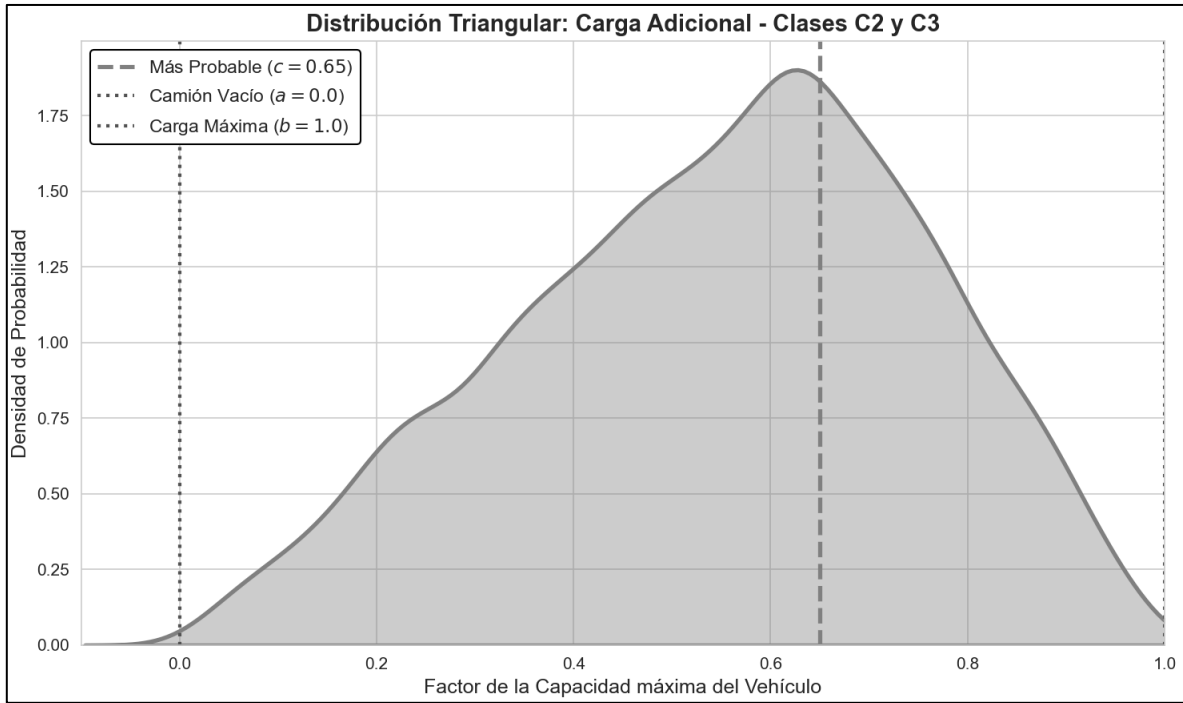


Figura 61. Distribución probabilista de Carga adicional - Clases C2 y C3.

