



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

**EFFECTOS DE VEHÍCULOS CON SOBRECARGA EN PUENTES SIMPLEMENTE
APOYADOS**

POR

Sofía Valentina Chávez Montiel

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

Profesor Guía
Víctor Aguilar Vidal

Profesional Supervisor
Tomás Echaveguren Navarro

Abril 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Sofía Valentina Chávez Montiel

© 2025 Sofía Valentina Chávez Montiel

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

Dedicatoria

Le dedico este trabajo a mi familia, por el apoyo, la confianza y el cariño que siempre me han otorgado.

En especial a mi hermano Salvador, por ser mi luz e inspiración para ser mejor cada día.

Agradecimientos

Agradezco el financiamiento de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) mediante el proyecto Fondecyt de Iniciación No. 11230092.

Agradezco también al Departamento de Pesaje de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

Agradezco sinceramente al Profesor Víctor Aguilar Vidal por su apoyo, dedicación y guía en el desarrollo de este trabajo. Su ayuda y conocimientos han sido fundamentales para culminar este proceso.

Resumen

El tránsito de vehículos con sobrecarga, necesarios, por ejemplo, para el transporte de transformadores, turbinas, vigas prefabricadas, componentes industriales indivisibles, maquinaria pesada autopropulsada, etc., es una problemática que afecta la infraestructura vial. En particular en esta investigación, es de interés el impacto generado en puentes producto estos vehículos. En Chile, la circulación de estos vehículos es regulada por el Manual de Cargas Especiales de la Dirección de Vialidad (2023).

Este estudio analiza los efectos de la circulación de vehículos con sobrecarga en puentes simplemente apoyados de vano entre 5 y 70 metros, en términos del momento flector y la fuerza cortante que estos generan. A partir del análisis de datos nacionales de permisos de vehículos con sobrepeso otorgados entre 2018 y 2023, se caracterizaron los tipos de vehículos con sobrecarga más comunes en el país, se identificaron las regiones con mayor tránsito de estos vehículos y se propusieron trenes de carga representativos de dichas configuraciones detectadas. Se evaluaron los efectos de momento flector y fuerza cortante generados por distintas configuraciones vehiculares en comparación con las demandas de diseño establecidas en las normativas vigentes.

En la mayoría de los casos, las configuraciones de vehículos sobrecargados evaluadas superaron las demandas de diseño. Los resultados evidencian que el patrón de carga normativo HS20-44+20% es superado por prácticamente todos vehículos evaluados, mientras que el patrón normativo HL-93 induce demandas estructurales comparables a las de camiones menos sobrecargados actuando en vanos de gran longitud. Los mayores porcentajes de excedencia en momento flector ocurrieron en vanos menores a 15 metros. La fuerza cortante producto de grúas autopropulsadas fueron más críticas en vanos cortos (luzes menores a 15 m). La fuerza cortante producto de camiones fueron más críticas en vanos medianos (luzes entre 20 y 30 m). Las grúas autopropulsadas presentaron las mayores excedencias en ambos casos, acercándose a los límites de diseño por resistencia en una de las configuraciones estudiadas de peso bruto total 78 toneladas. Estos resultados destacan la influencia de la distribución de las cargas por eje y la longitud del vano en el comportamiento estructural. Los hallazgos de este estudio proporcionan información estructural valiosa para el diseño de puentes, la conservación de estos y para la fiscalización del transporte de cargas especiales.

Abstract

The transit of overloaded vehicles, necessary for transporting transformers, turbines, prefabricated beams, indivisible industrial components, self-propelled heavy machinery, etc., poses a challenge to road infrastructure. In this study, particular interest is given to the impact of these vehicles on bridges. In Chile, the circulation of such vehicles is regulated by the Special Loads Manual of the Directorate of Roads (2023).

This study analyzes the effects of overloaded vehicle traffic on simply supported bridges with spans ranging from 5 to 70 meters, focusing on the bending moment and shear force they generate. Based on an analysis of national databases of overweight vehicle permits issued between 2018 and 2023, the most common types of overloaded vehicles in the country were identified, the regions with the highest traffic of these vehicles were determined, and representative load models were proposed based on the detected configurations. The effects of bending moment and shear force generated by different vehicle configurations were evaluated in comparison with the design demands established by current regulations.

In most cases, the evaluated overloaded vehicle configurations exceeded the design demands. The results show that the regulatory load pattern HS20-44+20% was exceeded by almost all evaluated vehicles, while the HL-93 load pattern induced structural demands comparable to those of less overloaded trucks operating on long-span bridges. The highest excess percentages in bending moment occurred in spans shorter than 15 meters. The shear force generated by self-propelled cranes was more critical in short spans (less than 15 meters), while the shear force from trucks was more critical in medium spans (between 20 and 30 meters). Self-propelled cranes exhibited the highest exceedances in both cases, approaching the resistance design limits in one of the studied configurations with a total gross weight of 78 tons. These results highlight the influence of axle load distribution and span length on structural behavior. The findings of this study provide valuable structural information for bridge design, maintenance, and the regulation of special load transportation.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	7
1.1 Motivación.....	7
1.2 Objetivo general	8
1.3 Objetivos específicos	8
1.4 Alcances.....	8
1.5 Plan de trabajo	9
1.6 Principales resultados y conclusiones.....	9
1.7 Organización de la memoria.....	10
CAPÍTULO 2: NORMATIVAS Y ESTUDIOS SOBRE CARGAS ESPECIALES EN PUENTES	11
2.1 Introducción.....	11
2.2 Marco teórico.....	11
2.3 Manual de Autorizaciones para Transportes Especiales (DV, 2023).....	11
2.4 Trenes de Diseño AASHTO ASD	14
2.5 Trenes de Diseño AASHTO LRFD	16
2.6 Manual de Carreteras Vol. 3 (MOP, 2023)	17
2.7 Límites de peso por eje y conjunto de ejes.....	18
2.8 Estado del arte	19
2.9 Conclusiones.....	24
CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE VEHICULOS CON SOBRECARGA Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PUENTES	25
3.1 Introducción.....	25
3.2 Metodología.....	25
3.3 Levantamiento de información.....	26
3.4 Caracterización de los tipos de vehículos con sobrecarga más comunes	31
3.5 Propuesta de trenes de carga representativos de vehículos sobrecargados	32
3.6 Efectos de diferentes escenarios de carga.....	34
3.7 Conclusiones.....	36

CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PUENTES BAJO ESCENARIOS DE SOBRECARGA	37
4.1 Introducción.....	37
4.2 Caracterización de tipos de vehículos con sobrepeso.....	37
4.3 Trenes de carga representativos de vehículos sobrecargados.....	44
4.4 Comparación de los efectos estructurales de diferentes escenarios de carga	53
4.5 Conclusiones.....	68
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Codificación de Ejes	12
Tabla 2.2 Límite de Pesos Máximos para Ejes (D.S MOP N° 158/80)	13
Tabla 2.3 Pesos máximos por eje y sus combinaciones	18
Tabla 2.4 Efecto de la sobrecarga por encima del GVW admisible de los camiones en el daño por fatiga.....	21
Tabla 3.1 Estudio de conteo total de vehículos en regiones de Chile	32
Tabla 3.2 Indicadores estadísticos configuración de ejes S-DD-DDD	33
Tabla 4.1 Indicadores estadísticos Tren de carga S-DD-DDD	44
Tabla 4.2 Indicadores estadísticos Tren de carga S-DD-DDDD	45
Tabla 4.3 Indicadores estadísticos Tren de carga S-DDD-DDDD.....	46
Tabla 4.4 Indicadores estadísticos Tren de carga S-DDD-DDD	47
Tabla 4.5 Indicadores estadísticos Tren de carga SG-SG-SG-SG-SG.....	48
Tabla 4.6 Indicadores estadísticos Tren de carga SG-SG-SG-SG	49
Tabla 4.7 Indicadores estadísticos Tren de carga SG-SGSG-SGSG	50
Tabla 4.8 Indicadores estadísticos Tren de carga SGSG-SGSG-SGSG	51
Tabla 4.9 Indicadores estadísticos Tren de carga SGSG-SGSG-SGSG	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Camión estándar AASHTO ASD	15
Figura 2.2 Carga distribuida en carril y carga concentrada AASHTO ASD	15
Figura 2.3 Carga militar AASHTO ASD	15
Figura 2.4 Camión estándar y Carga de carril AASHTO LRFD	16
Figura 2.5 Tándem y Carga de carril AASHTO LRFD	16
Figura 2.6 Valores extremos para momento comparando sagging (a) flexión hacia abajo y hogging (b) flexión hacia arriba	20
Figura 2.7 Comparación de momento en hogging para Viga 4	20
Figura 2.8 Relación entre el factor de sobrecarga y el aumento porcentual del daño por fatiga	22
Figura 2.9 Vida útil estimada del puente multiviga de hormigón pretensado.....	23
Figura 3.1 Carga Especial: S-DD-DDD de 65 Ton.....	26
Figura 3.2 Carga Especial: S-DDD-DDD de 63 Ton.....	27
Figura 3.3 Carga Especial: S-DDD-DDDD de 62 Ton.....	27
Figura 3.4 Carga Especial: S-S-S-S-S de 65 Ton.....	27
Figura 3.5 Carga Especial: S-DD-DDD de 63 Ton.....	28
Figura 3.6 Carga Especial: S-DD-DDD de 60.a Ton.....	28
Figura 3.7 Carga Especial: S-DD-DDD de 64 Ton.....	28
Figura 3.8 Carga Especial: S-DD-DDD de 60.b Ton.....	28
Figura 3.9 Carga Especial: S-DD-DDD de 62 Ton.....	28
Figura 3.10 Carga Especial: S-DDD-DDD de 61 Ton.....	29
Figura 3.11 Carga Especial: S-DDD-DDD de 67 Ton.....	29
Figura 3.12 Carga Especial: S-DDD-DDD de 63 Ton.....	29
Figura 3.13 Carga Especial: S-DDD-DDD de 66 Ton.....	29
Figura 3.14 Carga Especial: S-DDD-DDD de 73 Ton.....	29
Figura 3.15 Grúas autopropulsadas de 51,2 Ton.....	30
Figura 3.16 Grúas autopropulsadas de 65 Ton.....	30
Figura 3.17 Grúas autopropulsadas de 69,8 Ton.....	30
Figura 3.18 Grúas autopropulsadas de 62 Ton.....	30
Figura 3.19 Grúas autopropulsadas de 62,5 Ton.....	30
Figura 3.20 Tren de carga S-DD-DDD Unión, 2009	33

Figura 3.21 Tren de carga S-DD-DDD elaboración propia	33
Figura 4.4 Distribución del peso bruto total.....	38
Figura 4.5 Región de destino, Total de vehículos	40
Figura 4.6 Número de pasadas, Total de vehículos.....	40
Figura 4.7 Región de destino, Vehículos autopropulsados	41
Figura 4.8 Número de pasadas, Vehículos autopropulsados.....	41
Figura 4.9 Región de destino, Camiones con remolque.....	42
Figura 4.10 Número de pasadas, Camiones con remolque	42
Figura 4.11 Región de destino, Camiones con semirremolque	43
Figura 4.12 Número de pasadas, Camiones con semirremolque	43
Figura 4.13 Tren de carga S-DD-DDD 64 Ton.....	44
Figura 4.14 Tren de carga S-DD-DDDD 66.a Ton.....	45
Figura 4.15 Tren de carga S-DD-DDDD 66.b Ton.....	45
Figura 4.16 Tren de carga S-DD-DDDD 66.c Ton.....	45
Figura 4.17 Tren de carga S-DD-DDDD 66.d Ton.....	46
Figura 4.18 Tren de carga S-DD-DDDD 66.e Ton.....	46
Figura 4.19 Tren de carga S-DD-DDDD 66.f Ton.....	46
Figura 4.20 Tren de carga S-DDD-DDDD 69 Ton.....	47
Figura 4.21 Tren de carga S-DDD-DDD 69.a Ton.....	47
Figura 4.22 Tren de carga S-DDD-DDD 69.b Ton.....	47
Figura 4.23 Tren de carga SG-SG-SG-SG-SG 70 Ton.....	48
Figura 4.24 Tren de carga SG-SG-SG-SG-SG 60 Ton.....	48
Figura 4.25 Tren de carga SG-SG-SG-SG-SG 64 Ton.....	48
Figura 4.26 Tren de carga SG-SG-SG-SG 50 Ton.....	49
Figura 4.27 Tren de carga SG-SG-SG-SG 56 Ton.....	49
Figura 4.28 Tren de carga SG-SG-SG-SG 48 Ton.....	49
Figura 4.29 Tren de carga SG-SG-SG-SG 48 Ton.....	50
Figura 4.30 Tren de carga SG-SGSG-SGSG 62 Ton.....	50
Figura 4.31 Tren de carga SG-SGSG-SGSG 60 Ton.....	50
Figura 4.32 Tren de carga SGSG-SGSG-SGSG 72.a Ton.....	51
Figura 4.33 Tren de carga SGSG-SGSG-SGSG 72.b Ton.....	51
Figura 4.34 Tren de carga SGSG-SGSG-SGSG 78 Ton.....	51

Figura 4.35 Tren de carga SGS-GSG 50 Ton	52
Figura 4.36 Tren de carga SGS-GSG 48 Ton	52
Figura 4.37 Tren de carga SGS-GSG 39 Ton	52
Figura 4.56 Momento flector Tren de carga más desfavorable por configuración de ejes	65
Figura 4.57 Fuerza cortante Tren de carga más desfavorable por configuración de ejes	66

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El transporte terrestre es un elemento fundamental para el desarrollo económico y social del país, de acuerdo con las estadísticas del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), el número de permisos de circulación emitidos en Chile en 2023 alcanzó los 6,5 millones, lo que refleja la alta demanda de la red de transporte terrestre (INE, 2024). Además, el monitoreo del tránsito en plazas de peaje indica un crecimiento constante en el tráfico vehicular, con un aumento interanual del 17,9% en el número de vehículos que utilizan la infraestructura vial del país (INE, 2024). En este contexto, los puentes desempeñan un papel clave dentro del sistema de transporte, ya que garantizan la conectividad en diversas regiones del país, especialmente en aquellas zonas donde constituyen la principal vía de acceso.

