



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



## **EFFECTOS DE CONVOYES DE CAMIONES EN PUENTES SIMPLEMENTE APOYADOS**

POR

**Francisco Javier León Cabezas**

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

Profesor Guía  
Dr. Víctor Aguilar Vidal

Profesor Comisión  
Dr. Sebastián Calderón Díaz

Marzo 2025  
Concepción (Chile)

© 2025 Francisco Javier León Cabezas

© 2025 Francisco Javier León Cabezas

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

## DEDICATORIA

*Dedicado a mis padres, Miriam y Francisco, por su amor y apoyo incondicional durante todos estos años, por ser mi mayor fortaleza y la principal causa de todos mis logros. También a mis hermanos Rosio e Ignacio, por ser una gran inspiración para mí.*

*A Daniela, por su gran amor y comprensión, por darme siempre palabras de aliento y acompañarme en los momentos más desafiantes de este camino.*

*Finalmente, a mis fieles mascotas Molly y Pascu, por acompañarme en mis noches de estudio y trabajo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco el financiamiento del presente trabajo a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo ANID a través del proyecto FONDECYT de Iniciación Nr. 11230092.

También agradezco especialmente a mi profesor guía Dr. Víctor Aguilar Vidal durante todo el desarrollo de este trabajo, gracias por toda su ayuda, paciencia y brindarme las herramientas necesarias para poder llevar a cabo toda la investigación, es sin duda una gran persona y un profesional de excelencia.

## RESUMEN

En los últimos años, los avances tecnológicos han dado lugar a nuevas formas de transporte de carga terrestre como el "*Truck Platooning*", donde camiones automatizados viajan en convoyes sincronizados para mejorar la eficiencia operativa y energética de las flotas de camiones. Esta innovación, plantea desafíos significativos para la infraestructura vial, especialmente para los puentes, que desempeñan un papel fundamental en la conectividad y el desarrollo económico del país. La circulación de convoyes de camiones sobre estas estructuras puede incrementar significativamente ciertas demandas estructurales, como momentos flectores y fuerzas de corte. Si bien este fenómeno también puede provocar otros efectos, como deformaciones, resonancia, fatiga e impactos dinámicos elevados, esta investigación se enfoca exclusivamente en momentos flectores y fuerzas de corte.

Este estudio cuantifica y evalúa las demandas estructurales generadas por 357 configuraciones distintas de convoyes, considerando variables como el número de camiones y su espaciamiento. Los resultados fueron comparados con las demandas generadas por patrones de carga viva de diseño HS20-44+20% y HL-93. La metodología abarcó la caracterización de camiones frecuentes en el país, simulaciones y cálculos computacionales desarrollados mediante programación en Python y análisis de sensibilidad para identificar configuraciones permisibles.

Además de evaluar las demandas estructurales, este estudio proporciona una recomendación práctica para el diseño de puentes, proponiendo una modificación en el patrón de carga viva HL-93 que permita considerar el efecto del *Truck Platooning* sin necesidad de realizar simulaciones complejas. A partir de los resultados obtenidos, se determinó que un incremento del 30% en el patrón de carga HL-93, junto con un espaciamiento de 9 m, es fundamental para garantizar que la totalidad de los convoyes de camiones evaluados en esta investigación no excedan los límites de diseño por serviciabilidad, permitiendo su circulación en puentes simplemente apoyados menores y medianos.

Finalmente, el estudio entrega recomendaciones prácticas para la operación de convoyes de camiones en puentes, destacando la prohibición de convoyes en estructuras con vanos mayores a 30 m diseñadas con HS20-44+20%, y la exigencia de un espaciamiento mínimo de 15 m en estructuras similares diseñadas con HL-93. Estas medidas buscan preparar la red vial chilena para posibles demandas futuras.

## ABSTRACT

In recent years, technological advances have given rise to new forms of land freight transportation such as “Truck Platooning”, where automated trucks travel in synchronized convoys to improve the operational and energy efficiency of truck fleets. This innovation poses significant challenges for road infrastructure, especially bridges, which play a key role in the country's connectivity and economic development. The movement of truck convoys over these structures can significantly increase certain structural demands, such as bending moments and shear forces. Although this phenomenon can also cause other effects, such as deformations, resonance, fatigue and high dynamic impacts, this research focuses exclusively on bending moments and shear forces.

This study quantifies and evaluates the structural demands generated by 357 different convoy configurations, considering variables such as the number of trucks and their spacing. The results were compared with the demands generated by HS20-44+20% and HL-93 design live load patterns. The methodology included the characterization of frequent trucks in the country, simulations and computational calculations developed through Python programming and sensitivity analysis to identify allowable configurations.

In addition to evaluating the structural demands, this study provides a practical recommendation for bridge design, proposing a modification in the HL-93 live load pattern that allows considering the effect of Truck Platooning without the need to perform complex simulations. From the results obtained, it was determined that a 30% increase in the HL-93 load pattern, together with a 9 m spacing, is fundamental to guarantee that all the truck convoys evaluated in this research do not exceed the design limits for serviceability, allowing them to circulate on minor and medium-sized simply supported bridges.

Finally, the study provides practical recommendations for the operation of truck convoys on bridges, highlighting the prohibition of convoys on structures with spans greater than 30 m designed with HS20-44+20%, and the requirement of a minimum spacing of 15 m on similar structures designed with HL-93. These measures seek to prepare the Chilean road network for possible future demands.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Alcance del estudio .....	3
1.4 Plan de trabajo.....	4
1.5 Principales resultados.....	5
1.6 Organización de la memoria de título .....	5
<b>CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Introducción .....	6
2.2 Marco Teórico .....	6
2.2.1 Cargas en puentes.....	6
2.2.2 Cargas permanentes.....	6
2.2.3 Cargas ambientales.....	7
2.2.4 Cargas vivas .....	7
2.2.5 Fundamentos de diseño de puentes según AASHTO.....	8
2.2.6 Factores que influyen en los efectos de las cargas vivas.....	9
2.2.7 Convoy de camiones .....	10
2.2.8 Parámetros del convoy .....	11
2.3 Estado de la práctica.....	11
2.3.1 Camión de diseño y patrones de carga .....	12
2.3.2 Clasificación vehicular .....	14
2.4 Estado del arte .....	15
2.4.1 Número de camiones y espaciamiento en el convoy.....	15

2.4.2	Demandas estructurales por convoyes de camiones extranjeros.....	16
2.4.3	Criterios para el cálculo de momento y corte en puentes.....	18
2.5	Conclusiones .....	19
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA .....</b>		<b>21</b>
3.1	Introducción .....	21
3.2	Metodología general.....	21
3.3	Levantamiento de información.....	22
3.3.1	Camiones de estudio.....	22
3.3.2	Obtención del peso por eje de camiones .....	23
3.3.3	Determinación del espaciamiento entre ejes .....	24
3.3.3.1	Revisión de camiones en el mercado nacional.....	24
3.3.3.2	Fotometría .....	25
3.3.3.3	Mediciones en terreno .....	26
3.4	Evaluación de las demandas por corte y flexión generadas por convoyes.....	27
3.4.1	Puentes seleccionados .....	27
3.4.2	Tipos de convoyes y escenarios de carga.....	28
3.5	Análisis de Sensibilidad y Comparación con Patrones de diseño .....	30
3.5.1	Análisis de sensibilidad para determinar límites óptimos .....	30
3.5.2	Relaciones de demandas estructurales .....	31
3.6	Ajuste del patrón de carga HL-93 .....	32
3.7	Software .....	33
3.8	Conclusiones .....	34
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS .....</b>		<b>35</b>
4.1	Introducción .....	35
4.2	Resultados caracterización de camiones .....	35
4.3	Resultados momentos flectores y fuerzas de corte producidas por convoyes.....	37

---

4.3.1	Efectos de acuerdo con el número de camiones dentro del convoy .....	38
4.3.2	Efectos de acuerdo con la separación de camiones dentro del convoy .....	41
4.4	Resultados análisis de sensibilidad y comparación con HS20-44+20% .....	42
4.5	Resultados análisis de sensibilidad y comparación con HL-93 .....	46
4.6	Resultados ajuste del patrón de carga HL-93 .....	49
4.7	Recomendaciones de espaciamientos y número de camiones.....	57
<b>CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>		<b>61</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>63</b>
<b>ANEXO A. CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SUSTENTABLE .</b>		<b>65</b>
<b>ANEXO 3.1 CÓDIGOS PYTHON PARA CÁLCULO DE DEMANDAS.....</b>		<b>66</b>
<b>ANEXO 4.1 REGISTRO FOTOMETRÍA Y RESULTADOS CAMIONES.....</b>		<b>75</b>

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 3.1 Camiones de estudio candidatos a formar convoyes.....	22
Tabla 3.2 Combinaciones de escenarios de carga por tipo de camión.....	28
Tabla 4.1 Longitudes totales de camiones según configuración de ejes y carrocería.....	35
Tabla A.4.1 Fotometría de camiones forestales tipo 520.....	75
Tabla A.4.2 Fotometría de camiones multipropósito tipo 690.....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Incremento por carga dinámica (DLA) (AASHTO (2012)).	8
Figura 2.2 Esquema de un convoy de camiones automatizado (ATP) cruzando un puente de autopista (Ling <i>et al.</i> (2022)).	10
Figura 2.3 Diagrama de flujo simplificado del proceso de diseño de puentes con metodología AASHTO.	12
Figura 2.4 Características del camión de diseño HS20 (AASHTO (2012)).	13
Figura 2.5 Patrones de carga viva provenientes de EE. UU: HS20-44 (a-c) y HL-93 (d-f) (Aguilar <i>et al.</i> (2023)).	14
Figura 2.6 Resultados para un puente de vano simple, (a) Flexión positiva y (b) Fuerza de corte. Convoy con camiones C5 separados a 6.1 m (izquierda) y 12.2 m (derecha) (Yarnold y Weidner, 2019).	16
Figura 2.7 Resultados combinados para un puente de vano simple, (a) Flexión positiva y (b) Fuerza de corte, $S_a$ (separación entre camiones), $L$ (longitud del vano) (Yarnold y Weidner, 2019).	17
Figura 2.8 Momentos para un puente de vano simple variando el espaciamiento y el número de camiones tipo SU4 (Sayed, <i>et al.</i> (2020)).	18
Figura 3.1 Diagrama de flujo de metodología general de la investigación.	21
Figura 3.2 Ejemplo de distribución y cálculo del peso por eje real de camiones a partir de datos de plazas de pesaje.	24
Figura 3.3 Ficha técnica camión Mercedes Benz AROCS 4848 K 8X4/4 4500 SEG RET HEAVY DUTY, medidas en mm.	25
Figura 3.4 Análisis fotométrico para determinar espaciamiento entre ejes utilizando AutoCAD.	26
Figura 3.5 Mediciones <i>in-situ</i> de camiones, Agosto – Octubre (2024).	26
Figura 3.6 Diferencia entre espacio físico (Gap) y espaciamiento entre ejes de camiones ( $S_a$ ) para 2 camiones 690.	29
Figura 3.7 Análisis estructural de cargas móviles en código desarrollado en Python (Lab. Prof. Aguilar).	30
Figura 3.8 Pseudocódigo general utilizado para cálculo de demandas estructurales.	34
Figura 4.1 Caracterización camión 450 (áridos), espaciamientos en mm.	36
Figura 4.2 Caracterización camión 520 (forestal), espaciamientos en mm.	36
Figura 4.3 Caracterización camión 690 (multipropósito), espaciamientos en mm.	37

Figura 4.4 (a) Momentos generados por un convoy de 1 camión en función de la luz del puente (b) Fuerzas de corte generadas por un convoy de 1 camión en función de la luz del puente. ....	38
Figura 4.5 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 6 m en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 6 m en función de la luz del puente. ....	39
Figura 4.6 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 15 m en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 15 m en función de la luz del puente. ....	40
Figura 4.7 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función de la luz del puente. ....	42
Figura 4.8 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m, respectivamente, en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m, respectivamente, en función del número de camiones. HS20-44+20%.....	43
Figura 4.9 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 450 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 450 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. HS20-44+20%.....	45
Figura 4.10 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HL-93.....	47
Figura 4.11 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 450 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 450 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. HL-93.....	49
Figura 4.12 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h)	

Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HL-93+30%.....	51
Figura 4.13 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 450 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 450 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. HL-93+30%.....	53
Figura 4.14 Resumen relaciones de demandas estructurales ( $R_M$ , $R_V$ ) para cada escenario del camión 450 (color rojo: sobre límite de servicio, color azul: sobre límite de resistencia). .....	54
Figura 4.15 Resumen relaciones de demandas estructurales ( $R_M$ , $R_V$ ) para cada escenario del camión 520 (color rojo: sobre límite de servicio, color azul: sobre límite de resistencia). .....	55
Figura 4.16 Resumen relaciones de demandas estructurales ( $R_M$ , $R_V$ ) para cada escenario del camión 690 (color rojo: sobre límite de servicio, color azul: sobre límite de resistencia). .....	56
Figura 4.17 Recomendaciones de espaciamientos para la operación de convoyes según el tipo de camión y la luz del puente, considerando los momentos y fuerzas de corte de diseño del MC Vol. 3 (patrón de carga HS20-44+20%).....	57
Figura 4.18 Recomendaciones de espaciamientos para la operación de convoyes según el tipo de camión y la luz del puente, considerando los momentos y fuerzas de corte de diseño de la norma AASHTO (2012) (patrón de carga HL-93). .....	58
Figura 4.19 Recomendaciones de N° de camiones para la operación de convoyes según el tipo de camión y la luz del puente, considerando los momentos y fuerzas de corte de diseño del MC Vol. 3 (patrón de carga HS20-44+20%).....	58
Figura 4.20 Recomendaciones de N° de camiones para la operación de convoyes según el tipo de camión y la luz del puente, considerando los momentos y fuerzas de corte de diseño de la norma AASHTO (2012) (patrón de carga HL-93). .....	59
Figura 4.21 (a), (b) Recomendaciones de espaciamiento. (c), (d) Recomendaciones de N° de camiones con patrón de carga HS20-44+20% y HL-93 respectivamente.....	60
Figura A.4.1 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 9 m en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 9 m en función de la luz del puente. ....	81
Figura A.4.2 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 12 m en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte	

generadas por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 12 m en función de la luz del puente. ....	82
Figura A.4.3 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función de la luz del puente. ....	83
Figura A.4.4 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función de la luz del puente. ....	84
Figura A.4.5 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HS20-44+20% .....	85
Figura A.4.6 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HS20-44+20% .....	86
Figura A.4.7 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 520 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 520 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. HS20-44+20% .....	88
Figura A.4.8 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 690 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 690 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. HS20-44+20% .....	89
Figura A.4.9 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HL-93. ....	90
Figura A.4.10 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h)	

Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HL-93. ....	91
Figura A.4.11 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 520 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 520 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. HL-93. ....	93
Figura A.4.12 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 690 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 690 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. HL-93. ....	94
Figura A.4.13 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HL-93+30%.....	95
Figura A.4.14 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HL-93+30%.....	96
Figura A.4.15 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 520 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 520 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. HL-93+30%.....	98
Figura A.4.16 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 690 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 690 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. HL-93+30. ....	99
Figura A.4.17 Demandas estructurales generadas por 357 escenarios de convoyes estudiados sin considerar impacto. ....	102
Figura A.4.18 Demandas estructurales generadas por distintos patrones de carga viva (HS20-44, HS20-44+20% y HL-93).....	102

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación

La red vial es un componente esencial para el desarrollo económico y social de un país, pues facilita el transporte vía terrestre y permite satisfacer las necesidades básicas de educación, trabajo, alimentación y salud de la población (Rivera, 2015). Dentro de esta red, los puentes desempeñan un rol fundamental, al asegurar la continuidad del tránsito sobre obstáculos naturales como ríos y quebradas. Por esta razón, su estudio, diseño y mantenimiento son primordiales para garantizar su durabilidad y funcionalidad a lo largo del tiempo, asegurando así la conectividad territorial y el acceso a bienes y servicios.

En este contexto, el desarrollo de nuevas tecnologías de transporte ha dado lugar a innovaciones como el "*Truck platooning*", o caravana de camiones en español. Este concepto se refiere a un sistema en el cual dos o más camiones circulan de manera simultánea y automatizada, separados por una distancia preestablecida. El primer camión del convoy es el que dirige a los demás camiones que lo siguen, por lo que este requiere de solo un conductor profesional (ACEA, 2017). Investigadores como Wassef (2021) destacan los beneficios de esta tecnología en términos de reducción de costos de combustible, aumento de la seguridad vial y disminución del impacto ambiental. Sin embargo, sus posibles efectos estructurales sobre la infraestructura vial, y en particular sobre los puentes, han sido escasamente investigados en el contexto nacional. Evaluar dichos efectos resulta especialmente relevante, ya que los puentes constituyen una infraestructura crítica dentro de la red vial, debido a que, a diferencia de las calzadas apoyadas directamente sobre el suelo, los puentes deben resistir completamente las cargas a través de su propia estructura, lo que los hace más susceptibles a sobrecargas, esfuerzos dinámicos y vibraciones.

En Chile, el diseño de puentes se basa en patrones internacionales de carga vehicular, como HS20-44 y HL-93, definidos por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). El patrón HS20-44, desarrollado en 1944, fue diseñado para reflejar las condiciones de carga típicas de mediados del siglo XX en Estados Unidos, mientras que el HL-93, introducido en 1993, incluye avances, como la combinación de cargas distribuidas de faja con el camión de diseño, que lo hacen más representativo de las cargas vivas modernas. No obstante, estos patrones no

contemplan configuraciones como el *Truck platooning*, donde una mayor cantidad de vehículos pesados de manera simultánea podría generar un incremento en las demandas estructurales, especialmente en términos de momentos flectores y fuerzas de corte.

Actualmente, en el territorio nacional, los camiones circulan de manera individual, sin una coordinación previa, lo que genera incertidumbre sobre las posibles consecuencias que los convoyes podrían producir en los puentes. Por esta razón, en la presente investigación se estudiarán los posibles efectos de la implementación de convoyes de camiones en el contexto nacional. Se compararán las demandas estructurales producidas, con los patrones de carga HL-93 y HS20-44+20% con el objetivo de determinar la necesidad de un aumento porcentual de las magnitudes de alguno de estos patrones para cubrir las posibles mayores demandas que genere esta nueva forma de transporte de carga terrestre.

Dado el amplio espectro de tipologías estructurales de puentes existentes, esta investigación se centrará exclusivamente en los puentes simplemente apoyados. Esta decisión se justifica, en primer lugar, porque se trata de una tipología ampliamente utilizada en la infraestructura vial chilena, especialmente en puentes clasificados como menores y medianos, cuyo nombre especifica sus vanos que varían entre 0.5 y 70 m, rangos que corresponden a la gran mayoría de los puentes construidos en Chile. Además, su modelo estructural simple facilita el análisis de una amplia variedad de escenarios de carga de manera más versátil y sistemática. Por último, esta configuración permite dar una primera aproximación razonable y cercana a la realidad de los efectos del *Truck platooning* sobre la demanda estructural en puentes.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Evaluar los efectos generados por potenciales convoyes de camiones sobre puentes simplemente apoyados.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar camiones frecuentes que pueden ser eventualmente utilizados como convoy.
- Evaluar las demandas de momento flector y fuerza de corte producidas por convoyes de camiones potencialmente comunes sobre puentes simplemente apoyados menores y medianos.
- Proponer un ajuste al patrón de carga viva HL-93 para el diseño de puentes considerando convoyes de camiones en el contexto chileno.
- Recomendar espaciamiento y número de camiones para eventuales convoyes en la práctica chilena, en función del patrón de carga viva considerado (HS20-44+20% o HL-93).

### 1.3 Alcance del estudio

Se evaluaron puentes menores y medianos según la definición dada en el Manual de Carreteras (2023) Vol. 3, sección 3.1001.301 (2), según la longitud de vano. Es decir, se consideraron estructuras con una luz de vano entre 0.5 a 70 metros de longitud. Esta decisión responde tanto al marco normativo vigente anteriormente mencionado, que establece dicho rango para el diseño de puentes en el país, como a la realidad de la infraestructura vial chilena, donde la mayoría de los puentes construidos no supera este límite de longitud.

Además, se evaluaron los puentes con sólo una vía cargada y modelados como una viga simplemente apoyada. Esta decisión se fundamenta en la metodología propuesta por la normativa AASHTO, la cual establece que el análisis base debe realizarse con un solo carril cargado. En caso de considerar más de un carril, la propia normativa proporciona fórmulas específicas para calcular los factores de distribución, lo que permite representar de manera adecuada el efecto de múltiples carriles cargados sin necesidad de modelar cada caso de forma explícita. Por lo tanto, esta estrategia permite simplificar el análisis estructural, facilitar la comparación entre diversos escenarios y mantener la validez de los resultados, sin recurrir a modelos complejos con múltiples combinaciones de camiones simultáneamente cargando la estructura.

## 1.4 Plan de trabajo

En primera instancia, se seleccionan los tipos de camiones más frecuentes en Chile, clasificados de acuerdo con la tipología propuesta por el Ministerio de Obras Públicas (MOP). A continuación, se caracterizan estos camiones, obteniendo información como el espaciamiento entre ejes y el peso por eje en cada caso. Para este análisis, se utilizan datos de camiones disponibles en el mercado nacional, fotografías y mediciones de camiones en circulación por la infraestructura vial del país, así como datos provenientes de ocho plazas de pesaje fijas de la Dirección de Vialidad, distribuidas a lo largo del territorio nacional. El objetivo de esta etapa es identificar los camiones más representativos que puedan ser utilizados eventualmente como convoy.

Posteriormente, se definen distintos escenarios de convoyes utilizando los camiones previamente caracterizados. En cada escenario se modifican variables como el número de camiones en el convoy y el espaciamiento entre ellos. El análisis se realiza sobre puentes simplemente apoyados con luces que varían entre 10 y 70 metros de acuerdo con lo definido en la sección anterior. Por ejemplo, para un puente con una luz fija de 20 metros, se simula la circulación de convoyes compuestos por uno a cinco camiones, con espaciamientos de 6, 9, 12 y 15 metros, con el objetivo de evaluar cómo varían las demandas estructurales en función de estas combinaciones. Con la ayuda del software Jupyter y el lenguaje de programación Python, se calcularán los esfuerzos de momento y corte generados en cada uno de estos escenarios. Los resultados obtenidos se compararán con trenes de carga establecidos en los códigos de diseño actuales, tales como HS20-44 + 20% (MC Vol.3, 2023) y HL-93 (AASHTO, 2023).

Finalmente, se elaboran recomendaciones sobre el número de camiones y los espaciamientos adecuados dentro de convoyes, en función de los camiones caracterizados en esta investigación y del patrón de carga viva considerado en el diseño del puente. Estas recomendaciones están respaldadas por el análisis de las demandas estructurales obtenidas en los distintos escenarios evaluados. Adicionalmente, se propone un ajuste al patrón de carga viva HL-93, que permite incorporar el efecto de convoyes en el diseño de puentes. Este ajuste busca facilitar el proceso de diseño sin necesidad de realizar evaluaciones específicas para cargas de convoyes, permitiendo en su lugar utilizar un aumento porcentual del patrón normativo vigente, de manera práctica y conservadora.

## 1.5 Principales resultados

Los resultados obtenidos evidencian que ciertas configuraciones de convoyes de camiones pueden producir momentos flectores y fuerzas de corte superiores a los límites establecidos por las normativas actuales, especialmente en puentes con luces mayores a 30 m y con un espaciamiento menor a 9 m entre camiones. Se identificó que, aunque el número de camiones en un convoy influye en las demandas estructurales, el espaciamiento entre estos se convierte en una variable más crítica a medida que las longitudes de luz aumentan. Se concluye que, para el diseño de puentes, un incremento del 30% en el patrón de carga viva HL-93, garantiza que la mayoría de los escenarios evaluados en esta investigación se mantengan dentro de los límites de serviciabilidad.

## 1.6 Organización de la memoria de título

Este trabajo se estructura en cinco capítulos. En el Capítulo 1 se introduce el tema de investigación, proporcionando el contexto general. El Capítulo 2 se centra en el análisis de los avances y estudios realizados a nivel internacional sobre los convoyes de camiones o *Truck platooning*. En el Capítulo 3 se detalla la metodología empleada, describiendo cada etapa del proceso. El Capítulo 4 presenta los resultados obtenidos, organizados de acuerdo con los distintos casos analizados. Finalmente, el Capítulo 5 expone las conclusiones derivadas de la investigación.

## **CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se detallan los conceptos básicos necesarios para comprender la definición de un convoy de camiones. Se aborda cómo esta nueva forma de transporte de carga terrestre ha sido estudiada en investigaciones previas, destacando los principales efectos que provoca en los puentes. Asimismo, se detalla el estado del arte y el marco teórico, los cuales proporcionan los fundamentos necesarios para entender a profundidad el tema de investigación.

### **2.2 Marco Teórico**

#### **2.2.1 Cargas en puentes**

Las cargas en puentes son las fuerzas que actúan sobre la estructura y deben ser consideradas en su diseño para garantizar seguridad y durabilidad. Estas se clasifican en cargas permanentes, cargas ambientales y cargas vivas. El presente estudio se refiere a las cargas vivas inducidas por el tránsito de convoyes de camiones sobre puentes.

#### **2.2.2 Cargas permanentes**

Las cargas permanentes representan las demandas generadas por el peso propio de los elementos estructurales que conforman el puente. En los puentes tipo viga, estas cargas incluyen componentes como las vigas, la losa, el pavimento, las barreras y otros elementos similares (sección 3.5.1, AASHTO (2012)). Para su cálculo, se multiplica el peso específico del material por el área de la sección transversal de cada elemento. A continuación, se mencionan algunas cargas permanentes importantes:

- DC: Incluye el peso de elementos estructurales tales como vigas, barreras, losa y cartelas.
- DW: Corresponde al peso del pavimento o asfalto.

### 2.2.3 Cargas ambientales

Las cargas ambientales son fuerzas externas que actúan sobre las estructuras debido a condiciones naturales y son fundamentales en el diseño. Estas incluyen la carga por viento, que representa la presión ejercida por corrientes de aire sobre el puente; la carga sísmica, originada por movimientos del terreno durante terremotos; la carga por nieve y hielo, asociada al peso adicional generado por acumulaciones en climas fríos; y la carga por temperatura, que resulta de la expansión o contracción de los materiales debido a variaciones térmicas. Estas cargas, variables según el entorno, son abordadas en las normativas AASHTO.

### 2.2.4 Cargas vivas

Las cargas vivas o *Live Loads* (LL) son fuerzas variables que actúan sobre los puentes como resultado de su uso y operación normal, originadas principalmente por el tráfico vehicular, peatonal y de maquinaria. Su análisis considera factores dinámicos, como la amplificación de las demandas debido a impactos, y evalúa condiciones extremas para garantizar que la estructura resista cargas máximas sin comprometer su estabilidad ni funcionalidad.

De acuerdo con la normativa AASHTO (2012), las principales demandas asociadas a las cargas vivas incluyen:

- Carga viva vehicular (inciso 3.6.1.3).
- Carga viva peatonal (inciso 3.6.1.6).

Adicionalmente, se debe incorporar el incremento por efecto dinámico (*Dynamic Load Allowance*) en las demandas de momento y corte obtenidas para cada escenario de carga viva vehicular. Esto permite estimar demandas más realistas y conservadoras para el diseño estructural. En la Figura 2.1 se muestra el incremento por efecto dinámico estipulado en la normativa AASHTO (2012).

**3.6.2—Dynamic Load Allowance: *IM***

**3.6.2.1—General**

Unless otherwise permitted in Articles 3.6.2.2 and 3.6.2.3, the static effects of the design truck or tandem, other than centrifugal and braking forces, shall be increased by the percentage specified in Table 3.6.2.1-1 for dynamic load allowance.

The factor to be applied to the static load shall be taken as:  $(1 + IM/100)$ .

The dynamic load allowance shall not be applied to pedestrian loads or to the design lane load.

**Table 3.6.2.1-1—Dynamic Load Allowance, *IM***

Component	IM
Deck Joints—All Limit States	75%
All Other Components:	
• Fatigue and Fracture Limit State	15%
• All Other Limit States	33%

**Figura 2.1 Incremento por carga dinámica (DLA) (AASHTO (2012)).**

**2.2.5 Fundamentos de diseño de puentes según AASHTO**

Generalmente los puentes se verifican para distintas combinaciones de cargas con el fin de garantizar su resistencia y funcionalidad a lo largo de su vida útil. En esta investigación, se consideraron las combinaciones de carga Resistencia I y Servicio I, según la normativa AASHTO, las cuales se detallan a continuación:

Resistencia I: Representa la combinación de carga básica para el uso normal del puente sin considerar efectos de viento. Es utilizada para evaluar la resistencia estructural con factores de carga amplificados.

$$\emptyset R \leq 1.25 DC + 1.5 DW + 1.75 LL \tag{2.1}$$

Servicio I: Representa la operación normal del puente con viento de 90 km/h, utilizando cargas en sus valores nominales, enfocándose en deflexiones, vibraciones y agrietamientos.

$$\emptyset R \leq 1.0 DC + 1.0 DW + 1.0 LL \tag{2.2}$$

- R : Resistencia nominal
- $\emptyset R$  : Resistencia de diseño
- $(1.25 DC + 1.5 DW + 1.75 LL)$  : Carga última o carga de diseño para resistencia.
- $(1.0 DC + 1.0 DW + 1.0 LL)$  : Carga última o carga de diseño para servicio.

Debido a esto, en el análisis y la interpretación de resultados se emplean los límites de 1.0 LL y 1.75 LL, de acuerdo con las combinaciones de carga establecidas. Si las demandas generadas por los convoyes de camiones superan el valor de 1.0 LL (combinación de servicio), la funcionalidad del puente podría verse comprometida. En caso de que superen el límite de 1.75 LL (combinación de resistencia), es probable que la estructura experimente una falla, lo que podría derivar en un colapso parcial o total.

### **2.2.6 Factores que influyen en los efectos de las cargas vivas**

Los efectos más importantes generados por las cargas vivas corresponden a esfuerzos de corte, flexión y deflexiones, los cuales están principalmente determinados por los siguientes factores Marchini (2024):

**Peso bruto total (PBT):** El peso bruto total corresponde a la suma del peso del vehículo vacío más la carga que transporta. En Chile, el Manual de Cargas Especiales indica que el peso bruto total máximo permitido corresponde a 45 ton. Es un factor clave, ya que determina la magnitud de las fuerzas ejercidas sobre la estructura del puente, influyendo directamente en su diseño y capacidad de soporte.

**Peso por eje:** El peso por eje hace referencia a la carga que soporta cada conjunto de ejes del vehículo. Es fundamental para evaluar cómo se distribuye el peso sobre la superficie del puente, ya que una concentración desigual puede generar esfuerzos localizados que comprometen la integridad estructural.

**Distribución de cargas:** La distribución de cargas describe cómo se reparte el peso total de un vehículo sobre los distintos ejes y puntos de apoyo. Una distribución irregular puede provocar sobrecargas puntuales que incrementan los esfuerzos de flexión y corte en la estructura.

**Frecuencia de tránsito:** La frecuencia de tránsito se refiere a la cantidad y periodicidad con que los vehículos cruzan el puente. Un tránsito constante o intenso incrementa el desgaste de los materiales y amplifica los efectos dinámicos, como las vibraciones e impactos.

Tipología vehicular: La tipología vehicular se relaciona con las características y tipos de vehículos que transitan por el puente, como camiones pesados, buses o vehículos livianos. Cada tipo de vehículo ejerce diferentes magnitudes de carga, lo que influye en el diseño y mantenimiento de la estructura. En la sección 2.3.2 se define en detalle la tipología vehicular utilizada en Chile.

### 2.2.7 Convoy de camiones

Un convoy de camiones autónomo corresponde a un grupo de dos o más camiones que conducen juntos como una sola unidad mediante el uso de tecnología de comunicación vehículo a vehículo (Tohme y Yarnold, 2020), estos convoyes aceleran o frenan automáticamente juntos y pueden estar espaciados a una menor distancia que los vehículos convencionales. En la Figura 2.2 se presenta un esquema y descripción de un convoy de camiones.

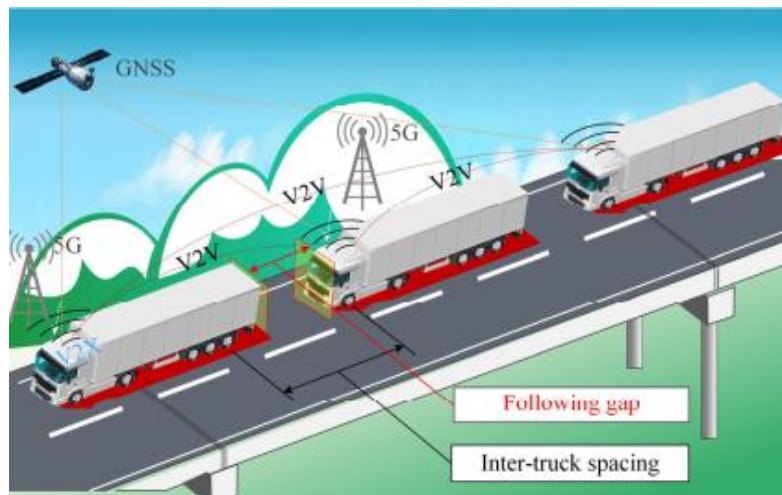


Figura 2.2 Esquema de un convoy de camiones automatizado (ATP) cruzando un puente de autopista (Ling *et al.* (2022)).

El “*Following gap*” corresponde a la distancia física entre las carrocerías de los camiones dentro del convoy. Esta medida se toma entre el parachoques trasero del camión líder y el parachoques delantero del camión que lo sigue. Es un parámetro crucial para optimizar la eficiencia aerodinámica y garantizar la seguridad durante la operación del convoy.

El parámetro “*Inter-truck spacing*” se refiere a la distancia entre los ejes de los camiones en un convoy automatizado. Específicamente, esta distancia se mide desde el último eje del camión líder hasta el

primer eje del tracto del camión que lo sigue. Este parámetro es esencial para evaluar los efectos en infraestructuras como puentes y carreteras. Es importante destacar que este es el parámetro que se utilizará en esta investigación como separación de camiones y se denominará como “ $S_a$ ”.

### 2.2.8 Parámetros del convoy

Sumado a las variables de interés descritas en la sección 2.2.4, el efecto del convoy de camiones sobre puentes, en términos de momentos flectores y fuerzas de corte, depende también del espaciamiento entre camiones ( $S_a$ ) descrito anteriormente y el número de camiones dentro del convoy, ya que una menor separación y un mayor número de vehículos incrementan la demanda estructural sobre el puente (Yarnold y Weidner, 2019).

## 2.3 Estado de la práctica

En Chile, el diseño de puentes está regulado principalmente por el Manual de Carreteras, elaborado por el MOP. Este manual, en su Volumen 3, Capítulo 3.1000, titulado "*Puentes y Estructuras Afines*", establece especificaciones técnicas para el diseño, construcción y mantenimiento de estas estructuras. En la sección 3.1003, "*Disposiciones y Recomendaciones de Diseño*", sugiere ceñirse a las especificaciones de la "Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition, 2002" o, como alternativa, a las disposiciones de la norma "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6ª Edición, 2012", o versiones posteriores. Aunque no se exige explícitamente el uso de una norma en particular, la práctica común en Chile muestra que los puentes de administración pública suelen diseñarse siguiendo AASHTO (2002), mientras que para los puentes concesionados se utiliza AASHTO (2012) o ediciones más recientes.

La Figura 2.3 presenta un diagrama de flujo general del proceso de diseño de puentes según la metodología AASHTO, destacando pasos clave como la determinación de cargas, combinaciones de carga y diseño de elementos estructurales. Se señala particularmente la estimación de la carga viva (LL) como un punto crítico del proceso y que esta investigación busca aportar con la comparación con demandas de convoyes de camiones.