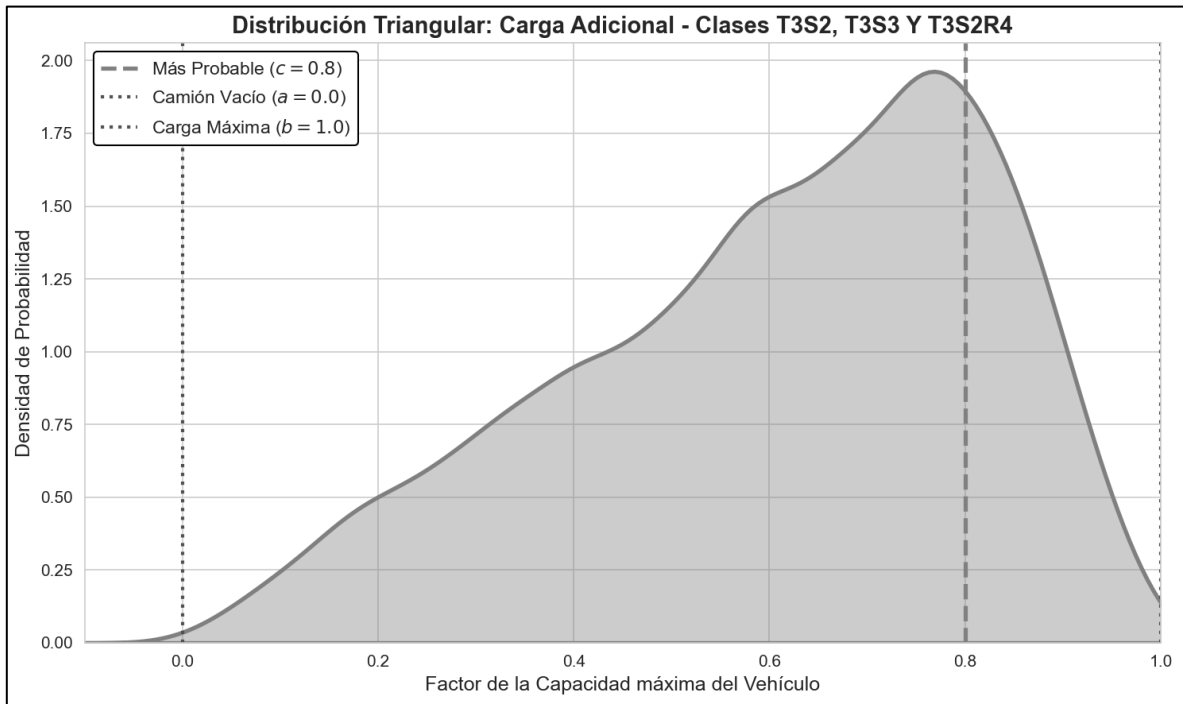


Figura 62. Distribución probabilista de Carga adicional - Clases T3S2, T3S3 y T3S2R4.

C. TABLAS DE CARACTERÍSTICAS DE VEHÍCULOS LIGEROS.

SUBCOMPACTOS – A2						
Marca	Modelo	Porcentaje	Largo	Longitud entre ejes	Peso Bruto Vehicular	Peso en Vacío
		(%)	(mm)	(mm)	(kg)	(kg)
Nissan	March	43.10%	3827	2450	1384	993
Kia	Río Sedan	31.20%	4385	2580	1612	1135
Kia	Río Hatchbak	12.20%	4065	2580	1600	1131
Hyundai	Accent Sedan	5.00%	4385	2580	1620	1141
Mazda	Mazda 2 Sedan	4.40%	4340	2540	1550	1116
Hyundai	Accent Hatchbak	1.50%	4185	2580	1630	1148
Otros		2.60%	4198	2552	1566	1111

SUV'S – A3						
Marca	Modelo	Porcentaje	Largo	Longitud entre ejes	Peso Bruto Vehicular	Peso en Vacío
		(%)	(mm)	(mm)	(kg)	(kg)
Nissan	Kicks	22.40%	4365	2655	1779	1379
Volkswagen	Tiguan	15.40%	4670	2791	2110	1545
Honda	HR-V	14.90%	4568	2655	1999	1464
Volkswagen	Taos	12.60%	4467	2689	1490	1412
Mazda	CX-30	9.60%	4395	2795	1939	1463
Ford	Bronco Sport	5.50%	4477	2667	2100	1568
Jeep	Compass	3.00%	4404	2636	2177	1711
Audi	Q5	2.80%	4682	2826	2245	1825
Otros		13.80%	4504	2714	1980	1546

DEPORTIVOS – A4						
Marca	Modelo	Porcentaje	Largo	Longitud entre ejes	Peso Bruto Vehicular	Peso en Vacío
		(%)	(mm)	(mm)	(kg)	(kg)
BMW	BMW	100.00%	4783	2856	2605	2125

PICKUPS – A5						
Marca	Modelo	Porcentaje	Largo	Longitud entre ejes	Peso Bruto Vehicular	Peso en Vacío
		(%)	(mm)	(mm)	(kg)	(kg)
Nissan	NP 300	55.80%	5066	3150	2880	1653
Chrysler	RAM 2500	12.30%	6066	3785	4536	3360
Toyota	Tacoma	5.80%	5411	3350	2619	1940
Jac	Frison	5.50%	5325	3090	2870	1970
Chevrolet	Silverado	4.20%	5358	3213	3084	2182
Chevrolet	Cheyenne	3.60%	5890	3745	2835	2100
Otros		12.80%	5519	3389	3137	2201

MINIVAN – A6						
Marca	Modelo	Porcentaje	Largo (m)	Longitud entre ejes	Peso Bruto Vehicular	Peso en Vacío
		(%)	(mm)	(mm)	(kg)	(kg)
JAC	Sunray	92.20%	5990	3570	4000	2825
Chevrolet	Tornado	4.70%	4425	2850	4050	2850
JAC	E Sunray	3.10%	5990	3570	4100	2800

D. TABLAS DE CARACTERÍSTICAS DE VEHÍCULOS PESADOS.

VEHÍCULOS TIPO "B" - AUTOBUSES									
ID	Ejes	Marca	Modelo	Probabilidad	Largo	Longitud entre ejes 1	Long. Ejes traseros	Peso Bruto Vehicular	Peso en Vacío
				(%)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	(kg)
B1	2	HINO	BF 918K	25.00%	9310	4650	N/A	9000	2435
B2	2	International	SC	25.00%	8600	6340	N/A	14968	4050
B3	2	International	FE	25.00%	10660	5320	N/A	14968	4050
B4	3	Mercedez Benz	Tourismo L	25.00%	13935	8260	1225	24750	6696