En el transporte terrestre, se pueden encontrar cargas que exceden los límites establecidos por las normativas vigentes, tanto en peso como en dimensiones, conocidas como cargas especiales. El transporte de estas cargas requiere permisos específicos, sujetos a la revisión y autorización de la Dirección de Vialidad (DV) del Ministerio de Obras Públicas (MOP), conforme al Manual de Autorizaciones para Transportes Especiales (DV, 2023). Entre las cargas especiales se encuentran equipos de construcción de grandes dimensiones, transformadores, turbinas, vigas prefabricadas, componentes industriales indivisibles y maquinaria pesada autopropulsada (DV, 2023). Estas cargas son frecuentemente solicitadas por industrias como la minería, construcción, energía y manufactura, que requieren transportar grandes estructuras o equipos especializados por las carreteras y puentes del país.

De acuerdo con los datos compartidos por Departamento de Pesaje del Ministerio de Obras Públicas para realizar este estudio, entre 2018 y 2022, se solicitaron un total de 62.355 permisos de autorización para vehículos con sobrepeso, con un promedio aproximado de 12.000 permisos por año. En el norte del país se concentra la mayoría de estas solicitudes, con más de 47.000 permisos registrados entre la región de Tarapacá y la Región Metropolitana. Destaca la región de Antofagasta, que cuenta con más de 23.000 permisos.

En los puentes, el aumento de vehículos con sobrecarga plantea desafíos para la infraestructura vial. Estos vehículos, al exceder los límites de diseño, pueden comprometer la seguridad y reducir la vida útil de los puentes. La memoria de título tiene como objetivo principal analizar los efectos generados, en términos de momento flector y fuerza cortante, por la circulación de vehículos con sobrecarga en puentes simplemente apoyados.

1.2 Objetivo general

Calcular los efectos generados por la circulación de vehículos con sobrecarga en puentes simplemente apoyados.

1.3 Objetivos específicos

- a. Caracterizar los tipos de vehículos con sobrecarga más comunes en las regiones del país, según su clasificación vehicular, peso bruto y configuraciones de ejes.
- b. Proponer trenes de carga representativos de vehículos sobrecargados.
- c. Comparar los efectos de momento flector y fuerza cortante de diferentes escenarios de carga generados por vehículos sobrecargados mediante modelos matemáticos.

1.4 Alcances

La memoria de título se centró en la evaluación de puentes simplemente apoyados menores y medianos, con longitudes comprendidas entre los 5 y 70 metros.

El análisis se limitó exclusivamente a los permisos de sobrepeso, excluyendo aquellos relacionados con sobredimensión y vehículos de alta productividad, dado que, estos últimos no se encuentran autorizados para circular a nivel nacional. Se considera que sólo una vía del puente se encuentra cargada.

1.5 Plan de trabajo

Para el análisis desarrollado en esta memoria, se utilizó el registro de permisos de vehículos con sobrepeso entre el año 2018 al año 2023, en Chile. A partir de estos datos, se caracterizaron los vehículos con sobrecarga más comunes en las regiones del país, considerando tipos de vehículos, cantidad de conjuntos y configuraciones de ejes, peso bruto total y las regiones con mayor tráfico de vehículos con sobrepeso.

A partir del análisis estadístico de los datos y estudios de referencia, se propusieron trenes de carga representativos, estableciendo configuraciones vehiculares que reflejan las condiciones de tráfico de vehículos sobrecargados.

Se implementaron códigos que permitieron analizar los efectos de momento flector y fuerza cortante en puentes con vanos entre 5 y 70 metros. Los resultados obtenidos fueron comparados con los valores establecidos por normativas vigentes HS20-44+20% y HL-93.

Finalmente, se analizaron los efectos generados por los distintos trenes de carga, identificando las configuraciones vehiculares que generaron las mayores demandas estructurales en términos de momento flector y fuerza cortante.

1.6 Principales resultados y conclusiones

La caracterización de los vehículos con sobrecarga en Chile en base a los permisos de sobrepeso otorgados por el Departamento de pesaje mostró que el 86,7% corresponde a vehículos autopropulsados. En cuanto a la cantidad de conjuntos de ejes, el 70,7% de los vehículos posee tres conjuntos de ejes. La configuración de ejes más frecuente corresponde a S-DD-DDD con un 21,1% de los permisos. Representando una configuración de 6 ejes y 3 conjuntos de ejes. Donde S: Rodado simple y D: Rodado doble. Además, se observó que el peso bruto total (PBT) se concentra principalmente entre 50 y 75 toneladas.

Geográficamente, la Región de Antofagasta registró la mayor cantidad de permisos de sobrecarga, con 23.295 registros entre el año 2018 y 2022.

Se desarrollaron 25 trenes de carga representativos. Se utilizaron datos de permisos de sobrepeso y se complementaron con referencias de estudios previos, incluyendo configuraciones de ejes no documentadas previamente en los estudios referenciados.

Se realizó un análisis comparativo entre los 25 trenes de carga propuestos, los 19 trenes de carga de referencia y los trenes de diseño normativos HS20-44+20% y HL-93.

El tren normativo HS20-44+20% fue superado prácticamente por todos los trenes de carga evaluados, tanto en momento flector como en fuerza cortante.

Por otro lado, el tren HL-93 mostró demandas de momento flector y fuerza cortante más cercanas a las producidas por los vehículos sobrecargados en ciertos escenarios, especialmente para camiones menos sobrecargados y vanos de mayor longitud. Sin embargo, en la mayoría de los casos evaluados, los trenes de carga analizados superaron las demandas de diseño establecidas.

1.7 Organización de la memoria

La memoria de título se estructura en cinco capítulos. El Capítulo 1 introduce el contexto del estudio, la motivación, los objetivos generales y específicos, el alcance del trabajo, junto con los principales resultados y conclusiones generales. El Capítulo 2 presenta la revisión bibliográfica, abarcando el marco teórico y normativo relacionado con la circulación de vehículos con sobrecarga en puentes, incluyendo normativas nacionales e internacionales y estudios previos relevantes. En el Capítulo 3 se describe la metodología utilizada, detallando la caracterización de los vehículos con sobrecarga, la selección de trenes de carga representativos y los criterios de comparación con los trenes de diseño normativos en términos de momento flector y fuerza cortante. El Capítulo 4 expone los resultados del análisis, incluyendo la caracterización y distribución geográfica de los vehículos, la propuesta de trenes de carga representativos y la comparación estructural con los trenes normativos HS20-44+20% y HL-93 para distintos vanos. Finalmente, el Capítulo 5 presenta las conclusiones, la relevancia de los hallazgos, las principales limitaciones del estudio y recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2: NORMATIVAS Y ESTUDIOS SOBRE CARGAS ESPECIALES EN PUENTES

2.1 Introducción

En esta sección se presentan los antecedentes teóricos que sustentan esta memoria de título. Se realiza una revisión del conjunto de normativas reguladoras vigentes y las investigaciones previas sobre los efectos de la sobrecarga vehicular en puentes. El objetivo es sentar las bases teóricas que guiarán el análisis estructural de los puentes simplemente apoyados expuestos a vehículos sobrecargados.

2.2 Marco teórico

En esta sección se revisarán conceptos clave relacionados con las cargas en puentes, específicamente las cargas vivas y su impacto en las estructuras. Además, se analizarán las principales normativas de diseño que rigen el comportamiento estructural de los puentes simplemente apoyados en Chile, particularmente frente a la circulación de vehículos con sobrecarga.

2.3 Manual de Autorizaciones para Transportes Especiales (DV, 2023)

Este documento establece los procedimientos y requisitos para la circulación de vehículos con sobrecarga, definiendo las condiciones bajo las cuales se otorgan permisos especiales.

2.3.1 Configuración de Ejes



Se denomina configuración a de ejes a:

Distancia entre Conjuntos: corresponde a la distancia entre centro de ruedas extremas de ejes o conjuntos de ejes. Esta debe ser superior a 2.4 m. entre centros de ruedas.

Tipo de Ejes: Es la agrupación de ejes según distancias entre ejes y conjuntos. Identificar los ejes de acuerdo con la Tabla 2.1 codificación de ejes.

Rodado de Vehículo: cantidad de ruedas de un eje, pudiendo ser simple, doble o múltiple.

**Tabla II
Codificación de Ejes**

Eje	Esquema	Código
Simple Rodado Simple	-----	(S)
Simple Rodado Doble	-----	(D)
Simple Rodado Simple (*)	-----	(G)
Cuádruple Rodado Doble	----- ----- ----- -----	(D)4
Simple (semieje) Rodado Múltiple de cuatro ruedas		(MD)
Simple (semieje) Rodado Múltiple de ocho ruedas		(MC)

(*) Eje simple con rodado simple de mayor tamaño utilizado en maquinaria autopropulsada.

Tabla 2.1 Codificación de Ejes. Fuente: *Manual de Autorizaciones para Transportes Especiales (Ministerio de Obras Públicas, 2023)*.

2.3.2 Límites de peso

El Manual de Autorizaciones para Transportes Especiales (DV, 2023) establece los límites de peso bruto vehicular y carga por eje según el tipo de vehículo y la configuración de los ejes.

1. Peso bruto vehicular máximo:

Los límites máximos de peso bruto total se establecen en función del tipo de vehículo y la longitud entre ejes, según lo siguiente:

Semirremolques:

Menor de 13 metros entre ejes extremos: Peso máximo de 39 toneladas.

De 13 a 15 metros entre ejes extremos: Peso máximo de 42 toneladas.

Más de 15 metros entre ejes extremos: Peso máximo de 45 toneladas.

Camión con semirremolque, con eje posterior triple, cualquiera sea la distancia entre ejes extremos: Peso máximo de 45 toneladas.

Remolques:

Camión con remolque, cualquier distancia entre ejes extremos: Peso máximo de 45 toneladas.

2. Carga por eje:

Los límites de pesos máximos para ejes se establecen en función del tipo de eje y tipo de rodado, según lo que establece la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Límite de Pesos Máximos para Ejes (D.S MOP N° 158/80). Fuente: *Manual de Autorizaciones para Transportes Especiales* (Ministerio de Obras Públicas, 2023).

**Tabla I
Límite de Pesos Máximos para Ejes (D.S. MOP N° 158/80)**

Tipo de Eje	Tipo de Rodado	Límite de Peso (Ton.)
Simple	Simple	7
Simple	Doble	11
Doble	Simple	14
Doble	Doble + Simple	16
Doble	Doble	18
Triple	Simple	19
Triple	2 Doble + 1 Simple	23
Triple	Doble	25
Cuádruple	Doble	29
Simple (compuesto por semiejes)	Múltiple (4 ruedas)	12
Simple (compuesto por semiejes)	Múltiple (8 ruedas)	14

3. Configuración de ejes y combinación de vehículos:

Los camiones articulados, pueden tener una combinación de hasta cinco ejes, lo que les permite transportar un mayor volumen de carga. En estos casos, la carga total se puede dividir entre los ejes para cumplir con los límites de carga por eje, pero el peso bruto no puede exceder el límite establecido sin un permiso especial.

2.3.3 Clases de vehículos

Transporte especial: Vehículos o transporte de cargas indivisibles cuyas dimensiones y/o pesos exceden los límites máximos establecidos en la legislación vigente.

No Autopropulsada: Se refiere a las cargas que deben transportarse sobre un equipo de transporte.

Autopropulsada: Se refiere a maquinarias que se desplaza por sus propios medios.

Remolques: Vehículo no motorizado que cuenta con más de un grupo de ejes, diseñado para el transporte de carga y para ser remolcado por otro vehículo, al cual se conecta mediante una barra de tiro.

Semirremolques: Vehículo no motorizado que cuenta con un grupo de ejes único, diseñado para el transporte de carga y para ser remolcado por otro vehículo, cuando parte de su peso se recibe en el vehículo que lo remolca por medio de una quinta rueda.

2.4 Trenes de Diseño AASHTO ASD

La metodología ASD se basa en el uso de esfuerzos permisibles, comparando la tensión real con la tensión máxima permitida en los materiales.

Camión estándar: Representa un camión de carga de 32,66 toneladas, distribuida en tres ejes, 3,63 toneladas en el eje delantero y 14,52 toneladas en cada uno de los dos ejes traseros. Como se muestra en la Figura 2.1.

Carga distribuida en carril y carga concentrada: Representa una carga distribuida de 952 kg/m, en conjunto con una carga puntual correspondiente a 8,165 toneladas para el análisis de momento flector y 11,793 toneladas para fuerza cortante. Como se muestra en la Figura 2.2.

Carga militar: Representa una carga de 22,68 toneladas, distribuida en dos ejes de 11,34 toneladas. Como se muestra en la Figura 2.3.

Analizando cada tren de diseño de manera individual.

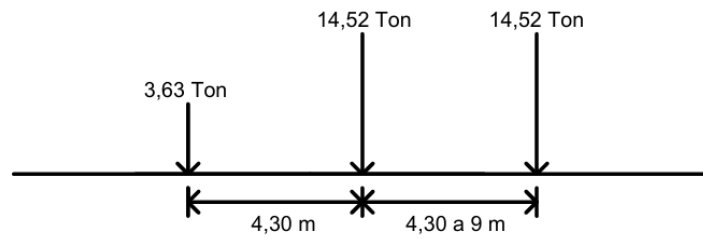


Figura 2.1 Camión estándar AASHTO ASD. Fuente: Adaptado de *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges* (AASHTO, 2002).

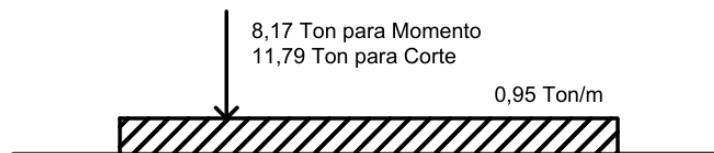


Figura 2.2 Carga distribuida en carril y carga concentrada AASHTO ASD. Fuente: Adaptado de *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges* (AASHTO, 2002).