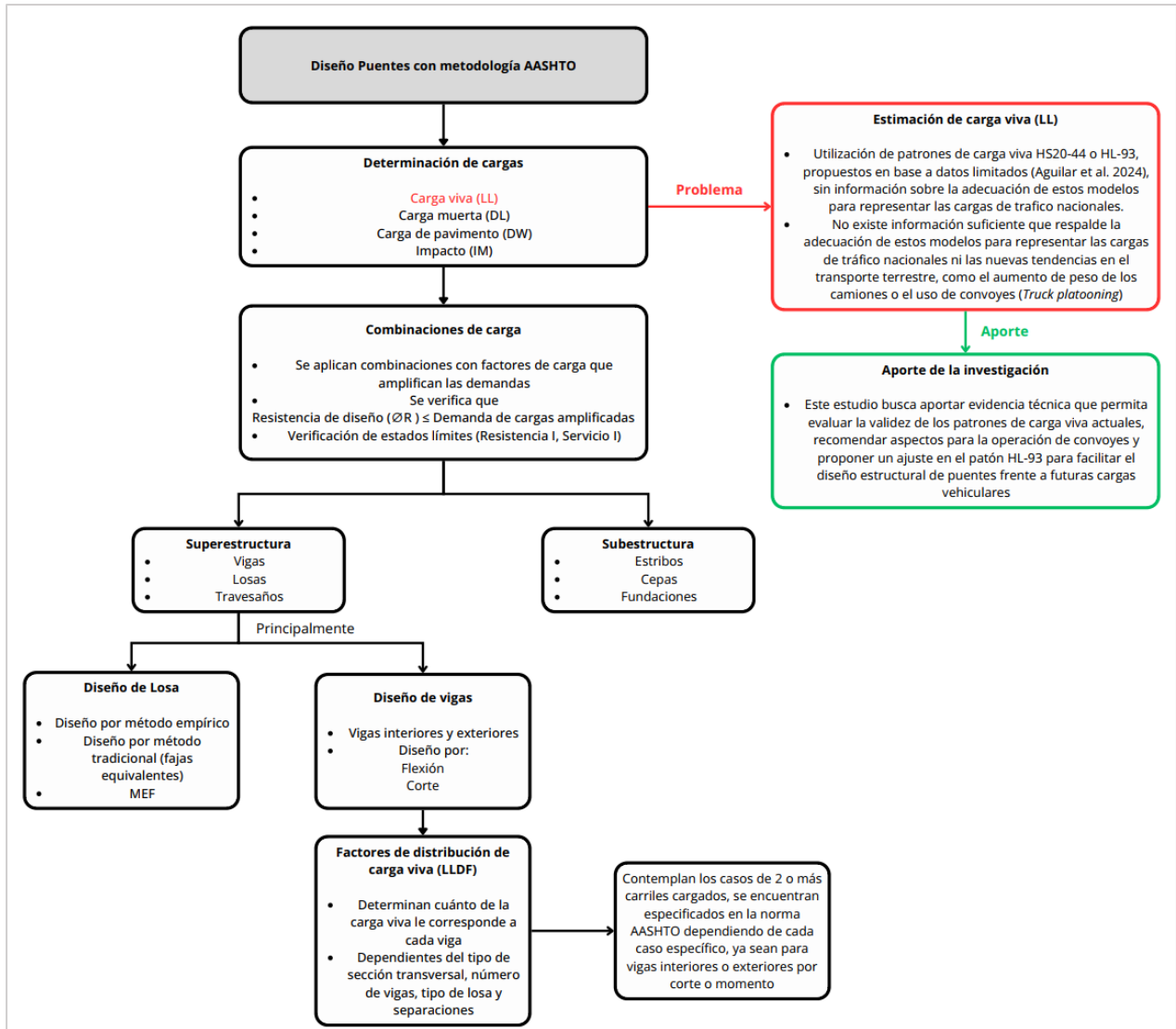


Figura 2.3 Diagrama de flujo simplificado del proceso de diseño de puentes con metodología AASHTO.

### 2.3.1 Camión de diseño y patrones de carga

Un patrón de carga es un modelo de referencia utilizado en ingeniería estructural para representar las cargas que actúan sobre un puente debido al tránsito real de vehículos. De acuerdo con el MC Vol 3. (2023), en Chile, los puentes pueden ser diseñados con el patrón HS20-44, incrementadas sus cargas en 20% (denominado en este documento como HS20-44+20% donde el 20% corresponde al factor MOP) o se puede utilizar como alternativa el patrón de carga HL-93.

De acuerdo con la normativa AASHTO (2012), se establece que el patrón de carga vehicular HL-93 para las calzadas de puentes o estructuras incidentales consistirá en una combinación del camión de diseño o tándem de diseño y la carga de carril o faja. A diferencia del patrón de carga vehicular HS20-44 definido en la normativa AASHTO (2002), el patrón HL-93 incluye combinaciones como camión/carril y tándem/carril, proporcionando un enfoque más amplio para evaluar las demandas estructurales.

A continuación, se detallan las características de ambos patrones de carga vehiculares según las especificaciones de AASHTO.

- HL-93: Camión estándar HS20 y carga uniforme de faja. Tándem militar de dos ejes y carga uniforme de faja.
- HS20-44: Camión estándar HS20. Tándem militar de dos ejes. Carga de faja.

En la Figura 2.4 se presenta las características del camión de diseño estándar HS20 y en la Figura 2.5 se detallan los patrones de carga viva anteriormente mencionados principalmente para puentes simplemente apoyados.

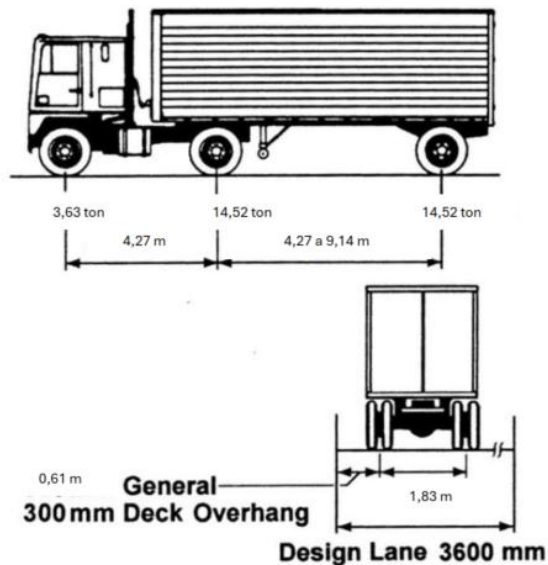


Figura 2.4 Características del camión de diseño HS20 (AASHTO (2012)).

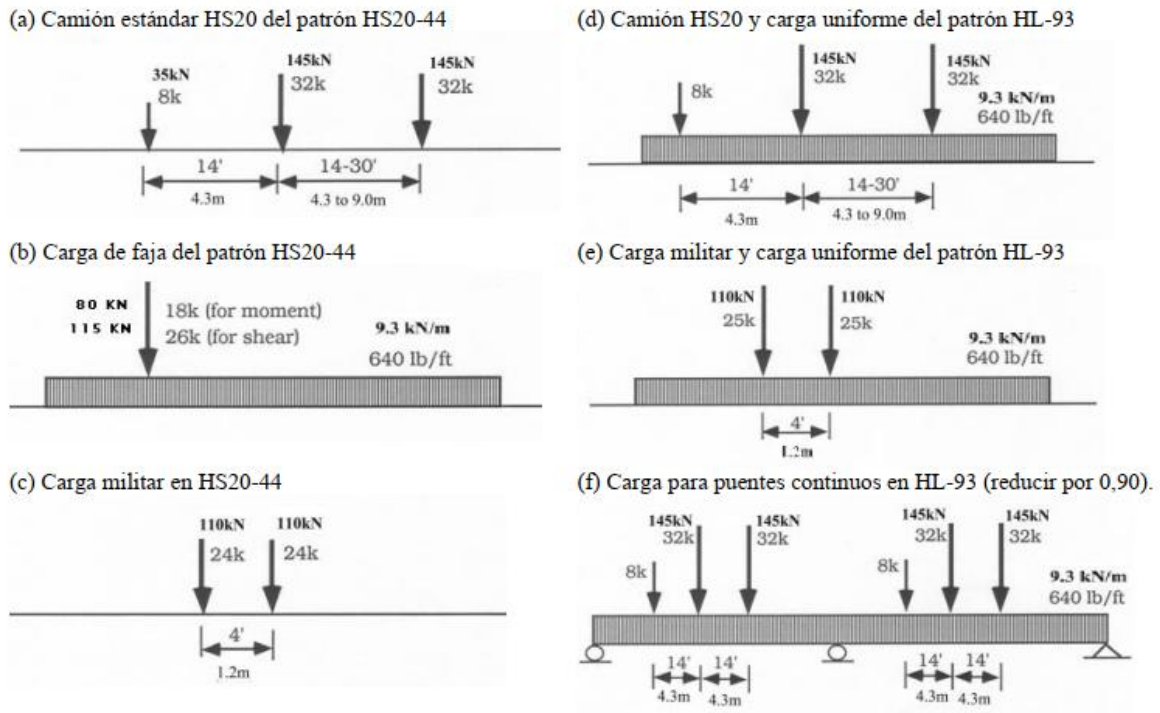


Figura 2.5 Patrones de carga viva provenientes de EE. UU: HS20-44 (a-c) y HL-93 (d-f) (Aguilar *et al.* (2023)).

### 2.3.2 Clasificación vehicular

El MOP implementa un sistema de clasificación vehicular que organiza los vehículos según características específicas, como el número de ejes, el tipo de eje y el tipo de rodado. Existen 58 tipos de vehículos en esta clasificación y se nombran principalmente de acuerdo con su número de ejes. Una descripción más completa se puede encontrar en Marchini (2024) y Ortiz de la Maza (2024).

Para esta investigación se emplearán los camiones más representativos y comunes en Chile, identificados como 520 y 690 (Ortiz de la Maza (2024)), y adicionará a este estudio el camión tipo 450.

## 2.4 Estado del arte

A lo largo de los años, diversos autores han estudiado los efectos de convoyes de camiones, especialmente desde el año 2019 hasta la actualidad, comparando sus efectos con los patrones de carga HS20-44 y HL-93. Las investigaciones realizadas han identificado puntos clave que se detallan a continuación y que constituyen antecedentes relevantes para el desarrollo de esta investigación.

### 2.4.1 Número de camiones y espaciamento en el convoy

El número de camiones y su espaciamento son considerados como parámetros críticos dentro de la configuración de un convoy de camiones (Tohme y Yarnold, 2020). Yarnold y Weidner (2019) analizaron los efectos de convoyes de camiones en puentes de vigas de acero. En su estudio, realizaron pruebas con convoyes de dos, tres y cuatro camiones C5<sup>1</sup>, espaciados a 6.1, 7.6, 9.1, 10.7 y 12.2 m. Por su parte, Sayed *et al.* (2020) evaluaron los efectos del *Truck platooning* en la preservación de puentes. Llevaron a cabo pruebas con convoyes de dos, tres y cinco camiones SU4<sup>2</sup> espaciados a 4.6, 9.1 y 18.3 metros. Tohme y Yarnold (2020) analizaron los efectos de los convoyes de camiones autónomos en puentes de acero. Sus pruebas incluyeron convoyes de dos, tres y cuatro camiones C5, con espaciamientos de 6 y 12 metros.

Ling *et al.* (2022a) investigaron el impacto dinámico del *Truck platooning* en puentes carreteros. Su análisis involucró convoyes de uno a seis y hasta diez camiones C5 de Florida, así como camiones chinos y europeos de cinco ejes, con espaciamientos que iban desde 2 hasta 15 metros. Finalmente, Ling *et al.* (2022b) estudiaron el efecto de las cargas del *Truck platooning* en puentes y estrategias de carga. En este estudio, se realizaron pruebas con convoyes de dos a seis camiones chinos con distintos pesos brutos (55, 42.5, 43 y 49 ton), espaciados a 4, 5, 10, 15, 20 y 25 m.

A partir de esta revisión, se establecieron los espaciamientos entre camiones para los convoyes propuestos en esta investigación.

<sup>1</sup> camiones de carga con un peso bruto de 36.6 toneladas y 5 ejes.

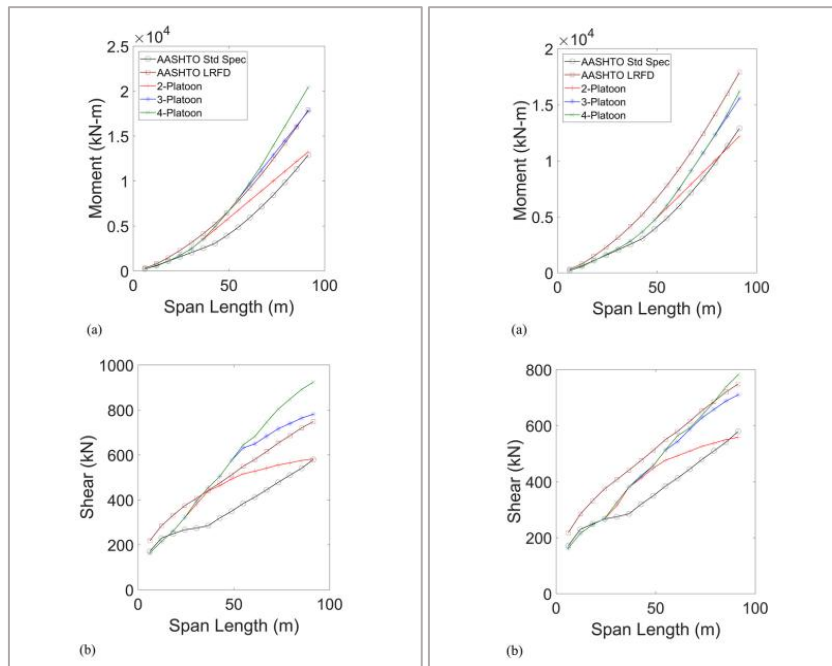
<sup>2</sup> camiones *Single Unit* con un peso bruto de 35 toneladas, una longitud de 9.1 metros y 4 ejes.

### 2.4.2 Demandas estructurales por convoyes de camiones extranjeros

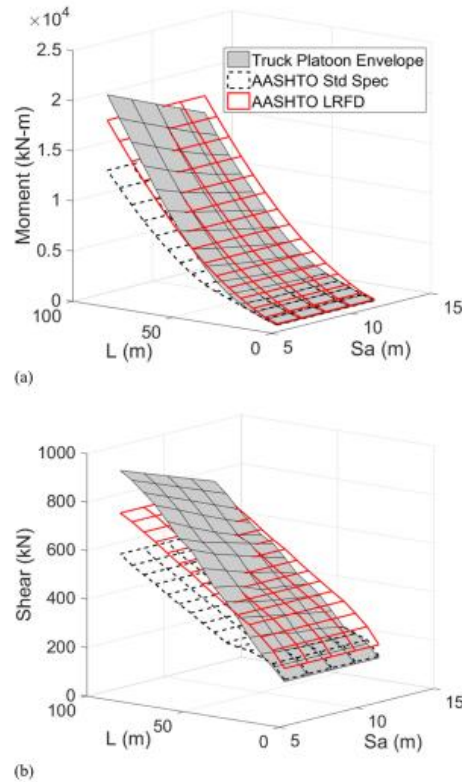
Luego de una revisión general de las investigaciones en años anteriores, es posible afirmar que los momentos y las fuerzas cortantes que producen los convoyes de camiones, aumentan en gran medida con la disminución de la separación entre camiones y el aumento del número de estos que se encuentren dentro del convoy.

En la mayoría de los estudios, los patrones de carga de AASHTO subestiman las demandas estructurales de los convoyes de camiones. Esto se debe a que AASHTO no considera la distribución de carga altamente concentrada y el impacto dinámico adicional generado por los convoyes. En algunos casos específicos, AASHTO puede sobrestimar la carga cuando el espaciamiento entre camiones es mayor, permitiendo una mejor distribución de la carga sobre el puente.

En la Figura 2.6 y la Figura 2.7 se puede evidenciar lo anteriormente descrito con investigaciones realizadas en el año 2019.



**Figura 2.6 Resultados para un puente de vano simple, (a) Flexión positiva y (b) Fuerza de corte. Convoy con camiones C5 separados a 6.1 m (izquierda) y 12.2 m (derecha) (Yarnold y Weidner, 2019).**



**Figura 2.7 Resultados combinados para un puente de vano simple, (a) Flexión positiva y (b) Fuerza de corte,  $S_a$  (separación entre camiones),  $L$  (longitud del vano) (Yarnold y Weidner, 2019).**

De acuerdo con investigaciones de Sayed, *et al.* (2020) para un tramo simple de 61 m, el aumento en el momento máximo debido a la carga viva a una distancia de 4.6 m es del orden del 63%, 116% y 137% para dos, tres y cinco convoyes de camiones, respectivamente, en comparación con un solo camión. A medida que aumenta la distancia entre los camiones, el aumento porcentual disminuye rápidamente. Los elementos de la superestructura (por ejemplo, losas, vigas) estarían sujetos a momentos de flectores y esfuerzos de corte más altos con el convoy de camiones en comparación con los modelos de clasificación de carga de puentes comúnmente utilizados en la práctica. A continuación, en la Figura 2.8 se muestran las aseveraciones anteriormente descritas.

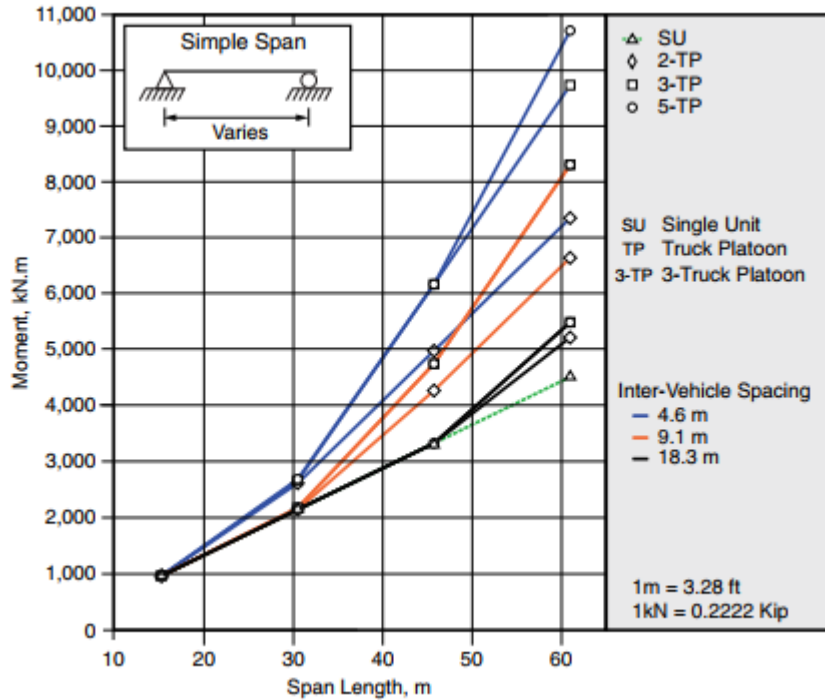


Figura 2.8 Momentos para un puente de vano simple variando el espaciamiento y el número de camiones tipo SU4 (Sayed, *et al.* (2020)).

Por otro lado, otros autores en años posteriores analizan el fenómeno de resonancia en los puentes producto de la utilización de convoyes de camiones automatizados (ATP), señalan que el método tradicional de reducir el efecto de carga del ATP simplemente aumentando el espacio entre camiones no es del todo fiable. Se ha descubierto que se podrían inducir una serie de condiciones de resonancia del puente al combinar la velocidad normal del camión con múltiples espacios entre camiones. Esas condiciones de resonancia asociadas con un mayor espaciamiento entre camiones pueden resultar en un impacto dinámico más significativo en los puentes. Por lo tanto, para disminuir el efecto de carga general adicional del ATP, evitar la resonancia también debería ser un principio importante. Además, los DLA (*Dynamic Load Allowance*) sugeridos en los códigos de diseño de puentes actuales pueden no ser suficientemente capaces de caracterizar los efectos dinámicos provocados por el ATP (Ling *et al.*, 2022).

### 2.4.3 Criterios para el cálculo de momento y corte en puentes

Para calcular el momento flector y las fuerzas de corte generadas por un convoy de camiones sobre un puente modelado como una viga simplemente apoyada, se considera la contribución de cada eje

cargado de los camiones en función de su posición sobre el vano, superponiendo los efectos individuales de estas cargas aplicadas para obtener las demandas estructurales generadas por el convoy en su totalidad.

El procedimiento implica iterar las posiciones de una distribución de cargas conocida a lo largo del vano, encontrando la posición más desfavorable, es decir, aquella que maximiza los valores de momento y corte, tal como se describe en los estudios de Ling *et al.* (2022) y Tohme y Yarnold (2020), quienes enfatizan que la iteración de las posiciones de las cargas es fundamental para identificar las máximas demandas estructurales y evaluar los efectos de los convoyes.

En resumen, dada una luz de puente conocida y dada una distribución de camiones conocida, se posiciona esta distribución de fuerzas en toda la longitud del puente encontrando el máximo valor de corte y momento. Para ello, se resuelve cada carga puntual por separado, se aplica superposición de efectos de estas cargas y se itera la posición del convoy en todas las posiciones dentro de la luz del puente.

Además, Tohme y Weidner (2019) destacaron tres parámetros clave en el diseño estructural considerando cargas de convoyes: (i) la configuración del puente (vano simple o continuo), (ii) la longitud del vano y (iii) la disposición del convoy (número de camiones y separación entre ellos).

## 2.5 Conclusiones

En este capítulo se analizaron las características fundamentales de los convoyes de camiones automatizados, incluyendo los parámetros que influyen en las demandas estructurales que generan, las normativas nacionales e internacionales vigentes y estudios previos realizados por otros investigadores. Estos estudios han destacado la importancia de continuar investigando aspectos clave como la multipresencia (presencia simultánea de convoyes en vías adyacentes), los fenómenos de resonancia en puentes, el impacto de las velocidades y los efectos de estas nuevas cargas sobre el diseño de componentes estructurales.

La brecha de conocimiento que esta investigación busca abordar está relacionada principalmente con el contexto geográfico. Mientras que en otros países se han desarrollado estudios sobre convoyes de camiones automatizados, no existen análisis de estos efectos en el contexto chileno. Este trabajo se enfoca específicamente en evaluar el impacto de los convoyes de camiones chilenos sobre las demandas estructurales en puentes simplemente apoyados, un tipo de infraestructura común en el país. De este modo, esta investigación busca aportar una primera aproximación sobre el tema, generando conocimiento relevante y específico para el territorio nacional.

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

### 3.1 Introducción

En este capítulo se detalla la metodología utilizada para cumplir con los objetivos específicos de la investigación. Se presentan los procedimientos y herramientas utilizadas para el cálculo de momentos flectores y fuerzas de corte generados por convoyes de camiones. Además, se describen las etapas del estudio que permiten evaluar las demandas estructurales y proponer configuraciones óptimas dentro del contexto normativo vigente.

### 3.2 Metodología general

La metodología de esta investigación se basa en cuatro procesos principales. Primero, se realizó un levantamiento de información, recopilando datos y características sobre los de camiones estudiados y que son relevantes en el contexto nacional. Luego, se realizó una evaluación de las demandas estructurales, calculando momentos flectores y fuerzas de corte considerando distintas configuraciones de convoyes y puentes con vanos entre 10 y 70 metros. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad y comparación con patrones de diseño (HS20-44+20% y HL-93), identificando si las demandas estructurales generadas por los convoyes superan los límites normativos. Finalmente, se propone un ajuste al patrón HL-93, recomendando un incremento porcentual que cubra las demandas generadas por los convoyes analizados. En la Figura 3.1 se presenta un diagrama general de la metodología empleada en esta investigación.

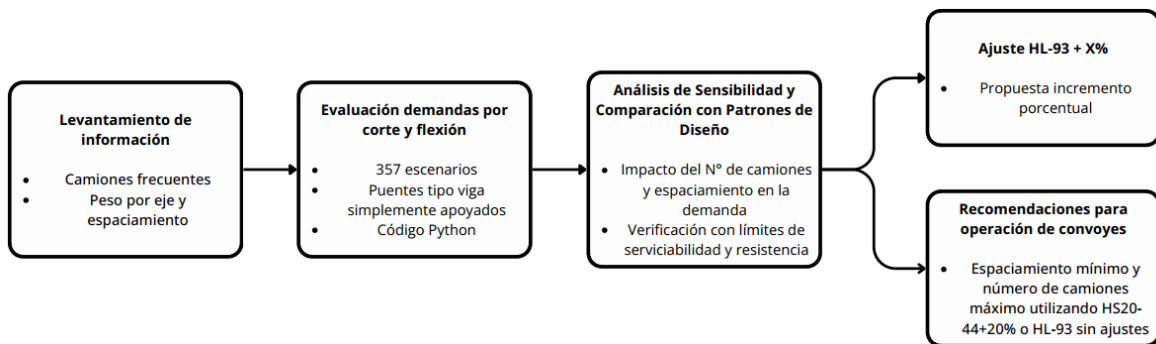


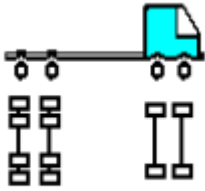

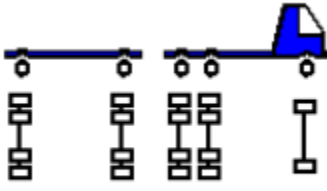

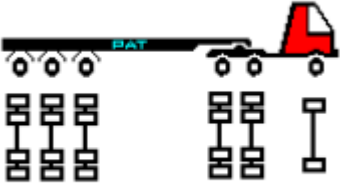

Figura 3.1 Diagrama de flujo de metodología general de la investigación.

### 3.3 Levantamiento de información

#### 3.3.1 Camiones de estudio

De acuerdo con Ortiz de la Maza (2024), algunos de los camiones más frecuentes en las rutas nacionales son los camiones tipo 520 y 690, según clasificación MOP. Se puede anticipar que, si la tecnología de convoy de camiones es implementada, estos vehículos sean potenciales integrantes de convoyes, por lo tanto, se analizarán y caracterizarán dichos camiones. Además, en la experiencia del autor y supervisor, el vehículo 450 es de uso frecuente en transporte de áridos, material de relleno y escombros. Así, se definen tres tipos de convoy en este estudio: (1) con el propósito de formar convoyes de áridos (camiones 450); transporte forestal (camiones 520); y, fletes multipropósitos (camiones 690). En la Tabla 3.1 se presentan ejemplos de los vehículos de interés.

Tabla 3.1 Camiones de estudio candidatos a formar convoyes.

Clasificación MOP	Tipo de convoy	Camión real
 <p>450</p>	Áridos	
 <p>520</p>	Forestal	
 <p>690</p>	Multipropósito	

Se busca identificar los fabricantes y modelos más frecuentes, el peso bruto total (PBT), la cantidad de ejes, el peso por eje y los espaciamientos a través de: (i) Información recolectada en las plazas de pesaje del Departamento de Pesaje de la Dirección de Vialidad del MOP (ii) revisión de modelos de camiones a la venta en el mercado nacional; (iii) de obtención y análisis de imágenes o videos pausados (fotometría) de estos tipos de camiones que circulan dentro de la región del Bio-Bio; y (iv) mediciones *in-situ* de los espaciamientos entre ejes de los camiones.

De esta forma, se tendrán camiones hipotéticos que pueden ser eventualmente utilizados como convoy en un futuro.

### **3.3.2 Obtención del peso por eje de camiones**

Se dispuso de datos recopilados de ocho plazas de pesaje distribuidas a lo largo de Chile, los cuales permitieron determinar el peso real por eje de los camiones analizados. Para este estudio, se seleccionaron camiones cuyo peso bruto total (PBT) se aproxima al límite legal en Chile de 45 toneladas, establecido por el Decreto Supremo MOP N°158 de 1980, en el caso de los camiones tipo 520 y 690. Por otro lado, para los camiones tipo 450, el máximo PBT registrado fue de 32 toneladas, por lo que este valor fue considerado como la carga legal más desfavorable para este tipo de vehículo.

A partir de una muestra representativa de 156 camiones cercanos al límite legal de peso para los tipos 520 y 690, se calculó el peso promedio por eje de cada vehículo. La Figura 3.2 ilustra este proceso de análisis aplicado al camión tipo 520. Para los camiones tipo 450, se trabajó con una muestra representativa de 18 camiones, correspondientes a los máximos PBT identificados en la base de datos para esta categoría.

N°	ID	PATENTE	FECHA	HORA	VEL.	LARGO	TIPO	PLAZA	PESO EJE 1	PESO EJE 2	PESO EJE 3	PESO EJE 4	PESO EJE 5	PBT
1	1925	RHSX72	01/01/22	09:48	3,8	16,9	520	AN-12	6260	10590	7300	10230	10030	44410
2	9016	RHTL71	01/02/22	09:48	4,3	17,8	520	AN-12	6250	11090	6850	10610	9890	44690
3	9021	RHTL76	01/02/22	09:54	4,6	18,1	520	AN-12	6370	10460	7630	10860	10190	45510
4	9072	DHZR54	01/02/22	11:55	4,8	19,3	520	AN-12	5890	8650	8460	10720	11010	44730
5	9097	FVWS61	01/02/22	13:04	2,8	16,9	520	AN-12	5510	8790	8760	11760	10440	45260
6	9143	HFVR48	01/02/22	14:49	3,7	20,1	520	AN-12	6640	8750	8800	11020	10670	45880
7	9166	HFVR48	01/02/22	15:47	3,1	20,4	520	AN-12	6280	8800	8760	10990	10640	45470
8	5110	RPDB61	01/04/22	01:14	2,9	18,9	520	AN-12	6620	9290	8220	10450	10280	44860
9	5121	RRLS63	01/04/22	01:45	2,9	18,8	520	AN-12	6920	9020	9160	9950	9880	44930
10	5123	RRLS63	01/04/22	01:47	3,4	20,6	520	AN-12	6450	9180	9070	9950	9890	44540
11	5133	LWVC23	01/04/22	02:27	3	19,5	520	AN-12	7370	9140	9230	9150	9750	44640
⋮									⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
150	680	ZH9829	01/10/22	00:51	3,8	21,7	520	AN-12	5060	8710	8940	10410	10300	43420
151	801	RHSX72	01/10/22	07:18	2,7	17,9	520	AN-12	6100	11050	7000	9970	9780	43900
152	814	HLRC80	01/10/22	07:53	3,8	19,3	520	AN-12	5220	10330	6910	10540	10590	43590
153	839	JJVD89	01/10/22	09:09	3,4	14,7	520	AN-12	5260	9680	6220	11020	11000	43180
154	855	RHTL19	01/10/22	10:12	2,9	17,1	520	AN-12	5700	10920	6950	10470	10120	44160
155	908	RHSX74	01/10/22	13:16	2,6	18,5	520	AN-12	5930	10880	6590	10300	10400	43900
156	911	PXWV75	01/10/22	13:26	5,6	16,4	520	AN-12	5750	8150	7750	10930	10660	43240
<b>PROMEDIO (kgf)</b>									6382	8923	8056	10252	10197	43808
<b>Camión 520, 5 ejes. PBT ≈ 44 tonf</b>									↓	↓	↓	↓	↓	
									6,4 tonf	9 tonf	8,1 tonf	10,3 tonf	10,2 tonf	

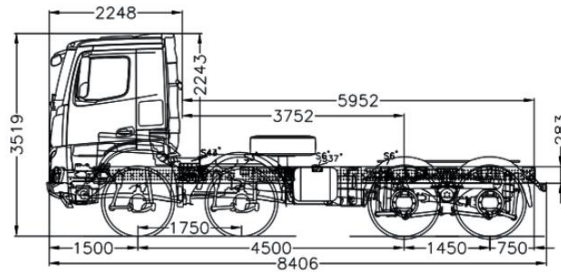
Figura 3.2 Ejemplo de distribución y cálculo del peso por eje real de camiones a partir de datos de plazas de pesaje.

### 3.3.3 Determinación del espaciamiento entre ejes

#### 3.3.3.1 Revisión de camiones en el mercado nacional

Se llevó a cabo una revisión de los modelos de camiones disponibles en el mercado nacional. Esta revisión incluyó el análisis de fichas técnicas que especifican el espaciamiento entre ejes de diversos tipos de tractos, de remolques forestales y semirremolques. Como resultado, se estipula que el modelo de camión 450 corresponde al camión Mercedes-Benz Arocs 4848, cuyo espaciamiento entre ejes se obtuvo a partir de esta revisión. En la Figura 3.3 se especifica las dimensiones encontradas en la ficha técnica de este modelo de camión.

PESO	
Peso eje delantero	(1) 3.842 Kg.; (2) 3.330 Kg.
Peso eje trasero	(1) 2.121 Kg.; (2) 2.121 Kg.
Tara	11.414 Kg.
Capacidad eje delantero	(1) 9.000 Kg.; (2) 9.000 Kg.
Capacidad tandem trasero	40.000 Kg.
Carga útil	46.586 Kg.
Peso bruto vehicular	*58.000 Kg.
Peso bruto vehicular combinado	120.000 Kg.



**Figura 3.3** Ficha técnica camión Mercedes Benz AROCS 4848 K 8X4/4 4500 SEG RET HEAVY DUTY, medidas en mm.

### 3.3.3.2 Fotometría

Dado que los datos de las plazas de pesaje no incluyen información sobre el espaciamiento entre ejes de los camiones, se decide complementar este aspecto mediante la captura y análisis de fotografías de estos vehículos pesados. Utilizando software profesional de dibujo técnico como AutoCAD, y tomando un objeto de la imagen como referencia, se determinaron las longitudes de los espaciamentos entre ejes de las fotografías de los camiones. A partir de una muestra representativa de 15 fotografías por tipo de camión (520 y 690), fue posible calcular estos espaciamentos entre ejes con mayor precisión. La Figura 3.4 muestra un ejemplo del proceso realizado.



Figura 3.4 Análisis fotométrico para determinar espaciamiento entre ejes utilizando AutoCAD.

### 3.3.3.3 Mediciones en terreno

Además del análisis fotométrico, se realizaron mediciones en terreno para los camiones tipo 520 (forestales) y tipo 690 (multipropósito). Estas mediciones se llevaron a cabo utilizando una cinta métrica de 50 metros de largo para estimar las distancias entre ejes. La Figura 3.5 documenta esta actividad, evidenciando el procedimiento empleado.



Figura 3.5 Mediciones *in-situ* de camiones, Agosto – Octubre (2024)

### **3.4 Evaluación de las demandas por corte y flexión generadas por convoyes**

#### **3.4.1 Puentes seleccionados**

Se seleccionaron puentes representativos del tipo vigas simplemente apoyadas, abarcando estructuras menores y medianas, de acuerdo con las definiciones del MC Vol. 3 (2023), dichos puentes tienen luces de vano desde 10 hasta 70 metros de longitud, permitiendo así evaluar una amplia gama de escenarios de carga.

En este estudio, los puentes se modelan como una viga simplemente apoyada, siguiendo el método de diseño de puentes establecido por AASHTO, en donde los momentos flectores y las fuerzas de corte por carga viva se calculan considerando un único carril cargado para que posteriormente en una etapa de diseño se apliquen factores de distribución (tabla 4.6.2.2.2b-1, AASHTO (2012)) y así poder estimar la carga que toma cada viga de la estructura, ya sean vigas interiores o exteriores. Asimismo, los factores de distribución en vigas, tanto para flexión como para corte, también incluyen escenarios con la presencia de dos o más carriles cargados.

Es importante destacar que el análisis no se centra en una viga específica del puente, sino en la más desfavorable, cuyo diseño controla el resto de las vigas que componen el puente. Además, esta metodología permite evaluar múltiples escenarios sin la necesidad de desarrollar una gran cantidad de modelos de elementos finitos complejos para cada configuración de convoy, optimizando el proceso de análisis estructural.

### 3.4.2 Tipos de convoyes y escenarios de carga

Para evaluar los efectos de los convoyes de áridos, forestales y multipropósitos sobre los puentes, se definieron un total de 357 escenarios distintos. El estudio se llevó a cabo considerando únicamente una vía cargada y realizando variaciones en los siguientes parámetros:

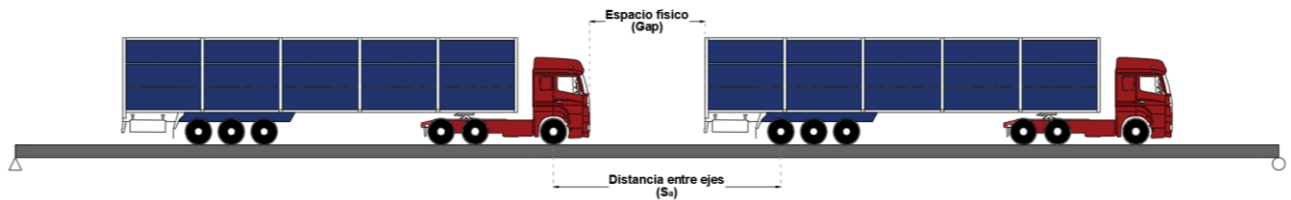
- Cantidad de camiones por convoy : 1, 2, 3, 4 y 5 camiones.
- Espaciamiento entre camiones : 6, 9, 12 y 15 m.
- Longitud de la luz del puente : 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 m.
- Tipo de convoy : Convoyes de camiones tipo 450, 520 y 690, previamente caracterizados.

En la Tabla 3.2 se presentan los 119 escenarios de carga evaluados por cada tipo de camión, organizados según la cantidad de camiones por convoy, la longitud de la luz del puente y, cuando corresponde, la separación entre los camiones. Para cada combinación se asignó un identificador único denominado “escenario”. Esta tabla permite visualizar de forma sistemática todas las configuraciones estructurales analizadas, las cuales fueron aplicadas posteriormente a los tres tipos de camiones caracterizados (áridos 450, forestales 520 y multipropósito 690), dando origen a un total de 357 escenarios distintos considerados en el estudio.