VEHÍCULOS TIPO "C2" - CAMIONES UTILITARIOS DE DOS EJES									
ID	Ejes	Marca	Modelo	Probabilidad	Largo	Longitud entre ejes	Long. Ejes traseros	Peso Bruto Vehicular	Peso en Vacío
				(%)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	(kg)
C21	2	Freightliner	Euro VI	11.11%	5900	4300	N/A	6160	2435
C22	2	Kenworth	KW55	11.11%	5500	3900	N/A	26450	12000
C23	2	International	CT4	11.11%	5985	3365	N/A	7200	2820
C24	2	International	CT6	11.11%	8855	5300	N/A	12080	4180
C25	2	International	MV 6X4	11.11%	9649	5994	N/A	23586	6216
C26	2	International	MV 4X2	11.11%	9497	5994	N/A	15876	4922
C27	2	HINO	1626	11.11%	7785	4330	N/A	16000	5640
C28	2	HINO	1024	11.11%	6795	3850	N/A	10400	3630
C29	2	Volvo	FH 4x2T	11.11%	5690	3500	N/A	20100	7402

VEHÍCULOS TIPO "C3" - CAMIONES UTILITARIOS DE TRES EJES									
ID	Ejes	Marca	Modelo	Probabilidad	Largo	Longitud entre ejes	Long. Ejes traseros	Peso Bruto Vehicular	Peso en Vacío
				(%)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	(kg)
C31	3	International	MV 6X2	50.00%	9650	5994	1225	23586	6216
C32	3	Volvo	VM 6x2R	50.00%	10270	5763	1225	24700	6510

E. DISTRIBUCIÓN DE PESOS: CLASES C2, C3, T3S2, T3S3 Y T2S3R4.

Vehículos tipo Camión Utilitario de dos ejes (Clase C2):

La complejidad de este tipo de vehículos es estimar la sobrecarga que pueden soportar, por lo que el peso del vehículo y de los ocupantes es similar a los casos anteriores.

I. Peso en vacío del vehículo.

La manera en que se distribuye las cargas en cada eje se obtendrá contemplando lo indicado por sus respectivas fichas técnicas.

Tabla 14. Distribución de pesos en cada eje de acuerdo con las fichas técnicas de cada modelo – Vehículo Clase C2.

DISTRIBUCIÓN DE PESOS MÁXIMOS POR EJE EN VEHÍCULOS TIPO "C2"							
ID	Ejes	Marca	Peso Bruto Vehicular	Peso máximo eje delantero	Peso máximo eje trasero	Porcentaje delantero respecto a W	Porcentaje trasero respecto a W
			(kg)	(kg)	(kg)	(%)	(%)
C21	2	Freightliner	8550	2992	5558	0.35	0.65
C22	2	Kenworth	15000	5000	10000	0.33	0.67
C23	2	International	7200	2500	4700	0.35	0.65
C24	2	International	12080	4200	7880	0.35	0.65
C25	2	International	23586	8255	15331	0.35	0.65
C26	2	International	15876	5443	10433	0.34	0.66
C27	2	HINO	16000	6000	10000	0.38	0.63
C28	2	HINO	10400	3600	6800	0.35	0.65
C29	2	Volvo	20100	7100	13000	0.35	0.65

Los datos presentados muestran variaciones mínimas entre los porcentajes de carga de cada eje, sin embargo, a manera de acotar una proporción tipo para todos los modelos se estima la relación del 35% para el eje delantero y del 65%:

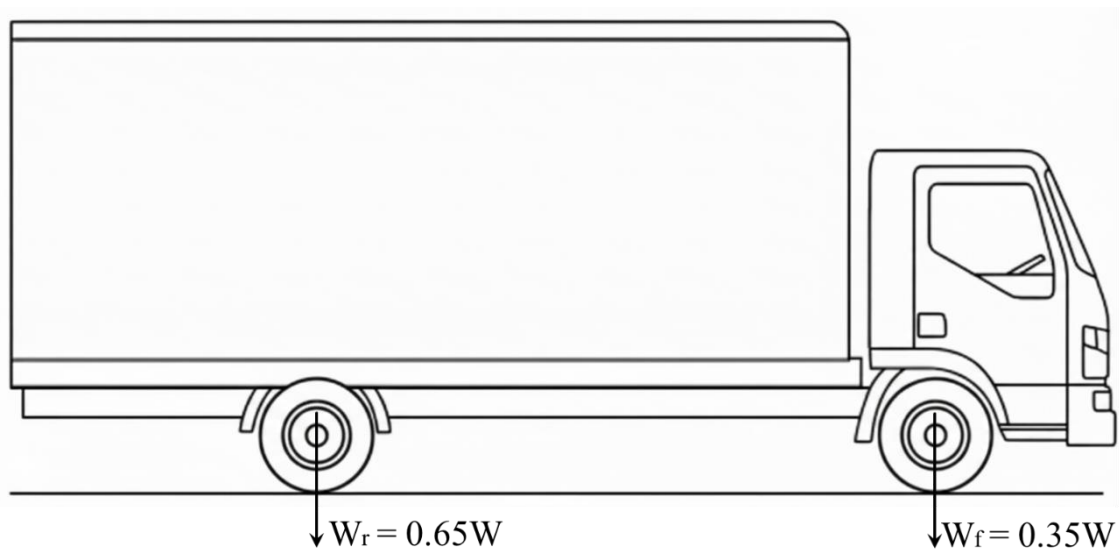


Figura 63. Distribución de la carga aplicada a cada eje por peso del vehículo en Vehículos Clase C2.

II. Peso de ocupantes.

En este tipo de vehículos la demanda por ocupantes se limita a un máximo de tres usuarios simultáneos, por lo que este peso por usuarios se aplicará directamente al eje delantero:

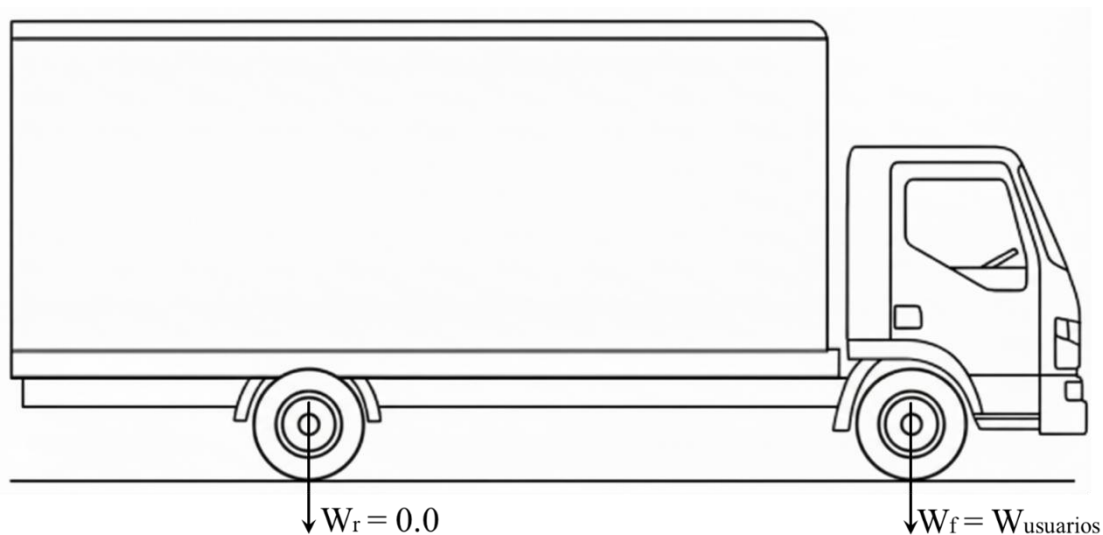


Figura 64. Distribución de la carga aplicada a cada eje por peso de ocupantes en Vehículos Clase C2.

III. Cargas adicionales.

Respecto a este tipo de vehículos, la carga máxima se distribuirá de la misma forma que el peso propio del vehículo, es decir, un 35% para el eje delantero y un 65% del eje trasero. El punto medular para esta Clase de vehículo es la variación de la carga que puede existir, esto se detallará en capítulos posteriores.

Vehículos tipo Camión Utilitario de tres ejes (Clase C3):

Las cargas de este tipo de vehículos se aplican de la misma forma que para la Clase C2, únicamente se considera el eje adicional.

I. Peso en vacío del vehículo.

Se presenta el resumen de las distribuciones por eje indicado por las fichas técnicas:

Tabla 15. Distribución de pesos en cada eje de acuerdo con las fichas técnicas de cada modelo – Vehículo Clase C3.