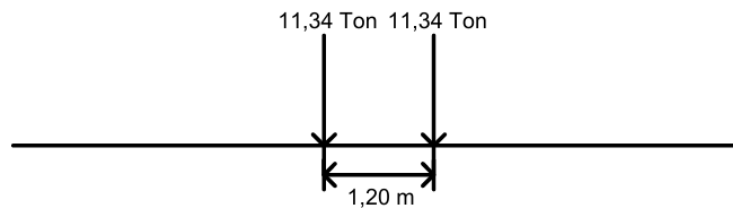


Figura 2.3 Carga militar AASHTO ASD. Fuente: Adaptado de *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges* (AASHTO, 2002).

2.5 Trenes de Diseño AASHTO LRFD

La metodología LRFD aplica factores de carga y resistencia, proporcionando un enfoque que toma en cuenta la variabilidad tanto de las cargas como de la resistencia estructural.

Camión estándar: Representa un camión de carga de 32,66 toneladas, distribuida en tres ejes, 3,63 toneladas en el eje delantero y 14,52 toneladas en cada uno de los dos ejes traseros.

Tándem: Representa una carga de 22,68 toneladas, distribuida en dos ejes de 11,34 toneladas.

Carga de carril: Representa una carga distribuida de 952 kg/m.

Analizando la combinación de trenes de diseño correspondiente a Camión estándar y Carga de carril, junto con Tándem y Carga de carril. Como se muestra en las Figuras 2.4 y 2.5.

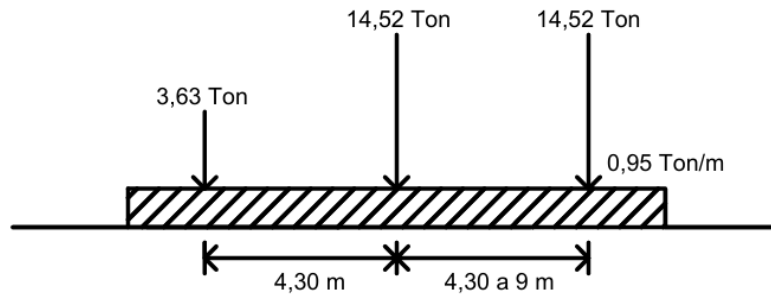


Figura 2.4 Camión estándar y Carga de carril AASHTO LRFD. Fuente: Adaptado de *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (AASHTO, 2012).

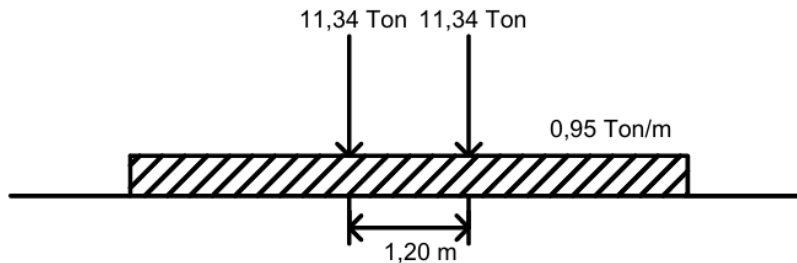


Figura 2.5 Tándem y Carga de carril AASHTO LRFD. Fuente: Adaptado de *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (AASHTO, 2012).

2.6 Manual de Carreteras Vol. 3 (MOP, 2023)

Normativa nacional que regula las instrucciones y criterios de diseño en estructuras viales.

2.6.1 Clasificación de puentes

Clasificación de puentes según la longitud del vano. De acuerdo con la longitud del vano o luz libre, esta clasificación divide los puentes en:

- Alcantarillas y estructuras menores: con vanos entre 0,5 y 10 metros.
- Estructuras medianas: con vanos entre 10 y 70 metros.
- Estructuras mayores: con vanos superiores a 70 metros.

2.6.2 Trenes de Diseño

HS20-44 + 20%: Este tren de diseño es utilizado en puentes no concesionados y sigue las especificaciones AASHTO ASD, se basa en el tren de carga AASHTO HS20-44, incrementado en un 20%, el peso por eje se ajusta con un factor de 1.20.

HL-93: Este tren de diseño es utilizado en puentes concesionados y sigue las especificaciones AASHTO LRFD.

2.6.3 Definición de Ejes y Rodados

Eje doble es un conjunto de dos ejes cuya distancia entre centros de ruedas es superior a 1,2 metros e inferior a 2,4 metros.

Eje triple es un conjunto de tres ejes cuya distancia entre centro de ruedas extremas es superior a 2,4 metros e inferior a 3,6 metros.

Eje cuádruple es un conjunto de cuatro ejes cuya distancia entre centros de ruedas extremas es superior a 3,6 metros e inferior a 4,8 metros. Este tipo de eje solo puede ser utilizado con autorización de la Dirección de Vialidad para transporte de carga indivisible.

Rodado simple consiste en dos ruedas por eje.

Rodado doble consiste en cuatro ruedas por eje.

Estos tipos de rodado afectan directamente la distribución de la carga sobre los ejes del vehículo.

2.7 Límites de peso por eje y conjunto de ejes

El peso máximo permitido por eje y por conjunto de ejes para vehículos que circulan en caminos públicos está regulado en el país, según el Decreto Supremo N° 158 de 1980, en conjunto con el Decreto N° 414 de 2014, los límites de peso son establecidos en función del tipo de eje y su configuración.

La Tabla 3.005.4.A (Tabla 2.3) presenta los pesos máximos permitidos por tipo de eje y su combinación.

Tabla 2.3 Pesos máximos por eje y sus combinaciones. Fuente: *Manual de Carreteras Volumen 3 (MOP, 2023)*.

**TABLA 3.005.4.A
PESOS MÁXIMOS POR EJE Y SUS COMBINACIONES**

Tipo de Eje	Tipo de Rodado	Peso (t)	Tolerancia (t)
Simple	Simple	7	0,35
Simple Dobl	e	11	0,60
Simple (compuesto por semiejes)	Múltiple (4 ruedas)	12	-
Simple (compuesto por semiejes)	Múltiple (8 ruedas)	14	-
Doble Simple		14	0,70
Doble	Uno doble + uno simple	16	0,75
Doble Dobl	e	18	0,90
Triple Simple		19	0,95
Triple	Dos dobles + uno simple	23	1,10
Triple Dobl	e	25	1,20
Cuádruple Dobl	e	29	-

2.7.1 Límite de Peso Bruto Total según el Tipo de Vehículo

El peso bruto total (PBT), o la suma del peso del vehículo más su carga, se encuentra limitado de acuerdo con el tipo de vehículo y a la configuración de los ejes, como se detalla a continuación:

Camión semirremolque:

Con un eje posterior simple o doble, el peso bruto total dependerá de la distancia entre los centros de las ruedas extremas:

Si la distancia es menor a 13 metros, el PBT es de 39 toneladas.

Si la distancia esta entre 13 metros y 15 metros, el PBT es de 42 toneladas.

Si la distancia es mayor a 15 metros, el PBT es de 45 toneladas.

Para un eje posterior triple, independientemente de la distancia, el PBT se fija en 45 toneladas.

Camión más remolque:

Para vehículos que consisten en uno o más remolques, sin importar la distancia entre los ejes extremos, el PBT total permitido es de 45 toneladas.

2.8 Estado del arte

2.8.1 Análisis del comportamiento dinámico de puentes ante camiones extrapesados. Han, W., *et al.* (2015)

Los camiones sobrecargados representan una amenaza para los puentes, generando daños por fatiga, deterioro acelerado e incluso colapso. Sus características reales dependen del lugar, factores económicos, regulatorios y de fiscalización, además de presentar variaciones temporales. Un estudio analizó datos de monitoreo de tráfico a largo plazo con el fin de identificar parámetros clave como tipo de camión, velocidad, peso por eje, distancia entre ejes y distribución por carril.

Se clasificaron 17 tipos de vehículos y se extrajeron 1.319 escenarios representativos de camiones extrapesados. Luego, se utilizó un software avanzado de interacción puente-tráfico para evaluar el comportamiento de un puente vial de tramo medio frente a estas cargas.

Finalmente, en las Figuras 2.6 y 2.7 se analizaron las respuestas estructurales y los factores de amplificación dinámica, comparándolos con las normas AASHTO LRFD y los códigos chinos.

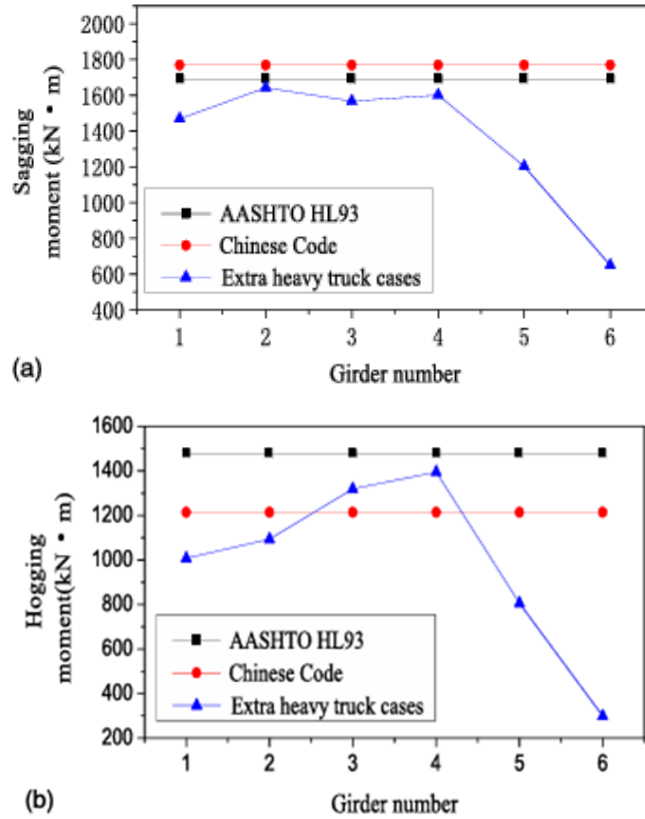


Figura 2.6 Valores extremos para momento comparando sagging (a) flexión hacia abajo y hogging (b) flexión hacia arriba. Fuente: Han, Wu, Cai & Chen (2015).

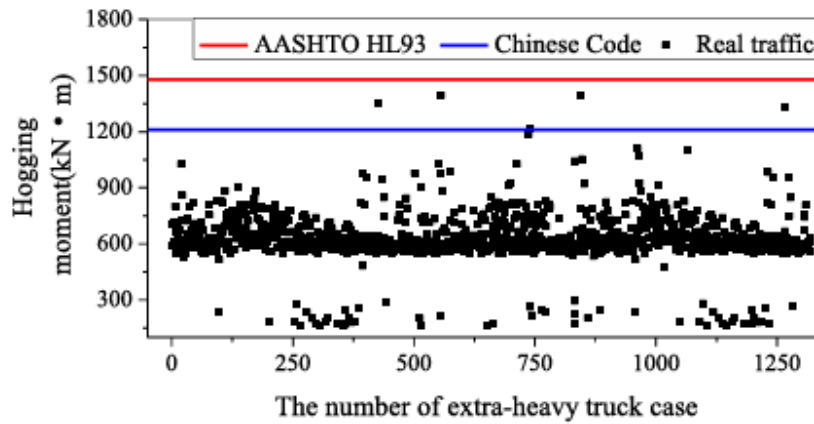


Figura 2.7 Comparación de momento en hogging para Viga 4. Fuente: Han, Wu, Cai & Chen (2015).

2.8.2 Efecto de la sobrecarga vehicular en la fatiga estructural de puentes.
Aggarwal, V., et al. (2015)

Los camiones con sobrecarga afectan significativamente la vida útil a fatiga de los puentes. El rango de tensiones aumenta notablemente cuando se excede el peso bruto vehicular (GVW).

Este estudio evalúa cómo la sobrecarga de camiones contribuye a la acumulación de daño por fatiga en una viga longitudinal de acero de un puente mixto de cuatro vanos y 119 m de longitud. Se comparan camiones sobrecargados con otros que cumplen el GVW permitido por las normas IRC.

Los resultados muestran que un aumento del 50 % en el peso del camión puede incrementar el daño por fatiga en un 80 %, y que esta relación no es lineal, como se muestra en la Tabla 2.4 y Figura 2.8. Los hallazgos son relevantes para el diseño a fatiga de puentes ubicados en zonas con alto tránsito de camiones pesados, como áreas industriales o portuarias.

Tabla 2.4 Efecto de la sobrecarga por encima del GVW admisible de los camiones en el daño por fatiga. Fuente: Adaptado de Aggarwal & Parameswaran (2015).

Factor de sobrecarga	Acumulación de daño por fatiga debido al camión sobrecargado	Incremento porcentual en la acumulación de daño por fatiga (%)
1.05	$7,0 \times 10^{-7}$	41
1.10	$8,1 \times 10^{-7}$	49
1.15	$9,2 \times 10^{-7}$	55
1.20	$1,0 \times 10^{-6}$	60
1.25	$1,2 \times 10^{-6}$	65
1.30	$1,3 \times 10^{-6}$	69
1.35	$1,48 \times 10^{-6}$	72
1.40	$1,7 \times 10^{-6}$	75
1.45	$1,83 \times 10^{-6}$	78
1.50	$2,03 \times 10^{-6}$	80

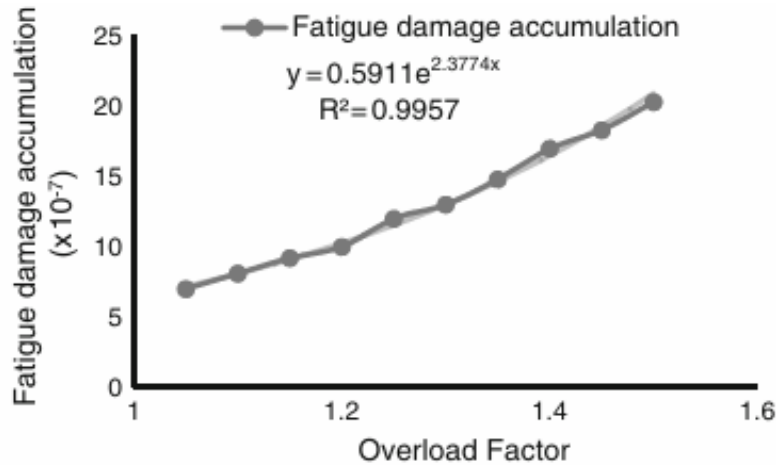


Figura 2.8 Relación entre el factor de sobrecarga y el aumento porcentual del daño por fatiga Fuente: Aggarwal & Parameswaran (2015).