**Tabla 3.2 Combinaciones de escenarios de carga por tipo de camión.**

1 camión			2 camiones			3 camiones			4 camiones			5 camiones			
Luz puente	Separación	Escenario	Luz puente	Separación	Escenario	Luz puente	Separación	Escenario	Luz puente	Separación	Escenario	Luz puente	Separación	Escenario	
10 m	NA	1	10 m	6 m	8	10 m	6 m	36	10 m	6 m	64	10 m	6 m	92	
20 m	NA	2		9 m	9		9 m	37		9 m	65		9 m	93	
30 m	NA	3		12 m	10		12 m	38		12 m	66		12 m	94	
40 m	NA	4		15 m	11		15 m	39		15 m	67		15 m	95	
50 m	NA	5	20 m	6 m	12	20 m	6 m	40	20 m	6 m	68	20 m	6 m	96	
60 m	NA	6		9 m	13		9 m	41		9 m	69		9 m	97	
70 m	NA	7		12 m	14		12 m	42		12 m	70		12 m	98	
				15 m	15		15 m	43		15 m	71		15 m	99	
119 escenarios * 3 tipos de camiones = 357 escenarios totales	30 m		30 m	6 m	16	30 m	6 m	44	30 m	6 m	72	30 m	6 m	100	
				9 m	17		9 m	45		9 m	73		9 m	101	
				12 m	18		12 m	46		12 m	74		12 m	102	
				15 m	19		15 m	47		15 m	75		15 m	103	
	40 m		40 m	40 m	6 m	20	40 m	6 m	48	40 m	6 m	76	40 m	6 m	104
					9 m	21		9 m	49		9 m	77		9 m	105
					12 m	22		12 m	50		12 m	78		12 m	106
					15 m	23		15 m	51		15 m	79		15 m	107
	50 m		50 m	50 m	6 m	24	50 m	6 m	52	50 m	6 m	80	50 m	6 m	108
					9 m	25		9 m	53		9 m	81		9 m	109
					12 m	26		12 m	54		12 m	82		12 m	110
					15 m	27		15 m	55		15 m	83		15 m	111
	60 m		60 m	60 m	6 m	28	60 m	6 m	56	60 m	6 m	84	60 m	6 m	112
					9 m	29		9 m	57		9 m	85		9 m	113
					12 m	30		12 m	58		12 m	86		12 m	114
					15 m	31		15 m	59		15 m	87		15 m	115
	70 m		70 m	70 m	6 m	32	70 m	6 m	60	70 m	6 m	88	70 m	6 m	116
					9 m	33		9 m	61		9 m	89		9 m	117
					12 m	34		12 m	62		12 m	90		12 m	118
					15 m	35		15 m	63		15 m	91		15 m	119

Cabe señalar que el espaciamiento entre camiones anteriormente señalado corresponde al parámetro “*inter-truck spacing*” (véase Figura 3.6, valor  $S_a$ ). Asimismo, la adopción de los espaciamientos utilizados en este estudio se fundamenta en la revisión bibliográfica realizada en el capítulo 2 de esta investigación.



**Figura 3.6 Diferencia entre espacio físico (Gap) y espaciamiento entre ejes de camiones ( $S_a$ ) para 2 camiones 690.**

La evaluación se centró en dos demandas estructurales fundamentales generadas por los convoyes:

- Momentos flectores máximos
- Fuerzas de corte máximas

Para obtener estos valores, se utilizó un código de análisis de cargas móviles desarrollado en lenguaje de programación Python con la ayuda del software Jupyter Notebook (véase Anexo 3.1). Este código obtiene los momentos y cortes máximos para cada escenario de convoyes. Las cargas puntuales, consideradas como cargas móviles, se desplazan en incrementos de 0.10 m a lo largo de toda la luz del puente (desde 0 m hasta L, considerando L como la luz total de cada puente) y se extrae el momento o corte mayor generado por la posición del convoy más desfavorable que produzca las mayores demandas estructurales (véase sección 2.4.3). La Figura 3.7 ilustra cómo el código interpreta y procesa las cargas de los convoyes. Su funcionamiento depende de la longitud del puente: en luces mayores, el convoy completo puede ser considerado en el análisis, mientras que, en luces más cortas, se incluyen únicamente algunas cargas puntuales debido a las limitaciones espaciales. No obstante, el código siempre identificó las cargas y posiciones que generaban la máxima demanda estructural en cualquier escenario.

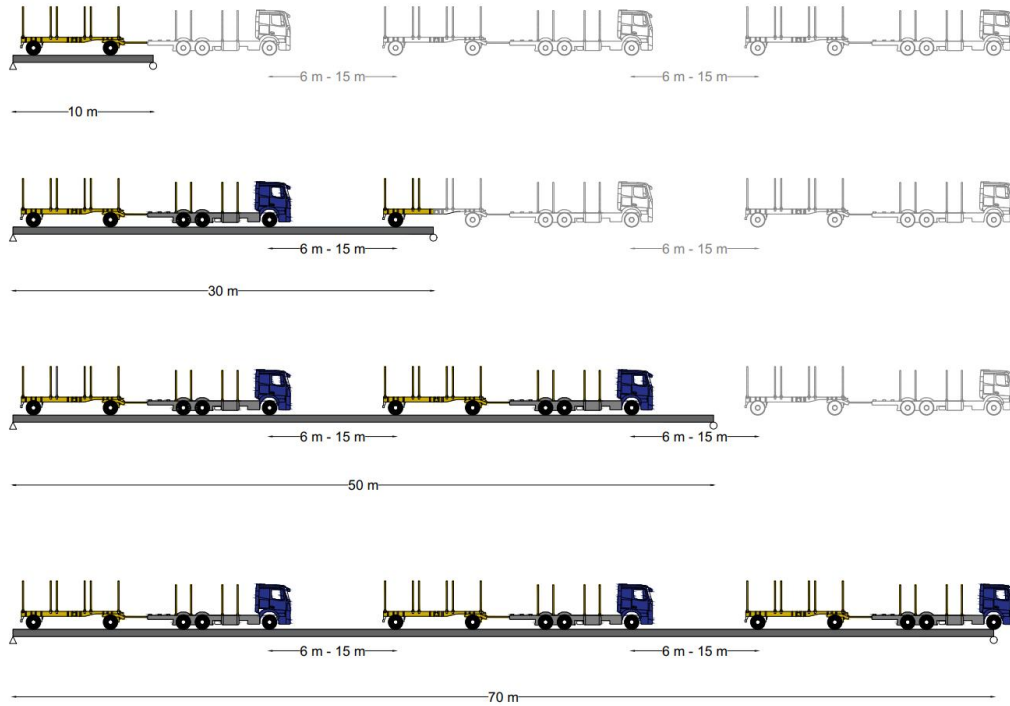


Figura 3.7 Análisis estructural de cargas móviles en código desarrollado en Python (Lab. Prof. Aguilar).

### 3.5 Análisis de Sensibilidad y Comparación con Patrones de diseño

#### 3.5.1 Análisis de sensibilidad para determinar límites óptimos

Se realizaron análisis de sensibilidad en el software Excel, considerando las siguientes variables clave:

- Número de camiones dentro del convoy: Evaluar el efecto de diferentes cantidades de camiones en las demandas estructurales (uno a cinco camiones).
- Espaciamento entre vehículos: Analizar el impacto de diversas distancias entre camiones en las demandas estructurales (6, 9, 12 y 15 m).

Estos análisis permitieron identificar configuraciones óptimas de espaciamentos y número de camiones dentro de los convoyes.

### 3.5.2 Relaciones de demandas estructurales

Se compararon las demandas estructurales generadas por los convoyes con las asociadas a los patrones de diseño HS20-44 y HL-93, calculando las relaciones de momentos flectores y fuerzas de corte para cada escenario analizado. Es importante destacar que el estudio se limitó a puentes representativos con luces de 10, 30, 50 y 70 metros.

Relación de momentos:

$$R_M = \frac{M_{\text{convoy}}}{M_{\text{diseño}}} \quad (3.1)$$

$M_{\text{convoy}}$  : Momento máximo generado por el convoy analizado.

$M_{\text{diseño}}$  : Momento máximo generado por patrones de carga (HS20-44+20% o HL-93).

Relación de fuerzas de corte:

$$R_V = \frac{V_{\text{convoy}}}{V_{\text{diseño}}} \quad (3.2)$$

$V_{\text{convoy}}$  : Fuerza de corte máxima generada por el convoy analizado.

$V_{\text{diseño}}$  : Fuerza de corte máxima generada por patrones de carga (HS20-44+20% o HL-93).

El criterio utilizado para evaluar la viabilidad de los convoyes fue que las relaciones  $R_M$  y  $R_V$  no superaran el valor de 1, es decir, que no sobrepasen el límite de Servicio I, asegurando funcionalidad y durabilidad de la estructura.

Si  $R_M > 1$  o  $R_V > 1$ , el convoy genera demandas estructurales superiores a las previstas en el diseño, lo que indica que el convoy no es apropiado para circular por el puente en cuestión.

Si  $R_M \leq 1$  o  $R_V \leq 1$ , las demandas estructurales generadas por el convoy están dentro de los límites de diseño, lo que indica que el convoy es apropiado para su circulación.

Estos indicadores proporcionan una herramienta clara para evaluar la compatibilidad de los convoyes, permitiendo identificar configuraciones que cumplen con los límites de servicio (1.0) y resistencia (1.75), así como aquellas que requieren ajustes para evitar que excedan estos límites de diseño. Este análisis se desarrolla conforme a las combinaciones de carga establecidas en la sección 2.2.5.

### **3.6 Ajuste del patrón de carga HL-93**

Para permitir la circulación de los convoyes estudiados en puentes simplemente apoyados con longitudes de luz de hasta 70 m, se evaluó el incremento porcentual necesario en el patrón de carga HL-93.

El análisis se centró en los casos más representativos, considerando incrementos razonables en el patrón de carga que aseguren que las demandas generadas por los convoyes estudiados en esta investigación no superen el límite de servicio (1). Se examinaron los resultados de los análisis de sensibilidad a través de gráficos en Excel ® para identificar el incremento necesario. Mediante iteraciones manuales, se aumentó porcentualmente el patrón de carga HL-93, aplicando este ajuste tanto al camión de diseño como a la carga de faja.

### 3.7 Software

-AutoCAD ®: Se utilizó para realizar análisis fotométrico a partir de imágenes y determinar los espaciamientos entre ejes de camiones mediante dibujo técnico. Este software permitió obtener medidas precisas al emplear referencias como el diámetro de las ruedas de los camiones en las fotografías.

-Excel ®: Se utilizó para almacenar los valores de momento y corte generados, para realizar análisis de sensibilidad y visualizar los efectos de diferentes configuraciones de convoyes. Esto permitió identificar el impacto de variables como el número de camiones y el espaciamiento entre ellos en la respuesta estructural. Además, Excel fue una herramienta clave para organizar y procesar los datos recopilados de las plazas de pesaje.

-Jupyter Notebook ®: Fue utilizado para desarrollar y ejecutar el código de análisis de cargas móviles en lenguaje Python. Este entorno proporcionó herramientas para la programación y cálculo de los efectos generados por los convoyes en puentes simplemente apoyados. Además, permitió calcular efectos como momentos flectores y fuerzas de corte producidos por los patrones de carga establecidos por las normativas vigentes para distintas luces de puentes.

La Figura 3.8 presenta un pseudocódigo explicativo de la rutina empleada en esta investigación, en la cual los puentes se simplifican como vigas simplemente apoyadas. Esta representación resume las etapas principales de los códigos originales, los cuales se encuentran detallados en los Anexos 3.1. El objetivo es facilitar la comprensión del flujo general del algoritmo, desde la definición de funciones hasta la obtención de resultados máximos de momento flector y fuerza de corte.

```

INICIO
1. Definir funciones auxiliares:
  a. mapping(L, DL):
  - Genera vector de posiciones X a lo largo del puente con paso DL.
  b. shear_and_moment_diagrams(X, P, a):
  - Calcula los diagramas de corte (V) y momento flector (M) para una carga puntual P ubicada a una distancia 'a' sobre la viga.
  - Considera reacciones en los apoyos y que la carga esté dentro de la luz del puente.
  c. solveIt(L, DL, Load, Spacing, Truck_Pos):
  - Superpone efectos de múltiples cargas (representando ejes de los camiones).
  - Calcula Momento y Corte total para una posición dada del convoy.

2. Ingresar parámetros de entrada:
  - Longitud del vano del puente (L) # 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 m
  - Paso de discretización (DL) # 0.10 m
  - Vector de cargas por eje (Load) # [8.1, 9.4, 6.2, 6.3, 8.1, 9.4, 6.2, 6.3] ton (ejemplo 2 camiones 450)
  - Vector de separaciones entre ejes (Spacing) # [0, 1.45, 2.75, 1.75, 15, 1.45, 2.75, 1.75] m (separados a 15 m)

3. Generar posiciones de análisis a lo largo del puente:
  - Crear vector de discretización del puente X con función mapping
  - Crear vector de posiciones Truck_Pos que simula el movimiento del convoy a lo largo del puente

4. Inicializar matrices de resultados:
  - Matriz SumM para almacenar momentos máximos
  - Matriz SumV para almacenar fuerzas de corte máximas

5. Para cada posición del convoy sobre el puente:
  - Llamar a solveIt(...) para calcular Momento y Corte totales
  - Almacenar resultados en SumM y SumV

6. Calcular valores máximos:
  - Mmax = máximo de SumM
  - Vmax = máximo absoluto de SumV

7. Imprimir resultados:
  - Mostrar Mmax y Vmax

FIN

```

Figura 3.8 Pseudocódigo general utilizado para cálculo de demandas estructurales.

### 3.8 Conclusiones

En este capítulo se detallaron las metodologías empleadas para caracterizar los camiones candidatos a formar convoyes, calcular y evaluar las demandas estructurales generadas por estos, así como los criterios de comparación con los patrones de carga normativos. Permitiendo así, lograr los objetivos planteados de la investigación.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS

### 4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de este trabajo, los cuales permiten responder a los objetivos y metodologías planteadas previamente. Los resultados han sido estructurados para facilitar su interpretación, destacando los casos más representativos y relevantes desde el punto de vista estructural.

### 4.2 Resultados caracterización de camiones

En esta sección se presentan las características principales de los camiones seleccionados para el estudio, las cuales fueron determinadas a partir de los procesos definidos en el capítulo anterior. Los camiones tipo 450, 520 y 690, representativos de convoyes de áridos, forestales y multipropósitos respectivamente, fueron caracterizados con base en su distribución de pesos por eje y espaciamentos. Esta caracterización fue esencial para simular los escenarios de convoyes y evaluar su impacto estructural sobre los puentes.

La Tabla 4.1 presenta las longitudes totales caracterizadas para cada tipo de camión. La fila "Ejes (m)" representa la suma de los espaciamentos entre todos los ejes del vehículo, mientras que la fila "Ejes + Carrocería (m)" indica la longitud completa del camión, que incluye la suma de los espaciamentos entre ejes más la longitud física de la carrocería.

Las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 muestran de manera detallada la disposición de ejes, su espaciamiento y las cargas asociadas a cada tipo de camión.

**Tabla 4.1 Longitudes totales de camiones según configuración de ejes y carrocería.**

Longitud total	Tipo camión		
	450	520	690
Ejes (m)	5,95	16,85	14,05
Ejes + Carrocería (m)	8,71	19,25	18,51

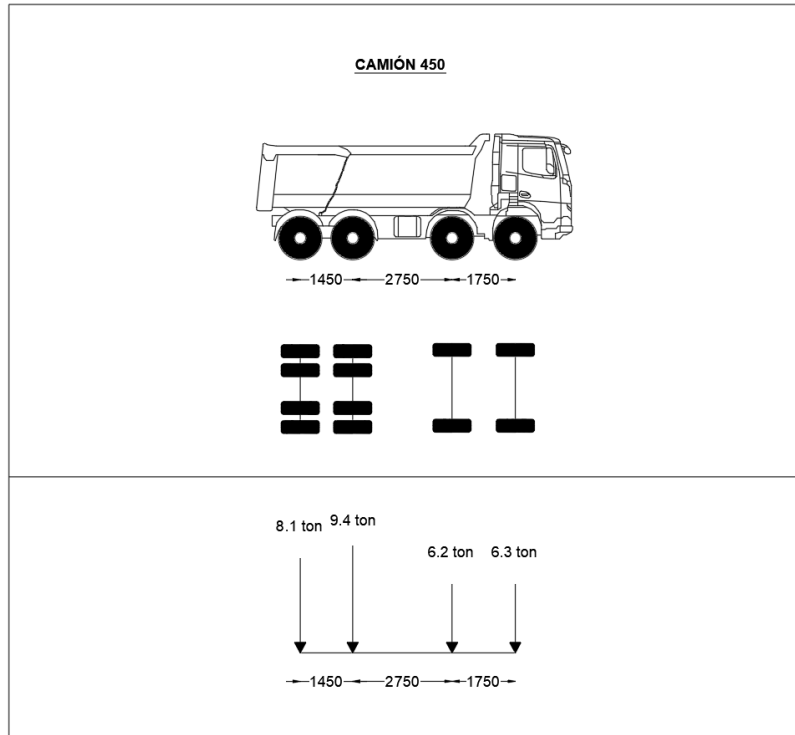


Figura 4.1 Caracterización camión 450 (áridos), espaciamientos en mm.

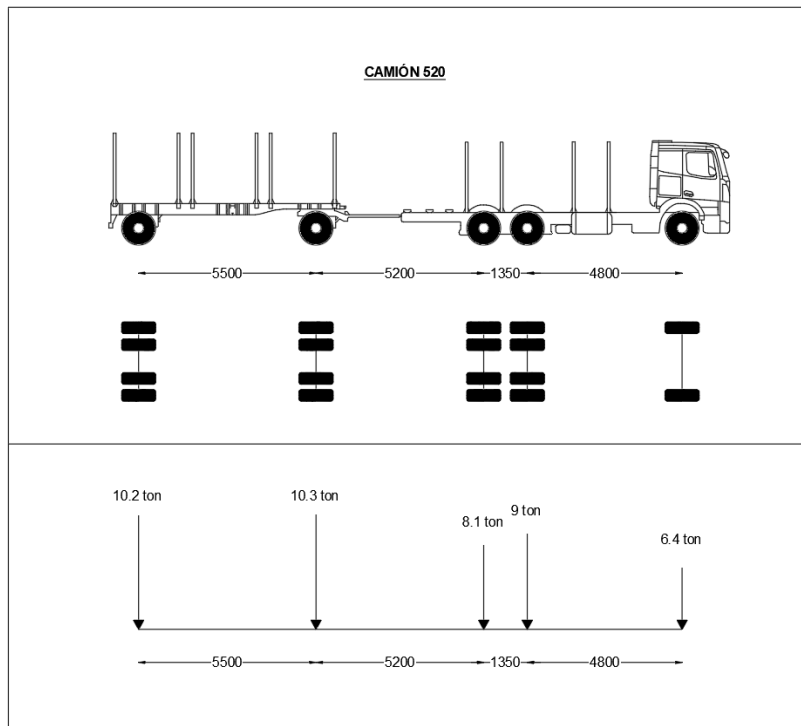


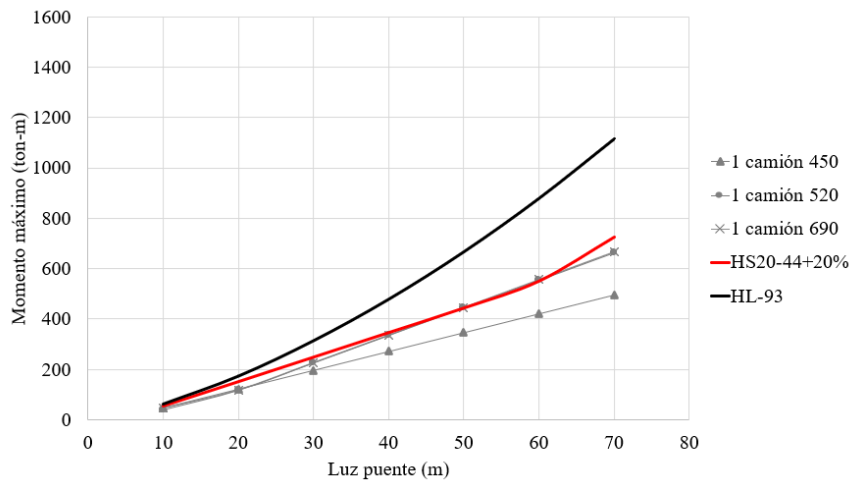
Figura 4.2 Caracterización camión 520 (forestal), espaciamientos en mm.



### 4.3.1 Efectos de acuerdo con el número de camiones dentro del convoy

La Figura 4.4 muestra dos gráficos que ilustran las demandas estructurales generadas por la presencia individual de un camión de cada tipo analizado en función de la luz del puente. La Figura 4.5 contiene gráficos que presentan las demandas estructurales producidas por convoyes de camiones de diferentes tipos y con un espaciamiento entre camiones igual a 6 m ( $S_a = 6$  m). Además, ambas figuras presentan las demandas generadas por los patrones de carga de diseño en distintos colores, rojo para el HS20-44+20% y negro para el HL-93.

(a)



(b)

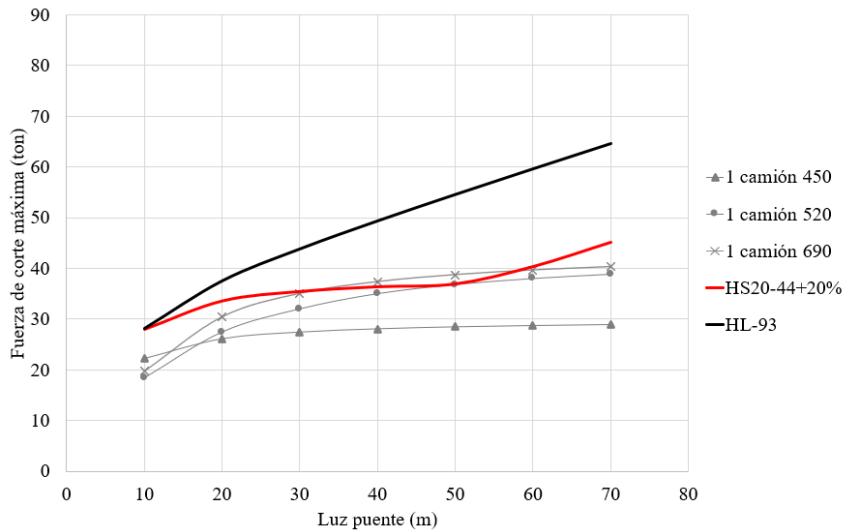
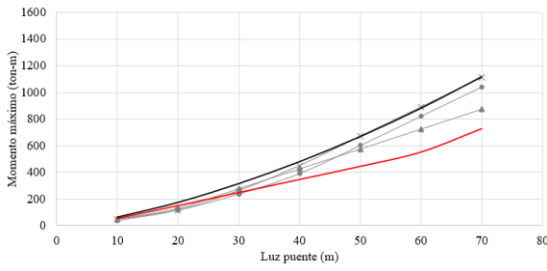
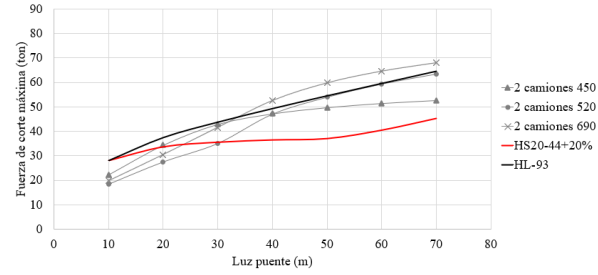


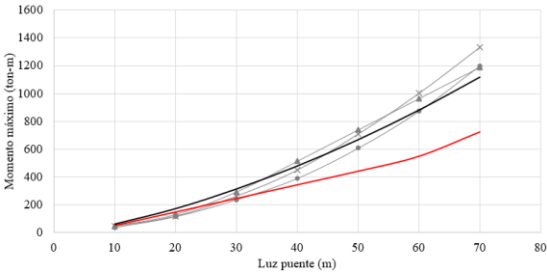
Figura 4.4 (a) Momentos generados por un convoy de 1 camión en función de la luz del puente (b) Fuerzas de corte generadas por un convoy de 1 camión en función de la luz del puente.



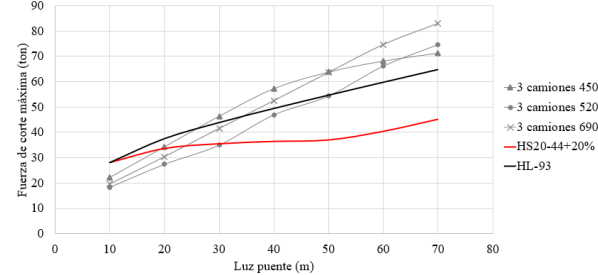
(a)



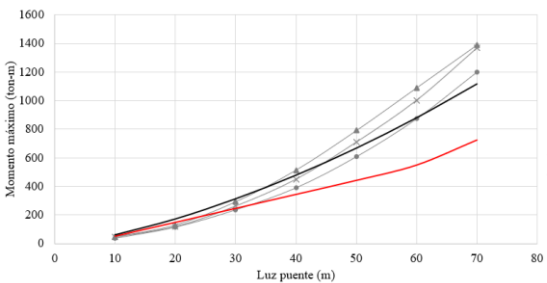
(b)



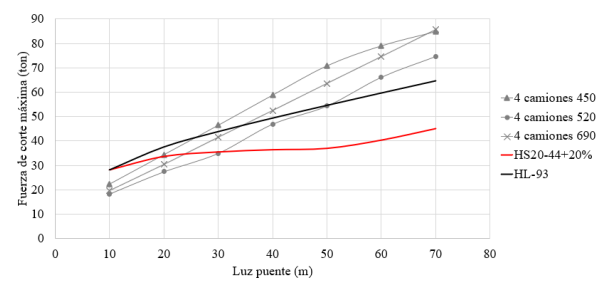
(c)



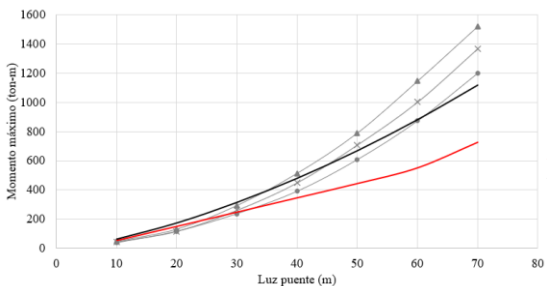
(d)



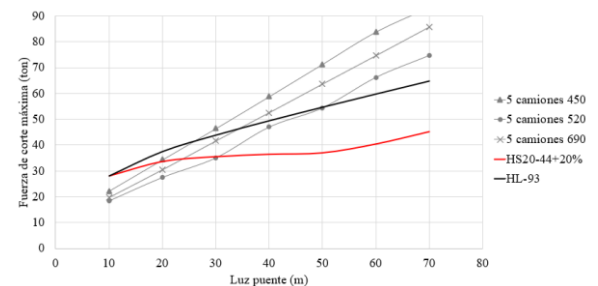
(e)



(f)



(g)

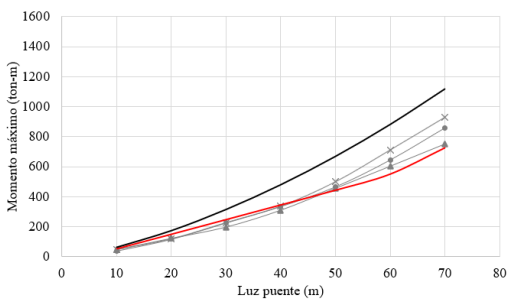


(h)

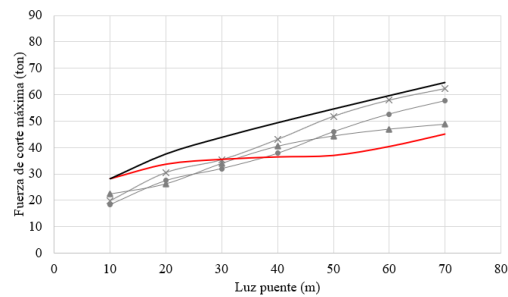
**Figura 4.5 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 6 m en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 6 m en función de la luz del puente.**

Posteriormente se calcularon los resultados correspondientes para separaciones entre camiones de 9, 12 y 15 m (véase Anexo 4.1). Para analizar de forma representativa las diferencias en las demandas estructurales generadas por convoyes con un espaciamiento de 6 m frente a un espaciamiento mayor, la Figura 4.6 presenta los gráficos respectivos. Estos gráficos ilustran las demandas estructurales

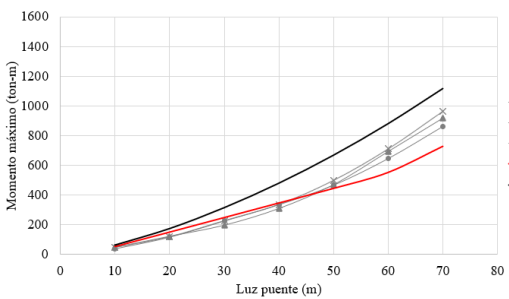
producidas por convoyes de distintos tipos de camiones, considerando un espaciamiento entre camiones de 15 m ( $S_a = 15$  m).



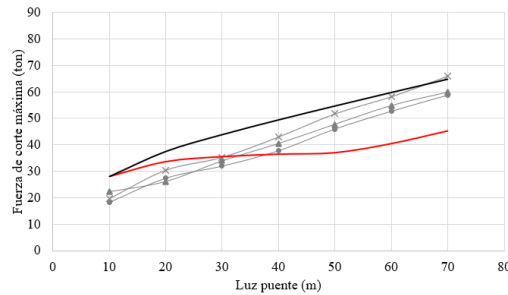
(a)



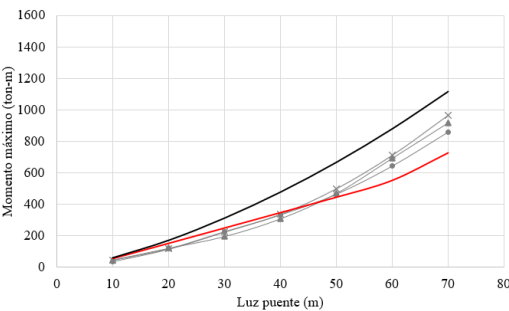
(b)



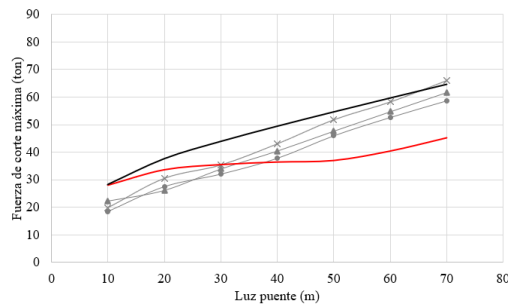
(c)



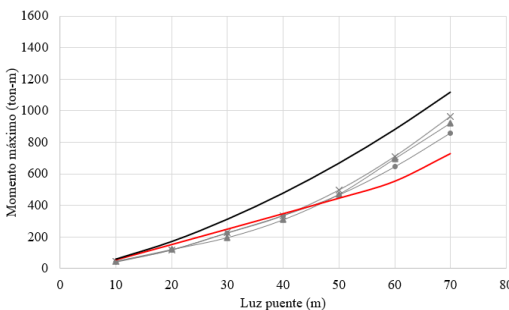
(d)



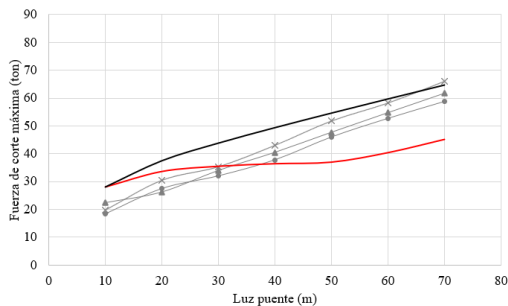
(e)



(f)



(g)

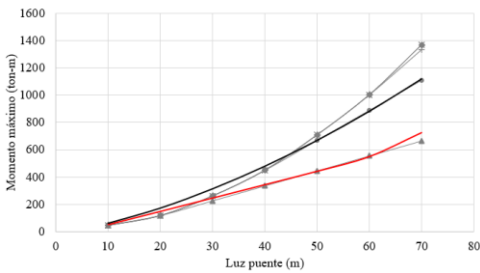


(h)

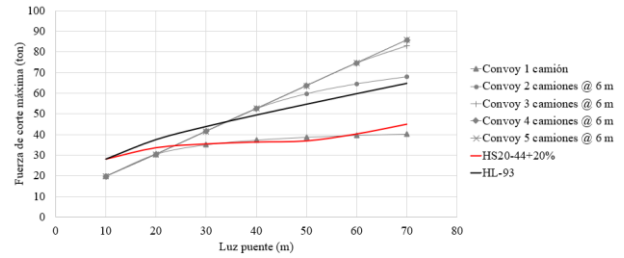
**Figura 4.6 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 15 m en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 15 m en función de la luz del puente.**

### 4.3.2 Efectos de acuerdo con la separación de camiones dentro del convoy

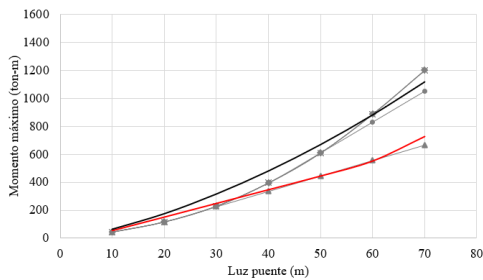
Por otra parte, se analizó el efecto del espaciamiento entre camiones dentro de los convoyes como parámetro clave. Para obtener conclusiones respecto a este factor, se calcularon las demandas estructurales generadas por cada tipo de camión, evaluando cómo las variaciones en el espaciamiento influyen en la respuesta estructural. De manera representativa, la Figura 4.7 muestra los momentos flectores y las fuerzas cortantes obtenidas para convoyes de camiones tipo 690, a medida que aumenta la separación entre éstos. Los demás tipos de camiones presentaron una respuesta estructural análoga (véase Anexo 4.1).



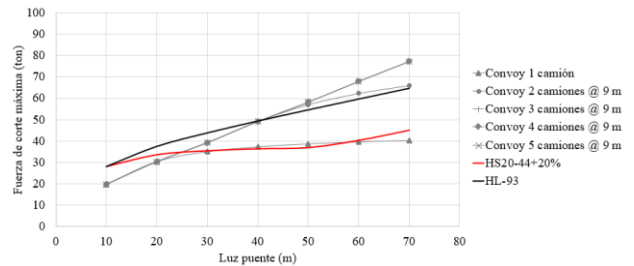
(a)



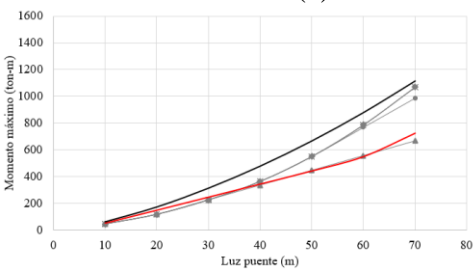
(b)



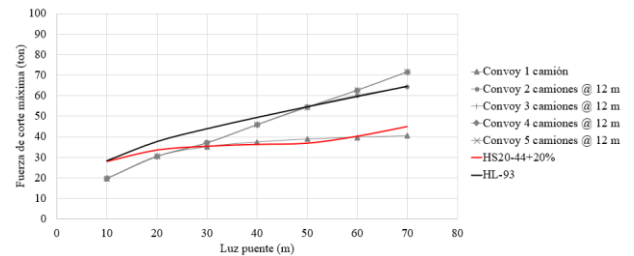
(c)



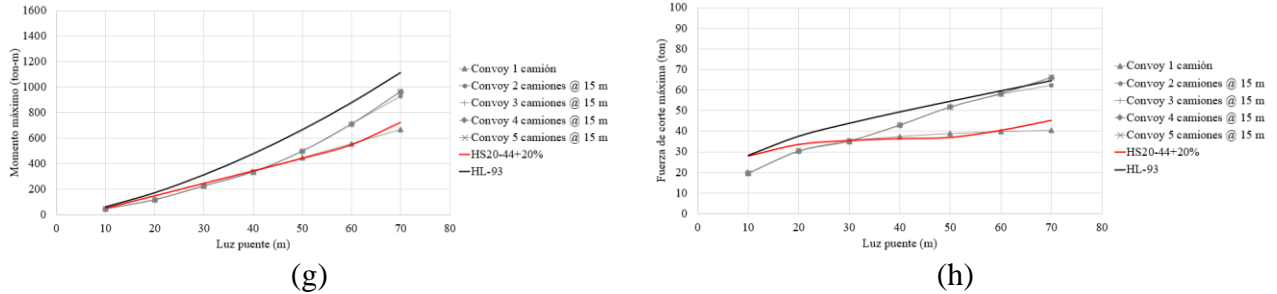
(d)



(e)



(f)



**Figura 4.7 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función de la luz del puente.**

#### 4.4 Resultados análisis de sensibilidad y comparación con HS20-44+20%

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad considerando el número de camiones y el espaciamiento dentro del convoy. La Figura 4.8 muestra  $R_M$  y  $R_V$  en función del número de camiones para distintos vanos de puentes. Además, se destacan dos límites: (1) en color rojo una razón igual a 1 que implica que la demanda del convoy supera el efecto normativo de carga viva de diseño; y (2) en negro una razón 1.75 que implica que el convoy supera la demanda última por carga viva. Superar el límite rojo, implica que aquel convoy superaría las demandas consideradas en combinaciones de carga de servicio. Por lo tanto, implicaría problemas de serviciabilidad (desplazamientos y agrietamientos excesivos, por ejemplo) que afectarían negativamente la funcionalidad de los puentes y potencialmente decrementen la durabilidad de estos. Por otro lado, superar el límite en color negro implica que aquel convoy superaría las demandas consideradas en combinaciones de carga de resistencia. Por lo tanto, implicaría un posible colapso del puente.