DISTRIBUCIÓN DE PESOS MÁXIMOS POR EJE EN VEHÍCULOS TIPO "C3"							
ID	Ejes	Marca	Peso Bruto Vehicular	Peso máximo eje delantero	Peso máximo eje trasero	Porcentaje delantero respecto a W	Porcentaje trasero respecto a W
			(kg)	(kg)	(kg)	(%)	(%)
C31	3	International	23586	8255	15331	0.35	0.65
C32	3	Volvo	24700	6700	18000	0.27	0.73
C33	3	Kenworth	16103	5669	10433	0.35	0.65

De acuerdo con los datos visualizados, se mantendrá la distribución del 35% para el eje delantero y del 65%:

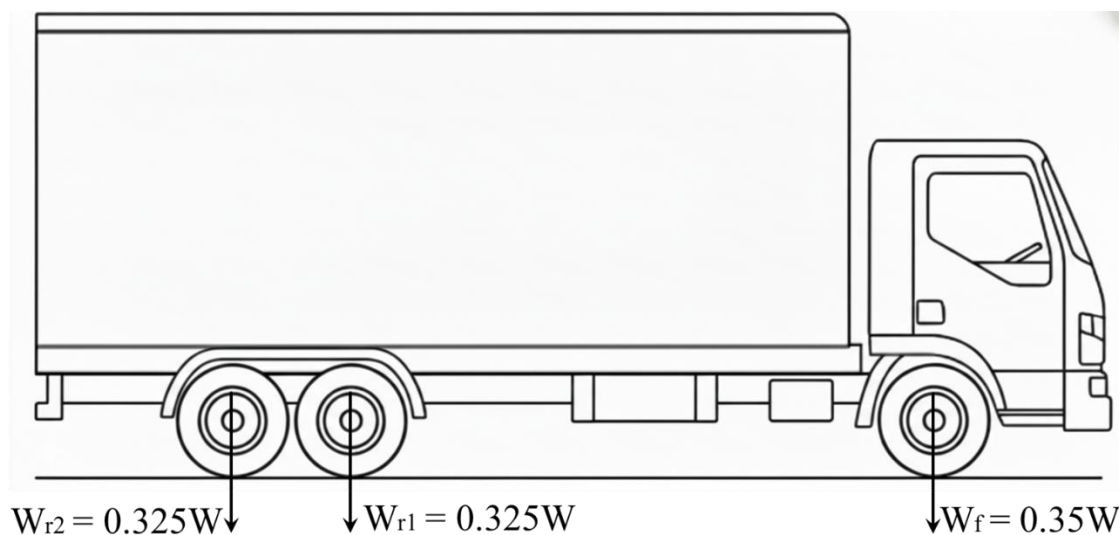


Figura 65. Distribución de la carga aplicada a cada eje por peso del vehículo en Vehículos Clase C3.

II. Peso de ocupantes.

De la misma manera que para los vehículos de la Clase C2, el 100% de la carga por ocupantes se dirigirá hacia el eje delantero:

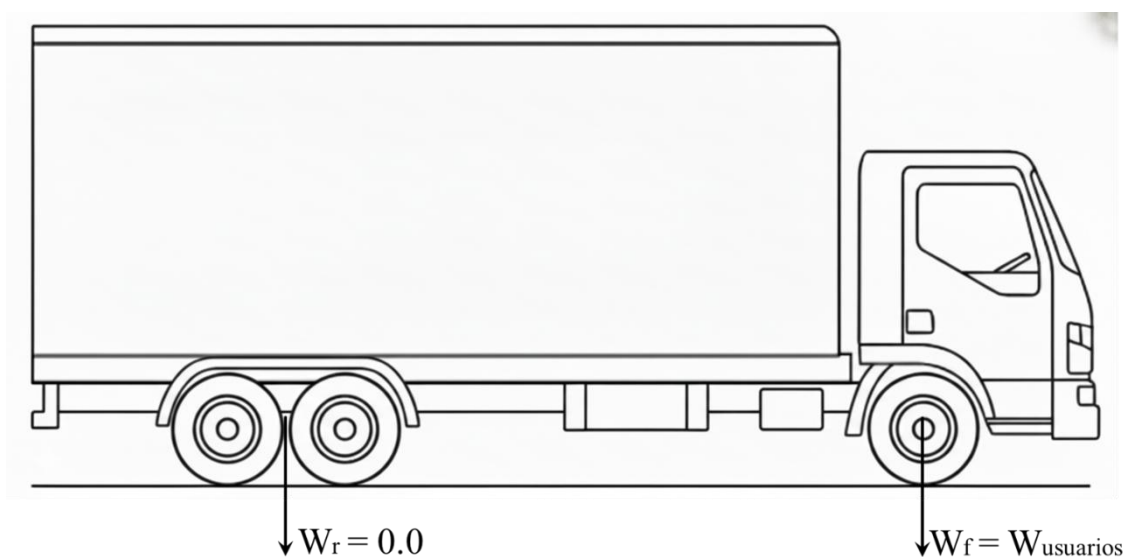


Figura 66. Distribución de la carga aplicada a cada eje por peso de ocupantes en Vehículos Clase C3.

III. Cargas adicionales.

La carga máxima se distribuirá en un 35% para el eje delantero y un 65% del eje trasero. La variación de la carga adicional se desarrolla en los siguientes capítulos.