2.8.3 Impacto de la sobrecarga en el diseño estructural de puentes. Chou, C. P. J. (1996)

En Taiwán, el auge de proyectos de infraestructura ha provocado un aumento significativo en la cantidad, tamaño y peso de los vehículos pesados. Esto ha generado un problema de sobrecarga de camiones, afectando la seguridad de los puentes y el estado del pavimento.

Para abordar esta situación, se implementaron sistemas de pesaje en movimiento (WIM) en autopistas, lo que permitió analizar el comportamiento real del tráfico. Los datos revelaron que el factor de carga promedio para camiones pesados era 2.7 veces mayor que el valor de diseño, el cual ya incluía un 30 % de sobrecarga.

Además, las cargas por eje registradas diferían significativamente de las establecidas en la normativa de diseño de puentes. El estudio concluyó que la especificación vigente subestima en un 28 % el volumen de acero requerido para el diseño del tablero de un puente simplemente apoyado.

2.8.4 Relación entre la sobrecarga de camiones y el deterioro de puentes. Lou, P., *et al.* (2017)

Durante las últimas dos décadas, la frecuencia de camiones con sobrecarga ha aumentado considerablemente, afectando la vida útil real de los puentes, la cual depende no solo del diseño estructural, sino también de factores como el entorno, el mantenimiento y la preservación.

Este estudio se enfoca en puentes de Nueva Jersey y utiliza informes de inspección, datos de pesaje en movimiento y el Inventario Nacional de Puentes para analizar el impacto de las cargas de camiones sobre la vida útil de las vigas. Se identificaron los modos de deterioro más comunes, destacando en las vigas pretensadas (PC) la corrosión de los tendones inducida por agrietamientos y desconchados en los extremos. También se observó que el mal estado de las juntas de cubierta acelera ese deterioro.

Finalmente, se estableció una fuerte correlación entre la sobrecarga de camiones y la reducción en la vida útil esperada de las vigas de hormigón pretensado, como se muestra en la Figura 2.9.

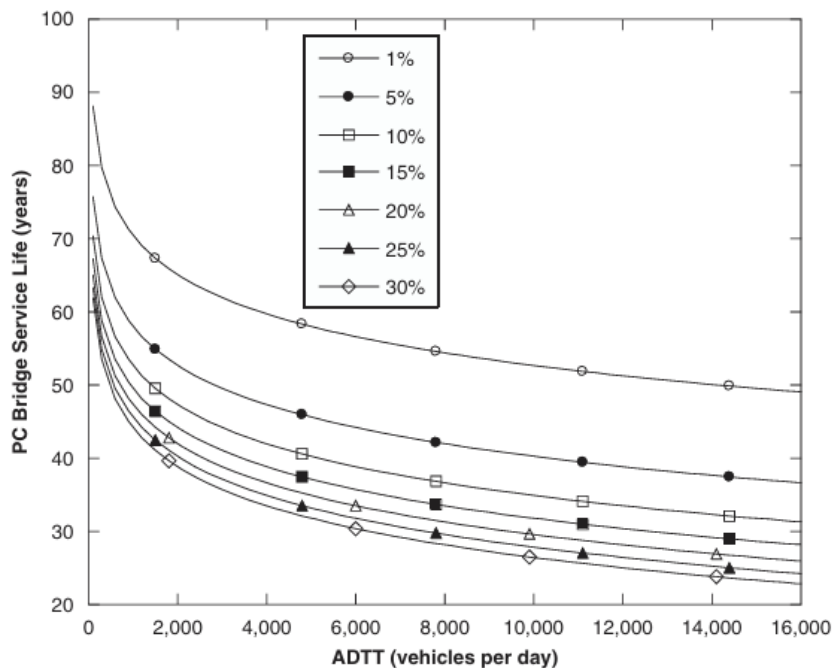


Figura 2.9 Vida útil estimada del puente multiviga de hormigón pretensado. Fuente: Lou, Nassif, Su & Truban (2017).

2.9 Conclusiones

En Chile las normativas nacionales, como el Manual de Autorizaciones para Transportes Especiales y el Manual de Carreteras Vol. 3, junto con estándares internacionales como AASHTO ASD y LRFD, constituyen un marco regulador para el diseño y evaluación de puentes simplemente apoyados. Estas normativas contemplan límites de peso bruto, configuraciones de ejes y métodos de análisis estructural que buscan garantizar la seguridad y durabilidad frente a las condiciones de tránsito, incluyendo el transporte de cargas especiales.

Por otro lado, la experiencia internacional resalta que las sobrecargas vehiculares generan solicitaciones significativas que pueden superar los valores normativos, con impactos críticos en momentos flectores y fuerzas cortantes. Estudios destacan que aumentan el daño por fatiga y el deterioro estructural, siendo factores determinantes el peso bruto total en conjunto con la distribución de las cargas de los vehículos con sobrecarga. Destacando la importancia de incorporar modelos representativos para abordar de manera efectiva las demandas reales del transporte en infraestructura vial.

CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE VEHICULOS CON SOBRECARGA Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PUENTES

3.1 Introducción

En este capítulo se describe la metodología adoptada para cumplir con los objetivos del estudio según objetivo específico. Se detalla el proceso de recopilación de datos, la estructura de los análisis y las herramientas utilizadas.

3.2 Metodología

La metodología desarrollada en esta memoria de título se estructuró en cinco etapas principales que permitieron cumplir con los objetivos planteados.

1. Levantamiento de información

Se utilizaron registros de permisos de vehículos con sobrepeso otorgados entre 2018 y 2023 por el Departamento de Pesaje del MOP. Estos datos incluyeron información detallada de tipo de vehículo, peso bruto, cantidad de ejes, configuración de ejes, y datos geográficos de origen y destino. Además, se complementó con estudios previos (Unión, 2009 y Unión, 2012).

2. Caracterización de los tipos de vehículos con sobrecarga más comunes

A partir de los registros, se identificaron las configuraciones vehiculares más frecuentes. Se determinaron indicadores estadísticos para peso por eje y distancias entre ejes, enfocándose principalmente en la moda.

3. Propuesta de trenes de carga representativos de vehículos sobrecargados.

Se desarrollaron 25 trenes de carga representativos utilizando los datos estadísticos de las configuraciones más comunes. Se complementó con datos de estudios de referencia con vehículos de geometrías y distribuciones de carga similares.

4. Efectos de diferentes escenarios de carga

Se aplicaron códigos para simular el paso de los trenes de carga sobre puentes simplemente apoyados con vanos entre 5 y 70 metros. Se calcularon las respuestas estructurales en términos de momento flector y fuerza cortante, comparándolas con los trenes de diseño normativos HS20-44+20% y HL-93.

Se evaluó si las respuestas generadas por los trenes de carga representativos excedían los valores normativos establecidos por servicio y por resistencia.

3.3 Levantamiento de información

3.3.1 Excel resumen del Departamento de Pesaje

El Departamento de Pesaje del MOP proporcionó al equipo de investigación dos reportes sobre vehículos con sobrepeso, correspondientes a los períodos comprendidos entre el año 2018 y 2022, en conjunto con el año 2023. Estos reportes contienen información detallada sobre los vehículos que transitan con permisos especiales, incluyendo datos como clasificación vehicular, dimensiones, peso bruto, peso por ejes, tipos de ejes, descripción de la carga y localización geográfica.

3.3.2 Unión, A. (2012)

Este estudio se centra en las cargas especiales más frecuentes en las rutas principales del país, con un enfoque en la distribución de la carga y la carga por ejes. A continuación, en las Figuras 3.1 a 3.4 se muestran los trenes de carga evaluados en este estudio.

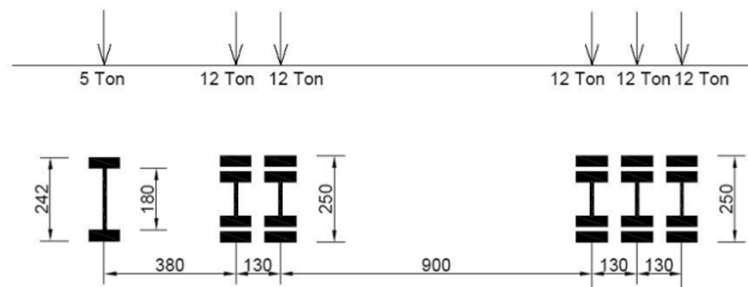


Figura 3.1 Carga Especial: S-DD-DDD de 65 Ton

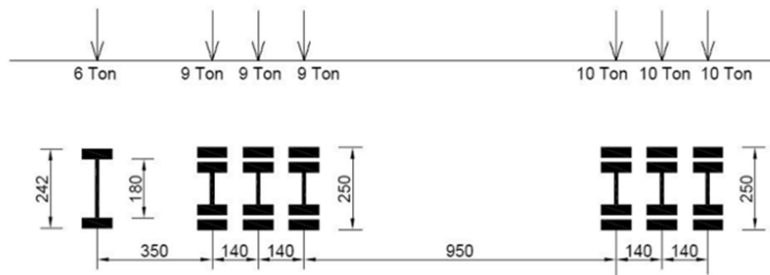


Figura 3.2 Carga Especial: S-DDD-DDD de 63 Ton

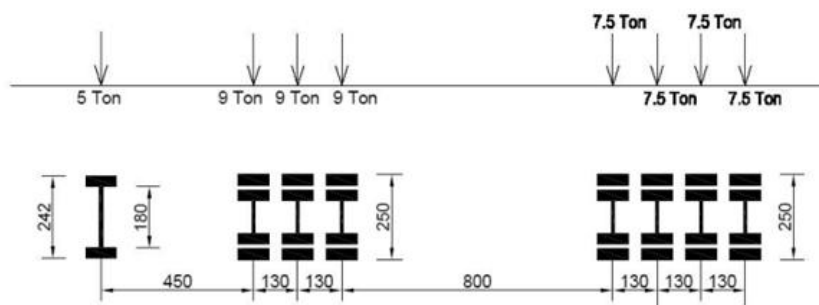


Figura 3.3 Carga Especial: S-DDD-DDDD de 62 Ton

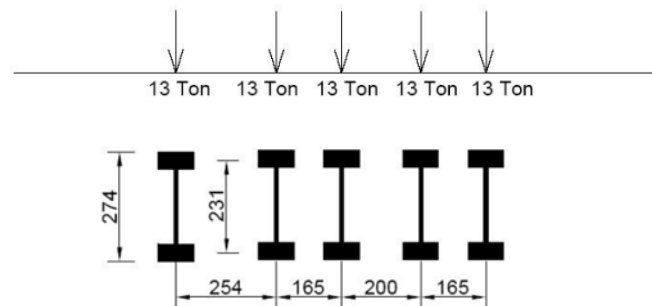


Figura 3.4 Carga Especial: S-S-S-S-S de 65 Ton

3.3.3 Unión, A. (2009)

Este estudio se centra en analizar y comparar las solicitaciones generadas por el camión de diseño HL-93, de acuerdo con la norma AASHTO LRFD, frente a otros tipos de cargas especiales comunes en Chile, como el camión Bitren y grúas autopropulsadas. A continuación, en las Figuras 3.5 a 3.19 se muestran los trenes de carga evaluados en este estudio, las cargas se encuentran en toneladas y las distancias en metros.