De las Figuras 4.8a y 4.8b se concluye que, para convoyes con espaciamiento de 6 m, si se componen de 3 camiones o más, en puentes de vano 70 m, se supera el límite de resistencia. Al aumentar el espaciamiento a 9, 12 y 15 m, como en las Figuras 4.8c y 4.8d, 4.8e y 4.8f, 4.8g y 4.8h, respectivamente, se puede ver que tanto  $R_M$  como  $R_V$  disminuyen, y se encuentran debajo del límite de resistencia para cualquier número de camiones y vano de puente estudiado. Todas las configuraciones de convoyes presentaron un comportamiento análogo al del camión tipo 450, el cual mostró los valores más desfavorables de  $R_M$  y  $R_V$ . Por ello, y con el propósito de simplificar la interpretación, solo se presentan dichos resultados.

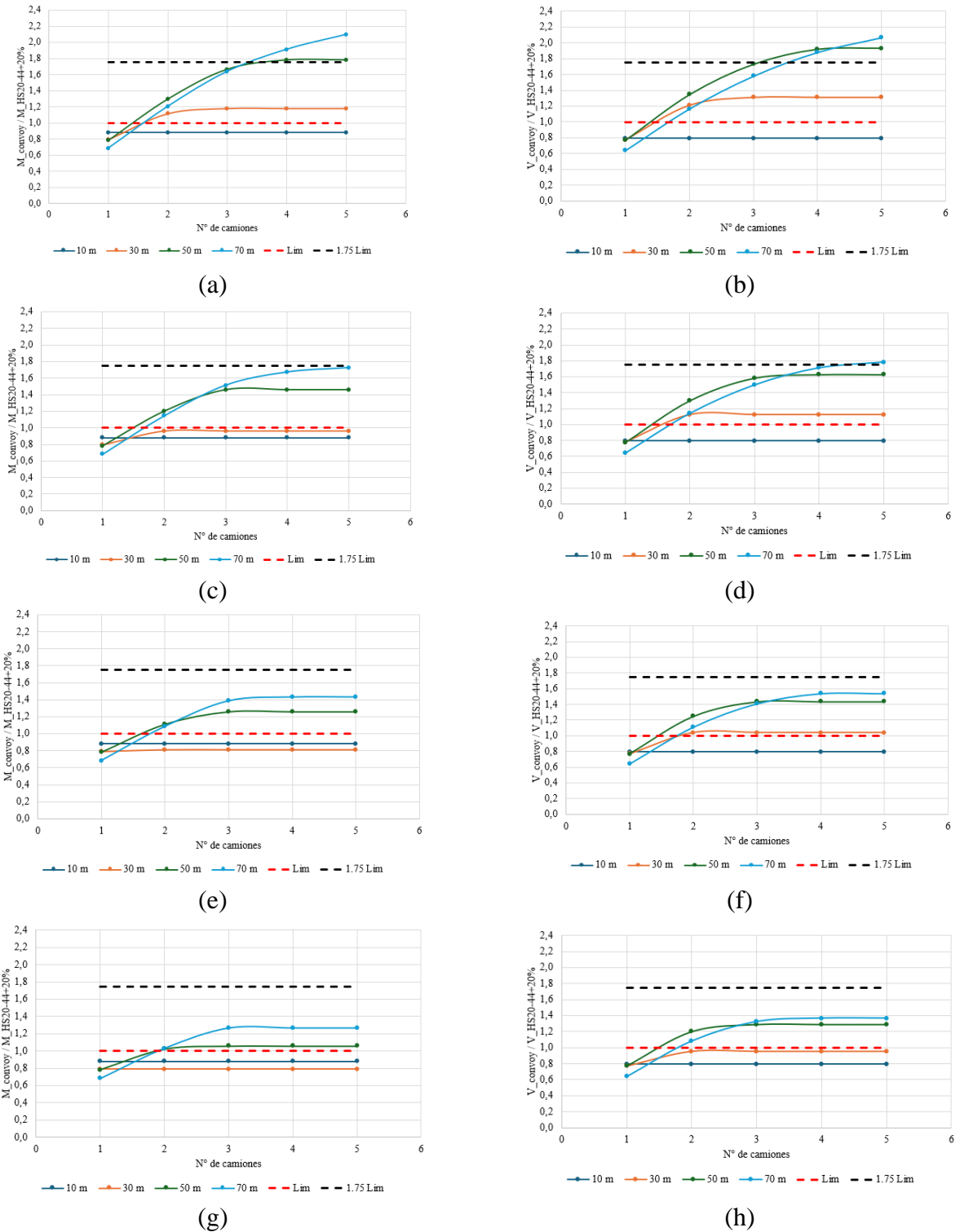
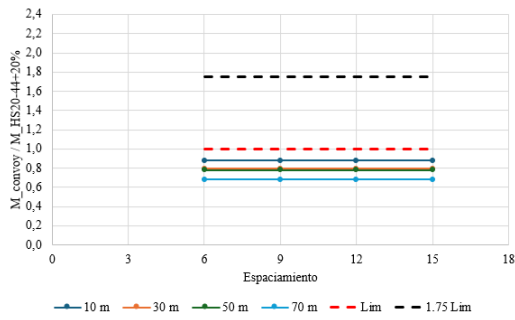


Figura 4.8 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m, respectivamente, en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m, respectivamente, en función del número de camiones. HS20-44+20%.

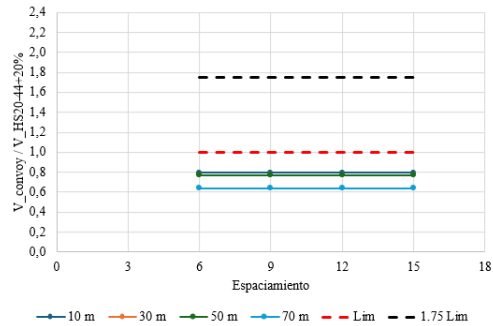
La Figura 4.9 muestra los resultados del análisis del espaciamiento entre camiones dentro del convoy, los gráficos ilustran  $R_M$  y  $R_V$  para cada escenario. Al igual que la figura anterior, la Figura 4.9 contiene gráficos con los límites de servicio (color rojo) y resistencia (color negro).

De las Figuras 4.9g, 4.9h, 4.9i y 4.9j se concluye que un espaciamiento de 6 m es un valor que resulta perjudicial con 4 y 5 camiones dentro del convoy, ya que, en puentes con vanos de 50 y 70 m, se supera el límite de resistencia. Sin embargo, aumentando el espaciamiento a 9 m o más se puede ver en estas figuras que no se supera el límite de resistencia para ningún escenario.

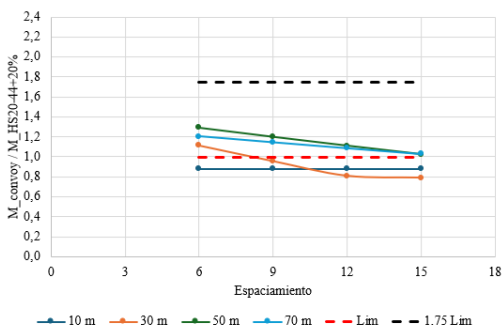
Es importante destacar que las configuraciones de convoyes tipo 520 y 690 mostraron un comportamiento similar al del camión tipo 450, el cual registró valores  $R_M$  y  $R_V$  más desfavorables. Por esta razón, y con el objetivo de facilitar la interpretación, únicamente se exponen los resultados correspondientes al camión tipo 450.



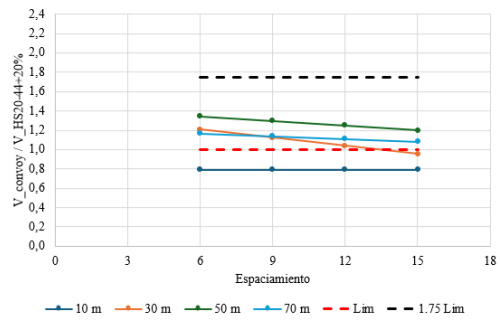
(a)



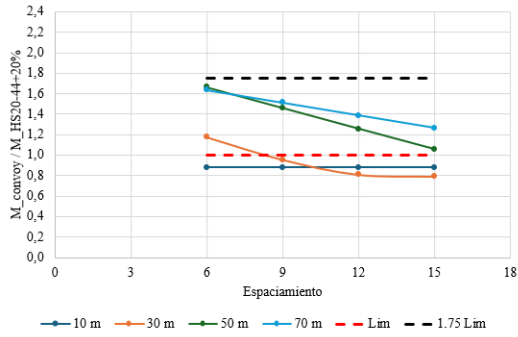
(b)



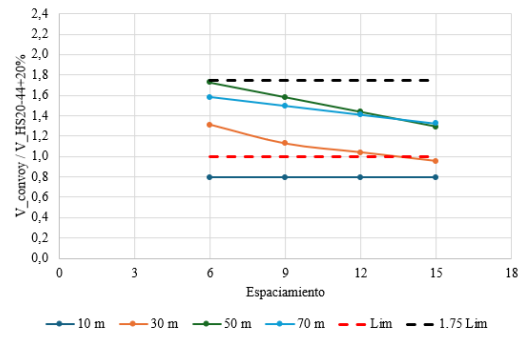
(c)



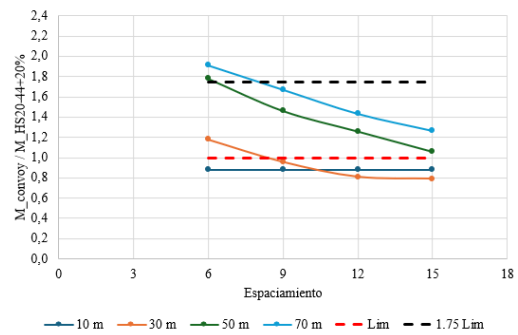
(d)



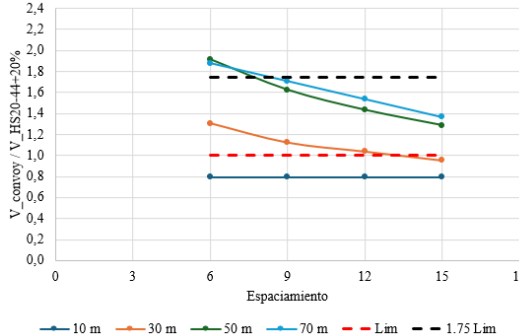
(e)



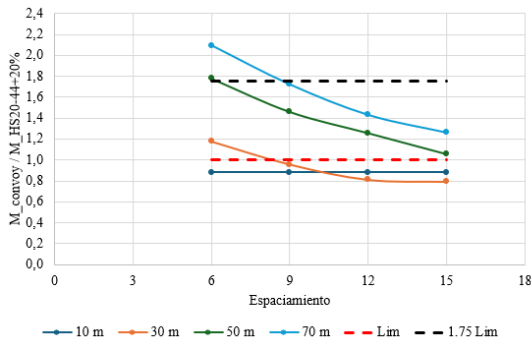
(f)



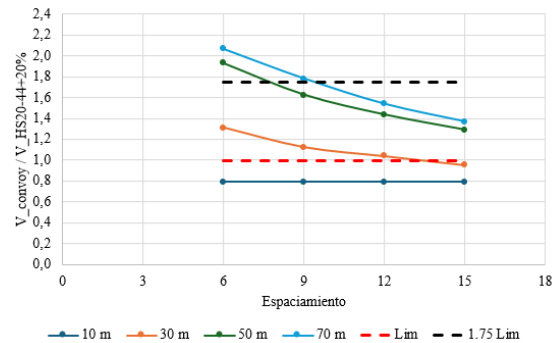
(g)



(h)



(i)



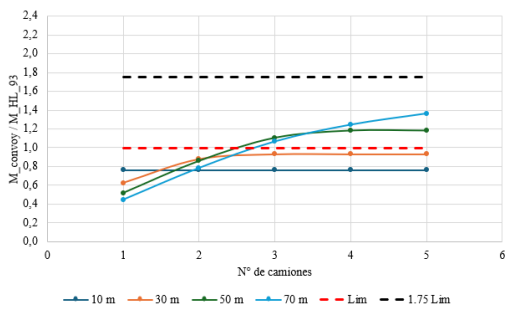
(j)

**Figura 4.9 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 450 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 450 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. HS20-44+20%.**

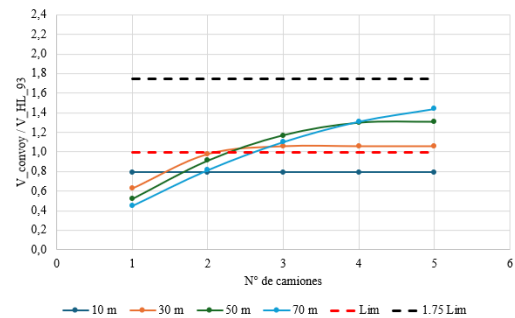
### 4.5 Resultados análisis de sensibilidad y comparación con HL-93

Se llevó a cabo un procedimiento similar al descrito en la sección 4.4. La Figura 4.10 muestra los resultados del análisis del número de camiones, presentando  $R_M$  y  $R_V$ , que dan cuenta de las relaciones entre las demandas estructurales generadas por cada convoy y las demandas generadas por el patrón de diseño HL-93. Para simplificar la interpretación, se detallan únicamente los resultados más representativos del camión 450 que resultó ser el que produjo valores  $R_M$  y  $R_V$  más desfavorables.

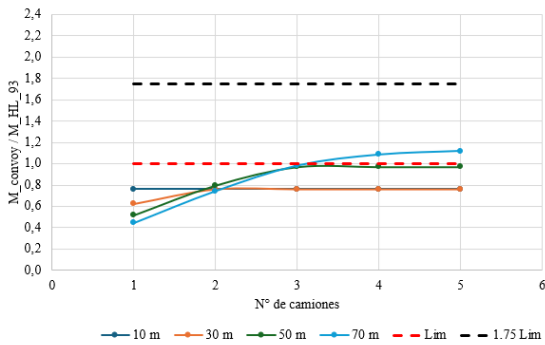
Se concluye de la Figura 4.10a y 4.10b que en convoyes de tres camiones o más con una separación de 6 m se supera el límite de servicio para todas las luces de puente. En las Figuras 4.10g y 4.10h se puede evidenciar que, con un espaciamiento de 15 m, ningún escenario de convoyes supera el límite de servicio.



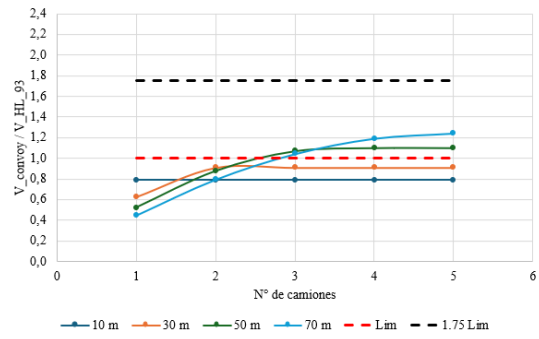
(a)



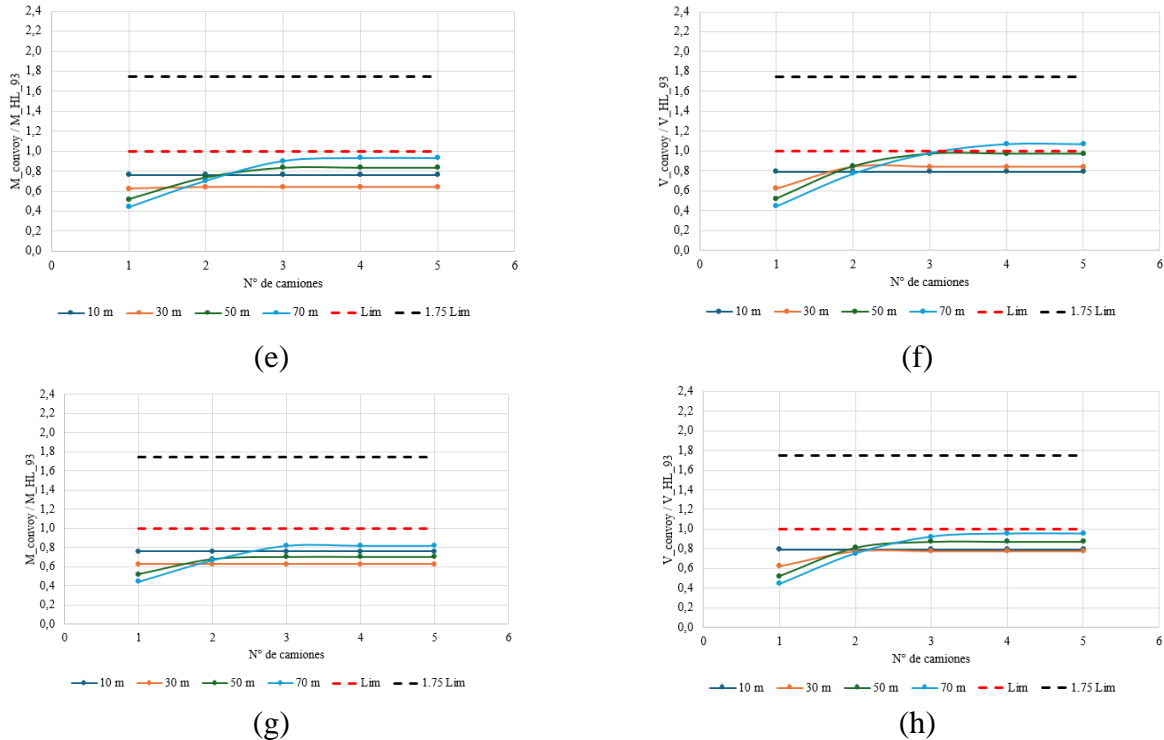
(b)



(c)



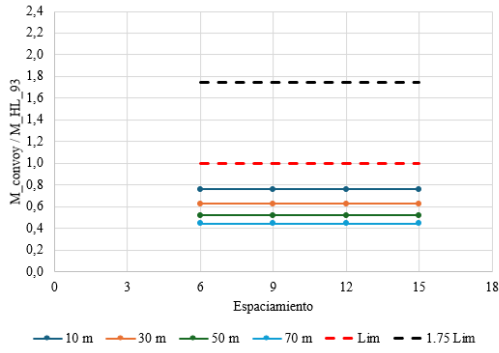
(d)



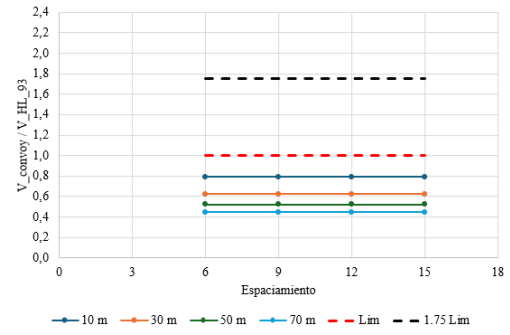
**Figura 4.10 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HL-93.**

La Figura 4.11 muestra los resultados del análisis del espaciamiento entre camiones, los gráficos ilustran  $R_M$  y  $R_V$  que dan cuenta de la relación entre las demandas estructurales generadas por los convoyes y los valores generados por el patrón HL-93. Es fundamental destacar que las configuraciones de convoyes tipo 520 y 690 mostraron un comportamiento análogo al camión tipo 450, este último registró las relaciones  $R_M$  y  $R_V$  más desfavorables. Por esta razón, y con el objetivo de facilitar la interpretación, únicamente se exponen los resultados correspondientes al camión tipo 450.

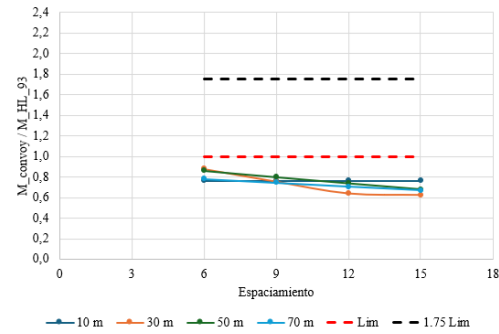
De las Figuras 4.11e y 4.11f se puede evidenciar que desde tres camiones o más y con espaciamientos de 6 y 9 m, se supera el límite de servicio para puentes con luces de vano iguales a 50 y 70 m.



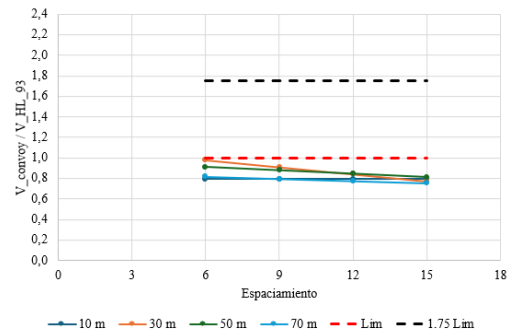
(a)



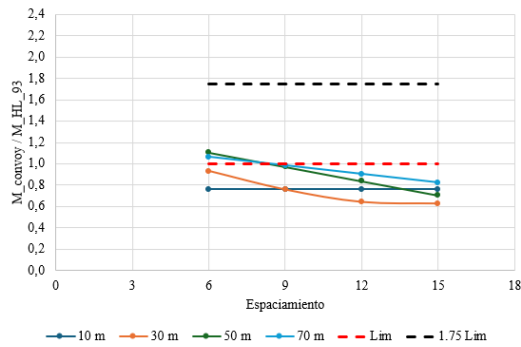
(b)



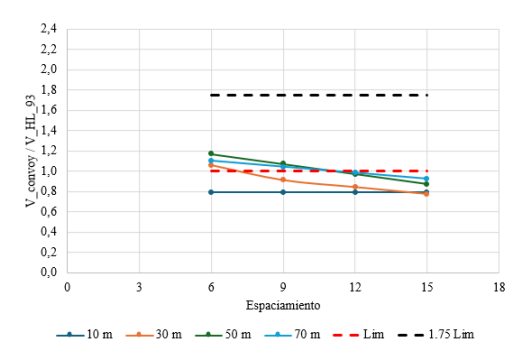
(c)



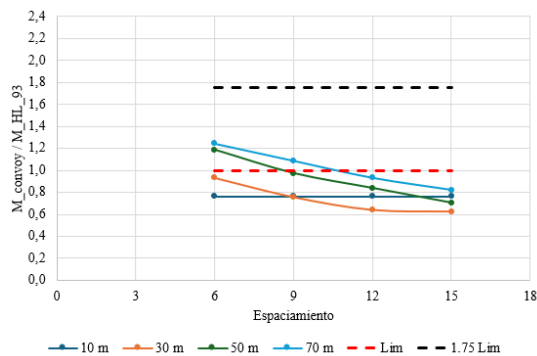
(d)



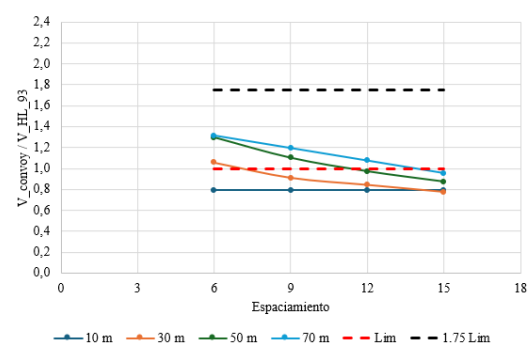
(e)



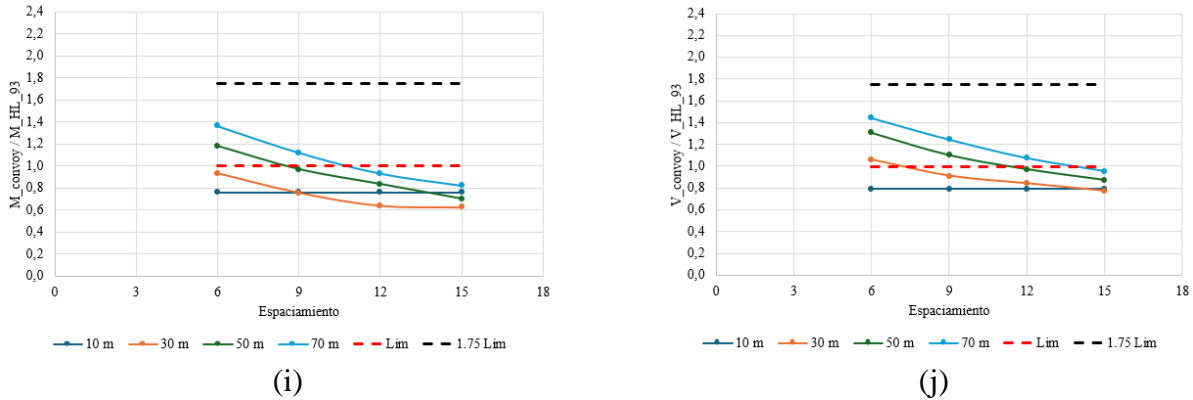
(f)



(g)



(h)



**Figura 4.11 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 450 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 450 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. HL-93.**

#### 4.6 Resultados ajuste del patrón de carga HL-93

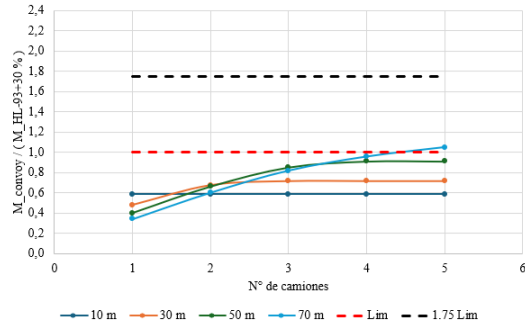
Debido a que los convoyes de camiones generan demandas estructurales superiores a las establecidas por las normativas de diseño en la mayoría de los casos, especialmente en luces de puentes superiores a 30 m, se propuso un incremento porcentual en el patrón de carga HL-93 para facilitar la implementación futura de este modo de transporte y garantizar que este incremento pueda cubrir todos los casos posibles analizados en este trabajo. Luego de analizar cada uno de los resultados obtenidos, se concluyó que un aumento del 30 % en todo el patrón de carga HL-93, incluyendo tanto el camión de diseño como la carga de faja, permite cubrir las demandas estructurales generadas por los distintos escenarios de convoyes. Esto permite la operación de convoyes con cualquier número de camiones y separaciones a partir de 6 metros, utilizando cualquiera de los tres tipos de vehículos analizados.

No obstante, es importante destacar que este incremento del 30 % resulta insuficiente únicamente en un caso específico: para el camión tipo 450, cuando se utilizan convoyes de este tipo con separaciones de 6 m en puentes con luces de 70 m. Por ello, para este caso en particular se recomienda partir de un espaciamento mínimo de 9 m para asegurar que este incremento cubra la totalidad de los escenarios analizados. Además, un espaciamento de 9 m es más adecuado desde un punto de vista práctico y físico, ya que un espaciamento de 6 m es insuficiente para permitir que otros vehículos adelanten al convoy o se posicionen entre los camiones que viajan en caravana. En el caso de camiones como el tipo 690, un espaciamento de 6 m genera una distancia física extremadamente reducida entre el tracto

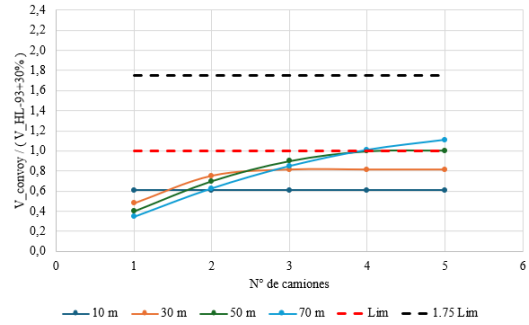
de un camión y la parte trasera del camión que lo precede, lo que refuerza la recomendación de adoptar un espaciamiento mínimo de 9 m en todos los escenarios de convoyes.

En la Figura 4.12 se presentan los valores  $R_M$  y  $R_V$  más desfavorables encontrados considerando un incremento del 30 % en el patrón HL-93 y analizando el parámetro número de camiones. Para simplificar la interpretación, se muestran únicamente los resultados representativos del camión tipo 450, el cual produce mayores  $R_M$  y  $R_V$ .

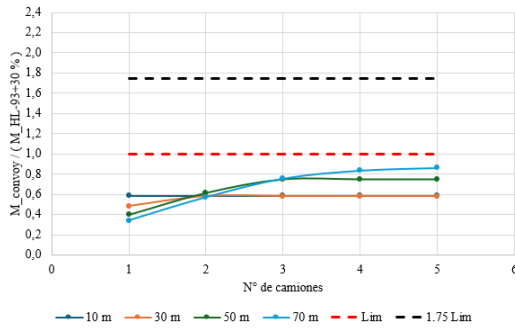
Se concluye de la Figura 4.12 que el incremento del 30% en el patrón de carga HL-93 cubre la totalidad de los casos, ninguno de los escenarios analizados en este estudio sobrepasa el límite de servicio, únicamente en el caso mencionado anteriormente.



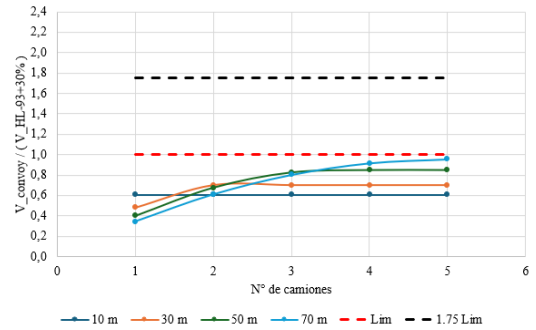
(a)



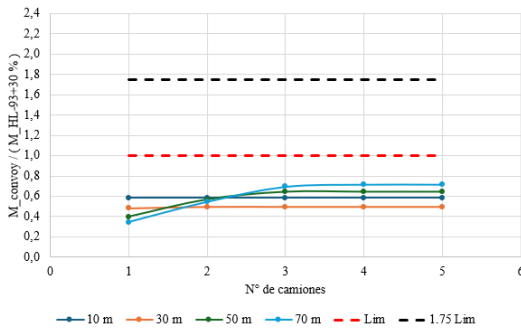
(b)



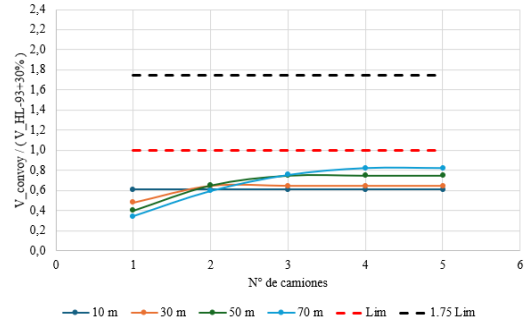
(c)



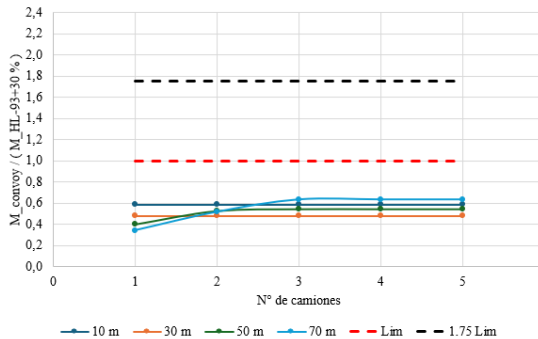
(d)



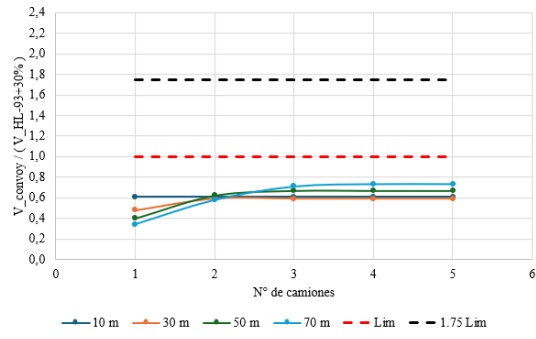
(e)



(f)



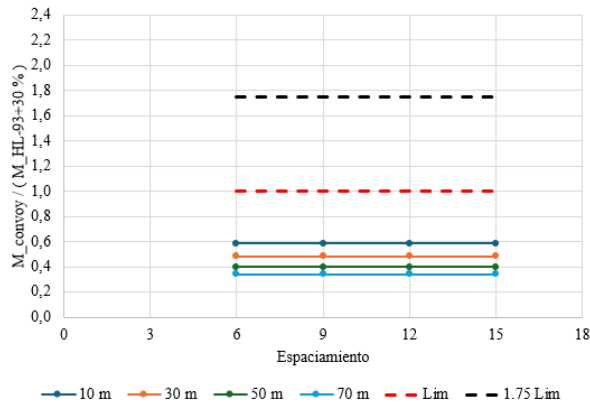
(g)



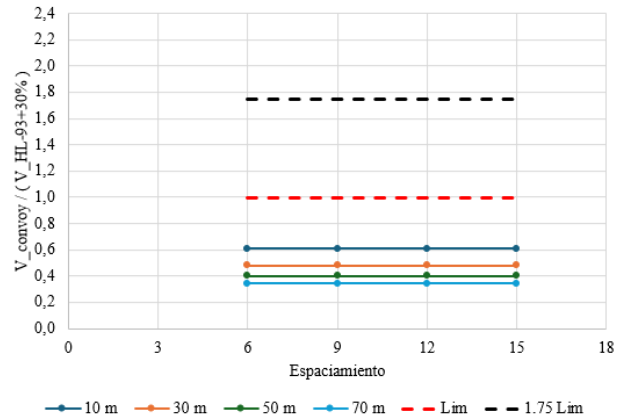
(h)

**Figura 4.12 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_v$ ) generadas por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HL-93+30%.**

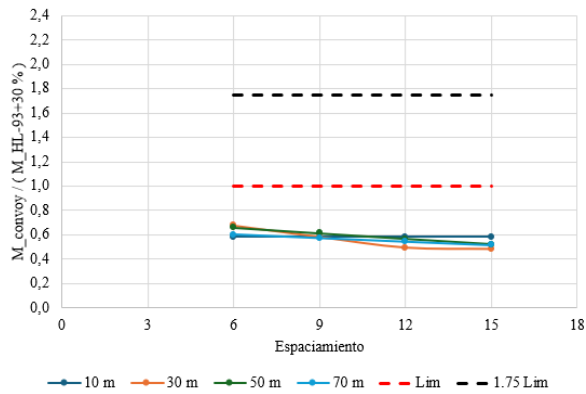
En la Figura 4.13 se muestran  $R_M$  y  $R_V$  más desfavorables encontrados con un incremento del 30 % en el patrón HL-93 analizando el espaciamiento entre camiones. Para simplificar la interpretación, se muestran únicamente los resultados representativos del camión tipo 450.