Vehículos pesados de 5 ejes (Clase T3S2):

Pese a que estos vehículos pesados tienen un mayor número de ejes la metodología para distribuir las cargas es la misma que en los otros tipos de vehículos:

I. Peso en vacío del vehículo.

Debido a que esta Clase está compuesta por un Tractocamión más un Semirremolque, se divide la proporción de cada uno para obtener la resultante de la proporción a cada eje. De acuerdo con las fichas técnicas, la proporción de la carga máxima hacia cada eje se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 16. Distribución de pesos en cada eje debido a peso de Tractocamión – Vehículo Clase T3S2.

DISTRIBUCIÓN DE PESOS POR EJE EN VEHÍCULOS TIPO "T3S2" POR TRACTO							
ID	Ejes	Marca	Peso en Vacío	Peso máximo eje delantero	Peso máximo eje trasero	Porcentaje delantero respecto a W	Porcentaje trasero respecto a W
			(kg)	(kg)	(kg)	(%)	(%)
T3S21	5	International	7362	3595	3767	0.49	0.51
T3S22	5	International	7362	3595	3767	0.49	0.51
T3S23	5	International	8382	4073	4309	0.49	0.51
T3S24	5	International	8382	4073	4309	0.49	0.51
T3S25	5	Volvo	9344	4284	5060	0.54	0.54

Como se observa, únicamente se arrojan los resultados para dos ejes que es lo mostrado por las fichas técnicas, sin embargo, los tractocamiones cuentan con tres ejes, por lo que la carga correspondiente a la parte trasera se repartirá a la mitad para cada uno de ambos ejes y la del eje delantero se le atribuye en su totalidad:

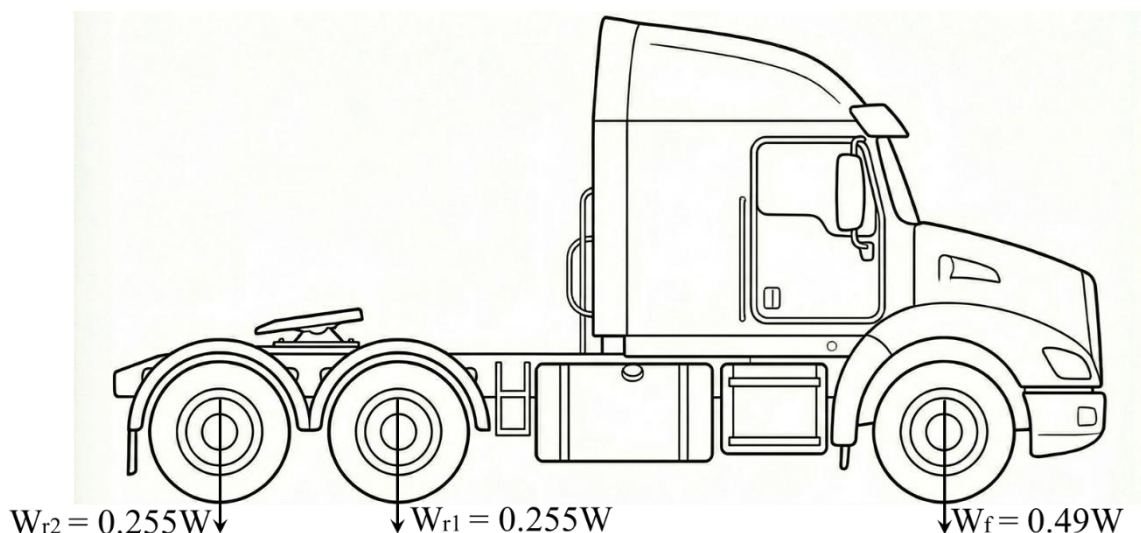


Figura 67. Distribución de la carga aplicada a cada eje por peso del Tractocamión en Vehículos Clase T3S2.

Esta distribución de pesos únicamente corresponde al peso del tractocamión, en la siguiente tabla se muestra la distribución de pesos por semirremolque:

Tabla 17. Distribución de pesos en cada eje debido a peso de Semirremolque – Vehículo Clase T3S2.

DISTRIBUCIÓN DE PESOS POR EJE EN VEHÍCULOS TIPO "T3S2" POR SEMI							
ID	Ejes	Marca	Peso en Vacío	Peso máximo eje delantero	Peso máximo eje trasero	Porcentaje delantero respecto a W	Porcentaje trasero respecto a W
			(kg)	(kg)	(kg)	(%)	(%)
T3S21	5	Fruehauf	6350	3175.0	3175.0	0.50	0.50
T3S22	5	Fruehauf	6500	3250.0	3250.0	0.50	0.50
T3S23	5	Utility	6589	3294.5	3294.5	0.50	0.50
T3S24	5	JR Trailers	6840	3420.0	3420.0	0.50	0.50
T3S25	5	Fruehauf	6900	3450.0	3450.0	0.50	0.50