a) S-DD-DDD

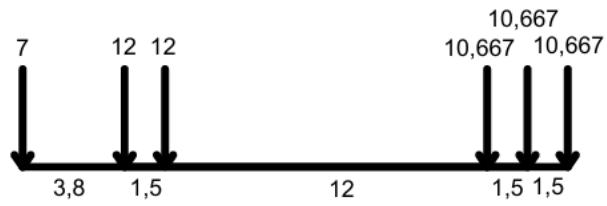


Figura 3.5 Carga Especial: S-DD-DDD de 63 Ton

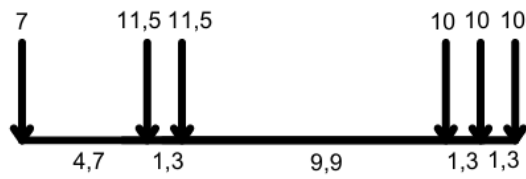


Figura 3.6 Carga Especial: S-DD-DDD de 60.a Ton

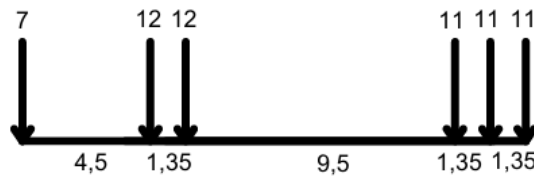


Figura 3.7 Carga Especial: S-DD-DDD de 64 Ton

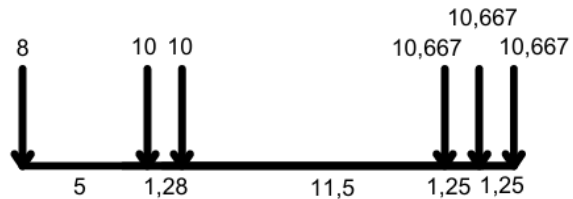


Figura 3.8 Carga Especial: S-DD-DDD de 60.b Ton

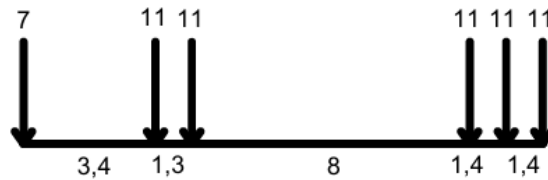


Figura 3.9 Carga Especial: S-DD-DDD de 62 Ton

b) S-DDD-DDD

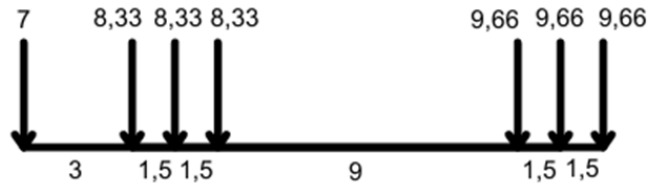


Figura 3.10 Carga Especial: S-DDD-DDD de 61 Ton

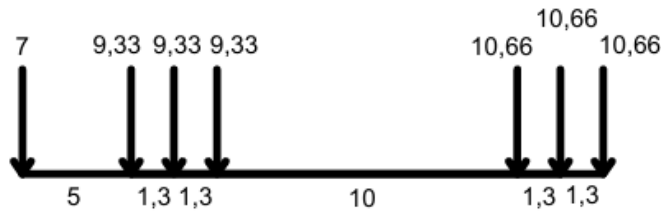


Figura 3.11 Carga Especial: S-DDD-DDD de 67 Ton

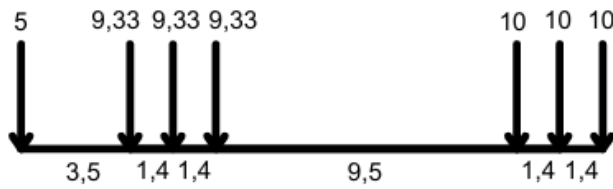


Figura 3.12 Carga Especial: S-DDD-DDD de 63 Ton

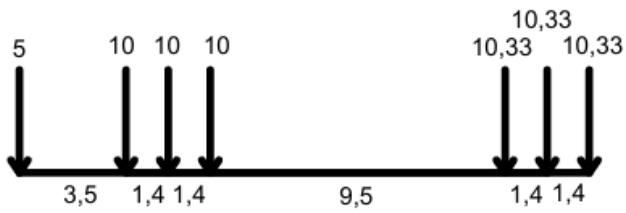


Figura 3.13 Carga Especial: S-DDD-DDD de 66 Ton

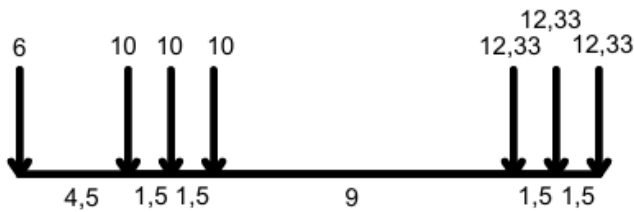


Figura 3.14 Carga Especial: S-DDD-DDD de 73 Ton

c) Grúas autopropulsadas

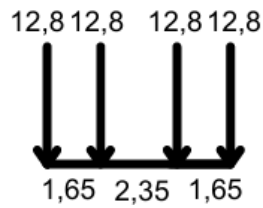


Figura 3.15 Grúas autopropulsadas de 51,2 Ton

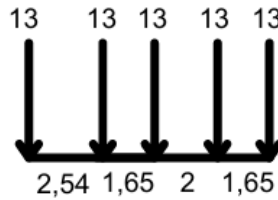


Figura 3.16 Grúas autopropulsadas de 65 Ton

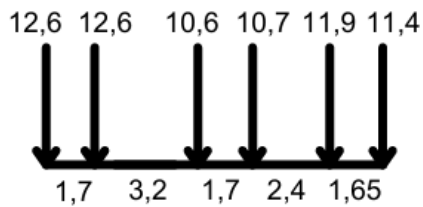


Figura 3.17 Grúas autopropulsadas de 69,8 Ton

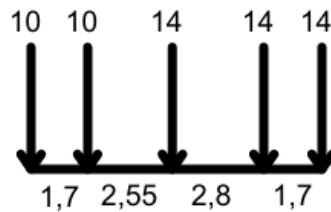


Figura 3.18 Grúas autopropulsadas de 62 Ton

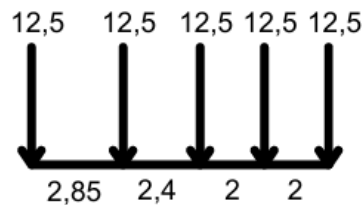


Figura 3.19 Grúas autopropulsadas de 62,5 Ton

3.4 Caracterización de los tipos de vehículos con sobrecarga más comunes

Se utilizaron los datos proporcionados a partir del registro de permisos de vehículos con sobrepeso en los periodos abordados entre el año 2018 al año 2023. Incluye información sobre:

- Clasificación vehicular
- Dimensiones
- Peso bruto y peso por ejes
- Tipos de ejes
- Descripción de la carga
- Localización geográfica (origen y destino)

Esta información ha permitido identificar mediante comparaciones respecto a la frecuencia, las configuraciones de ejes más comunes en la circulación de vehículos con sobrecarga, tipo de vehículo, cantidad de conjunto de ejes y peso bruto total, facilitando la caracterización de los vehículos con mayor frecuencia de tránsito.

Adicionalmente, se realizó un análisis geográfico mediante el origen y destino de cada vehículo con sobrecarga, determinando el recorrido realizado por estos, permitiendo definir tanto el número de pasadas como la cantidad de permisos por región. Este análisis se efectuó para el total de vehículos registrados, así como para categorías específicas como vehículos autopropulsados, camiones con remolque y camiones con semirremolque.

En la Tabla 3.1 se muestra el registro de permisos otorgados y pasadas de vehículos con sobrepeso para las distintas regiones de Chile.

Tabla 3.1 Estudio de conteo total de vehículos en regiones de Chile

REGIÓN	PERMISOS	PASADAS
Arica y Parinacota	876	1048
Tarapacá	5717	7037
Antofagasta	23295	27878
Atacama	7160	12798
Coquimbo	4363	10213
Valparaíso	1489	8562
Metropolitana de Santiago	4217	10446
O'Higgins	861	2506
Maule	274	1560
Ñuble	298	1990
Biobío	8540	12207
La Araucanía	2635	3789
Los Ríos	82	623
Los Lagos	1809	2005
Aysén	86	93
Magallanes	653	653

3.5 Propuesta de trenes de carga representativos de vehículos sobrecargados

Se diseñaron 25 trenes de carga representativos de vehículos con sobrecarga, a partir de un análisis estadístico de los datos de los archivos de reportes de sobrepeso.

Este análisis se centró en las configuraciones de ejes más frecuentes, evaluando la distribución de cargas y distancias mediante estadígrafos como moda, media y mediana, con un principal enfoque en el indicador correspondiente a la moda. Esta evaluación se realizó mediante filtros para cada una de las 9 configuraciones presentes en el estudio.

Los datos disponibles para este estudio incluían únicamente las distancias dentro de los conjuntos de ejes, por lo cual, para completar los datos correspondientes a las distancias entre conjuntos, se utilizaron las referencias del Estudio de Definición de Cargas Especiales de Sobrecarga para el Puente Chacao y el Estudio Comparativo del Camión de Diseño HL-93 de la Norma LRFD v/s Camión Bitren, permitiendo complementar esta variable a partir de vehículos reales con geometrías similares.

Dentro de este análisis, las configuraciones de grúas, aunque menos frecuentes, fueron incluidas debido a su impacto desfavorable en las estructuras. En estas configuraciones, se identificó que las

distribuciones de cargas y distancias correspondían frecuentemente a un mismo modelo, lo que permitió, en estos casos, elaborar los trenes de carga en base a vehículos reales.

A modo de ejemplo, se muestra el siguiente tren de carga de elaboración propia.

Mediante un análisis estadístico de los datos, se obtienen los indicadores estadísticos presentes en la Tabla 3.2, para la configuración de ejes S-DD-DDD. Los pesos se encuentran en toneladas y las distancias en metros.

Tabla 3.2 Indicadores estadísticos configuración de ejes S-DD-DDD

	PESO EJE 1	PESO EJE 2	DIST. EJE 2	PESO EJE 3	DIST. EJE 3
MODA	7	24	1,5	33	1,5
MEDIA	7,17	20,17	1,4	27,59	1,43
MEDIANA	7	20	1,4	27,5	1,4

Para complementar las distancias faltantes, se utiliza como referencia el tren de carga de la Figura 3.20, extraído del Estudio Comparativo del Camión de Diseño HL-93 de la Norma LRFD v/s Camión Bitren.

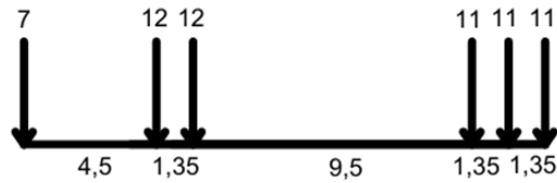


Figura 3.20 Tren de carga S-DD-DDD Unión, 2009

Así, se propone el tren de carga de la Figura 3.21.

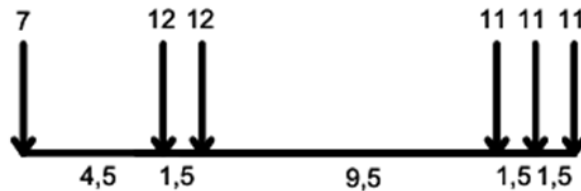


Figura 3.21 Tren de carga S-DD-DDD elaboración propia

3.6 Efectos de diferentes escenarios de carga

Una vez caracterizados los vehículos más representativos, se efectuó un estudio comparativo con los trenes de diseño HS20-44+20% y HL-93, evaluando las reacciones de momento flector y fuerza cortante generadas por los trenes de carga en puentes simplemente apoyados con vanos con entre 5 y 70 metros.

De acuerdo con los criterios establecidos por la AASHTO para el análisis de carga viva, se evaluó si las reacciones de los trenes de carga analizados superan las demandas de los trenes de diseño. En caso de hacerlo, exceden los límites de diseño por servicio, lo que puede afectar la durabilidad de la estructura. Asimismo, si estas reacciones superan en un 75% o más las demandas de los trenes de diseño, también exceden los límites de diseño por resistencia, lo que representa un potencial riesgo de colapso parcial o total de la estructura.

Se compararon los distintos trenes de carga de una misma configuración de ejes, para luego analizar el conjunto correspondiente a los trenes de carga más desfavorable de cada configuración.

Para llevar a cabo este estudio, se implementaron tres códigos principales:

3.6.1 Código para HS20-44+20% (Manual de Carreteras MOP)

Este código evalúa el momento flector y la fuerza cortante máximos generados por las cargas asociadas al tren de diseño HS20-44 con un incremento del 20%. Se considera el impacto dinámico según las especificaciones del Manual de Carreteras y calcula las reacciones en tres escenarios:

- Carga estándar.
- Carga distribuida en carril y carga concentrada.
- Carga militar.

Los resultados se presentan en términos de reacciones con y sin el efecto del impacto dinámico. Para este estudio, se evalúan los resultados sin considerar el efecto del impacto dinámico. Este análisis permite identificar los efectos más críticos según la longitud del vano analizado.

3.6.2 Código para HL-93 (Norma AASHTO LRFD)

Este código evalúa el momento flector y la fuerza cortante máximos generados por el tren de diseño HL-93, siguiendo los casos establecidos por la norma AASHTO LRFD y calcula las reacciones en dos escenarios:

- Carga estándar (camión de diseño HL-93 combinado con una carga distribuida).
- Carga tándem combinada con carga distribuida.

Los resultados se presentan en términos de reacciones con y sin el efecto del impacto dinámico. Para este estudio, se evalúan los resultados sin considerar el efecto del impacto dinámico. Este análisis permite identificar los efectos más críticos según la longitud del vano analizado.

3.6.3 Código para Vehículos Representativos y Referencias

Este código, basado en el *Moving Loads Code* adaptado por el laboratorio del profesor Víctor Aguilar, se utiliza para evaluar las configuraciones de vehículos desarrolladas en esta tesis, así como las configuraciones de referencia.

La metodología se basa en:

Ingresar las configuraciones de carga, definiendo las magnitudes de las cargas por eje desde el extremo trasero hacia el delantero del vehículo.

Especificar las distancias entre ejes y entre conjuntos de ejes dentro del tren de carga.

El programa analiza los efectos de las configuraciones desplazando el tren de carga a lo largo del vano del puente en incrementos definidos (*incremental mapping*), calculando las fuerzas internas (momento flector y fuerza cortante) para cada carga puntual y aplicando superposición, en cada ubicación del tren de carga. Los resultados se tabulan para cada longitud de vano, desde 5 hasta 70 metros, identificando los valores máximos en cada caso.

3.7 Conclusiones

La metodología empleada permitió abordar el análisis de los efectos de vehículos con sobrecarga sobre puentes simplemente apoyados, mediante la caracterización de vehículos, el desarrollo de trenes de carga representativos y la evaluación de sus efectos en términos de momento flector y fuerza cortante. Además, se incorporó un análisis geográfico de los registros, lo que permitió identificar las regiones con mayor tránsito de vehículos sobrecargados.

El uso de registros reales de permisos entregó un conjunto de datos sólido para el análisis, aunque limitada por la falta de información detallada sobre las distancias entre conjuntos de ejes. Esta limitación se abordó complementando los datos con referencias de estudios previos.

La implementación de códigos computacionales permitió evaluar las demandas estructurales generadas por las distintas configuraciones vehiculares, y compararlas con los trenes de diseño. Considerando tanto el diseño por servicio como el diseño por resistencia.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PUENTES BAJO ESCENARIOS DE SOBRECARGA

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la metodología descrita. Se incluye la caracterización de los vehículos con sobrecarga más comunes en el territorio nacional, en conjunto con la elaboración de los trenes de carga. Además, los resultados respecto a la evaluación de momento flector y fuerza cortante, comparando los trenes de carga propuestos y los de estudios de referencia con los trenes de diseño normativos en puentes simplemente apoyados de entre 5 y 70 metros de vano. Este análisis busca aportar información relevante para evaluar y gestionar los impactos de las cargas especiales en la infraestructura vial.

4.2 Caracterización de tipos de vehículos con sobrepeso

Para el total de 62.355 permisos de sobrecarga disponible, se presentan 3 clasificaciones de vehículos, como se muestra a continuación.

- Vehículo autopulsado: 54.062 permisos = 86,7 %
- Camión Tracto con Remolque: 5.644 permisos = 9,1 %
- Camión Tracto con Semirremolque: 2.649 permisos = 4,2 %

Por otra parte, la distribución de las cantidades de conjuntos de ejes se muestra a continuación.

- 1 conjunto de ejes: 38 permisos = 0,1 %
- 2 conjuntos de ejes: 3.036 permisos = 4,9 %
- 3 conjuntos de ejes: 44.155 permisos = 70,7 %
- 4 conjuntos de ejes: 10.639 permisos = 17,1 %
- 5 conjuntos de ejes: 4.487 permisos = 7,2 %

Así mismo, las configuraciones de ejes más frecuentes se muestran a continuación.