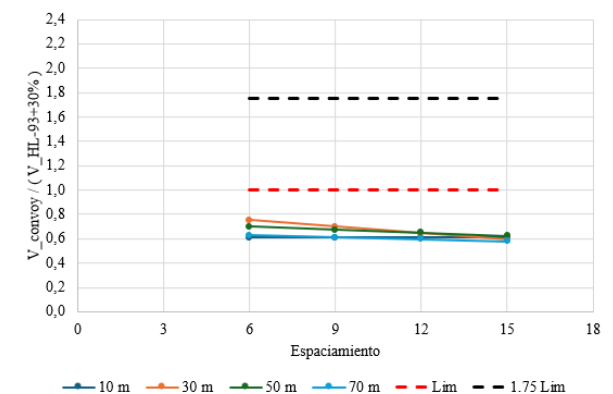
(a)



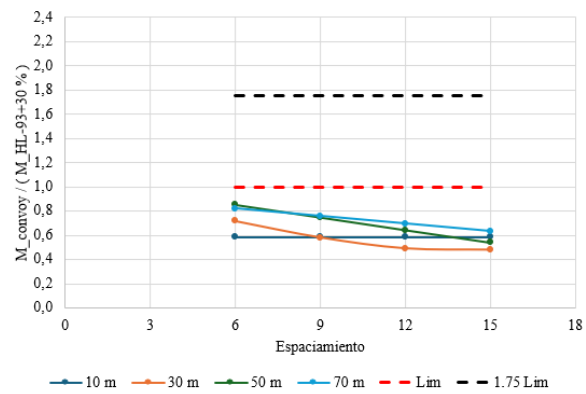
(b)



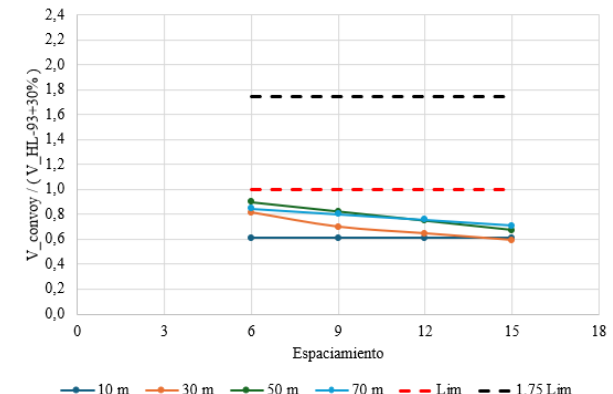
(c)



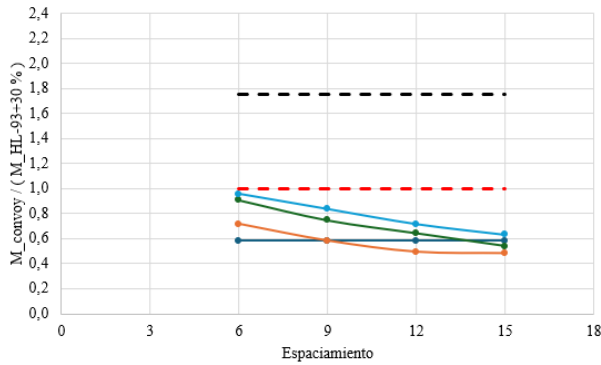
(d)



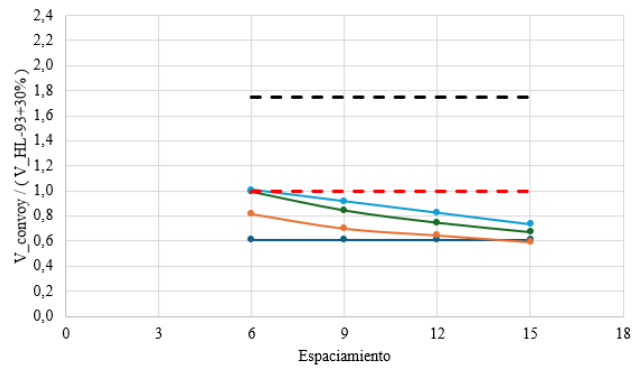
(e)



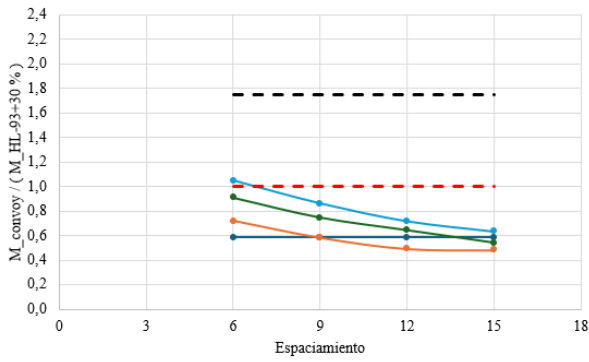
(f)



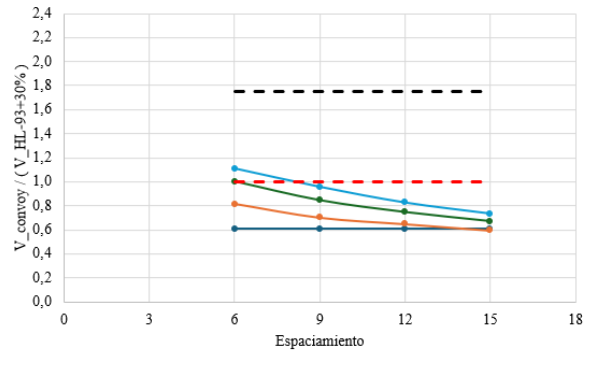
(g)



(h)



(i)



(j)

**Figura 4.13 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 450 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 450 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. HL-93+30%.**

A modo de resumen, en las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se muestran todas las relaciones de momento ( $R_M$ ) y corte ( $R_V$ ) obtenidas en las distintas configuraciones de convoyes propuestas, considerando separaciones entre camiones ( $S_a$ ) iguales a 6, 9, 12 y 15 m con distintos números de camiones (uno a cinco camiones). En color rojo se presentan las relaciones que superan el límite de servicio y en color azul las relaciones que superan el límite de resistencia. Se puede observar que un incremento del 30 % en el patrón HL-93 garantiza que no se supere el límite de servicio ( $R_M$  o  $R_V = 1$ ).

Sa = 6 m	Luz puente (m)	N ° camiones									
		1		2		3		4		5	
		RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV
Convoy / HS20-44+20%	10	0,88	0,79	0,88	0,79	0,88	0,79	0,88	0,79	0,88	0,79
	30	0,79	0,77	1,11	1,21	1,18	1,31	1,18	1,31	1,18	1,31
	50	0,78	0,77	1,29	1,35	1,66	1,73	1,78	1,92	1,78	1,93
	70	0,68	0,64	1,20	1,17	1,64	1,58	1,91	1,88	2,09	2,07
Convoy / HL-93	10	0,76	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79
	30	0,63	0,63	0,88	0,98	0,93	1,06	0,93	1,06	0,93	1,06
	50	0,52	0,52	0,86	0,91	1,11	1,17	1,18	1,30	1,18	1,31
	70	0,44	0,45	0,78	0,81	1,06	1,10	1,24	1,31	1,36	1,44
Convoy / HL-93 + 30%	10	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61
	30	0,48	0,48	0,68	0,75	0,72	0,81	0,72	0,81	0,72	0,81
	50	0,40	0,40	0,66	0,70	0,85	0,90	0,91	1,00	0,91	1,00
	70	0,34	0,34	0,60	0,63	0,82	0,85	0,96	1,01	1,05	1,11

Sa = 9 m	Luz puente (m)	N ° camiones									
		1		2		3		4		5	
		RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV
Convoy / HS20-44+20%	10	0,88	0,79	0,88	0,79	0,88	0,79	0,88	0,79	0,88	0,79
	30	0,79	0,77	0,96	1,13	0,96	1,13	0,96	1,13	0,96	1,13
	50	0,78	0,77	1,20	1,30	1,46	1,58	1,46	1,63	1,46	1,63
	70	0,68	0,64	1,14	1,14	1,51	1,50	1,67	1,71	1,72	1,78
Convoy / HL-93	10	0,76	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79
	30	0,63	0,63	0,76	0,91	0,76	0,91	0,76	0,91	0,76	0,91
	50	0,52	0,52	0,80	0,88	0,97	1,07	0,97	1,10	0,97	1,10
	70	0,44	0,45	0,74	0,79	0,98	1,04	1,09	1,19	1,12	1,24
Convoy / HL-93 + 30%	10	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61
	30	0,48	0,48	0,58	0,70	0,58	0,70	0,58	0,70	0,58	0,70
	50	0,40	0,40	0,61	0,68	0,75	0,82	0,75	0,85	0,75	0,85
	70	0,34	0,34	0,57	0,61	0,76	0,80	0,84	0,92	0,86	0,96

Sa = 12 m	Luz puente (m)	N ° camiones									
		1		2		3		4		5	
		RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV
Convoy / HS20-44+20%	10	0,88	0,79	0,88	0,79	0,88	0,79	0,88	0,79	0,88	0,79
	30	0,79	0,77	0,81	1,04	0,81	1,04	0,81	1,04	0,81	1,04
	50	0,78	0,77	1,11	1,25	1,26	1,44	1,26	1,44	1,26	1,44
	70	0,68	0,64	1,09	1,11	1,39	1,41	1,43	1,54	1,43	1,54
Convoy / HL-93	10	0,76	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79
	30	0,63	0,63	0,64	0,84	0,64	0,84	0,64	0,84	0,64	0,84
	50	0,52	0,52	0,74	0,84	0,84	0,97	0,84	0,97	0,84	0,97
	70	0,44	0,45	0,71	0,77	0,90	0,98	0,93	1,07	0,93	1,07
Convoy / HL-93 + 30%	10	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61
	30	0,48	0,48	0,49	0,65	0,49	0,65	0,49	0,65	0,49	0,65
	50	0,40	0,40	0,57	0,65	0,64	0,75	0,64	0,75	0,64	0,75
	70	0,34	0,34	0,54	0,60	0,69	0,76	0,72	0,83	0,72	0,83

Sa = 15 m	Luz puente (m)	N ° camiones									
		1		2		3		4		5	
		RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV
Convoy / HS20-44+20%	10	0,88	0,79	0,88	0,79	0,88	0,79	0,88	0,79	0,88	0,79
	30	0,79	0,77	0,79	0,96	0,79	0,96	0,79	0,96	0,79	0,96
	50	0,78	0,77	1,02	1,20	1,06	1,29	1,06	1,29	1,06	1,29
	70	0,68	0,64	1,03	1,08	1,26	1,32	1,26	1,37	1,26	1,37
Convoy / HL-93	10	0,76	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79
	30	0,63	0,63	0,63	0,77	0,63	0,77	0,63	0,77	0,63	0,77
	50	0,52	0,52	0,68	0,81	0,70	0,87	0,70	0,87	0,70	0,87
	70	0,44	0,45	0,67	0,75	0,82	0,92	0,82	0,95	0,82	0,95
Convoy / HL-93 + 30%	10	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61
	30	0,48	0,48	0,48	0,59	0,48	0,59	0,48	0,59	0,48	0,59
	50	0,40	0,40	0,52	0,62	0,54	0,67	0,54	0,67	0,54	0,67
	70	0,34	0,34	0,52	0,58	0,63	0,71	0,63	0,73	0,63	0,73

Figura 4.14 Resumen relaciones de demandas estructurales (RM, RV) para cada escenario del camión 450 (color rojo: sobre límite de servicio, color azul: sobre límite de resistencia).

Sa = 6 m	Luz puente (m)	N ° camiones									
		1		2		3		4		5	
		RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV
Convoy / HS20-44+20%	10	0,72	0,65	0,72	0,65	0,72	0,65	0,72	0,65	0,72	0,65
	30	0,91	0,90	0,96	0,99	0,96	0,99	0,96	0,99	0,96	0,99
	50	1,00	1,00	1,36	1,46	1,37	1,47	1,37	1,47	1,37	1,47
	70	0,91	0,86	1,43	1,40	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Convoy / HL-93	10	0,62	0,65	0,62	0,65	0,62	0,65	0,62	0,65	0,62	0,65
	30	0,72	0,73	0,76	0,80	0,76	0,80	0,76	0,80	0,76	0,80
	50	0,67	0,67	0,90	0,99	0,91	1,00	0,91	1,00	0,91	1,00
	70	0,59	0,60	0,93	0,98	1,08	1,15	1,08	1,15	1,08	1,15
Convoy / HL-93 + 30%	10	0,48	0,50	0,48	0,50	0,48	0,50	0,48	0,50	0,48	0,50
	30	0,55	0,56	0,58	0,61	0,58	0,61	0,58	0,61	0,58	0,61
	50	0,51	0,52	0,69	0,76	0,70	0,77	0,70	0,77	0,70	0,77
	70	0,46	0,46	0,72	0,75	0,83	0,89	0,83	0,89	0,83	0,89

Sa = 9 m	Luz puente (m)	N ° camiones									
		1		2		3		4		5	
		RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV
Convoy / HS20-44+20%	10	0,72	0,65	0,72	0,65	0,72	0,65	0,72	0,65	0,72	0,65
	30	0,91	0,90	0,91	0,94	0,91	0,94	0,91	0,94	0,91	0,94
	50	1,00	1,00	1,22	1,39	1,22	1,39	1,22	1,39	1,22	1,39
	70	0,91	0,86	1,35	1,36	1,47	1,53	1,47	1,53	1,47	1,53
Convoy / HL-93	10	0,62	0,65	0,62	0,65	0,62	0,65	0,62	0,65	0,62	0,65
	30	0,72	0,73	0,72	0,76	0,72	0,76	0,72	0,76	0,72	0,76
	50	0,67	0,67	0,81	0,94	0,81	0,94	0,81	0,94	0,81	0,94
	70	0,59	0,60	0,88	0,95	0,96	1,07	0,96	1,07	0,96	1,07
Convoy / HL-93 + 30%	10	0,48	0,50	0,48	0,50	0,48	0,50	0,48	0,50	0,48	0,50
	30	0,55	0,56	0,55	0,59	0,55	0,59	0,55	0,59	0,55	0,59
	50	0,51	0,52	0,62	0,72	0,62	0,72	0,62	0,72	0,62	0,72
	70	0,46	0,46	0,67	0,73	0,74	0,82	0,74	0,82	0,74	0,82

Sa = 12 m	Luz puente (m)	N ° camiones									
		1		2		3		4		5	
		RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV
Convoy / HS20-44+20%	10	0,72	0,65	0,72	0,65	0,72	0,65	0,72	0,65	0,72	0,65
	30	0,91	0,90	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
	50	1,00	1,00	1,11	1,32	1,11	1,32	1,11	1,32	1,11	1,32
	70	0,91	0,86	1,26	1,32	1,31	1,40	1,31	1,40	1,31	1,40
Convoy / HL-93	10	0,62	0,65	0,62	0,65	0,62	0,65	0,62	0,65	0,62	0,65
	30	0,72	0,73	0,72	0,74	0,72	0,74	0,72	0,74	0,72	0,74
	50	0,67	0,67	0,74	0,89	0,74	0,89	0,74	0,89	0,74	0,89
	70	0,59	0,60	0,82	0,92	0,85	0,98	0,85	0,98	0,85	0,98
Convoy / HL-93 + 30%	10	0,48	0,50	0,48	0,50	0,48	0,50	0,48	0,50	0,48	0,50
	30	0,55	0,56	0,55	0,57	0,55	0,57	0,55	0,57	0,55	0,57
	50	0,51	0,52	0,57	0,68	0,57	0,68	0,57	0,68	0,57	0,68
	70	0,46	0,46	0,63	0,71	0,65	0,75	0,65	0,75	0,65	0,75

Sa = 15 m	Luz puente (m)	N ° camiones									
		1		2		3		4		5	
		RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV
Convoy / HS20-44+20%	10	0,72	0,65	0,72	0,65	0,72	0,65	0,72	0,65	0,72	0,65
	30	0,91	0,90	0,91	0,90	0,91	0,90	0,91	0,90	0,91	0,90
	50	1,00	1,00	1,05	1,24	1,05	1,24	1,05	1,24	1,05	1,24
	70	0,91	0,86	1,18	1,28	1,18	1,30	1,18	1,30	1,18	1,30
Convoy / HL-93	10	0,62	0,65	0,62	0,65	0,62	0,65	0,62	0,65	0,62	0,65
	30	0,72	0,73	0,72	0,73	0,72	0,73	0,72	0,73	0,72	0,73
	50	0,67	0,67	0,70	0,84	0,70	0,84	0,70	0,84	0,70	0,84
	70	0,59	0,60	0,77	0,89	0,77	0,91	0,77	0,91	0,77	0,91
Convoy / HL-93 + 30%	10	0,48	0,50	0,48	0,50	0,48	0,50	0,48	0,50	0,48	0,50
	30	0,55	0,56	0,55	0,56	0,55	0,56	0,55	0,56	0,55	0,56
	50	0,51	0,52	0,54	0,65	0,54	0,65	0,54	0,65	0,54	0,65
	70	0,46	0,46	0,59	0,69	0,59	0,70	0,59	0,70	0,59	0,70

Figura 4.15 Resumen relaciones de demandas estructurales (RM, RV) para cada escenario del camión 520 (color rojo: sobre límite de servicio, color azul: sobre límite de resistencia).

Sa = 6 m	Luz puente (m)	N ° camiones									
		1		2		3		4		5	
		RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV
Convoy / HS20-44+20%	10	0,86	0,70	0,86	0,70	0,86	0,70	0,86	0,70	0,86	0,70
	30	0,91	0,99	1,06	1,17	1,06	1,17	1,06	1,17	1,06	1,17
	50	1,00	1,05	1,51	1,62	1,60	1,72	1,60	1,72	1,60	1,72
	70	0,92	0,89	1,53	1,51	1,84	1,84	1,88	1,90	1,88	1,90
Convoy / HL-93	10	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70
	30	0,72	0,80	0,84	0,95	0,84	0,95	0,84	0,95	0,84	0,95
	50	0,67	0,71	1,00	1,09	1,06	1,17	1,06	1,17	1,06	1,17
	70	0,60	0,62	1,00	1,05	1,19	1,28	1,22	1,33	1,22	1,33
Convoy / HL-93 + 30%	10	0,57	0,54	0,57	0,54	0,57	0,54	0,57	0,54	0,57	0,54
	30	0,55	0,62	0,64	0,73	0,64	0,73	0,64	0,73	0,64	0,73
	50	0,51	0,55	0,77	0,84	0,82	0,90	0,82	0,90	0,82	0,90
	70	0,46	0,48	0,77	0,81	0,92	0,99	0,94	1,02	0,94	1,02

Sa = 9 m	Luz puente (m)	N ° camiones									
		1		2		3		4		5	
		RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV
Convoy / HS20-44+20%	10	0,86	0,70	0,86	0,70	0,86	0,70	0,86	0,70	0,86	0,70
	30	0,91	0,99	0,93	1,11	0,93	1,11	0,93	1,11	0,93	1,11
	50	1,00	1,05	1,37	1,54	1,37	1,58	1,37	1,58	1,37	1,58
	70	0,92	0,89	1,44	1,46	1,65	1,71	1,65	1,71	1,65	1,71
Convoy / HL-93	10	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70
	30	0,72	0,80	0,73	0,90	0,73	0,90	0,73	0,90	0,73	0,90
	50	0,67	0,71	0,91	1,05	0,91	1,07	0,91	1,07	0,91	1,07
	70	0,60	0,62	0,94	1,02	1,07	1,19	1,07	1,20	1,07	1,20
Convoy / HL-93 + 30%	10	0,57	0,54	0,57	0,54	0,57	0,54	0,57	0,54	0,57	0,54
	30	0,55	0,62	0,56	0,69	0,56	0,69	0,56	0,69	0,56	0,69
	50	0,51	0,55	0,70	0,80	0,70	0,82	0,70	0,82	0,70	0,82
	70	0,46	0,48	0,72	0,79	0,83	0,92	0,83	0,92	0,83	0,92

Sa = 12 m	Luz puente (m)	N ° camiones									
		1		2		3		4		5	
		RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV
Convoy / HS20-44+20%	10	0,86	0,70	0,86	0,70	0,86	0,70	0,86	0,70	0,86	0,70
	30	0,91	0,99	0,91	1,04	0,91	1,04	0,91	1,04	0,91	1,04
	50	1,00	1,05	1,24	1,47	1,24	1,47	1,24	1,47	1,24	1,47
	70	0,92	0,89	1,36	1,42	1,47	1,59	1,47	1,59	1,47	1,59
Convoy / HL-93	10	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70
	30	0,72	0,80	0,72	0,85	0,72	0,85	0,72	0,85	0,72	0,85
	50	0,67	0,71	0,83	1,00	0,83	1,00	0,83	1,00	0,83	1,00
	70	0,60	0,62	0,88	0,99	0,96	1,11	0,96	1,11	0,96	1,11
Convoy / HL-93 + 30%	10	0,57	0,54	0,57	0,54	0,57	0,54	0,57	0,54	0,57	0,54
	30	0,55	0,62	0,55	0,65	0,55	0,65	0,55	0,65	0,55	0,65
	50	0,51	0,55	0,63	0,77	0,63	0,77	0,63	0,77	0,63	0,77
	70	0,46	0,48	0,68	0,76	0,74	0,85	0,74	0,85	0,74	0,85

Sa = 15 m	Luz puente (m)	N ° camiones									
		1		2		3		4		5	
		RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV	RM	RV
Convoy / HS20-44+20%	10	0,86	0,70	0,86	0,70	0,86	0,70	0,86	0,70	0,86	0,70
	30	0,91	0,99	0,91	1,00	0,91	1,00	0,91	1,00	0,91	1,00
	50	1,00	1,05	1,12	1,40	1,12	1,40	1,12	1,40	1,12	1,40
	70	0,92	0,89	1,28	1,38	1,33	1,46	1,33	1,46	1,33	1,46
Convoy / HL-93	10	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70
	30	0,72	0,80	0,72	0,81	0,72	0,81	0,72	0,81	0,72	0,81
	50	0,67	0,71	0,75	0,95	0,75	0,95	0,75	0,95	0,75	0,95
	70	0,60	0,62	0,83	0,96	0,86	1,02	0,86	1,02	0,86	1,02
Convoy / HL-93 + 30%	10	0,57	0,54	0,57	0,54	0,57	0,54	0,57	0,54	0,57	0,54
	30	0,55	0,62	0,55	0,62	0,55	0,62	0,55	0,62	0,55	0,62
	50	0,51	0,55	0,57	0,73	0,57	0,73	0,57	0,73	0,57	0,73
	70	0,46	0,48	0,64	0,74	0,66	0,79	0,66	0,79	0,66	0,79

Figura 4.16 Resumen relaciones de demandas estructurales (RM, RV) para cada escenario del camión 690 (color rojo: sobre límite de servicio, color azul: sobre límite de resistencia).

### 4.7 Recomendaciones de espaciamientos y número de camiones

Del análisis de todos los escenarios de convoyes se derivan las siguientes recomendaciones para puentes simplemente apoyados menores y medianos, con luces comprendidas entre 10 m y 70 m, considerando un límite de relación RM y RV menor o igual a 1 (serviciabilidad). La Figura 4.17 presenta las recomendaciones basadas en la comparación de los resultados de los convoyes con los obtenidos del patrón de carga HS20-44+20% (MC Vol.3), mientras que la Figura 4.18 muestra las recomendaciones obtenidas al comparar los resultados de los convoyes con los resultados del patrón de carga HL-93 (AASHTO, 2012). Ambas figuras proponen recomendaciones de espaciamiento. De la Figura 4.17 se desprende que para puentes diseñados con el patrón de carga HS20-44+20% que tengan una luz mayor a 30 m, no existe posibilidad de realizar convoyes de los camiones estudiados en esta investigación. En puentes con luces máximas de 30 m, es posible operar convoyes con camiones 450 y 690 manteniendo un espaciamiento mínimo de 15 m, independientemente del número de camiones. Asimismo, para puentes de hasta 30 m de longitud, se pueden realizar convoyes con camiones 520, siempre que el espaciamiento entre ellos sea al menos de 6 m.

HS20-44+20%						
Luz puente	Camión 450		Camión 520		Camión 690	
	Momento	Corte	Momento	Corte	Momento	Corte
10 a 30 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 9 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 15 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 6 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 6 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 9 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 15 m
30 a 50 m	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes
50 a 70 m	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes

**Figura 4.17 Recomendaciones de espaciamientos para la operación de convoyes según el tipo de camión y la luz del puente, considerando los momentos y fuerzas de corte de diseño del MC Vol. 3 (patrón de carga HS20-44+20%).**

De la Figura 4.18 se desprende que con el patrón de carga viva HL-93, se pueden realizar convoyes en todas las luces de puentes analizadas, sin embargo, deben tener ciertos espaciamientos mínimos. Por ejemplo, para puentes con luces entre 50 y 70 m de longitud, se requiere un espaciamiento mínimo de 15 m para los camiones 450 y 690. En el caso de los puentes con las mismas longitudes, se exige un espaciamiento mínimo de 12 m para los convoyes de camiones 520.

HL - 93						
Luz puente	Camión 450		Camión 520		Camión 690	
	Momento	Corte	Momento	Corte	Momento	Corte
10 a 30 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 6 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 9 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 6 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 6 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 6 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 6 m
30 a 50 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 9 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 12 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 6 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 6 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 9 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 12 m
50 a 70 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 12 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 15 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 9 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 12 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 12 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamiento de 15 m

**Figura 4.18 Recomendaciones de espaciamientos para la operación de convoyes según el tipo de camión y la luz del puente, considerando los momentos y fuerzas de corte de diseño de la norma AASHTO (2012) (patrón de carga HL-93).**

Por otro lado, la Figura 4.19 y la Figura 4.20 indican recomendaciones análogas a las figuras anteriores pero basadas en el N° de camiones dentro de los convoyes y puentes en cuestión. De la Figura 4.19 se desprende que solamente los convoyes de camiones 520 pueden realizarse con cinco camiones (cantidad máxima analizada en esta investigación) sin importar el espaciamiento, es decir, teniendo un mínimo de 6 m de espaciamiento en puentes con luces que van desde los 10 hasta los 30 m de longitud. Todo esto utilizando patrón de carga viva HS20-44+20%.

HS20-44+20%						
Luz puente	Camión 450		Camión 520		Camión 690	
	Momento	Corte	Momento	Corte	Momento	Corte
10 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones
30 m	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes
50 m	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes
70 m	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes

**Figura 4.19 Recomendaciones de N° de camiones para la operación de convoyes según el tipo de camión y la luz del puente, considerando los momentos y fuerzas de corte de diseño del MC Vol. 3 (patrón de carga HS20-44+20%).**

De acuerdo con la Figura 4.20, para puentes con luces de hasta 30 m, se pueden realizar convoyes con un espaciamiento mínimo de 6 m, sin importar la cantidad de camiones. Sin embargo, el número de camiones se limita a dos para los convoyes de camiones 450, y a un máximo de cinco camiones para los convoyes de camiones 520 y 690. La figura también indica que, para puentes con luces entre 50 y 70 m, los convoyes pueden realizarse sin restricciones de espaciamiento, pero el número de camiones se limita a dos para los convoyes de camiones 450 y 520. En cuanto a los convoyes de camiones 690, no es posible realizarlos, sin importar el espaciamiento. Esta información es aplicable a puentes diseñados con el patrón de carga viva HL-93 sin ajustes.

HL - 93						
Luz puente	Camión 450		Camión 520		Camión 690	
	Momento	Corte	Momento	Corte	Momento	Corte
10 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones
30 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 2 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones
50 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 2 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 2 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 2 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 2 camiones	No hay posibilidad de realizar convoyes
70 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 2 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 2 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 2 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 2 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamiento limitándolo a 2 camiones	No hay posibilidad de realizar convoyes

**Figura 4.20 Recomendaciones de N° de camiones para la operación de convoyes según el tipo de camión y la luz del puente, considerando los momentos y fuerzas de corte de diseño de la norma AASHTO (2012) (patrón de carga HL-93).**

Para facilitar la interpretación, se presenta la Figura 4.21 que contiene un resumen general de todas las recomendaciones, tanto para espaciamentos como para número de camiones dentro de los convoyes, dependiendo de la utilización de un patrón de carga u otro.

HS20-44+20%			
Luz puente	Camión 450	Camión 520	Camión 690
10 a 30 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamento de 15 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamento de 6 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamento de 15 m
30 a 50 m	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes
50 a 70 m	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes

(a)

HL - 93			
Luz puente	Camión 450	Camión 520	Camión 690
10 a 30 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamento de 9 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamento de 6 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamento de 6 m
30 a 50 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamento de 12 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamento de 6 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamento de 12 m
50 a 70 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamento de 15 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamento de 12 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el N° de camiones desde un espaciamento de 15 m

(b)

HS20-44+20%			
Luz puente	Camión 450	Camión 520	Camión 690
10 a 30 m	No hay posibilidad de realizar convoyes	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamento limitándolo a 5 camiones	No hay posibilidad de realizar convoyes
30 a 50 m	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes
50 a 70 m	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes	No hay posibilidad de realizar convoyes

(c)

HL - 93			
Luz puente	Camión 450	Camión 520	Camión 690
10 a 30 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamento limitándolo a 2 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamento limitándolo a 5 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamento limitándolo a 5 camiones
30 a 50 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamento limitándolo a 2 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamento limitándolo a 2 camiones	No hay posibilidad de realizar convoyes
50 a 70 m	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamento limitándolo a 2 camiones	Se pueden realizar convoyes sin importar el espaciamento limitándolo a 2 camiones	No hay posibilidad de realizar convoyes

(d)

**Figura 4.21 (a), (b) Recomendaciones de espaciamento. (c), (d) Recomendaciones de N° de camiones con patrón de carga HS20-44+20% y HL-93 respectivamente.**

## **CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

Se caracterizaron los camiones más comunes candidatos a formar convoyes y se seleccionaron los camiones 690, 520 y 450 (según clasificación MOP).

Se analizaron un total de 357 escenarios. Los cuales fueron generados combinando diferentes separaciones (6 a 15 metros) y número camiones dentro de los convoyes (uno a cinco camiones) para cada luz de puente analizada. Por cada tipo de camión se obtuvieron 119 escenarios de carga. Los resultados permitieron concluir que:

La reducción del espacio entre camiones en convoyes y el aumento del número de camiones que conforman el convoy, aumenta las demandas estructurales, generando momentos flectores y fuerzas de corte más elevados, especialmente en vanos largos (mayores a 30 metros).

Asimismo, los 357 escenarios analizados evidencian que, si bien las normativas actuales, como el MC Vol. 3 y la normativa AASHTO (2012), son adecuadas para camiones individuales, resultan insuficientes para estimar y diseñar frente a las demandas generadas por convoyes, especialmente en puentes con luces superiores a 30 metros. En este contexto, se propone un incremento del 30 % en el patrón de carga HL-93 para el diseño de puentes, ya que permite que la gran mayoría de los escenarios se encuentren bajo límites de serviciabilidad.

Se determinó que los momentos flectores y fuerzas de corte generados por los convoyes tipo 450 son, en general, más desfavorables en comparación con los convoyes de los camiones tipo 520 y 690. Esto se debe a que su menor longitud física permite que un mayor número de camiones pueda ubicarse simultáneamente sobre los puentes con luces que varían de 10 a 70 metros, incrementando así las demandas estructurales. También, esto permite concluir que un mayor número de ejes no necesariamente se traduce en una mayor demanda estructural, destacando la importancia de analizar cada configuración de convoy de manera individual.

Además, se concluye que el patrón de carga HS20-44+20% resulta frecuentemente insuficiente o inadecuado para representar las cargas de convoy. Para puentes diseñados con este patrón y que tengan

una luz mayor a 30 metros, no existe posibilidad de realizar convoyes de los camiones estudiados en esta investigación.

A partir del análisis y recomendaciones, se identificó que para puentes diseñados con HL-93, los convoyes compuestos por más de tres camiones, especialmente en puentes con luces superiores a 30 metros, tienden a generar demandas estructurales que exceden los límites de diseño establecidos por las normativas MC Vol. 3 y AASHTO (2012). Como alternativa viable, se sugiere limitar la cantidad de camiones por convoy a un máximo de dos en puentes con luces superiores a 30 metros para camiones 450 y 520 (independientemente del espaciamiento). Otra opción es mantener un espaciamiento de 15 metros en todos los convoyes, independientemente del tipo de camión, y para todas las longitudes de los puentes analizados, lo cual es aplicable a puentes diseñados con el patrón HL-93 sin ajustes.

Esta investigación resalta la importancia de preparar la infraestructura de los puentes existentes y futuros para implementar esta nueva modalidad de transporte de carga. El incremento del 30% en el patrón de carga viva HL-93 se presenta como una alternativa adecuada para el diseño de puentes que contemplen este tipo de convoyes en el futuro.

Como proyección del trabajo realizado, se plantean diversas líneas de investigación futura que podrían ampliar y profundizar los resultados obtenidos. Una de las principales áreas a explorar es el análisis de los efectos estructurales en puentes sometidos a cargas de convoy distribuidas en múltiples carriles simultáneamente. Esto resulta especialmente relevante dado que el presente estudio se limitó al análisis de una única vía cargada, dejando espacio para evaluar escenarios más representativos de las condiciones reales de tráfico. Además, sería valioso incluir estudios que consideren condiciones dinámicas más avanzadas, como velocidades variables, interacción vehículo-puente y resonancia.

Finalmente, además resulta interesante ampliar este análisis a otras tipologías de puentes, como los continuos o atirantados.

Este estudio constituye un primer paso hacia la construcción de un marco técnico más sólido para el análisis de cargas vivas en el diseño de puentes, sentando las bases para futuras investigaciones y enfrentar las crecientes demandas del transporte del futuro.

## REFERENCIAS

- AASHTO. (2002). *Standard Bridge Design Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials.*
- AASHTO. (2012). *LRFD Bridge Design Specifications, 6th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials.*
- ACEA (European Automobile Manufacturers' Association). (2017). *Platooning roadmap.* ACEA.
- Aguilar Vidal, V., Espinoza Leon, F., Fuentes Beltrán, M., & Márquez Marambio, M. (2023). Modelos de carga viva para el diseño y evaluación de puentes en Chile. *14° Congreso Internacional PROVIAL*, 6-10 de noviembre, Pucón, Chile.
- Dirección de Vialidad. (2024). *Manual de Carreteras. Volumen N° 3: Instrucciones y Criterios de Diseño.* Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Obras Públicas, Chile.
- Ling, T.; Cao, R.; Deng, L.; He, W.; Wu, X. & Zhong, W. (2022). Dynamic impact of automated truck platooning on highway bridges. *Engineering Structures*, 262, 114326. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114326>
- Ling, T.; Deng, L.; He, W.; Wu, H. & Deng, J. (2022). Load Effect of Automated Truck Platooning on Highway Bridges and Loading Strategy. *Sensors*, 22(20), 7704. <https://doi.org/10.3390/s22207704>
- Ministerio de Obras Públicas. (1980). *Decreto Supremo N°158: Normas de Diseño de Puentes.* Diario Oficial de la República de Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). *Clasificación MOP: Tipos de camiones.* Santiago, Chile: Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas.

- Marchini Yunis, L. L. (2024). Análisis de las cargas vivas en puentes de la Ruta 68 y su evolución en el tiempo entre el periodo 2009-2023. Memoria de título, Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.
- Ortiz De la Maza, J. P. (2024). Análisis de las cargas vivas en puentes carreteros chilenos desagregados según macrozona. Memoria de título, Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.
- Rivera, J. (2015, 9 de diciembre). La red vial es imprescindible para el desarrollo y crecimiento de un país. Universidad de Piura.
- Sayed, S. M.; Sunna, H. N. & Moore, P. R. (2020). Truck Platooning Impact on Bridge Preservation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001444](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001444)
- Tohmé, R. & Yarnold, M. (2020). Steel Bridge Load Rating Impacts Owing to Autonomous Truck Platoons. *Transportation Research Record*, 2674(2), 57-67. <https://doi.org/10.1177/0361198120906012>
- Wassef, W. (2021). *Truck platooning impacts on bridges: Phase I – Structural safety*. Federal Highway Administration, Office of Infrastructure, Office of Bridges and Structures.
- Yarnold, M. & Weidner, J. (2019). Truck Platoon Impacts on Steel Girder Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 24(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001423](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001423)

## ANEXO A. CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SUSTENTABLE

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

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

### Vinculación

Los puentes son fundamentales para la conectividad y el desarrollo económico, pero su durabilidad depende de las cargas vivas que soportan. En Chile, las normativas actuales no reflejan en su totalidad las demandas del tráfico moderno, evidenciando la necesidad de actualizarlas. Este estudio analizó las demandas estructurales generadas por convoyes de camiones automatizados y propuso ajustes al patrón de carga HL-93 para garantizar los límites de diseño actuales.

Esta investigación se vincula con el ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura, al promover infraestructuras resilientes mediante recomendaciones que fortalecen su capacidad para enfrentar demandas futuras. Además, se conecta con el ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles, al garantizar una movilidad segura, favoreciendo un transporte preparado para los desafíos del futuro.

Este enfoque técnico establece ciertas bases sólidas para enfrentar las necesidades del transporte automatizado futuro en Chile.