Considerando este fraccionamiento de cargas debidas al peso del tractocamión y del semirremolque, la configuración total de cargas es la siguiente:

- $W_{\text{Peso Propio eje1}} = 0.49W$
- $W_{\text{Peso Propio eje2}} = 0.255W_{\text{Tractocamión}} + 0.25W_{\text{Semirremolque}}$
- $W_{\text{Peso Propio eje3}} = 0.255W_{\text{Tractocamión}} + 0.25W_{\text{Semirremolque}}$
- $W_{\text{Peso Propio eje4}} = 0.25W_{\text{Semirremolque}}$
- $W_{\text{Peso Propio eje5}} = 0.25W_{\text{Semirremolque}}$

II. Peso de ocupantes.

Al igual que para los camiones utilitarios, el peso de los ocupantes se distribuirá completamente al eje delantero del vehículo.

III. Cargas adicionales.

Por último, estas cargas adicionales se considerarán igual a la carga máxima que pueda soportar el vehículo y se distribuirá de manera equitativa en los dos ejes traseros del tractocamión y del semirremolque.

Por lo tanto, el peso total de cada eje es igual a:

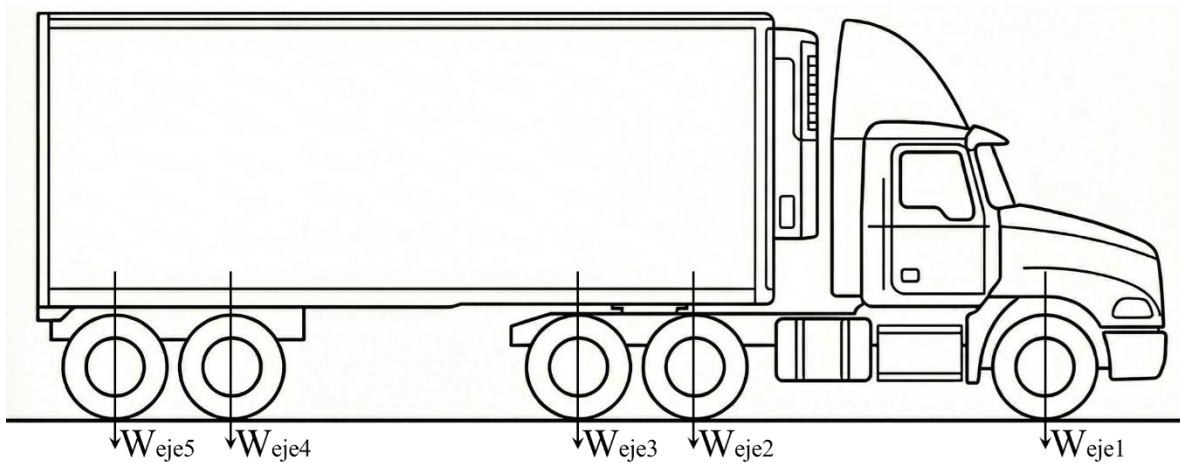


Figura 68. Distribución de la carga en cada eje por peso del Tractocamión y Semirremolque en Vehículos Clase T3S2.

Dónde:

- $W_{eje1} = 0.49W + W_{Usuarios}$
- $W_{eje2} = 0.255W_{Tractocamión} + 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje3} = 0.255W_{Tractocamión} + 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje4} = 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje5} = 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$

Vehículos pesados de 6 ejes (Clase T3S3):

Retomando la misma metodología que para los vehículos Clase T3S2 se muestran los datos y esquemas ilustrativos de la distribución de las cargas.

I. Peso en vacío del vehículo.

Los pesos resumidos por eje de tractocamión son los mismos que para el T3S2, por lo que se muestra únicamente la distribución de los ejes del semirremolque de 3 ejes:

Tabla 18. Distribución de pesos en cada eje debido a peso de Semirremolque – Vehículo Clase T3S3.

DISTRIBUCIÓN DE PESOS POR EJE EN VEHÍCULOS TIPO "T3S3" POR SEMI							
ID	Ejes	Marca	Peso en Vacío	Peso máximo eje delantero	Peso máximo eje trasero	Porcentaje delantero respecto a W	Porcentaje trasero respecto a W
			(kg)	(kg)	(kg)	(%)	(%)
T3S21	5	Fruehauf	7366	3683.0	3683.0	0.50	0.50
T3S22	5	Fruehauf	7540	3770.0	3770.0	0.50	0.50
T3S23	5	Utility	7643	3821.5	3821.5	0.50	0.50
T3S24	5	JR Trailers	7939	3969.5	3969.5	0.50	0.50
T3S25	5	Fruehauf	8004	4002.0	4002.0	0.50	0.50