- S – DD – DDD: 13.197 permisos = 21,1 %
- S – DD – DDDD: 7.499 permisos = 12,0 %
- S – DDD – DDDD: 7.460 permisos = 11,9 %
- S - DDD – DDD: 1.965 permisos = 3,2 %
- S – DDD – MC4: 1.501 permisos = 2,4 %
- S – DD: 1.330 permisos = 2,1 %
- S – DDD - MC6: 1.236 permisos = 2,0 %
- S – DDD – MC8: 1.164 permisos = 1,9 %
- S – DDD – DD – DDDD: 1.076 permisos = 1,7 %
- SG – SGSG – SGSG: 1.042 permisos = 1,7 %
- SG – SG – SG – SG – SG: 801 permisos = 1,3 %

La distribución del peso bruto total de los vehículos con sobrecarga, en rangos de 25 toneladas, se muestra en el histograma de la Figura 4.4.

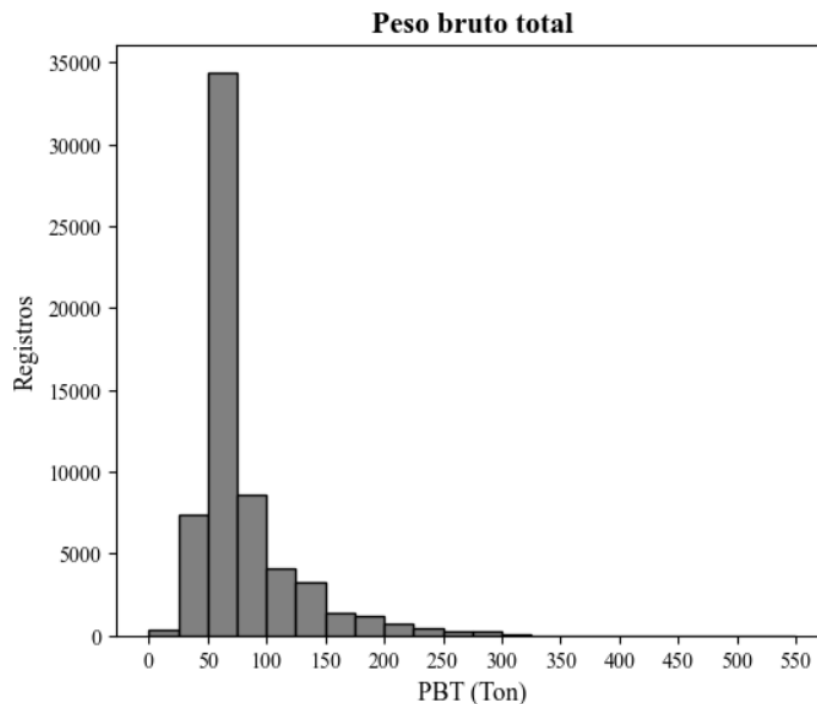


Figura 4.1 Distribución del peso bruto total

La distribución del peso bruto total está dada por:

- 0-25 Ton: 351 permisos = 0,6 %
- 25-50 Ton: 7361 permisos = 11,8 %
- 50-75 Ton: 34369 permisos = 55,1 %
- 75-100 Ton: 8563 permisos = 13,7 %
- 100-125 Ton: 4060 permisos = 6,5 %
- 125-150 Ton: 3300 permisos = 5,3 %
- 150-175 Ton: 1409 permisos = 2,3 %
- 175-200 Ton: 1215 permisos = 2,0 %
- 200-225 Ton: 696 permisos = 1,1 %
- 225-250 Ton: 482 permisos = 0,8 %

El análisis de la distribución del peso bruto total (PBT) de los vehículos muestra que el 55,1% de los registros corresponde a vehículos cuyo PBT se encuentra entre 50 y 75 toneladas, con casi 35.000 permisos. Los datos poseen una moda de 60 toneladas, una mediana de 63,84 toneladas y una media de 78,66 toneladas.

A medida que aumenta el peso bruto total, se observa una disminución progresiva en la frecuencia de los registros. Los vehículos con un PBT entre 75 y 150 toneladas tienen una menor proporción, pero aún constituyen una parte significativa de los datos. En contraste, los vehículos con PBT superiores a 150 toneladas son mucho menos frecuentes, evidenciando que el transporte de cargas extremadamente pesadas es menos común en el territorio nacional.

Estos resultados resaltan la necesidad de considerar diversas configuraciones vehiculares representativas en los análisis estructurales de puentes, ya que el impacto de la sobrecarga no solo depende del peso total del vehículo, sino también de la disposición de sus ejes y la distribución de la carga sobre la infraestructura.

Finalmente, se realiza un análisis geográfico basado en el origen y destino de cada vehículo con sobrecarga, permitiendo determinar tanto el número de pasadas como la cantidad de permisos por región. Los resultados se muestran en las Figuras 4.5 a 4.12.