## ANEXO 3.1 CÓDIGOS PYTHON PARA CÁLCULO DE DEMANDAS

### Código patrón de carga HS20-44+20%

```

import numpy as np

print('***** Manual de Carreteras HS20-44+20% *****')
print('Maximum Moment and Shear - Simple Span - One Lane')

span = 70          #m
L     = span/.3048 #ft
IM    = min(50/(L+125),0.30)
MOP   = 1.20

# Caso a: Standard HS20-44+20%
# valid for L>2a (28 ft). Tandem controls for L<37 ft.
# Max moment Barre's Teorem
P = 32*MOP
a = 14
x = L/2 - 5/6*a
A = P*( 9/4 - 9/4*(x/L) -3/2*(a/L))
Ma = A*x + (A-P)*a
# shear forces x=0
x = 0
Va = P*( 9/4 - 9/4*(x/L) -3/2*(a/L))

#Caso b: HS20 lane loading and concentrated load
M_lane = 0.64 * L**2 / 8
V_lane = 0.64 * L / 2

Mb = M_lane + 18*L/4
Vb = V_lane + 26

#Caso c: Military loading
P = 24
a = 4
# bending moment Barre's Teorem
x = L/2 - 1/4*a
A = 2*P - P/L*(2*x+a)
Mc = A*x
# shear force
x = 0
Vc = 2*P - P/L*(2*x+a)

# Unit change kip-ft to ton-m
Ma = Ma*0.4536*.3048
Mb = Mb*0.4536*.3048
Mc = Mc*0.4536*.3048
Va = Va*0.4536
Vb = Vb*0.4536

```

```

Vc = Vc*0.4536

# Print results
print( "Luz      : {:.2f} m".format(span))
print( "Impacto : {:.2f} ".format(IM))
print( "M_LL     : {:.2f} ton-m".format( max(Ma, Mb, Mc) ) )
print( "M_LLIM    : {:.2f} ton-m".format( max(Ma, Mb, Mc)*(1+IM) ) )
print( "V_LL     : {:.2f} ton".format( max(Va, Vb, Vc) ) )
print( "V_LLIM    : {:.2f} ton".format( max(Va, Vb, Vc)*(1+IM) ) )

```

### Código patrón de carga HL-93

```

import numpy as np

span = 70      #m
L = span/0.3048 #ft
IM = 0.33

print('**** HL 93 AASHTO LFRD *****)
print('Maximum Moment and Shear - Simple Span - One Lane')
# Caso a: Standard HS20-44 + Lane load, L > 28.
a = 336/(144+0.64*L)
M_truck = 16*( 9/8*L + a/L*(21-4.5*a) - 17.5 )
M_lane = 0.08*(L**2 - 4*a**2 )
MaLL = M_truck + M_lane
MaLLIM = (1+IM)*M_truck + M_lane

V_truck = 72 - 672/L
V_lane = 0.64 * L / 2
VaLL = V_truck + V_lane
VaLLIM = (1+IM)*V_truck + V_lane

#Caso b: Tandem + Lane load
b = 100/(100+0.64*L)
M_tandem = 50*(L/4 + b/L*(2-b) - 1)
M_lane = 0.08*(L**2 - 4*b**2 )
MbLL = M_tandem + M_lane
MbLLIM = (1+IM)*M_tandem + M_lane

V_tandem = 2*25 - 25*4/L
VbLL = V_tandem + V_lane
VbLLIM = (1+IM)*V_tandem + V_lane

# if L<28:
# MaLL=0
# MaLLIM=0
# VaLL=0
# VaLLIM=0

# Unit change kip-ft to ton-m
MaLL = MaLL*0.4536*.3048
MaLLIM = MaLLIM*0.4536*.3048

```

```

MbLL = MbLL*0.4536*.3048
MbLLIM = MbLLIM*0.4536*.3048
VaLL = VaLL*0.4536
VaLLIM = VaLLIM*0.4536
VbLL = VbLL*0.4536
VbLLIM = VbLLIM*0.4536

# Print results
print( "Luz      : {:8.2f} m".format(span))
print( "Impacto : {:8.2f} ".format(IM))
print( "V_LL     : {:8.2f} ton".format( max(VaLL, VbLL) ))
print( "M_LL     : {:8.2f} ton-m".format( max(MaLL, MbLL) ) )
print( "V_LLIM   : {:8.2f} ton".format( max(VaLLIM, VbLLIM) ) )
print( "M_LLIM   : {:8.2f} ton-m".format( max(MaLLIM, MbLLIM) ) )

```

### Código de análisis de cargas móviles para un convoy de 2 camiones 450 separados a 15 m

```

# Solve a simple single supported beam under multiple loads accounting for those loads
that end up outside the bridge
# Victor Aguilar, PhD. Fondecyt Marzo 2023
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import time

def mapping(L, DL):
    X = np.arange(0, L+DL, DL) # vector for length
    return X

def shear_and_moment_diagrams(X, P, a):
    L=X[-1]
    R_left = P*(L-a)/L # left reaction
    R_right = P*a/L # right reaction
    V=[] # shear force starting vector
    M=[] # moment starting vector
    if a<L:
        for x in X:
            if x<= a:
                m = R_left*x
                v = R_left
            else:
                m = R_left*x - P*(x-a)
                v = -R_right
            M.append(m)
            V.append(v)
        M = np.array(M)
        V = np.array(V)
    else:
        M = np.zeros_like(X)
        V = np.zeros_like(X)
    return M, V

def moment_diagram(X, Mom):

```

```

L=X[-1]
plt.plot(X,Mom,'k')
plt.plot([0,L],[0,0],'k--')
plt.xlabel('Position (m)')
plt.ylabel('Bending moment (kN-m)')
plt.fill_between(X, Mom, 0, alpha=0.3)
plt.grid(True)
ax = plt.gca()
ax.set_ylim(ax.get_ylim()[::-1])
plt.show()

def shear_diagram(X, shear):
    L=X[-1]
    plt.plot(X,shear,'k')
    plt.plot([0,L],[0,0],'k--')
    plt.xlabel('Position (m)')
    plt.ylabel('Shear force (kN)')
    plt.fill_between(X, shear, 0, color='orange', alpha=0.3)
    plt.grid(True)
    plt.show()

def solveIt(L, DL, Load, Spacing, Truck_Pos):
    X      = mapping(L,DL)
    Spacing = np.array(Spacing)
    Loc_Pos = np.cumsum(Spacing)
    SumM=0
    SumV=0
    for i in range(len(Load)):
        M, V = shear_and_moment_diagrams(X, P = Load[i], a = Truck_Pos+Loc_Pos[i])
        SumM = SumM + M
        SumV = SumV + V
    return SumV, SumM

# Inputs
L = 70
DL = 0.10
Load      = [8.1, 9.4, 6.2, 6.3, 8.1, 9.4, 6.2, 6.3]
Spacing   = [0, 1.45, 2.75, 1.75, 15, 1.45, 2.75, 1.75]

# Record the start time
start_time = time.time()
# loop the truck along the bridge
X      = mapping(L, DL)
Truck_Pos = mapping(L, DL)
# initialize variables
j = 0
SumV = np.zeros( (len(X), len(Truck_Pos)) )
SumM = np.zeros( (len(X), len(Truck_Pos)) )
for position in Truck_Pos:
    SumV[j,:], SumM[j,:] = solveIt(L, DL, Load, Spacing, position)
    j=j+1

# Maximum internal forces
Mmax = np.max(SumM)

```

```

Vmax = np.max(np.abs(SumV))

# Record the end time
end_time = time.time()

# Calculate the elapsed time
elapsed_time = end_time - start_time

print( "Mmax : {:8.2f} ton-m".format(Mmax) )
print( "Vmax : {:8.2f} ton".format(Vmax) )
print(f"Elapsed time: {elapsed_time} seconds")

```

### Código de análisis de cargas móviles para un convoy de 3 camiones 520 separados a 15 m

```

# Solve a simple single supported beam under multiple loads accounting for those loads
that end up outside the bridge
# Victor Aguilar, PhD. Fondecyt Marzo 2023
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import time

def mapping(L, DL):
    X = np.arange(0, L+DL, DL) # vector for length
    return X

def shear_and_moment_diagrams(X, P, a):
    L=X[-1]
    R_left = P*(L-a)/L # left reaction
    R_right = P*a/L # right reaction
    V=[] # shear force starting vector
    M=[] # moment starting vector
    if a<L:
        for x in X:
            if x<= a:
                m = R_left*x
                v = R_left
            else:
                m = R_left*x - P*(x-a)
                v = -R_right
            M.append(m)
            V.append(v)
        M = np.array(M)
        V = np.array(V)
    else:
        M = np.zeros_like(X)
        V = np.zeros_like(X)
    return M, V

def moment_diagram(X, Mom):
    L=X[-1]
    plt.plot(X,Mom,'k')
    plt.plot([0,L],[0,0],'k--')

```

```

plt.xlabel('Position (m)')
plt.ylabel('Bending moment (kN-m)')
plt.fill_between(X, Mom, 0, alpha=0.3)
plt.grid(True)
ax = plt.gca()
ax.set_ylim(ax.get_ylim()[::-1])
plt.show()

def shear_diagram(X, shear):
    L=X[-1]
    plt.plot(X,shear,'k')
    plt.plot([0,L],[0,0],'k--')
    plt.xlabel('Position (m)')
    plt.ylabel('Shear force (kN)')
    plt.fill_between(X, shear, 0, color='orange', alpha=0.3)
    plt.grid(True)
    plt.show()

def solveIt(L, DL, Load, Spacing, Truck_Pos):
    X      = mapping(L,DL)
    Spacing = np.array(Spacing)
    Loc_Pos = np.cumsum(Spacing)
    SumM=0
    SumV=0
    for i in range(len(Load)):
        M, V = shear_and_moment_diagrams(X, P = Load[i], a = Truck_Pos+Loc_Pos[i])
        SumM = SumM + M
        SumV = SumV + V
    return SumV, SumM

# Inputs
L = 70
DL = 0.10
Load      = [10.2, 10.3, 8.1, 9, 6.4, 10.2, 10.3, 8.1, 9, 6.4, 10.2, 10.3, 8.1, 9, 6.4]
Spacing   = [0, 5.5, 5.2, 1.35, 4.8, 15, 5.5, 5.2, 1.35, 4.8, 15, 5.5, 5.2, 1.35, 4.8]

# Record the start time
start_time = time.time()
# loop the truck along the bridge
X      = mapping(L, DL)
Truck_Pos = mapping(L, DL)
# initialize variables
j = 0
SumV = np.zeros( (len(X), len(Truck_Pos)) )
SumM = np.zeros( (len(X), len(Truck_Pos)) )
for position in Truck_Pos:
    SumV[j,:], SumM[j,:] = solveIt(L, DL, Load, Spacing, position)
    j=j+1

# Maximum internal forces
Mmax = np.max(SumM)
Vmax = np.max(np.abs(SumV))

# Record the end time

```

```

end_time = time.time()

# Calculate the elapsed time
elapsed_time = end_time - start_time

print( "Mmax : {:.2f} ton-m".format(Mmax) )
print( "Vmax : {:.2f} ton".format(Vmax) )
print(f"Elapsed time: {elapsed_time} seconds")

```

### Código de análisis de cargas móviles para un convoy de 4 camiones 690 separados a 15 m

```

# Solve a simple single supported beam under multiple loads accounting for those loads
that end up outside the bridge
# Victor Aguilar, PhD. Fondecyt Marzo 2023
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import time

def mapping(L, DL):
    X = np.arange(0, L+DL, DL) # vector for length
    return X

def shear_and_moment_diagrams(X, P, a):
    L=X[-1]
    R_left = P*(L-a)/L # left reaction
    R_right = P*a/L # right reaction
    V=[] # shear force starting vector
    M=[] # moment starting vector
    if a<L:
        for x in X:
            if x<= a:
                m = R_left*x
                v = R_left
            else:
                m = R_left*x - P*(x-a)
                v = -R_right
            M.append(m)
            V.append(v)
        M = np.array(M)
        V = np.array(V)
    else:
        M = np.zeros_like(X)
        V = np.zeros_like(X)
    return M, V

def moment_diagram(X, Mom):
    L=X[-1]
    plt.plot(X,Mom,'k')
    plt.plot([0,L],[0,0],'k--')
    plt.xlabel('Position (m)')
    plt.ylabel('Bending moment (kN-m)')
    plt.fill_between(X, Mom, 0, alpha=0.3)

```

```

plt.grid(True)
ax = plt.gca()
ax.set_ylim(ax.get_ylim()[::-1])
plt.show()

def shear_diagram(X, shear):
    L=X[-1]
    plt.plot(X,shear,'k')
    plt.plot([0,L],[0,0],'k--')
    plt.xlabel('Position (m)')
    plt.ylabel('Shear force (kN)')
    plt.fill_between(X, shear, 0, color='orange', alpha=0.3)
    plt.grid(True)
    plt.show()

def solveIt(L, DL, Load, Spacing, Truck_Pos):
    X      = mapping(L,DL)
    Spacing = np.array(Spacing)
    Loc_Pos = np.cumsum(Spacing)
    SumM=0
    SumV=0
    for i in range(len(Load)):
        M, V = shear_and_moment_diagrams(X, P = Load[i], a = Truck_Pos+Loc_Pos[i])
        SumM = SumM + M
        SumV = SumV + V
    return SumV, SumM

# Inputs
L = 70
DL = 0.10
Load      = [7.8, 7.5, 6.9, 7.7, 8.7, 5.7, 7.8, 7.5, 6.9, 7.7, 8.7, 5.7, 7.8, 7.5, 6.9,
7.7, 8.7, 5.7, 7.8, 7.5, 6.9, 7.7, 8.7, 5.7]
Spacing   = [0, 1.3, 1.3, 7.7, 1.35, 3.1, 15, 1.3, 1.3, 7.7, 1.35, 3.1, 15, 1.3, 1.3,
7.7, 1.35, 3.1, 15, 1.3, 1.3, 7.7, 1.35, 3.1]

# Record the start time
start_time = time.time()
# loop the truck along the bridge
X      = mapping(L, DL)
Truck_Pos = mapping(L, DL)
# initialize variables
j = 0
SumV = np.zeros( (len(X), len(Truck_Pos)) )
SumM = np.zeros( (len(X), len(Truck_Pos)) )
for position in Truck_Pos:
    SumV[j,:], SumM[j,:] = solveIt(L, DL, Load, Spacing, position)
    j=j+1

# Maximum internal forces
Mmax = np.max(SumM)
Vmax = np.max(np.abs(SumV))

# Record the end time
end_time = time.time()

```

```
# Calculate the elapsed time
elapsed_time = end_time - start_time



print( "Mmax : {:.2f} ton-m".format(Mmax) )
print( "Vmax : {:.2f} ton".format(Vmax) )
print(f"Elapsed time: {elapsed_time} seconds")
```

## ANEXO 4.1 REGISTRO FOTOMETRÍA Y RESULTADOS CAMIONES

Fotometría de camiones:

Tabla A.4.1 Fotometría de camiones forestales tipo 520.

N°	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	IMAGEN
1	5244	1413	5594	6078	
2	4851	1327	5667	5089	
3	4824	1353	5726	6064	
4	5107	1307	5117	5299	

5	5032	1387	5749	5715	
6	4800	1326	5154	5715	
7	4580	1346	5059	5129	
8	4759	1427	5335	5506	
9	4884	1418	5978	5407	


















10	4494	1396	5628	5495	
11	4702	1353	5818	6152	
12	4388	1356	5473	5763	
13	4089	1222	5382	5924	
14	4388	1353	5965	6162	
15	4304	1345	5697	6071	
<b>PRO M</b>	4696	1355	5556	5704	

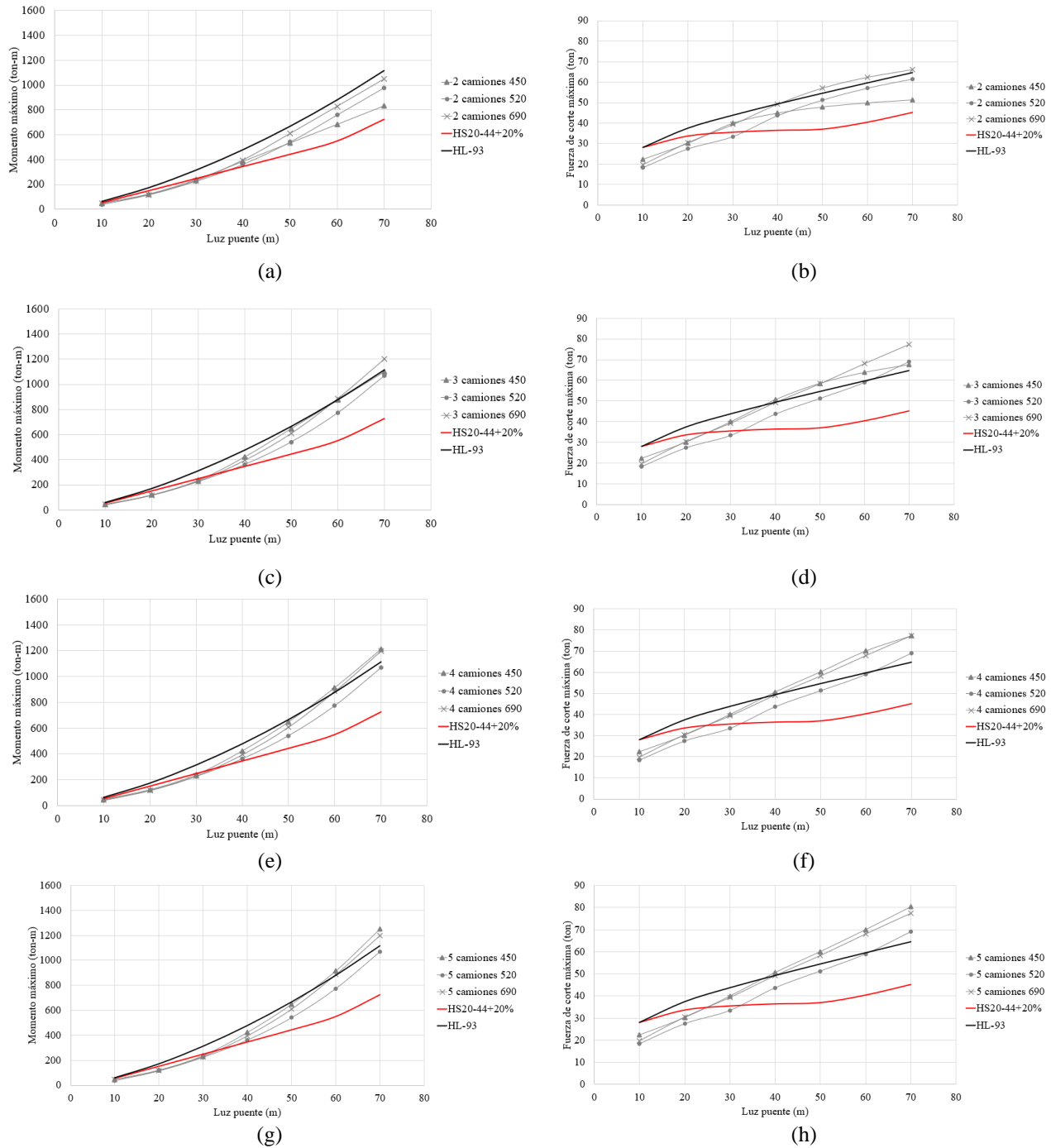
Tabla A.4.2 Fotometría de camiones multipropósito tipo 690.

N°	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	IMAGEN
1	3765	1150	6237	1353	1413	
2	3228	1359	6234	1308	1308	
3	3118	1323	7788	1686	1726	
4	3656	1433	6984	1383	1400	
5	3378	1415	7503	1611	1727	

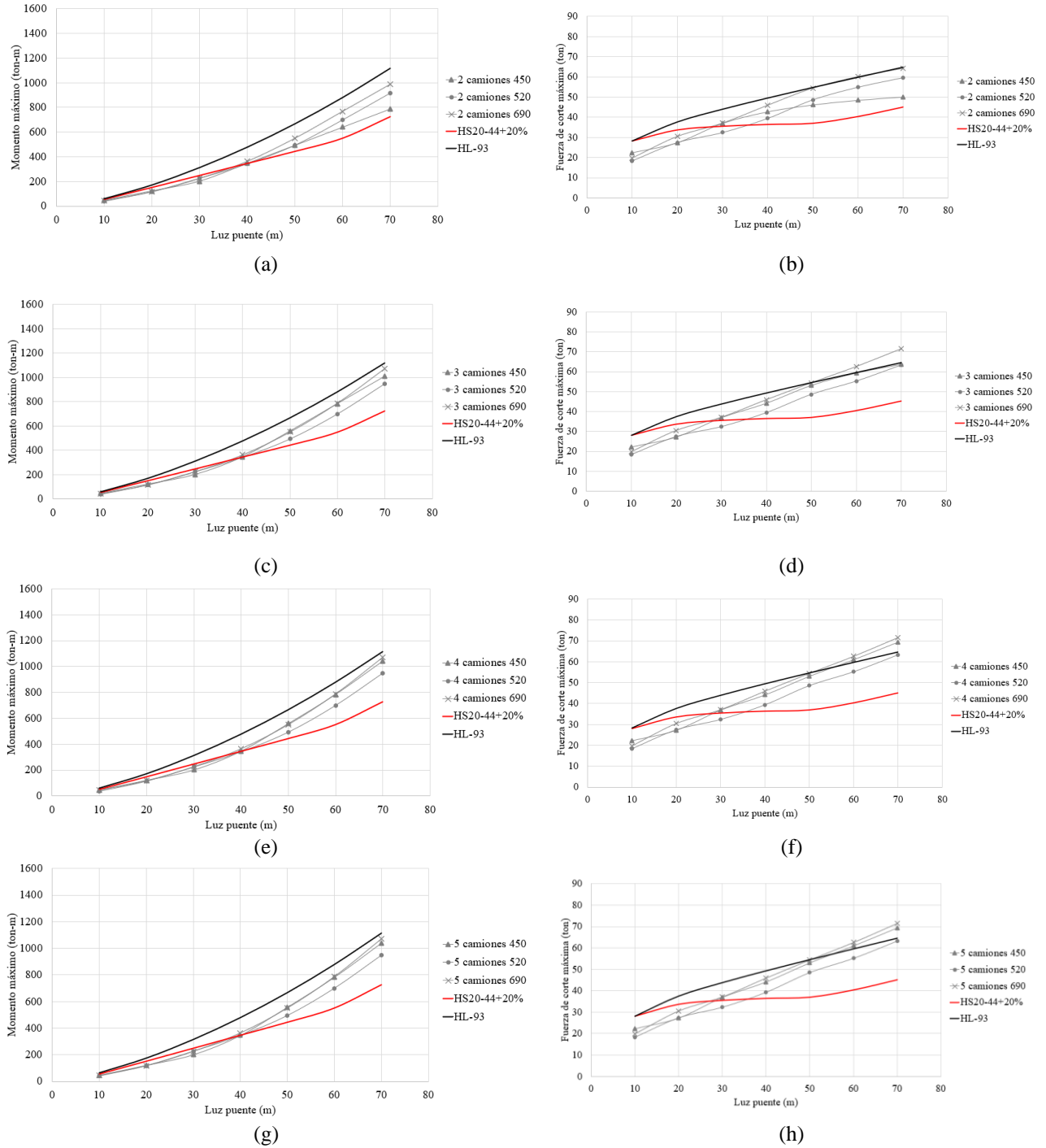
6	5501	1468	5827	1445	1498	
7	3788	1620	6029	1522	1540	
8	3683	1493	7874	1469	1518	
9	4439	1374	6886	1320	1268	
10	3630	1517	7174	1309	1295	
11	3883	1517	7243	1291	1228	

12	2957	1336	7662	1375	1442	
13	3228	1413	7129	1419	1410	
14	3339	1406	6951	1248	1297	
15	4438	1447	7015	1386	1431	
<b>PR OM</b>	3735	1418	6969	1408	1433	

**Resultados de convoyes camiones con separaciones de 9 y 12 m:**

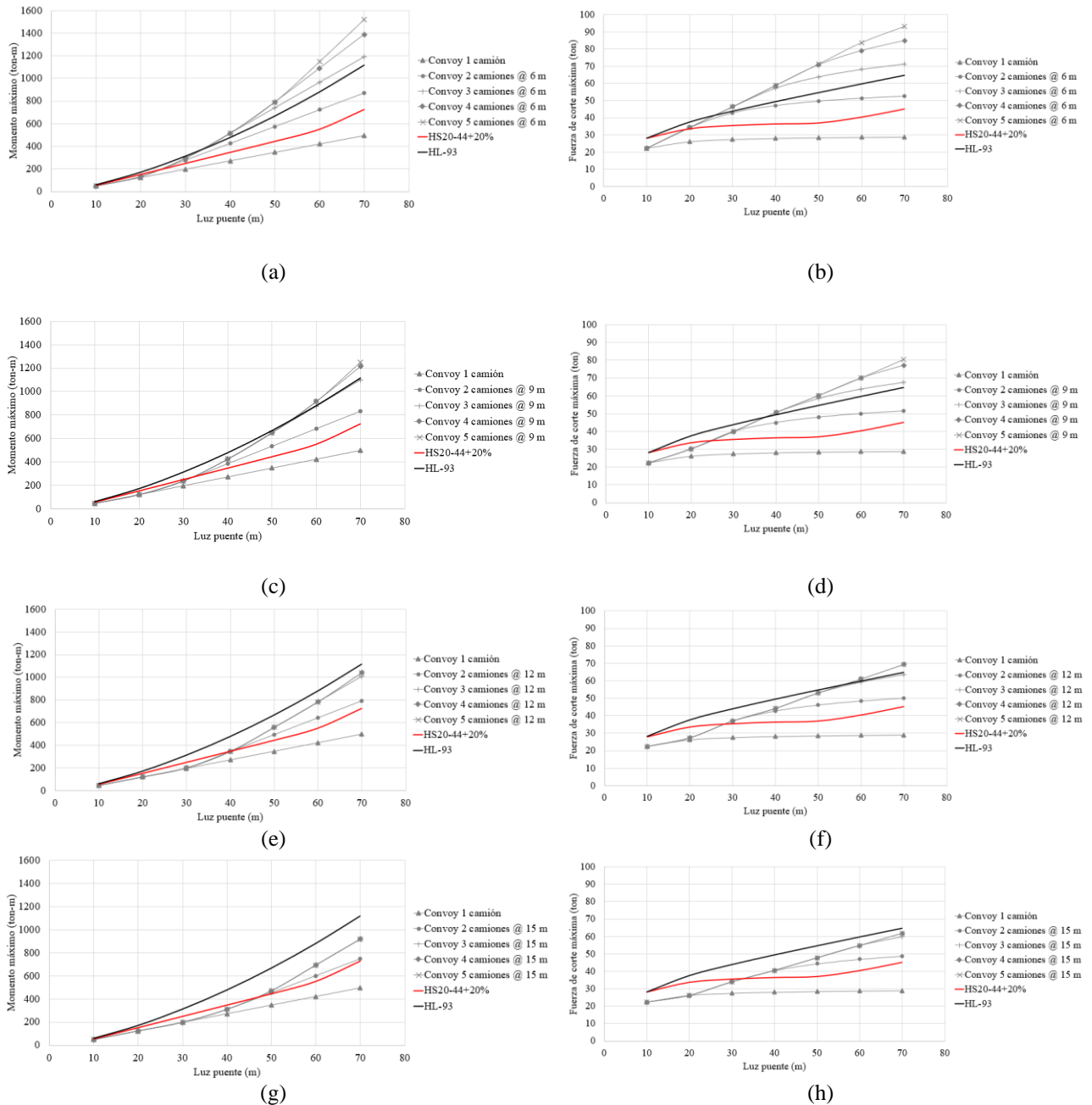


**Figura A.4.1 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 9 m en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 9 m en función de la luz del puente.**

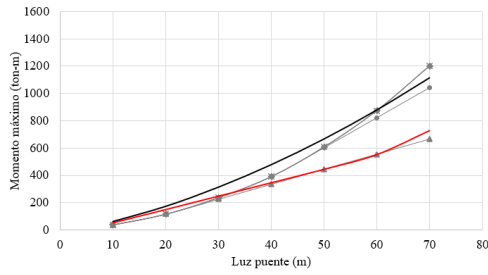


**Figura A.4.2 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 12 m en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por un convoy de 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente separados a 12 m en función de la luz del puente.**

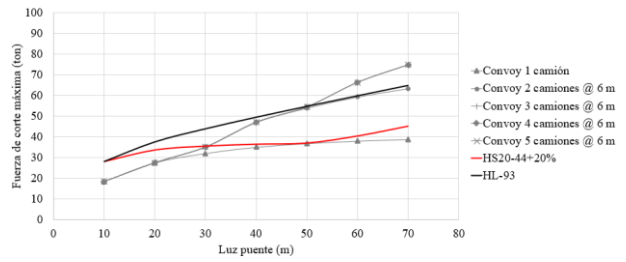
**Resultados camión 450 y 520 análisis separación:**



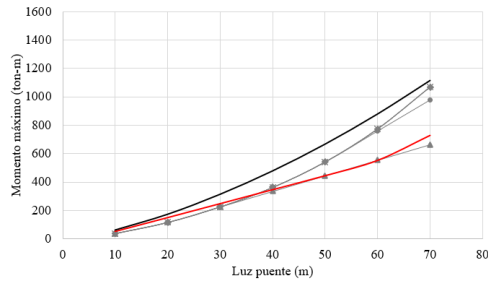
**Figura A.4.3 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por convoyes de camiones 450 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función de la luz del puente.**



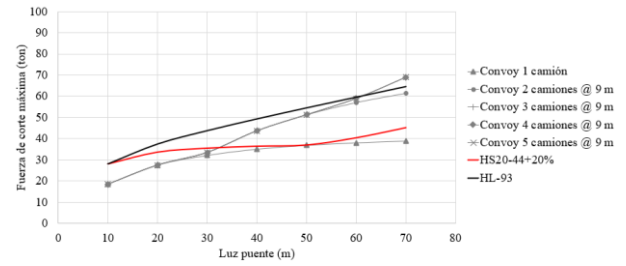
(a)



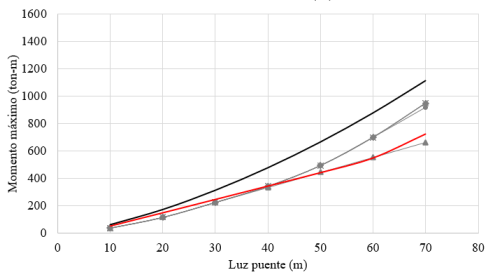
(b)



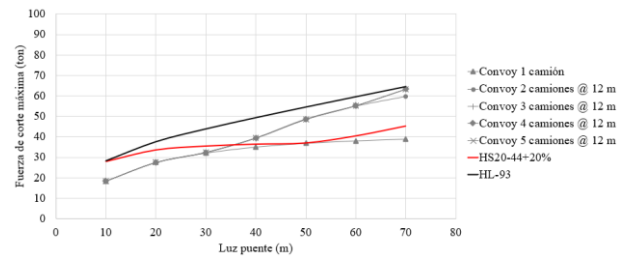
(c)



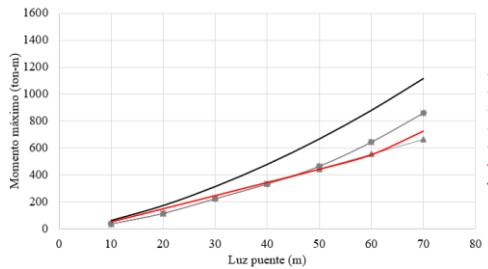
(d)



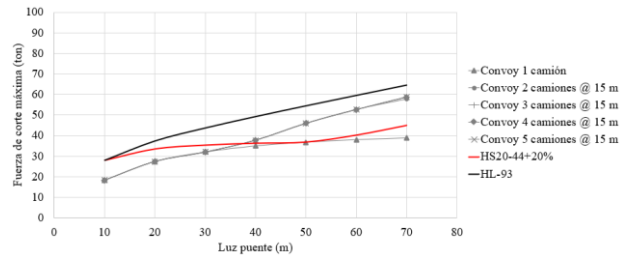
(e)



(f)



(g)



(h)

**Figura A.4.4 (a), (c), (e) y (g) Momentos generados por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función de la luz del puente. (b), (d), (f) y (h) Fuerzas de corte generadas por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función de la luz del puente.**

Resultados análisis de sensibilidad camión 520 y 690:

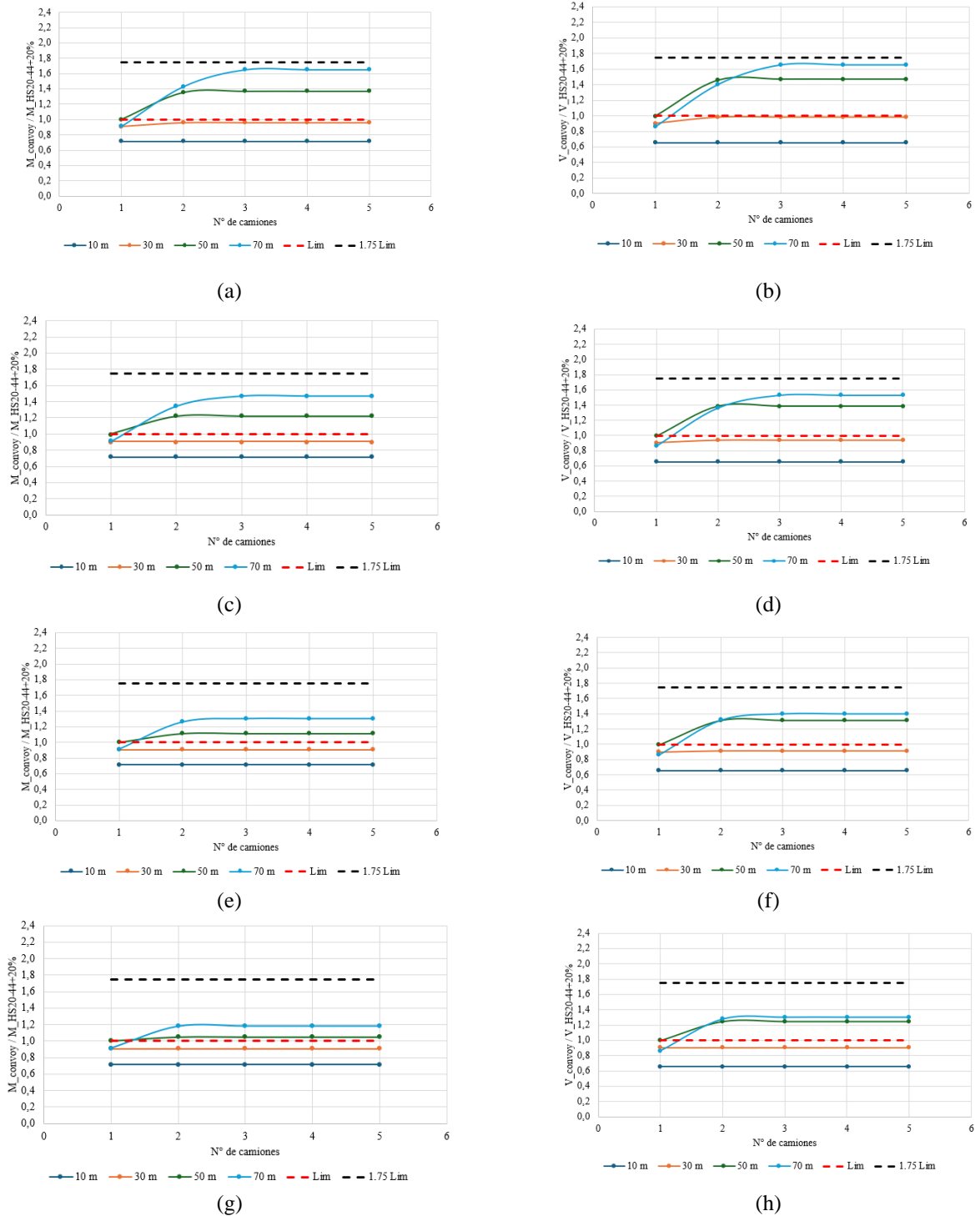
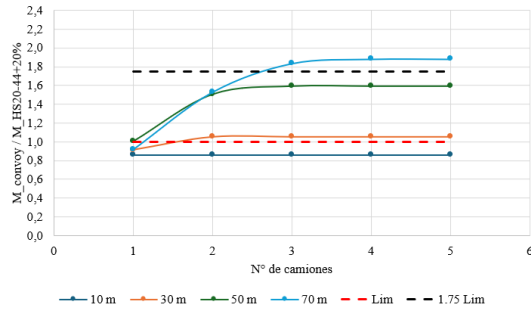
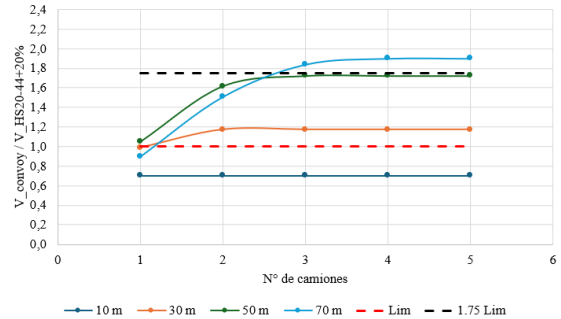


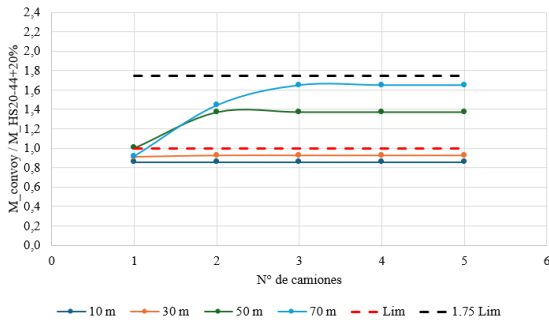
Figura A.4.5 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HS20-44+20%.