Al igual que para el vehículo de 5 ejes, el peso se distribuye en su totalidad al eje delantero y la capacidad de la caja se distribuye a la mitad, una parte sobre los ejes delanteros y la otra a los traseros. La sumatoria se muestra a continuación:

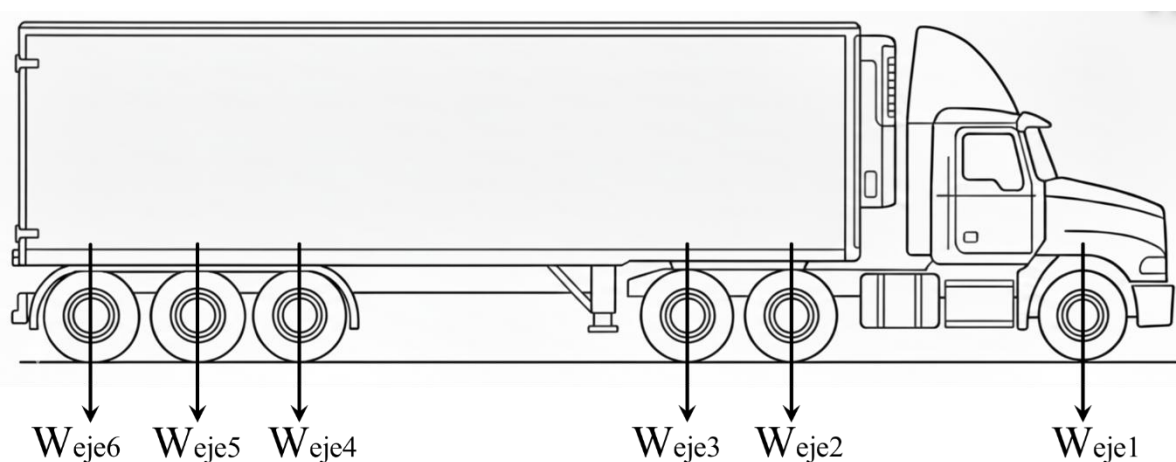


Figura 69. Distribución de la carga en cada eje por peso del Tractocamión y Semirremolque en Vehículos Clase T3S3.

Donde:

- $W_{eje1} = 0.49W + W_{Usuarios}$
- $W_{eje2} = 0.255W_{Tractocamión} + 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje3} = 0.255W_{Tractocamión} + 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje4} = 0.165W_{Semirremolque} + 0.165W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje5} = 0.165W_{Semirremolque} + 0.165W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje6} = 0.17W_{Semirremolque} + 0.17W_{Carga\ Adicional}$

Vehículos pesados de 9 ejes (Clase T3S2R4):

La manera en que se distribuye las cargas en cada eje es la misma que para las clases T3S2 y T3S3, por lo que se muestra el resumen de la distribución de estas cargas:

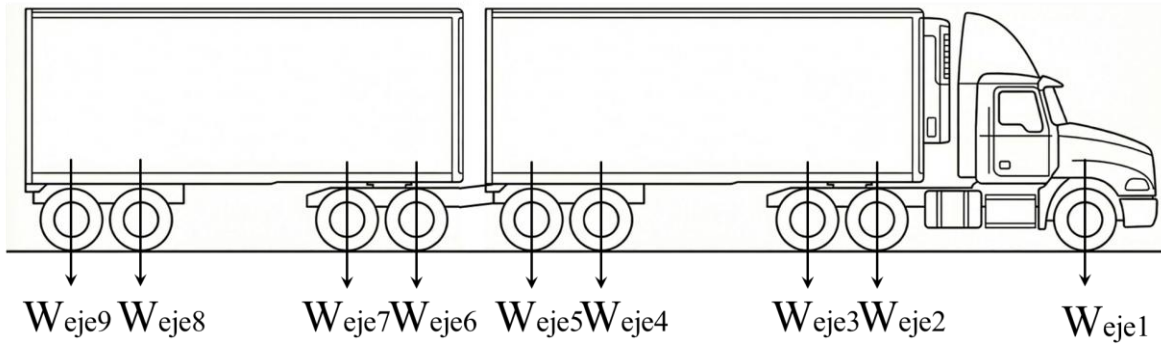


Figura 70. Distribución de la carga en cada eje por peso del Tractocamión y Semirremolque en Vehículos Clase T3S2R4.

Donde:

- $W_{eje1} = 0.49W + W_{Usuarios}$
- $W_{eje2} = 0.255W_{Tractocamión} + 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje3} = 0.255W_{Tractocamión} + 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje4} = 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje5} = 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje6} = 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje7} = 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje8} = 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$
- $W_{eje9} = 0.25W_{Semirremolque} + 0.25W_{Carga\ Adicional}$