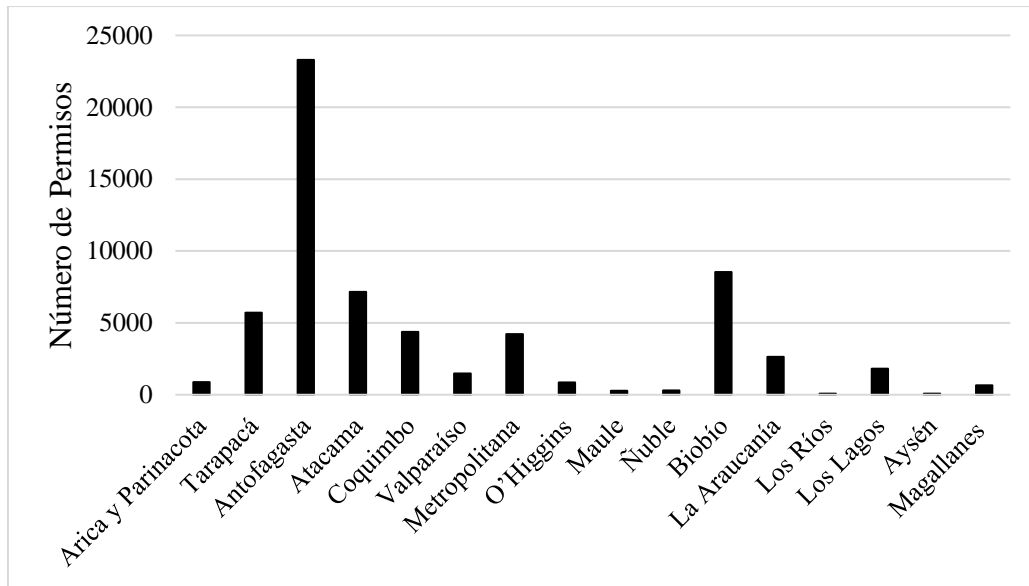


Figura 4.2 Región de destino, Total de vehículos

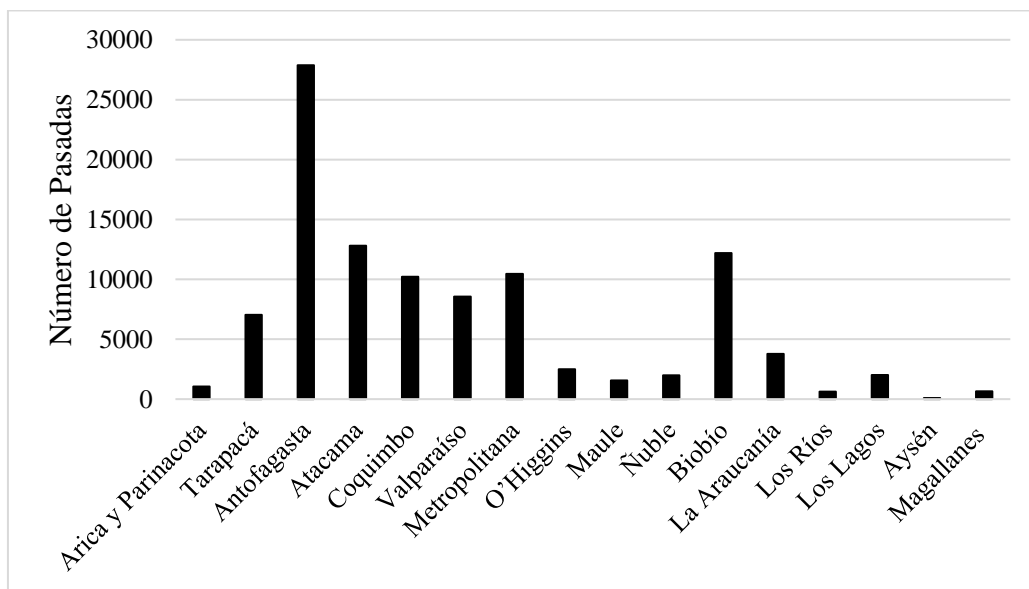


Figura 4.3 Número de pasadas, Total de vehículos

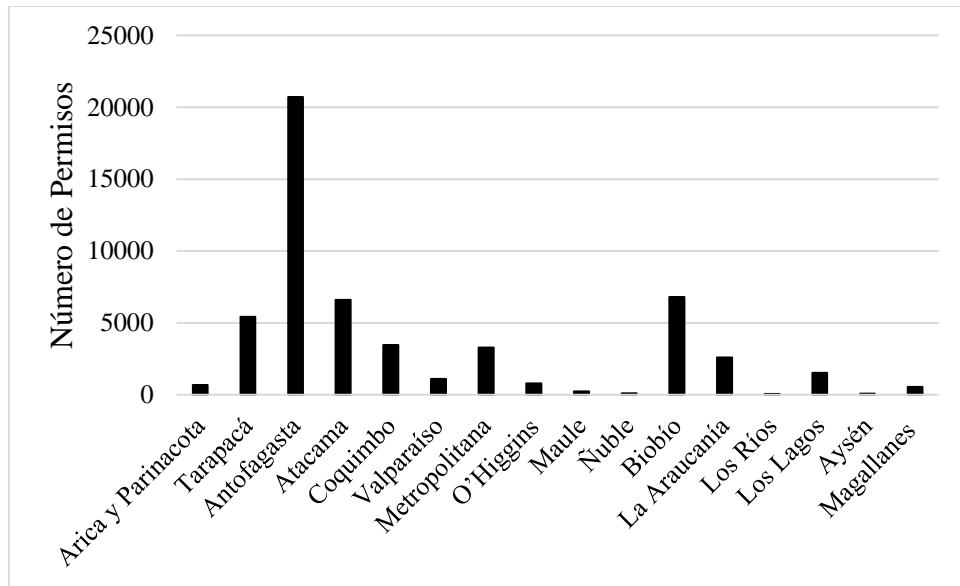


Figura 4.4 Región de destino, Vehículos autopropulsados

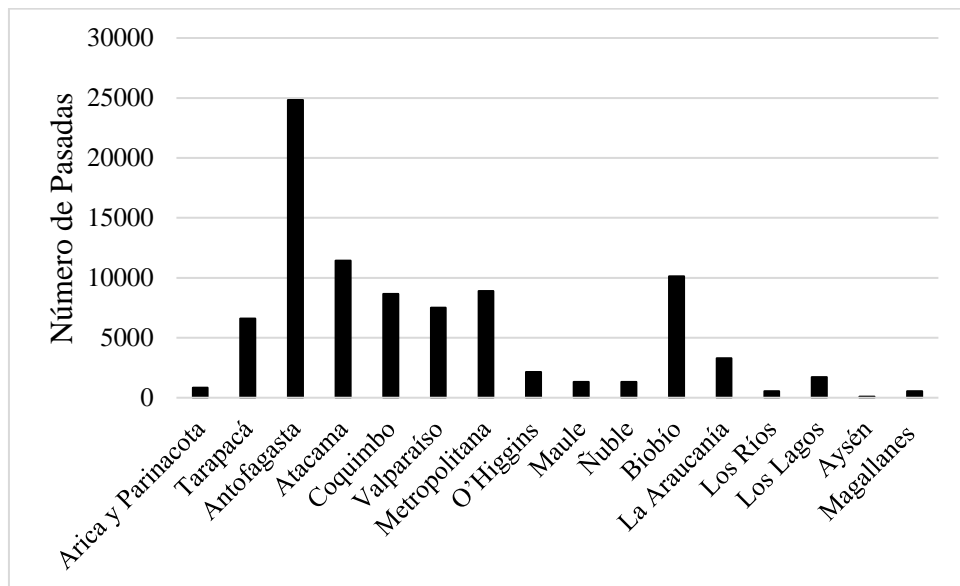


Figura 4.5 Número de pasadas, Vehículos autopropulsados

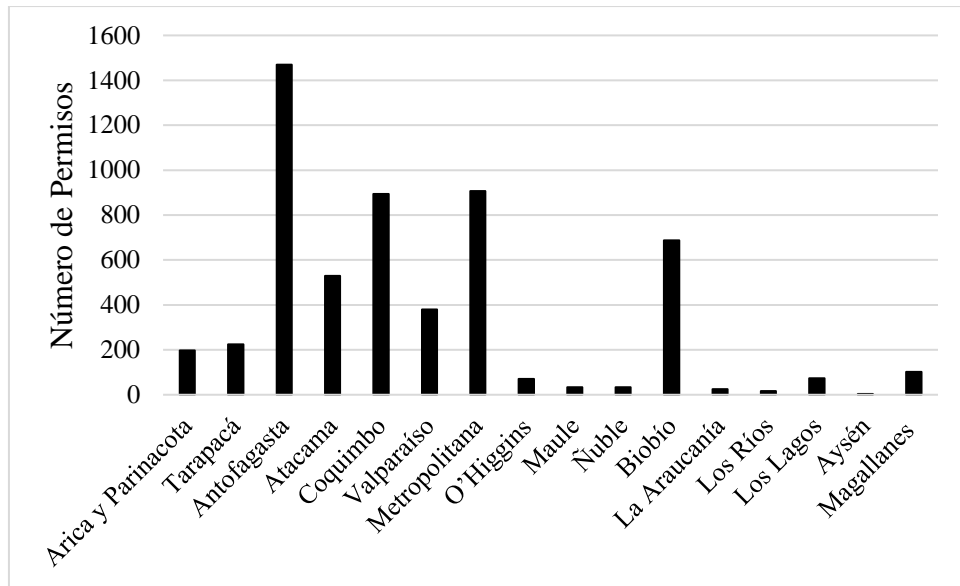


Figura 4.6 Región de destino, Camiones con remolque

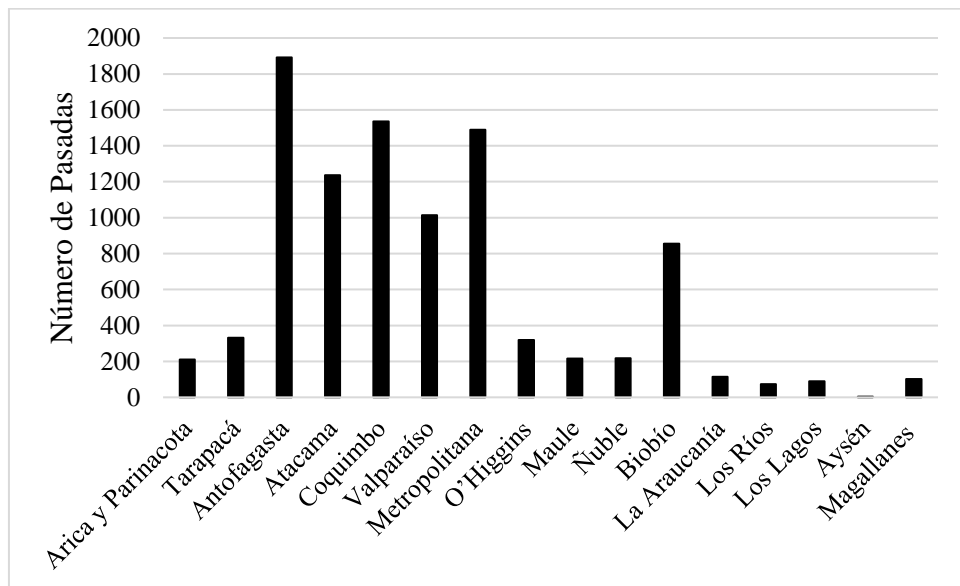


Figura 4.7 Número de pasadas, Camiones con remolque

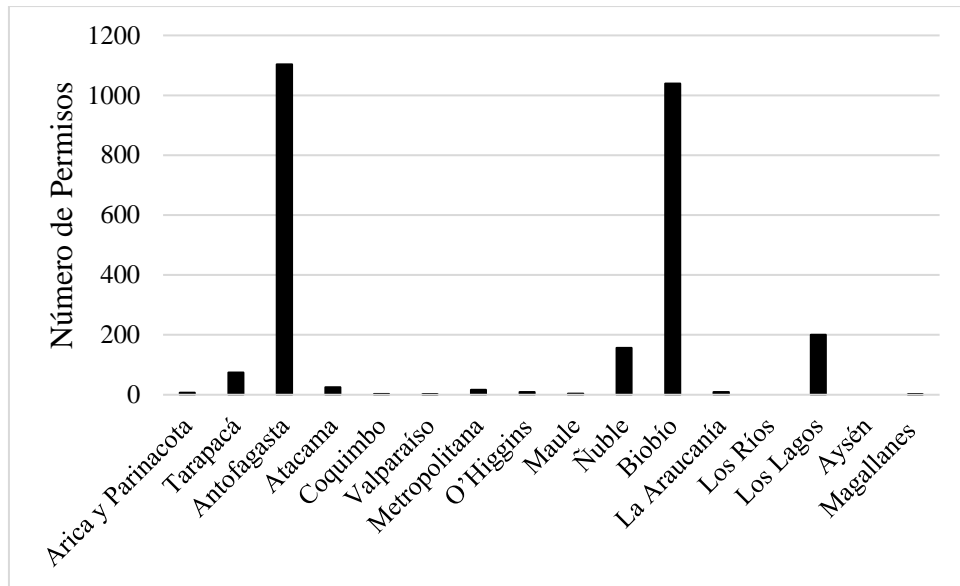


Figura 4.8 Región de destino, Camiones con semirremolque

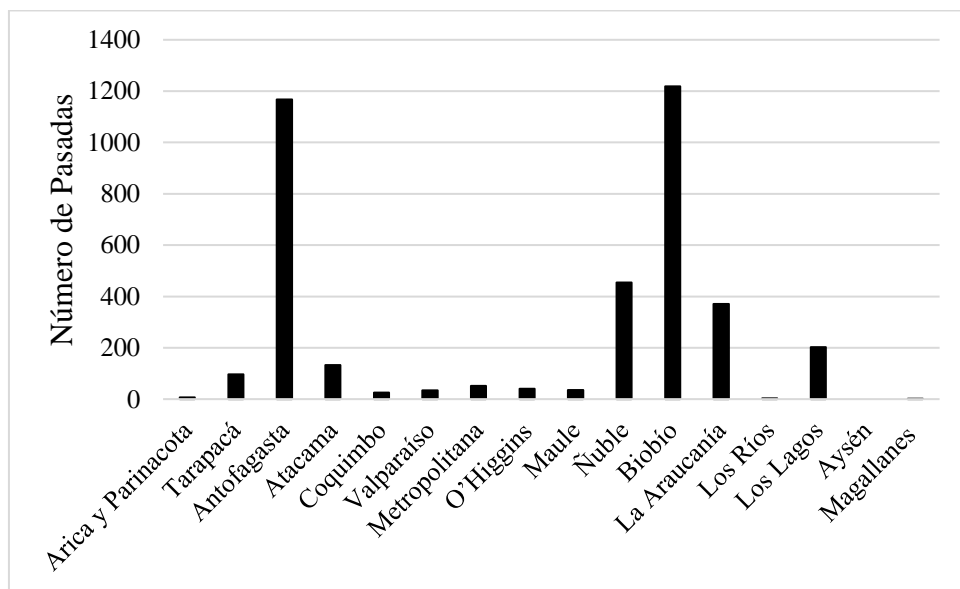


Figura 4.9 Número de pasadas, Camiones con semirremolque

La Región de Antofagasta posee 23.000 permisos, siendo la principal zona de destino de los vehículos con sobrecarga, especialmente los autopropulsados.

El análisis del número de pasadas de los vehículos con sobrecarga permite obtener una visión más realista de las cargas acumuladas en distintos sectores de la red vial. Es relevante para evaluar el desgaste estructural de los puentes, ya que regiones con un alto volumen de tránsito de vehículos con sobrecarga, como Antofagasta y Biobío, pueden estar expuestas a mayores demandas estructurales.

4.3 Trenes de carga representativos de vehículos sobrecargados

Se obtuvieron 25 trenes de carga representativos de vehículos sobrecargados, los cuales fueron diseñados a partir de un análisis estadístico de las configuraciones de ejes más frecuentes, en conjunto con sus respectivas cargas y distancias típicas. Estos trenes reflejan las características más frecuentes observadas en los datos de sobrecarga recopilados, permitiendo una representación más realista del tránsito de vehículos sobrecargados.

Además, se validó su representatividad mediante la referencia y comparación con modelos de vehículos descritos en el Estudio de Unión, 2009 y el Estudio de Unión, 2012, constatando una correlación entre los trenes de carga obtenidos y los trenes de carga utilizados en dichos estudios.

Los pesos se encuentran en toneladas y las distancias en metros.

4.3.1 Configuración de ejes S-DD-DDD

Se elaboró un tren de carga para la configuración de ejes S-DD-DDD, el cual se muestra en la Figura 4.13, a partir de indicadores estadísticos de la Tabla 4.1 y trenes de carga de referencia.

Tabla 4.1 Indicadores estadísticos Tren de carga S-DD-DDD

	PESO EJE 1	PESO EJE 2	DIST. EJE 2	PESO EJE 3	DIST. EJE 3
MODA	7	24	1,5	33	1,5
MEDIA	7,17	20,17	1,4	27,59	1,43
MEDIANA	7	20	1,4	27,5	1,4

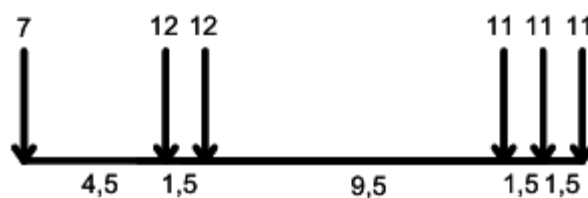


Figura 4.10 Tren de carga S-DD-DDD 64 Ton

4.3.2 Configuración de ejes S-DD-DDDD

Se realiza la elaboración de 6 trenes de carga para la configuración de ejes S-DD-DDDD, los cuales se muestran en las Figuras 4.14 a 4.19, a partir de indicadores estadísticos de la Tabla 4.2 y trenes de carga de referencia. Cabe destacar que esta configuración de ejes no se encontraba representada en ningún estudio previo, por lo cual se optó por extraer las distancias entre conjuntos de ejes de los trenes de carga de referencia S-DD-DDD.

Tabla 4.2 Indicadores estadísticos Tren de carga S-DD-DDDD

	PESO EJE 1	PESO EJE 2	DIST. EJE 2	PESO EJE 3	DIST. EJE 3
MODA	7	22	1,35	37	1,5
MEDIA	7,44	20,96	1,38	30,77	1,47
MEDIANA	7	22	1,35	32	1,4



Figura 4.11 Tren de carga S-DD-DDDD 66.a Ton

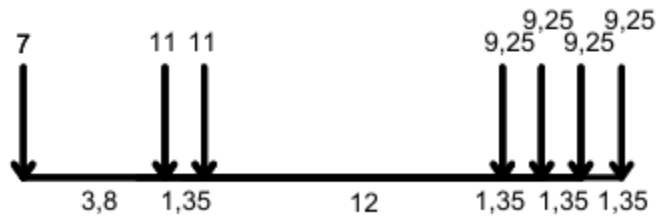


Figura 4.12 Tren de carga S-DD-DDDD 66.b Ton

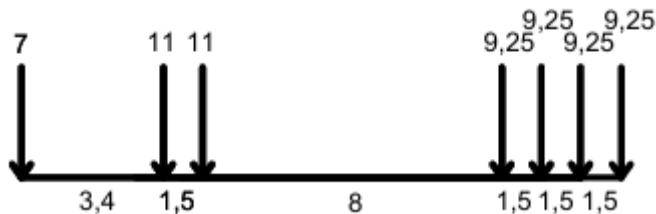


Figura 4.13 Tren de carga S-DD-DDDD 66.c Ton

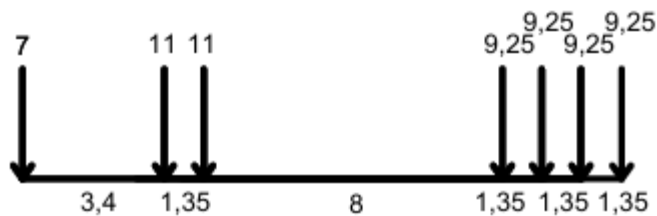


Figura 4.14 Tren de carga S-DD-DDDD 66.d Ton

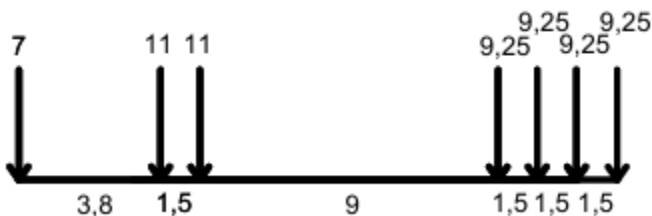


Figura 4.15 Tren de carga S-DD-DDDD 66.e Ton

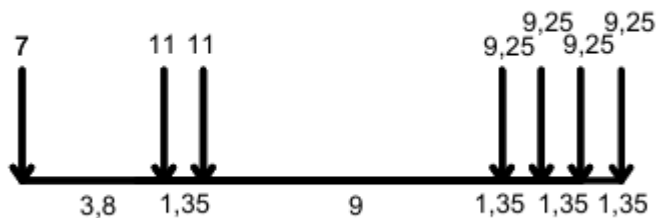


Figura 4.16 Tren de carga S-DD-DDDD 66.f Ton

4.3.3 Configuración de ejes S-DDD-DDDD

Se realiza la elaboración de un tren de carga para la configuración de ejes S-DDD-DDDD, el cual se muestra en la Figura 4.20, a partir de indicadores estadísticos de la Tabla 4.3 y trenes de carga de referencia.

Tabla 4.3 Indicadores estadísticos Tren de carga S-DDD-DDDD

	PESO EJE 1	PESO EJE 2	DIST. EJE 2	PESO EJE 3	DIST. EJE 3
MODA	7	25	1,5	37	1,5
MEDIA	7,4	25,98	1,4	32,91	1,44
MEDIANA	7	25,5	1,4	34	1,5

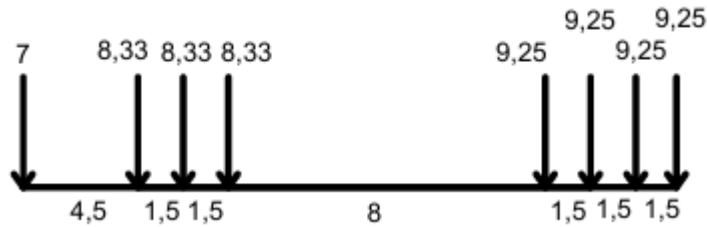


Figura 4.17 Tren de carga S-DDD-DDDD 69 Ton

4.3.4 Configuración de ejes S-DDD-DDD

Se realiza la elaboración de dos trenes de carga para la configuración de ejes S-DDD-DDD, los cuales se muestran en las Figuras 4.21 y 4.22, a partir de indicadores estadísticos de la Tabla 4.4 y trenes de carga de referencia.