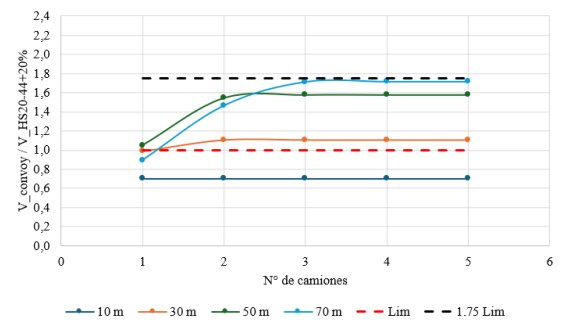
(a)



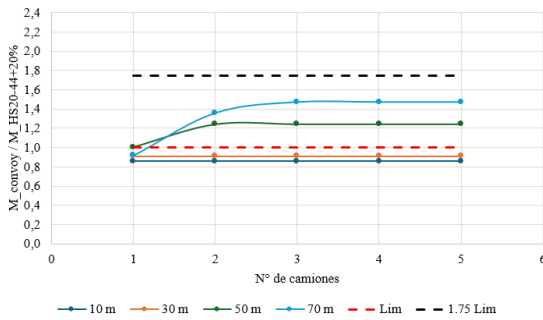
(b)



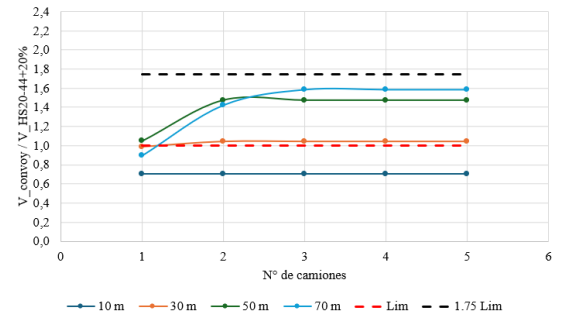
(c)



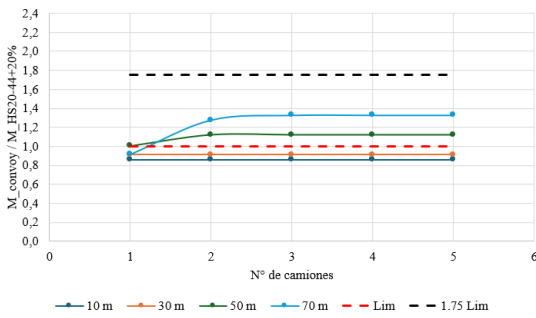
(d)



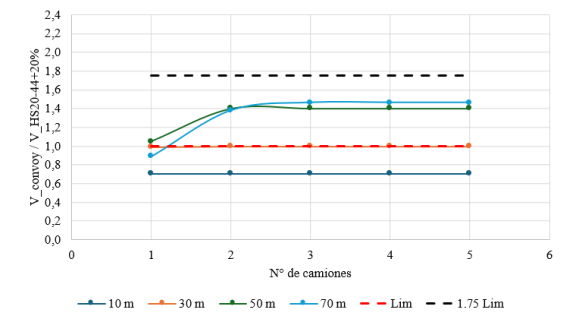
(e)



(f)

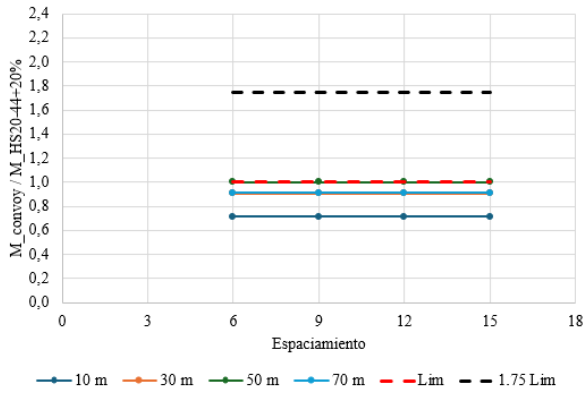


(g)

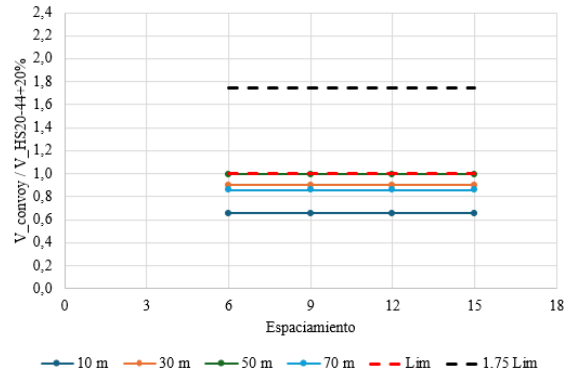


(h)

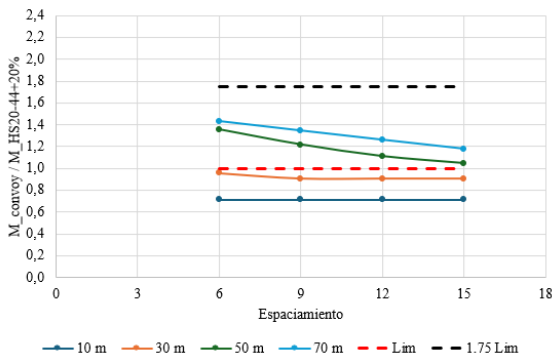
Figura A.4.6 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_v$ ) generadas por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HS20-44+20%.



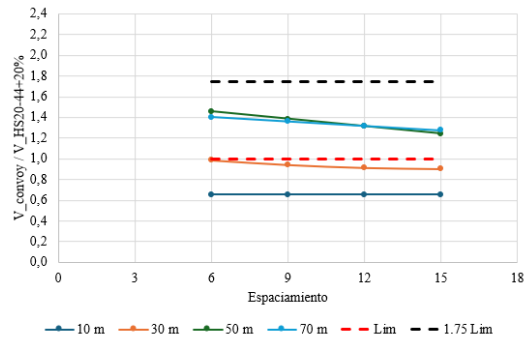
(a)



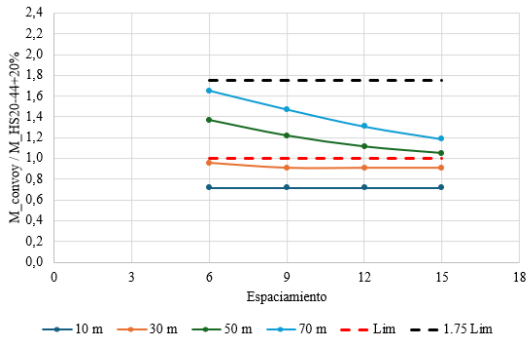
(b)



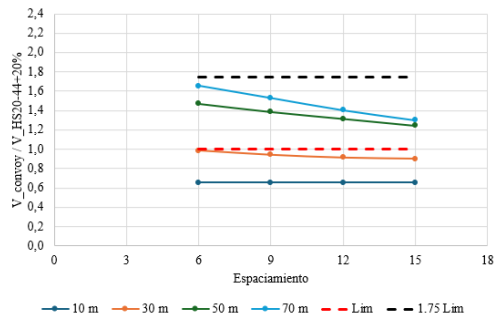
(c)



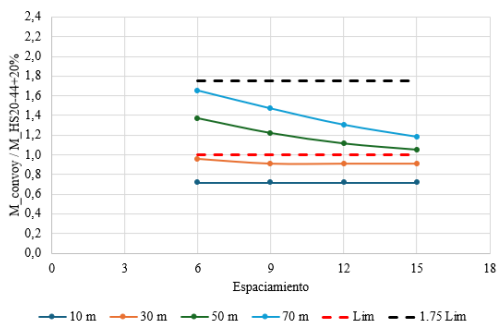
(d)



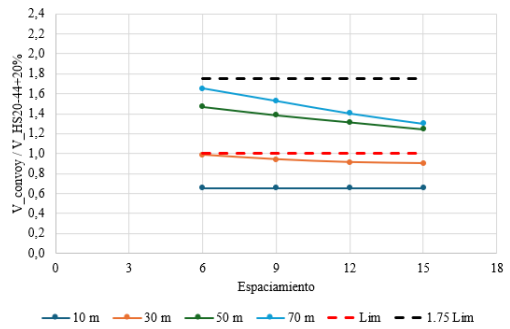
(e)



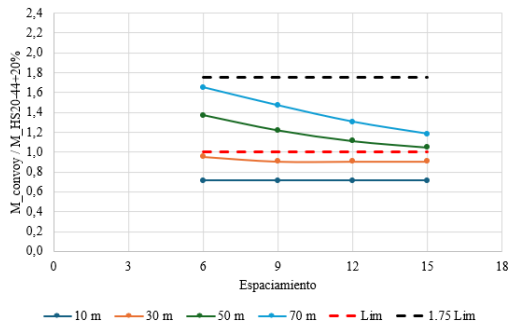
(f)



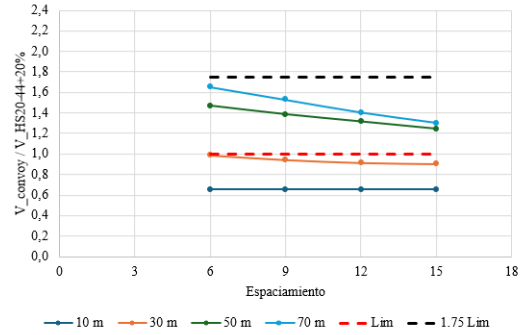
(g)



(h)

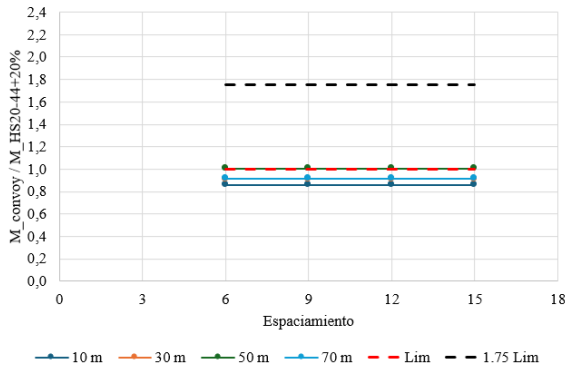


(i)

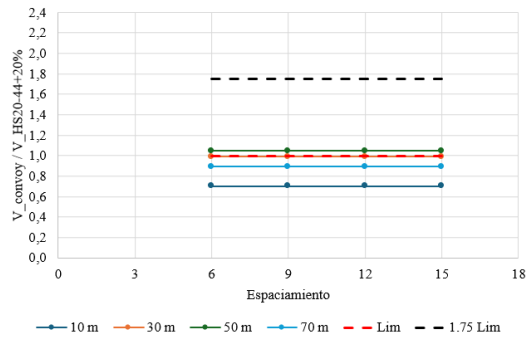


(j)

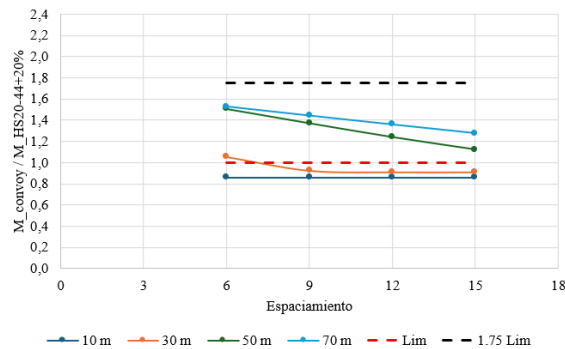
Figura A.4.7 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 520 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 520 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. HS20-44+20%.



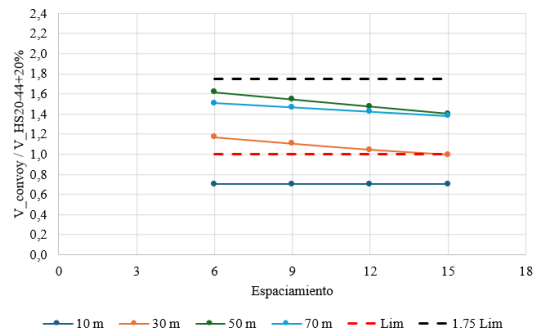
(a)



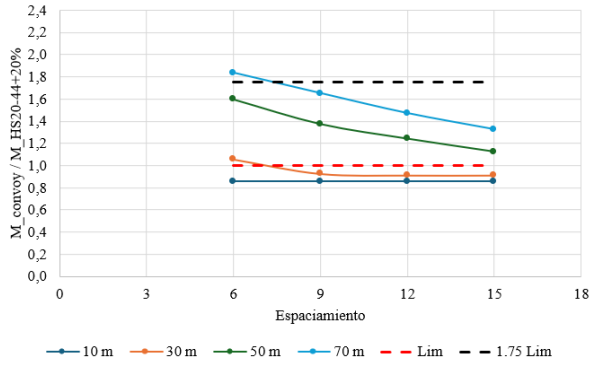
(b)



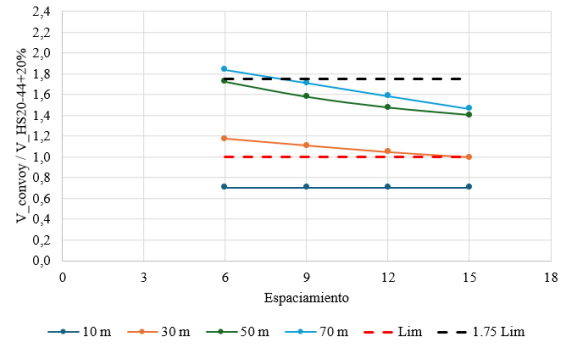
(c)



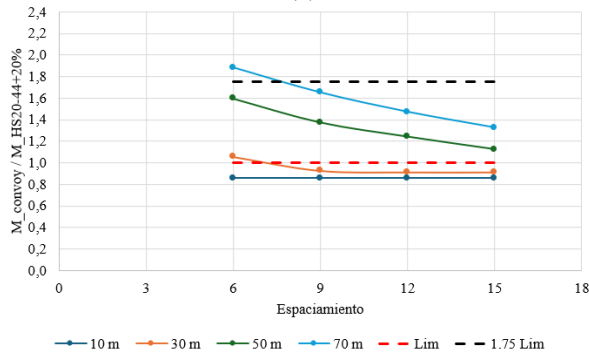
(d)



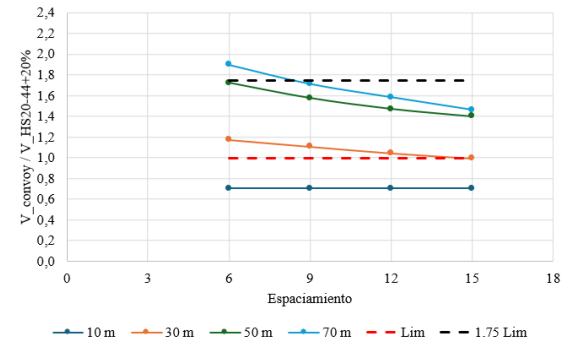
(e)



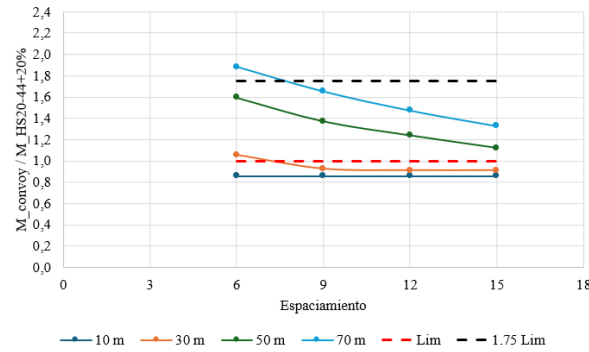
(f)



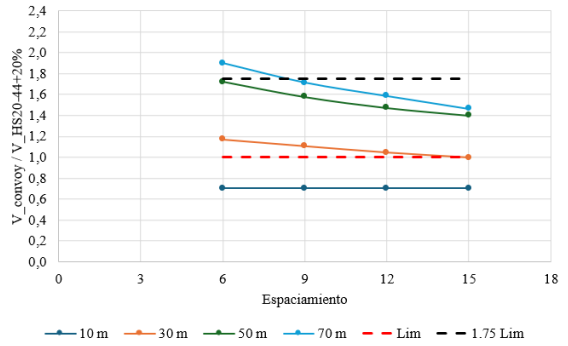
(g)



(h)

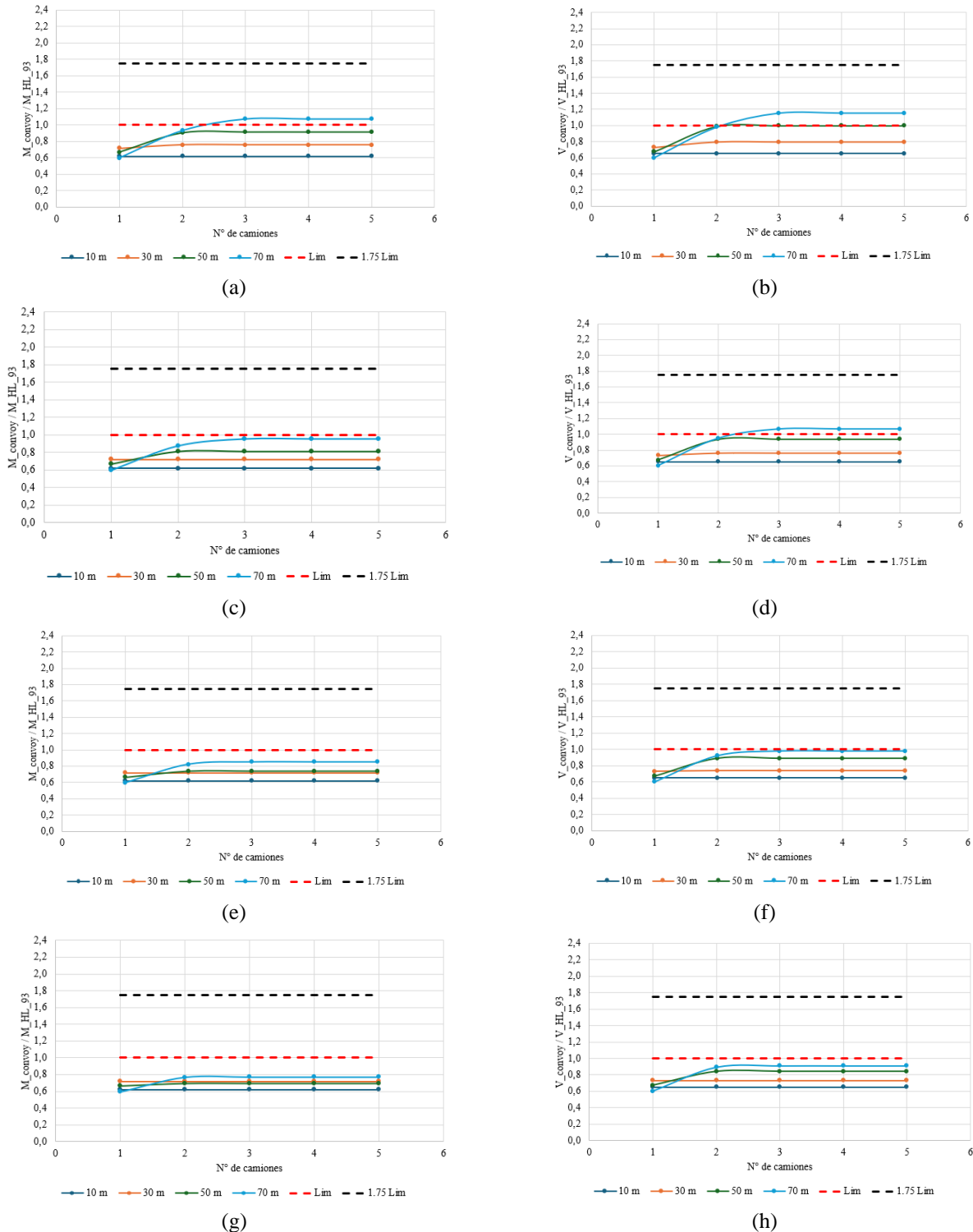


(i)

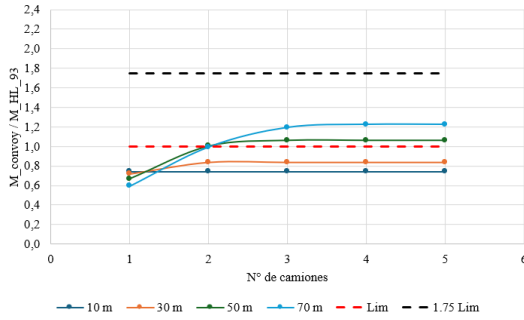


(j)

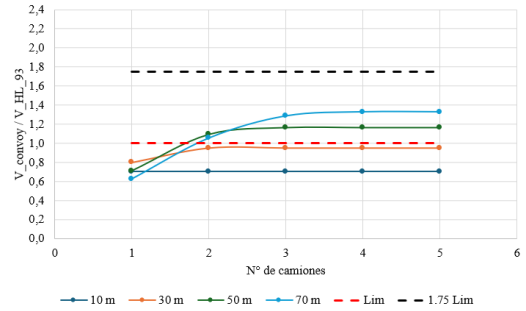
**Figura A.4.8 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 690 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 690 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. HS20-44+20%.**



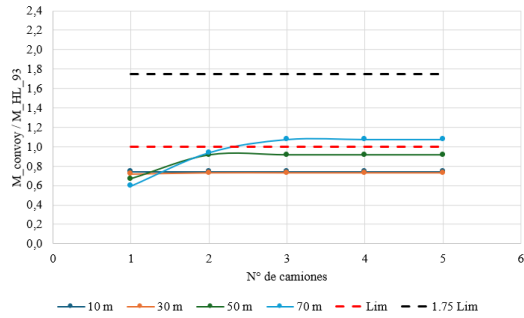
**Figura A.4.9 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HL-93.**



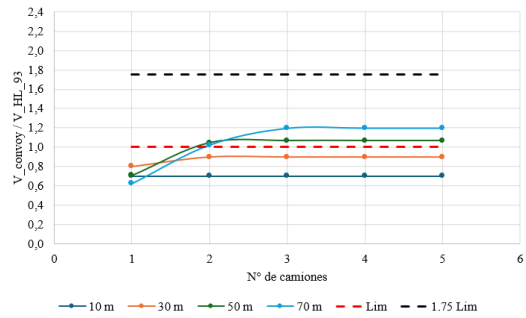
(a)



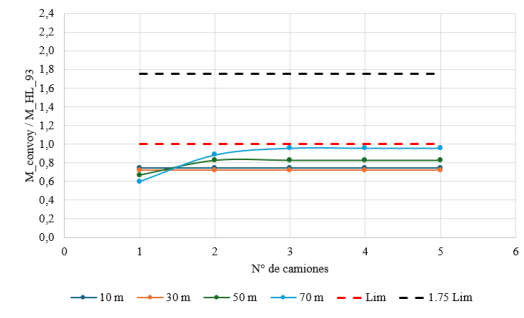
(b)



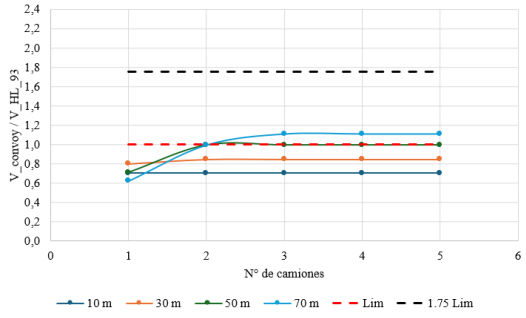
(c)



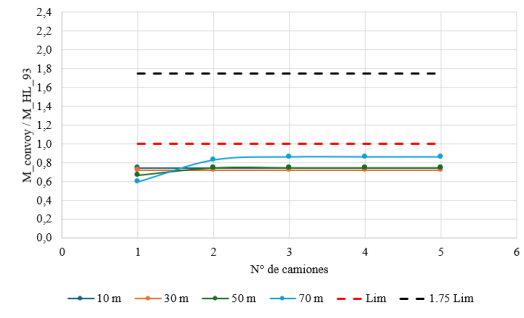
(d)



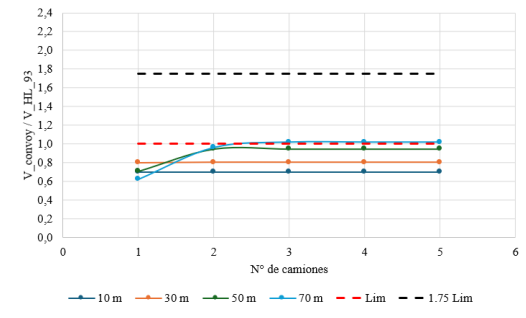
(e)



(f)

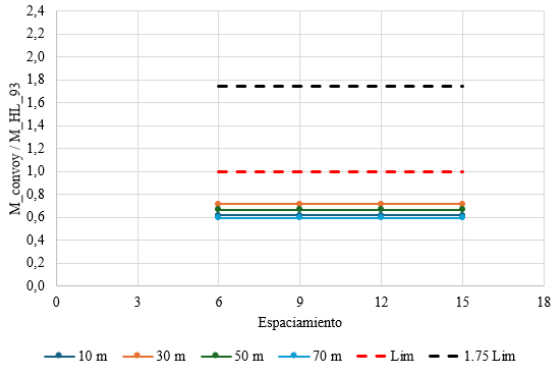


(g)

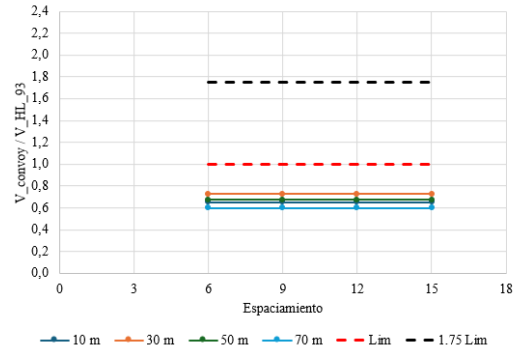


(h)

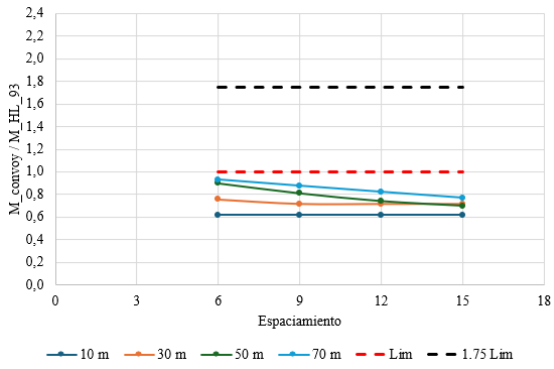
Figura A.4.10 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HL-93.



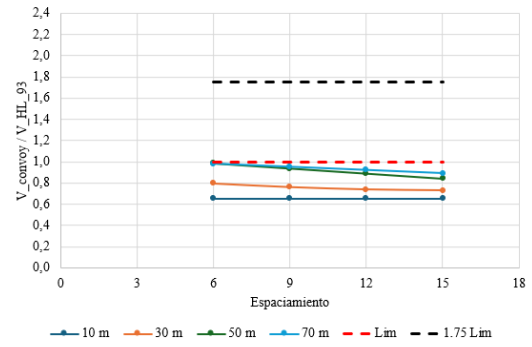
(a)



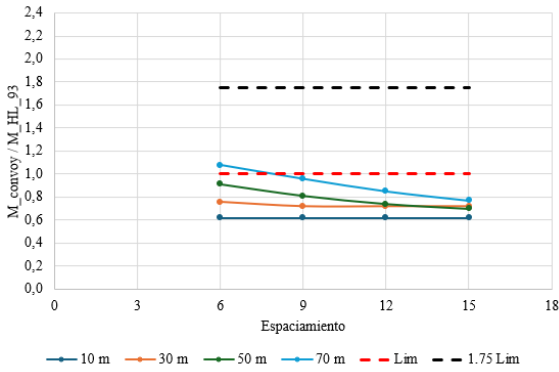
(b)



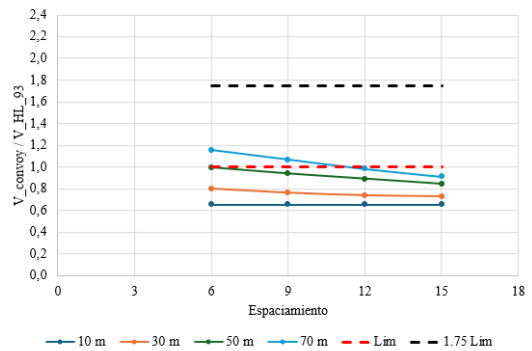
(c)



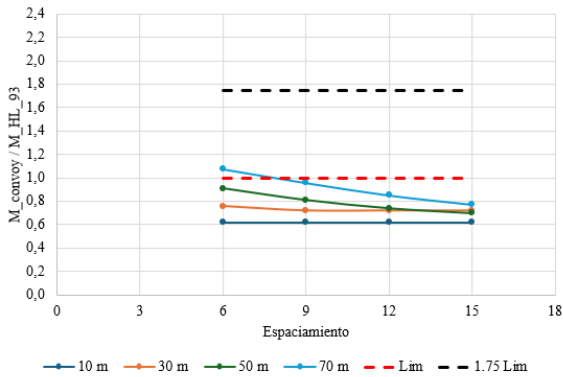
(d)



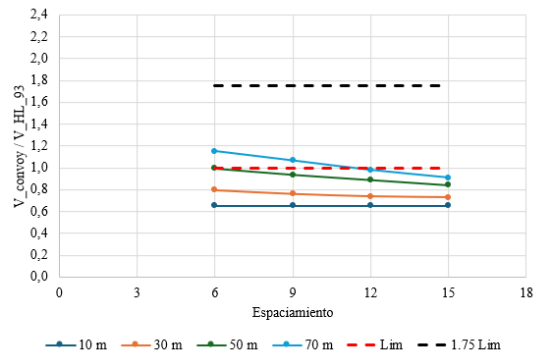
(e)



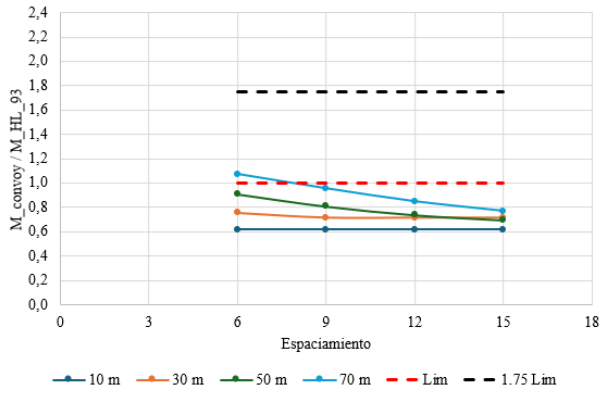
(f)



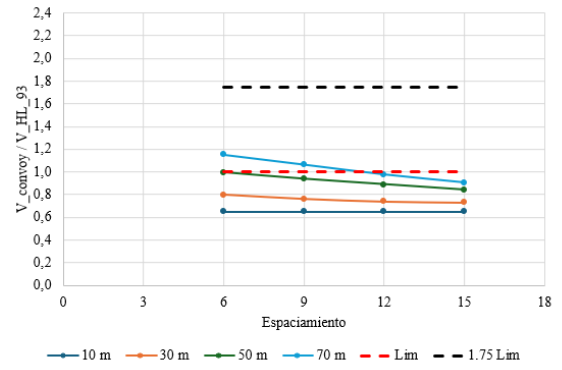
(g)



(h)

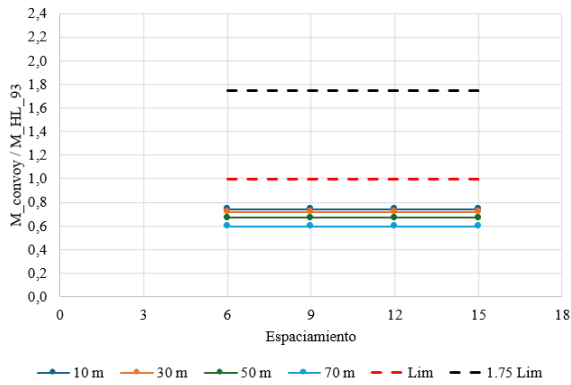


(i)

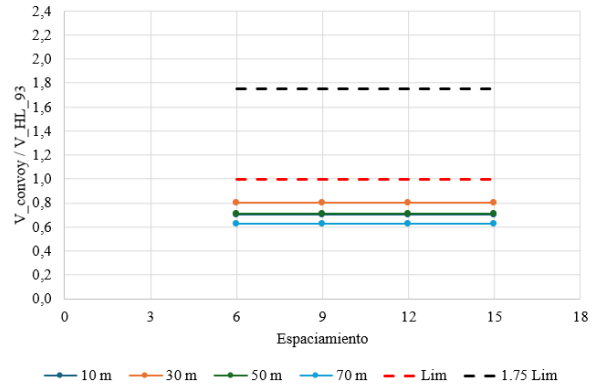


(j)

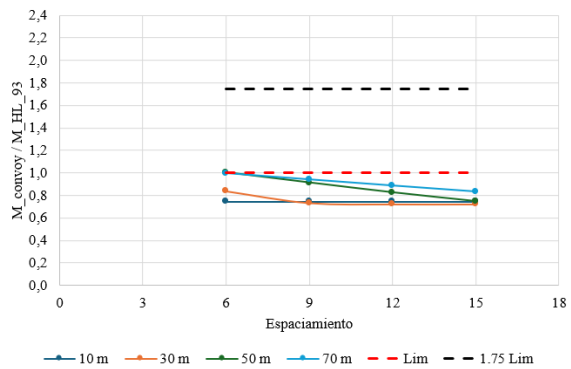
**Figura A.4.11 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 520 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 520 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. HL-93.**



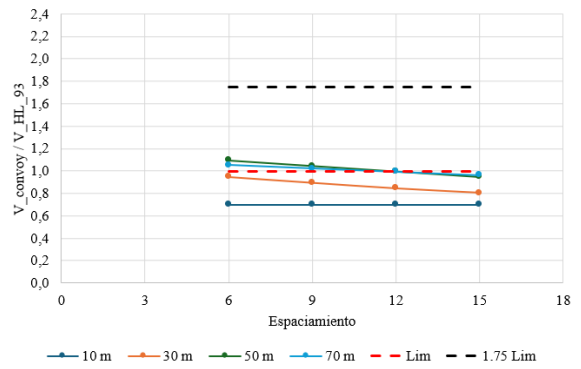
(a)



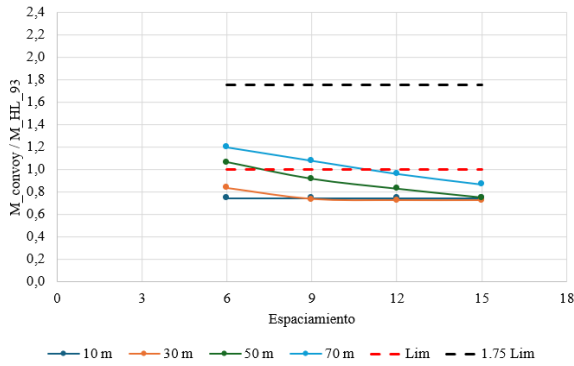
(b)



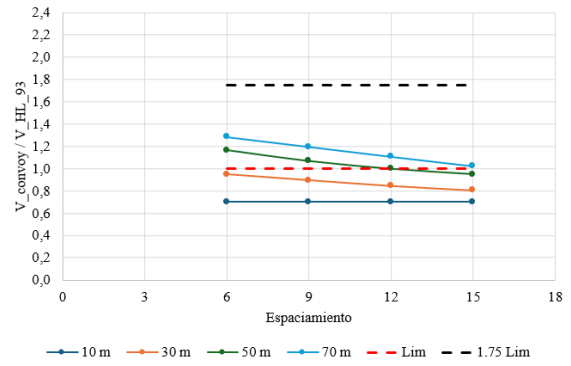
(c)



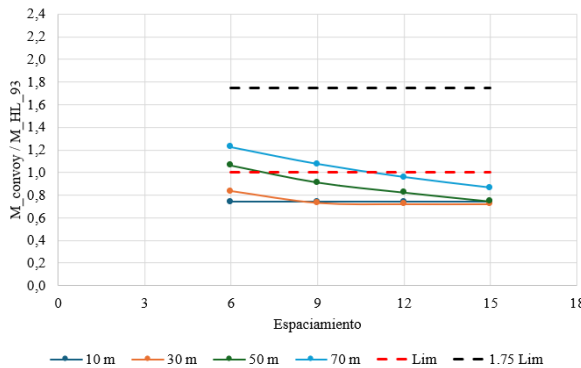
(d)



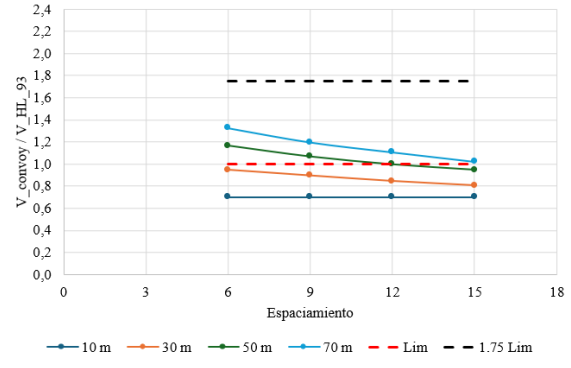
(e)



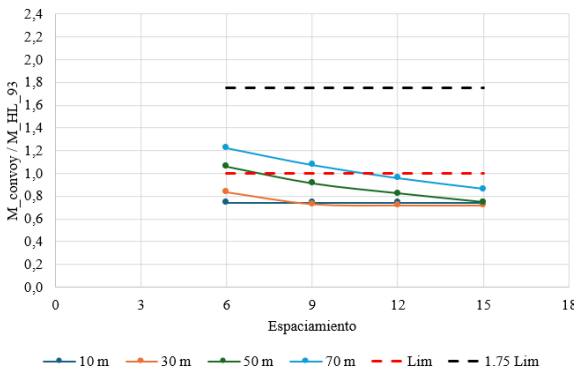
(f)



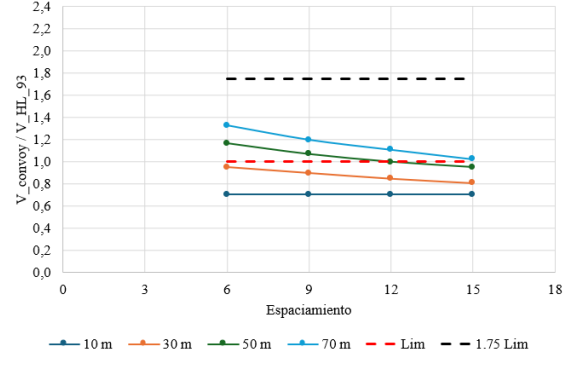
(g)



(h)

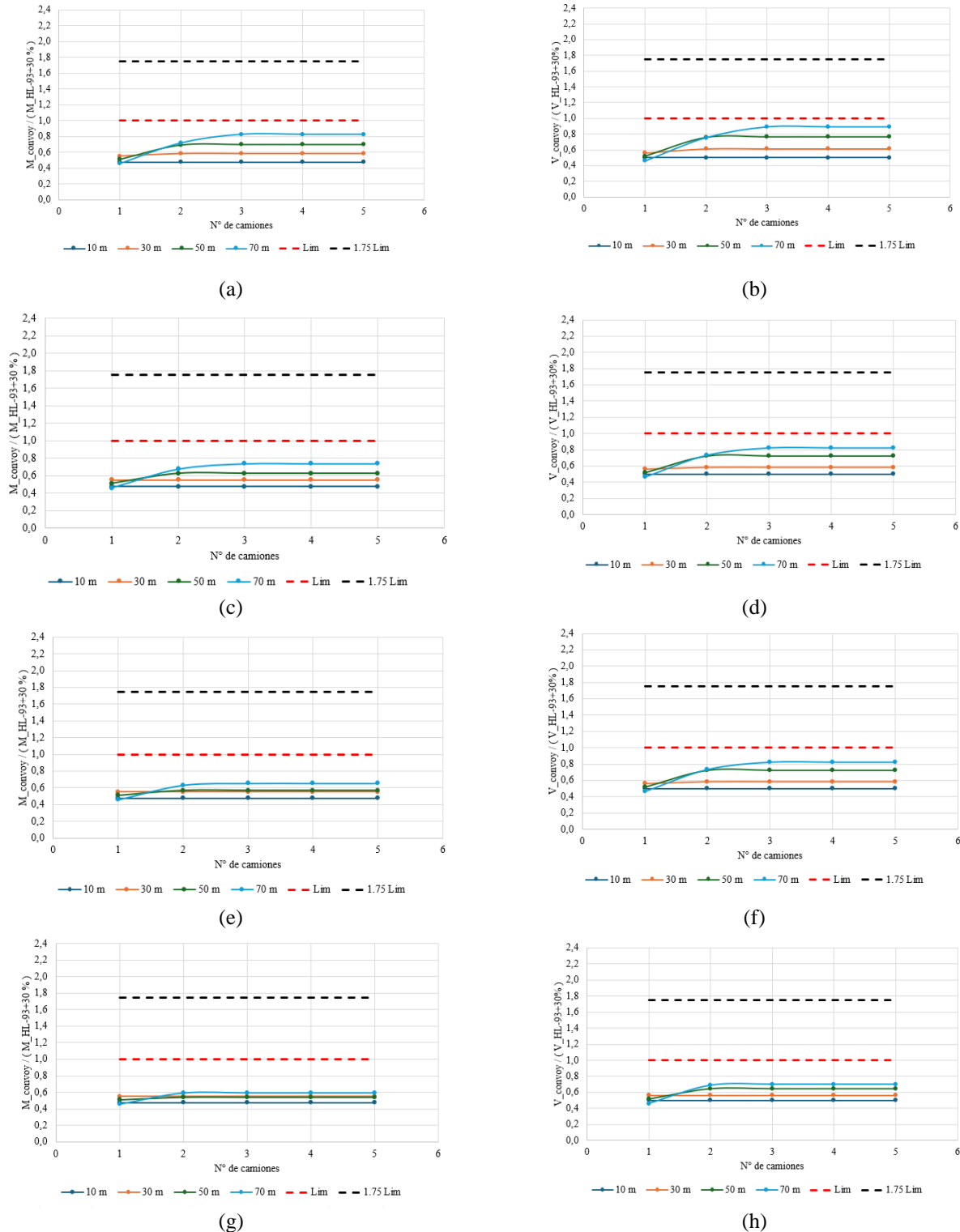


(i)

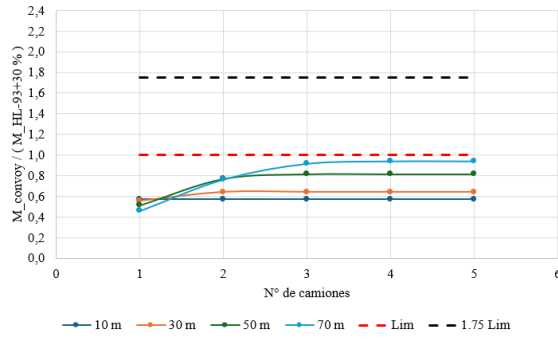


(j)

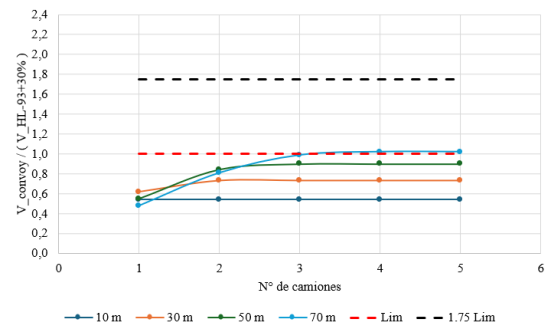
**Figura A.4.12 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 690 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 690 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamiento entre éstos. HL-93.**



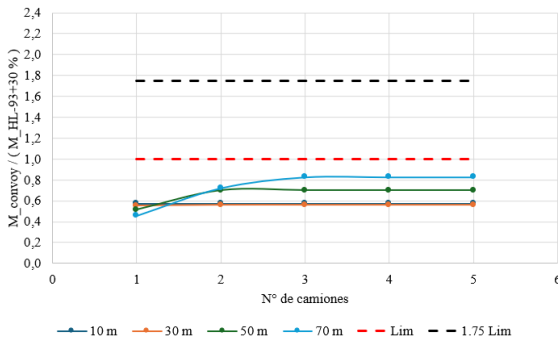
**Figura A.4.13 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 520 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HL-93+30%.**



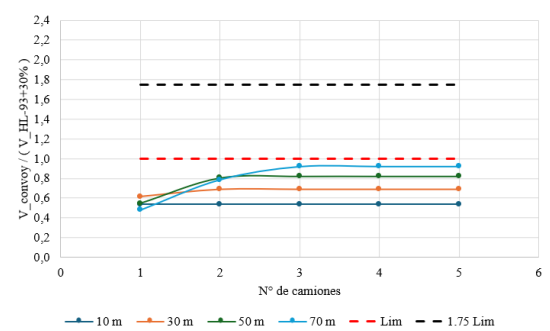
(a)



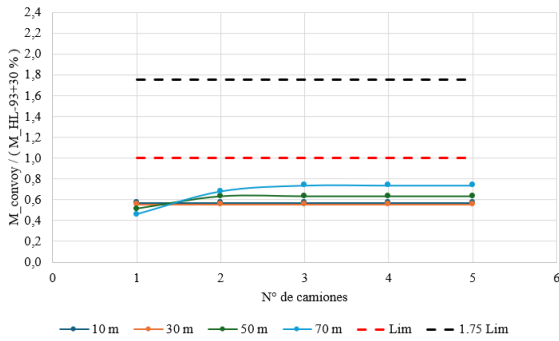
(b)



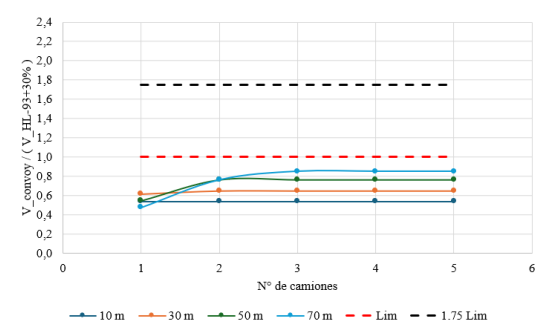
(c)



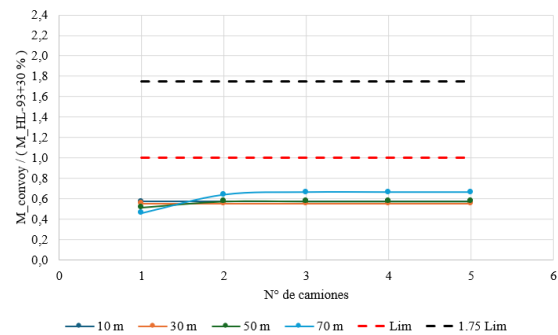
(d)



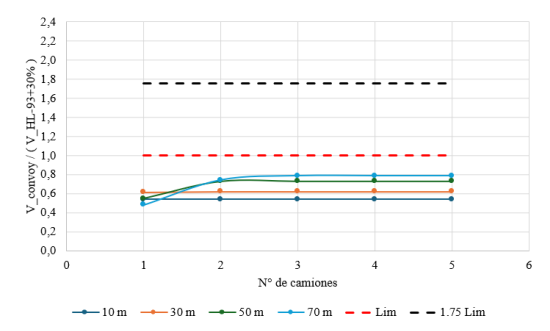
(e)



(f)

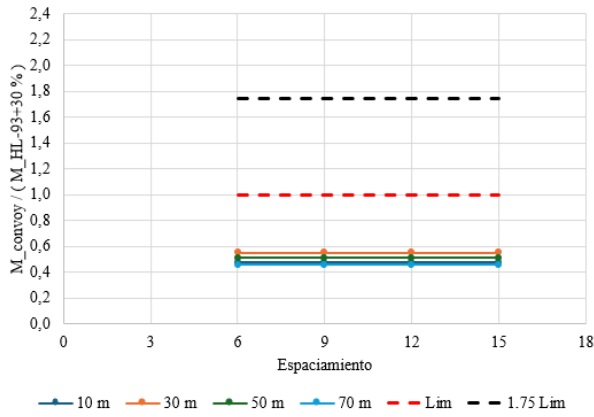


(g)

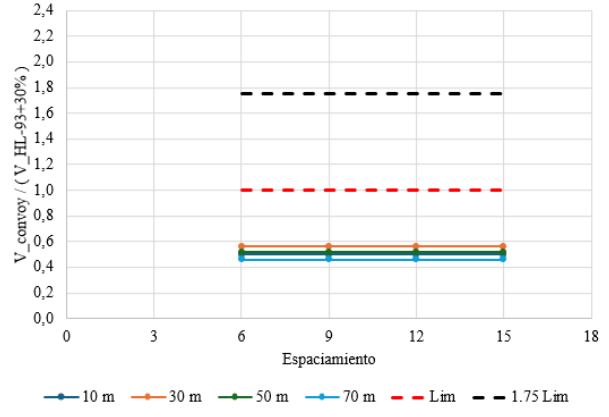


(h)

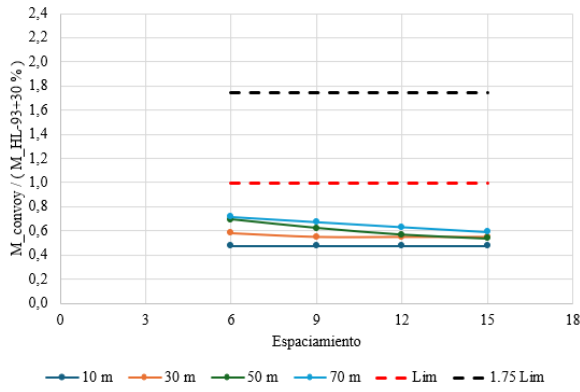
Figura A.4.14 (a), (c), (e) y (g) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. (b), (d), (f) y (h) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 690 separados a 6, 9, 12 y 15 m respectivamente en función del número de camiones. HL-93+30%.



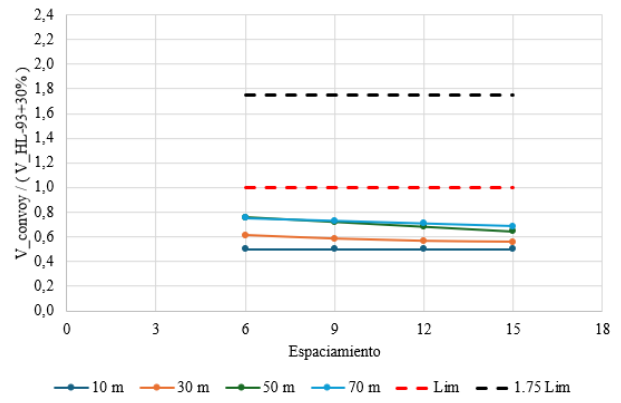
(a)



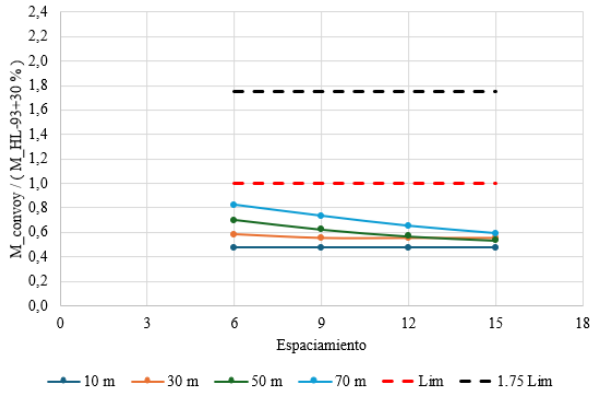
(b)



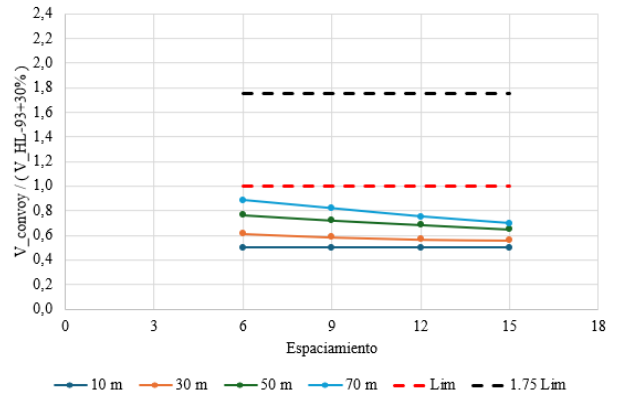
(c)



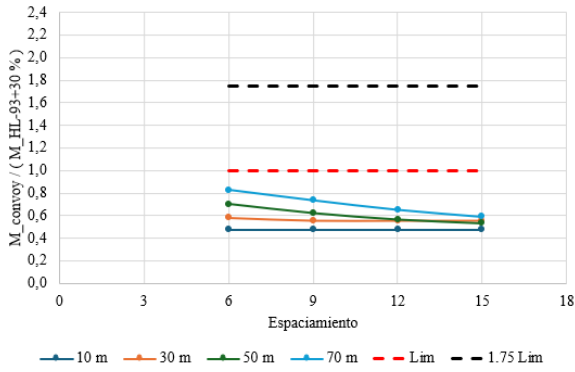
(d)



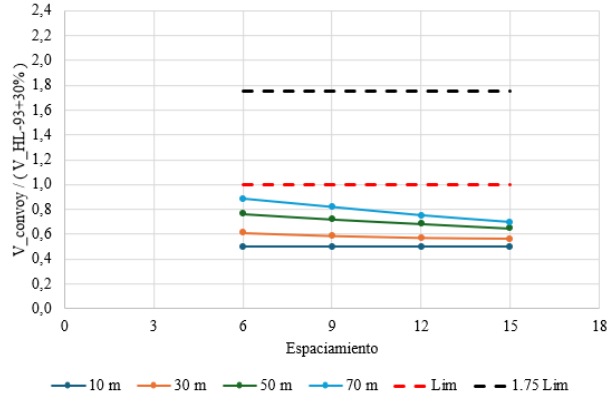
(e)



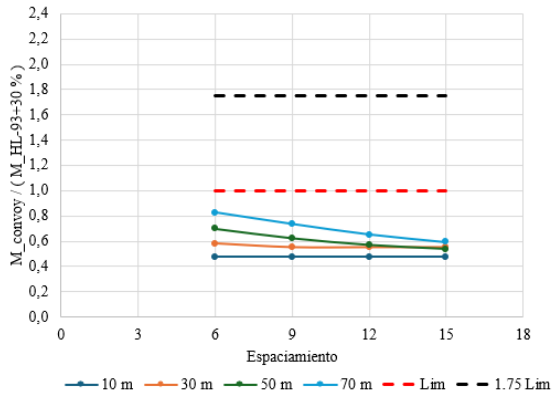
(f)



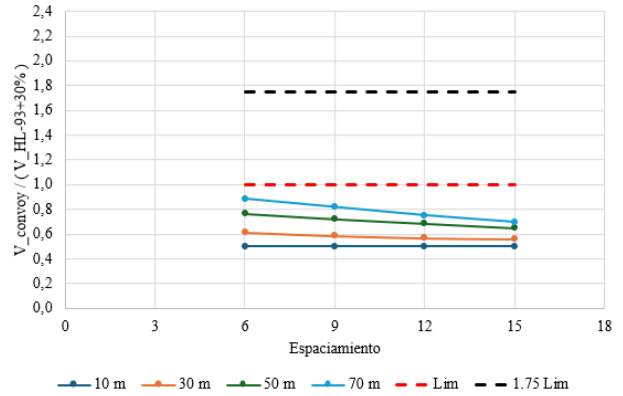
(g)



(h)

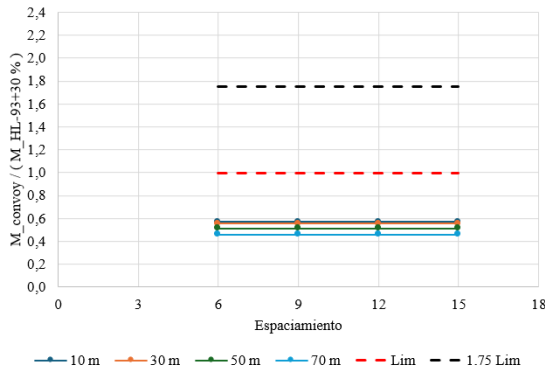


(i)

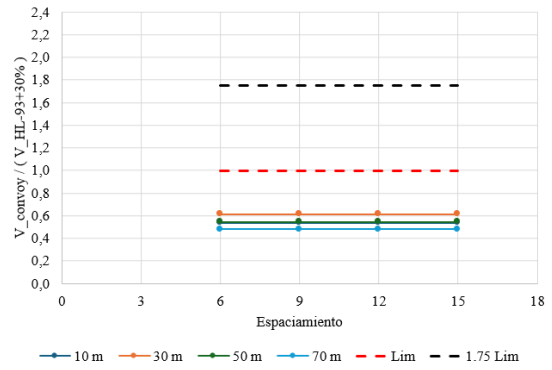


(j)

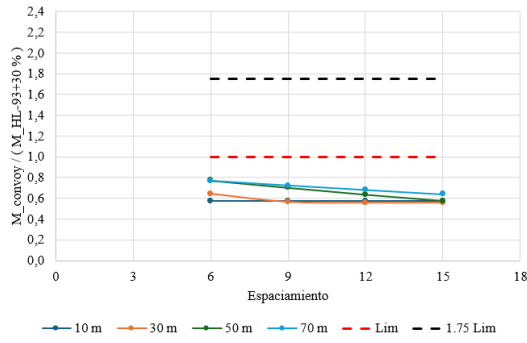
Figura A.4.15 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 520 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 520 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. HL-93+30%.



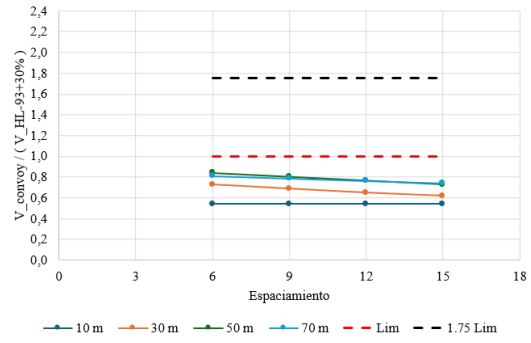
(a)



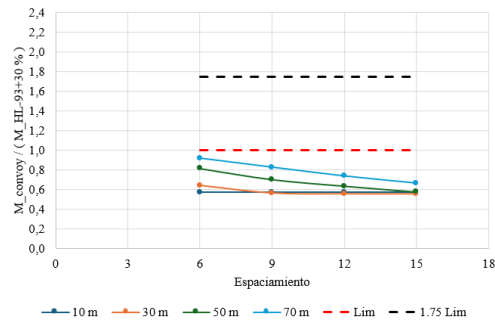
(b)



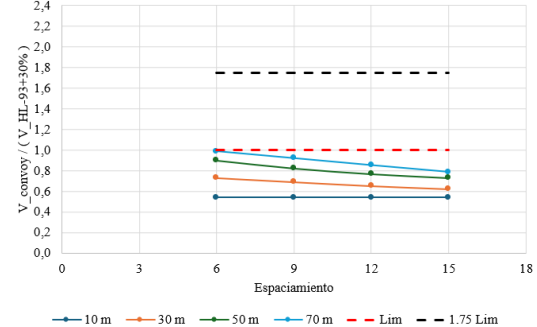
(c)



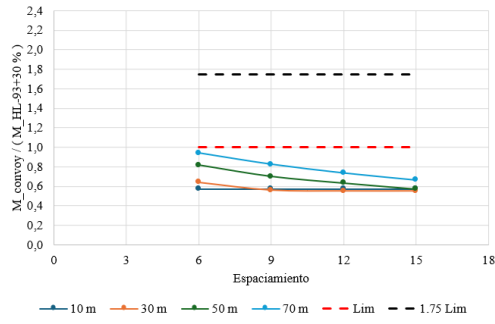
(d)



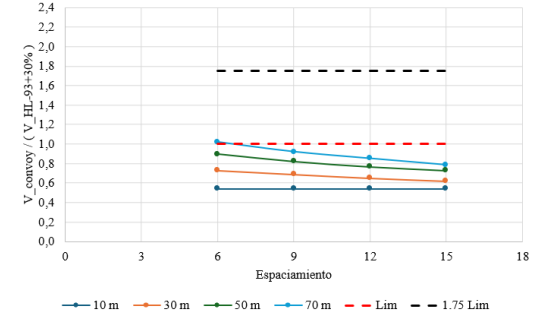
(e)



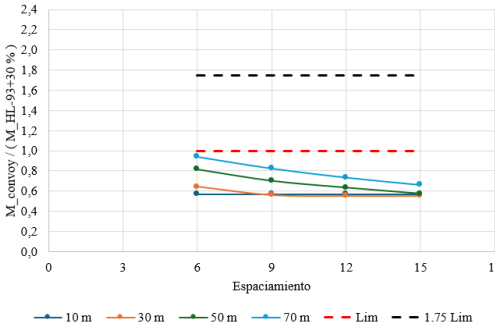
(f)



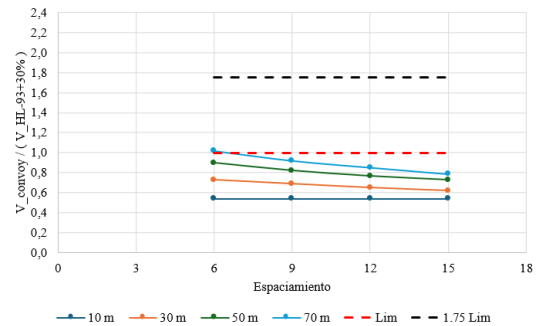
(g)



(h)



(i)



(j)

**Figura A.4.16 (a), (c), (e), (g) e (i) Relación de momentos ( $R_M$ ) generados por convoyes de camiones 690 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. (b), (d), (f), (h) y (j) Relación de fuerzas de corte ( $R_V$ ) generadas por convoyes de camiones 690 con 1, 2, 3, 4 y 5 camiones respectivamente en función del espaciamento entre éstos. HL-93+30.**

**Convoy 1 camión** 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	121,73	26,14
30	196,59	27,43
40	271,52	28,07
50	346,47	28,46
60	421,45	28,71
70	496,43	28,90

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	225,23	32,01
40	334,65	35,01
50	444,3	36,81
60	554,06	38,01
70	663,90	38,86

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	226,25	35,07
40	335,77	37,38
50	445,78	38,76
60	556,04	39,68
70	666,44	40,34

**Convoy 2 camiones**  
Espaciamiento 6 m 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	130,07	34,36
30	276,37	42,91
40	424,97	47,18
50	574,12	49,74
60	723,56	51,45
70	873,16	52,67

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	237,45	35,01
40	390,96	46,96
50	601,81	53,89
60	821,06	59,26
70	1040,52	63,36

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	262,07	41,6
40	449,6	52,55
50	669,53	59,76
60	890,01	64,56
70	1110,78	68,00

Espaciamiento 9 m 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	121,73	30,14
30	237,61	39,91
40	384,58	44,93
50	532,82	47,94
60	681,64	49,95
70	830,80	51,39

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	225,23	33,42
40	361,9	45,66
50	541,02	51,25
60	759,40	57,06
70	978,25	61,48

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	229,74	39,29
40	395,73	49,22
50	609,1	57,1
60	828,51	62,35
70	1048,57	66,10

Espaciamiento 12 m 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	121,73	27,25
30	201,17	36,91
40	345,96	42,68
50	492,86	46,14
60	640,84	48,45
70	789,40	50,10

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	225,23	32,4
40	342,96	39,4
50	493,76	48,61
60	699,40	54,86
70	917,39	59,59

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	226,25	37,07
40	363,99	45,92
50	530,73	54,44
60	768,79	60,13
70	987,83	64,20

Espaciamiento 15 m 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	121,73	26,14
30	196,59	33,91
40	309,06	40,43
50	454,32	44,34
60	601,17	46,95
70	748,96	48,82

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	225,23	32,01
40	334,65	37,77
50	465,53	45,97
60	644,49	52,66
70	857,94	57,71

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	226,25	35,32
40	335,77	43,02
50	498,39	51,78
60	710,72	57,92
70	928,57	62,30

**Convoy 3 camiones**

Espaciamiento 6 m 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	130,07	34,36
30	292,51	46,43
40	513,63	57,33
50	738,49	63,86
60	963,40	68,22
70	1188,33	71,33

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	237,45	35,01
40	390,96	46,96
50	608,18	54,38
60	873,59	66,18
70	1200,31	74,67

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	262,07	41,6
40	449,6	52,55
50	708,62	63,65
60	1001,63	74,64
70	1332,77	82,96

Espaciamiento 9 m 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	121,73	30,14
30	237,61	39,93
40	423,63	50,58
50	648,49	58,46
60	873,40	63,72
70	1098,33	67,47

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	225,23	33,42
40	361,9	43,66
50	541,02	51,25
60	773,29	58,95
70	1068,18	69,01

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	229,74	39,29
40	395,73	49,22
50	609,45	58,28
60	886,04	68,01
70	1199,87	77,27

Espaciamiento 12 m 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	121,73	27,25
30	201,17	36,91
40	345,96	44,13
50	558,49	53,06
60	783,40	59,22
70	1008,33	63,61

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	225,23	32,4
40	342,96	39,4
50	493,76	48,61
60	699,40	55,25
70	948,30	63,36

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	226,25	37,07
40	363,99	45,92
50	550,73	54,44
60	786,84	62,60
70	1069,91	71,57

Espaciamiento 15 m 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	121,73	26,14
30	196,59	33,91
40	309,06	40,43
50	469,55	47,66
60	693,40	54,72
70	918,33	59,76

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	225,23	32,01
40	334,65	37,77
50	465,53	45,97
60	644,49	52,66
70	859,88	58,74

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	226,25	35,32
40	335,77	43,02
50	498,39	51,78
60	710,72	58,24
70	964,74	66,05

**Convoy 4 camiones**

Espaciamiento 6 m 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	130,07	34,36
30	292,51	46,43
40	513,63	58,8
50	789,95	70,81
60	1088,79	79,01
70	1387,96	84,86

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	237,45	35,01
40	390,96	46,96
50	608,18	54,38
60	873,59	66,18
70	1200,31	74,67

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	262,07	41,6
40	449,6	52,55
50	708,62	63,65
60	1001,63	74,64
70	1366,95	85,72

Espaciamiento 9 m 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	121,73	30,14
30	237,61	39,93
40	423,63	50,58
50	648,49	60,11
60	913,02	70,01
70	1213,30	77,15

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	225,23	33,42
40	361,9	43,66
50	541,02	51,25
60	773,29	58,95
70	1068,18	69,01

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	229,74	39,29
40	395,73	49,22
50	609,45	58,28
60	886,04	68,01
70	1199,87	77,36

Espaciamiento 12 m 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	121,73	27,25
30	201,17	36,91
40	345,96	44,13
50	558,49	53,06
60	783,40	61,01
70	1040,37	69,43

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	225,23	32,4
40	342,96	39,4
50	493,76	48,61
60	699,40	55,25
70	948,30	63,36

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	226,25	37,07
40	363,99	45,92
50	550,73	54,44
60	786,84	62,60
70	1069,91	71,57

Espaciamiento 15 m 450

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28
20	121,73	26,14
30	196,59	33,91
40	309,06	40,43
50	469,55	47,66
60	693,40	54,72
70	918,33	61,72

520

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	38,33	18,35
20	116,4	27,44
30	225,23	32,01
40	334,65	37,77
50	465,53	45,97
60	644,49	52,66
70	859,88	58,74

690

Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	45,95	19,74
20	117,96	30,45
30	226,25	35,32
40	335,77	43,02
50	498,39	51,78
60	710,72	58,24
70	964,74	66,05

Convoy 5 camiones			520			690		
Espaciamiento 6 m		450			520			690
Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)	Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)	Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28	10	38,33	18,35	10	45,95	19,74
20	130,07	34,36	20	116,4	27,44	20	117,96	30,45
30	292,51	46,43	30	237,45	35,01	30	262,07	41,6
40	513,63	58,8	40	390,96	46,96	40	449,6	52,55
50	789,95	71,31	50	608,18	54,38	50	708,62	63,65
60	1146,52	83,82	60	873,59	66,18	60	1001,63	74,64
70	1521,42	93,27	70	1200,31	74,67	70	1366,95	83,72

Espaciamiento 9 m			520			690		
Espaciamiento 9 m		450			520			690
Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)	Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)	Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28	10	38,33	18,35	10	45,95	19,74
20	121,73	30,14	20	116,4	27,44	20	117,96	30,45
30	237,61	39,93	30	225,23	33,42	30	229,74	39,29
40	423,63	50,58	40	361,9	43,66	40	395,73	49,22
50	648,49	60,11	50	541,02	51,25	50	609,45	58,28
60	915,02	70,03	60	773,29	58,95	60	886,04	68,01
70	1251,42	80,42	70	1068,18	69,01	70	1199,87	77,36

Espaciamiento 12 m			520			690		
Espaciamiento 12 m		450			520			690
Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)	Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)	Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28	10	38,33	18,35	10	45,95	19,74
20	121,73	27,25	20	116,4	27,44	20	117,96	30,45
30	201,17	36,91	30	225,23	32,4	30	226,25	37,07
40	343,96	44,13	40	349,96	39,4	40	363,99	45,92
50	558,49	53,06	50	493,76	48,61	50	550,73	54,44
60	783,40	61,01	60	699,40	55,25	60	786,84	62,60
70	1040,57	69,43	70	948,30	63,36	70	1069,91	71,57

Espaciamiento 15 m			520			690		
Espaciamiento 15 m		450			520			690
Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)	Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)	Luz puente (m)	M_max (ton-m)	V_max (ton)
10	47,16	22,28	10	38,33	18,35	10	45,95	19,74
20	121,73	26,14	20	116,4	27,44	20	117,96	30,45
30	196,59	33,91	30	225,23	32,01	30	226,25	35,32
40	309,06	40,43	40	334,65	37,77	40	335,77	43,02
50	469,55	47,66	50	465,53	45,97	50	498,39	51,78
60	693,40	54,72	60	644,49	52,66	60	710,72	58,24
70	918,33	61,72	70	859,88	58,74	70	964,74	66,05

Figura A.4.17 Demandas estructurales generadas por 357 escenarios de convoyes estudiados sin considerar impacto.

MC Vol. 3		HS20-44+20%			
Luz (m)	M LL (ton-m)	M LLIM (ton-m)	V LL (ton)	V LLIM (ton)	
10	53,51	69,56	28,04	36,45	
20	150,49	189,97	33,62	42,43	
30	248,14	303,67	35,47	43,41	
40	345,95	413,46	36,40	43,51	
50	443,83	520,61	36,96	43,35	
60	551,07	636,68	40,37	46,64	
70	726,25	828,64	45,13	51,49	

AASHTO STD 2002		HS20-44			
Luz (m)	M (ton-m)	M LLIM (ton-m)	V LL (ton)	V LLIM (ton)	
10	48,00	62,40	23,37	30,38	
20	125,41	158,31	28,01	35,36	
30	206,78	253,06	29,56	36,18	
40	288,29	344,55	30,84	36,86	
50	399,70	468,84	35,60	41,76	
60	551,07	636,68	40,37	46,64	
70	726,25	828,64	45,13	51,49	

AASHTO LRFD 2012		HL-93			
Luz (m)	M LL (ton-m)	M LLIM (ton-m)	V LL (ton)	V LLIM (ton)	
10	61,87	78,36	28,13	35,84	
20	172,85	214,22	37,54	46,78	
30	313,76	381,99	43,85	53,60	
40	478,63	573,75	49,39	59,40	
50	667,36	789,39	54,61	64,78	
60	879,92	1028,88	59,68	69,95	
70	1116,31	1292,20	64,67	75,01	

Figura A.4.18 Demandas estructurales generadas por distintos patrones de carga viva (HS20-44, HS20-44+20% y HL-93).

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

**Departamento** : Departamento de Ingeniería Civil  
**Carrera** : Ingeniería Civil  
**Nombre del memorista** : Francisco León Cabezas  
**Título de la memoria** : Efectos de convoyes de camiones en puentes simplemente apoyados  
**Fecha de la presentación oral** : 01-04-2025

**Profesor(es) Guía** : Víctor Aguilar Vidal  
**Profesor(es) Revisor(es)** : Sebastián Calderón Díaz  
**Concepto** :  
**Calificación** :

**Resumen**

Este trabajo evalúa y cuantifica los efectos estructurales de convoyes de camiones automatizados en puentes simplemente apoyados menores y medianos, analizando principalmente momentos flectores y fuerzas de corte. Los resultados evidencian que los patrones de cargas vivas estipulados en las normativas actuales, como el Manual de Carreteras Vol. 3 y AASHTO (2012), resultan insuficientes para estimar y diseñar frente a las demandas generadas por ciertos convoyes de camiones chilenos. Esto resulta más relevante para puentes de luces superiores a 30 metros.

Se recomiendan separaciones y números de camiones para la operación de convoyes en puentes existentes diseñados con los patrones de carga HS20-44+20% y HL-93. Además, se propone un incremento del 30 % en el patrón de carga HL-93 para el diseño de puentes, lo que asegura la compatibilidad estructural con esta forma de transporte en la gran mayoría de los escenarios propuestos en este estudio. Este enfoque se fundamenta en metodologías detalladas que incluyeron la caracterización de camiones, análisis de sensibilidad y simulaciones en Python.

Las conclusiones destacan la necesidad de actualizar las normativas y sus patrones de carga para alinearlas con las posibles demandas estructurales futuras.