Tabla 4.4 Indicadores estadísticos Tren de carga S-DDD-DDD

	PESO EJE 1	PESO EJE 2	DIST. EJE 2	PESO EJE 3	DIST. EJE 3
MODA	7	31	1,5	31	1,5
MEDIA	6,88	25,54	1,43	28,36	1,46
MEDIANA	7	25,5	1,45	28,17	1,5

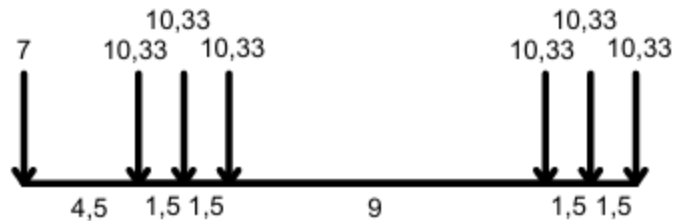


Figura 4.18 Tren de carga S-DDD-DDD 69.a Ton

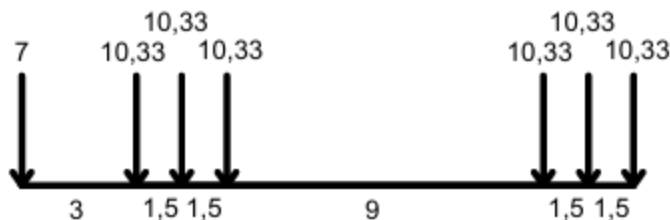


Figura 4.19 Tren de carga S-DDD-DDD 69.b Ton

4.3.5 Configuración de ejes SG-SG-SG-SG-SG

Se realiza la elaboración de tres trenes de carga para la configuración de ejes SG-SG-SG-SG-SG, los cuales se muestran en las Figuras 4.23 a 4.25, a partir de indicadores estadísticos de la Tabla 4.5 y trenes de carga de referencia, para esta configuración fue posible identificar distribuciones de cargas y distancias correspondían frecuentemente a un mismo modelo, lo que permitió elaborar los trenes de carga en base a vehículos reales.

Tabla 4.5 Indicadores estadísticos Tren de carga SG-SG-SG-SG-SG

	PESO EJE 1	DIST. EJE 1	PESO EJE 2	DIST. EJE 2	PESO EJE 3	DIST. EJE 3	PESO EJE 4	DIST. EJE 4	PESO EJE 5
MODA	14	0	14	0	14	0	12	0	12
MEDIA	13,04	0,63	13,18	1,07	12,91	0,84	12,67	0,93	12,62
MEDIANA	13	0	13	1,465	12,75	1,45	12,4	1,46	12,2

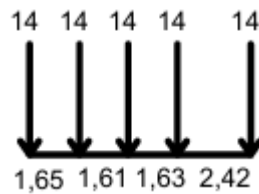


Figura 4.20 Tren de carga SG-SG-SG-SG-SG 70 Ton

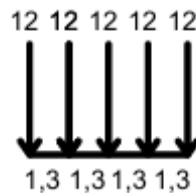


Figura 4.21 Tren de carga SG-SG-SG-SG-SG 60 Ton

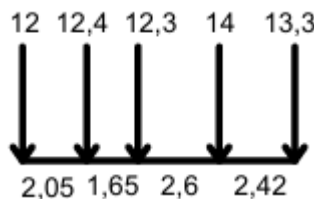


Figura 4.22 Tren de carga SG-SG-SG-SG-SG 64 Ton

4.3.6 Configuración de ejes SG-SG-SG-SG

Se realiza la elaboración de cuatro trenes de carga para la configuración de ejes SG-SG-SG-SG, los cuales se muestran en las Figuras 4.26 a 4.29, a partir de indicadores estadísticos de la Tabla 4.6 y trenes de carga de referencia. Cabe destacar que esta configuración de ejes no se encontraba representada en ningún estudio previo, además, fue posible identificar distribuciones de cargas y distancias correspondían frecuentemente a un mismo modelo, lo que permitió elaborar los trenes de carga en base a vehículos reales.

Tabla 4.6 Indicadores estadísticos Tren de carga SG-SG-SG-SG

	PESO EJE 1	PESO EJE 2	DIST EJE 2	PESO EJE 3	DIST EJE 3	PESO EJE 4	DIST EJE 4
MODA	14	11,5	0	14	0	14	0
MEDIA	12,45	12,88	0,98	13,49	1,45	13,3	0,98
MEDIANA	13	13	1,65	13	2,4	13	1,65



Figura 4.23 Tren de carga SG-SG-SG-SG 50 Ton

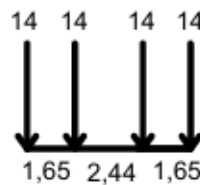


Figura 4.24 Tren de carga SG-SG-SG-SG 56 Ton

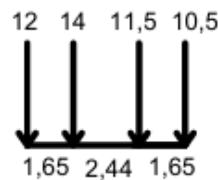


Figura 4.25 Tren de carga SG-SG-SG-SG 48 Ton

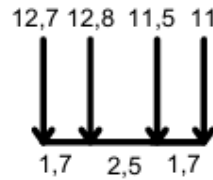


Figura 4.26 Tren de carga SG-SG-SG-SG 48 Ton

4.3.7 Configuración de ejes SG-SGSG-SGSG

Se realiza la elaboración de dos trenes de carga para la configuración de ejes SG-SGSG-SGSG, los cuales se muestran en las Figuras 4.30 y 4.31, a partir de indicadores estadísticos de la Tabla 4.7 y trenes de carga de referencia, para esta configuración fue posible identificar distribuciones de cargas y distancias correspondían frecuentemente a un mismo modelo, lo que permitió elaborar los trenes de carga en base a vehículos reales.

Tabla 4.7 Indicadores estadísticos Tren de carga SG-SGSG-SGSG

	PESO EJE 1	PESO EJE 2	DIST. EJE 2	PESO EJE 3	DIST. EJE 3
MODA	12	24	1,65	24	1,65
MEDIA	12,33	23,93	1,63	24,23	1,64
MEDIANA	12	24	1,65	24	1,65

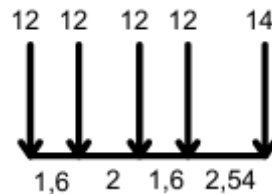


Figura 4.27 Tren de carga SG-SGSG-SGSG 62 Ton

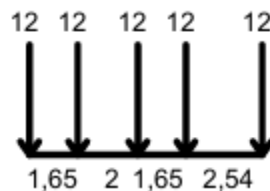


Figura 4.28 Tren de carga SG-SGSG-SGSG 60 Ton

4.3.8 Configuración de ejes SGSG-SGSG-SGSG

Se realiza la elaboración de tres trenes de carga para la configuración de ejes SGSG-SGSG-SGSG, los cuales se muestran en las Figuras 4.32 a 4.34, a partir de indicadores estadísticos de la Tabla 4.8 y trenes de carga de referencia, para esta configuración fue posible identificar distribuciones de cargas y distancias correspondían frecuentemente a un mismo modelo, lo que permitió elaborar los trenes de carga en base a vehículos reales.

Tabla 4.8 Indicadores estadísticos Tren de carga SGSG-SGSG-SGSG

	PESO EJE 1	DIST. EJE 1	PESO EJE 2	DIST. EJE 2	PESO EJE 3	DIST. EJE 3
MODA	24	1,65	24	1,65	24	1,65
MEDIA	23,47	1,67	23,65	1,66	23,7	1,66
MEDIANA	24	1,65	24	1,65	24	1,65



Figura 4.29 Tren de carga SGSG-SGSG-SGSG 72.a Ton

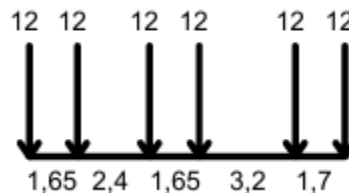


Figura 4.30 Tren de carga SGSG-SGSG-SGSG 72.b Ton

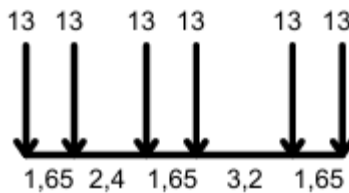


Figura 4.31 Tren de carga SGSG-SGSG-SGSG 78 Ton

4.3.9 Configuración de ejes SGSG-SGSG

Se realiza la elaboración de tres trenes de carga para la configuración de ejes SGSG-SGSG, los cuales se muestran en las Figuras 4.35 a 4.37, a partir de indicadores estadísticos de la Tabla 4.9 y trenes de carga de referencia, para esta configuración fue posible identificar distribuciones de cargas y distancias correspondían frecuentemente a un mismo modelo, lo que permitió elaborar los trenes de carga en base a vehículos reales.

Tabla 4.9 Indicadores estadísticos Tren de carga SGSG-SGSG-SGSG

	PESO EJE 1	DIST. EJE 1	PESO EJE 2	DIST. EJE 2
MODA	24	1,65	24	1,65
MEDIA	22,43	1,59	24,09	1,6
MEDIANA	24	1,65	24	1,65

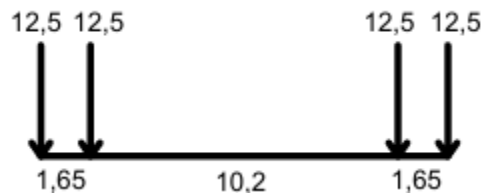


Figura 4.32 Tren de carga SGSG-SGSG 50 Ton

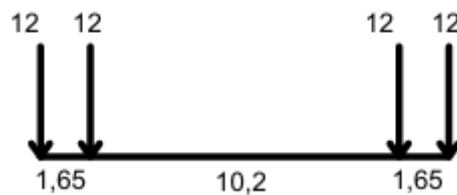


Figura 4.33 Tren de carga SGSG-SGSG 48 Ton

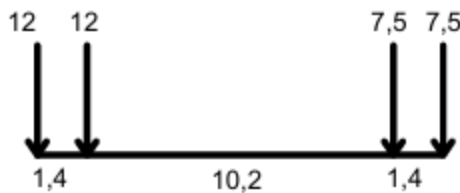


Figura 4.34 Tren de carga SGSG-SGSG 39 Ton

En la Tabla 4.10 se muestran los trenes de carga empleados en esta memoria de título.

Tabla 4.10 Resumen trenes de carga

Configuración de ejes	Unión 2009	Unión 2012	Elaborados	Total
S-DD-DDD	5	1	1	7
S-DD-DDDD	-	-	6	6
S-DDD-DDDD	-	1	1	2
S-DDD-DDD	5	1	2	8
SG-SG-SG-SG-SG	2	1	3	6
SG-SG-SG-SG	-	-	4	4
SG-SGSG-SGSG	1	-	2	3
SGSG-SGSG-SGSG	1	-	3	4
SGSG-SGSG	1	-	3	4
Total	15	4	25	44

La principal limitación de este estudio fue la falta de información sobre la distancia entre conjuntos de ejes en el conjunto de datos utilizado, por lo cual, se recurrió a trenes de carga de referencia basados en estudios previos, permitiendo estimaciones razonables, pero sin alcanzar una precisión total en la mayoría de los trenes de carga elaborados. Esta variable, al no estar completamente definida, afecta la exactitud de los resultados obtenidos

4.4 Comparación de los efectos estructurales de diferentes escenarios de carga

Para las 9 configuraciones de ejes de vehículos con sobrecarga analizadas, se compararon trenes de carga provenientes de los estudios de referencia junto con los trenes de carga de elaboración propia desarrollados en este estudio. Estos fueron evaluados en relación con los trenes de diseño normativos HL-93 y HS20-44+20%, analizando si las solicitaciones estructurales generadas, de momento flector y fuerza cortante, producen porcentajes de excedencia que comprometan el diseño por servicio y el diseño por resistencia.

Se empleo la siguiente tipología para clasificar los distintos trenes de carga.

- U: Trenes de carga extraídos del Estudio Comparativo del Camión de Diseño HL-93 de la Norma LRFD v/s Camión Bitren.
- CH: Trenes de carga extraídos Estudio de Definición de Cargas Especiales de Sobrecarga para el Puente Chacao.
- S: Trenes de carga de elaboración propia.

4.4.1 Configuración de ejes S-DD-DDD

En el Anexo 1 se presenta el máximo momento flector generado por cada uno de los siete vehículos, de seis ejes, de configuración S-DD-DDD, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El momento de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 1, en prácticamente la totalidad del rango de luz considerado. El momento de diseño HL93 es excedido por el vehículo 65 T CH en luces menores a aproximadamente 45 m. El vehículo 65 T CH supera hasta en un 22% la demanda de momento HL93, para una luz de 7 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

En el Anexo 1 se presenta el máximo corte generado por cada uno de los siete vehículos, de seis ejes, de configuración S-DD-DDD, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El corte de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 1, en prácticamente la totalidad del rango de luz considerado. El corte de diseño HL93 es excedido por el vehículo 65 T CH en luces menores a 55 m. El vehículo 65 T CH supera hasta en un 22% la demanda de corte HL93, para una luz de 7 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

4.4.2 Configuración de ejes S-DD-DDDD

En el Anexo 2 se presenta el máximo momento flector generado por cada uno de los seis vehículos, de siete ejes, de configuración S-DD-DDDD, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El momento de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 2, en la totalidad del rango de luz considerado. El momento de diseño HL93 es excedido por el vehículo 66 T S.d en luces menores a aproximadamente 45 m. El vehículo 66 T S.d supera hasta en un 10% la demanda de momento HL93, para una luz de 11 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

En el Anexo 2 se presenta el máximo corte generado por cada uno de los seis vehículos, de siete ejes, de configuración S-DD-DDDD, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El corte de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 2, en prácticamente la totalidad del rango de luz considerado. El corte de diseño HL93 es excedido por las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 2 para luces menores a aproximadamente 45 m. El vehículo 66 T S.d supera hasta en un 15% la demanda de corte HL93, para una luz de 26 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

4.4.3 Configuración de ejes S-DDD-DDDD

En el Anexo 3 se presenta el máximo momento flector generado por cada uno de los dos vehículos, de ocho ejes, de configuración S-DDD-DDDD, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El momento de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 3, en prácticamente la totalidad del rango de luz considerado. El momento de diseño HL93 es excedido por el vehículo 69 T S en luces comprendidas entre los rangos aproximados de 10 a 15 m y de 35 a 40 m. El vehículo 69 T S supera hasta en un 7% la demanda de momento HL93, para una luz de 12 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

En el Anexo 3 se presenta el máximo corte generado por cada uno de los dos vehículos, de ocho ejes, de configuración S-DDD-DDDD, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El corte de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 3, en prácticamente la totalidad del rango de luz considerado. El corte de diseño HL93 es excedido por el vehículo 69 T S en luces menores a 60 m. El vehículo 69 T S supera hasta en un 14% la demanda de corte HL93, para una luz de 29 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

4.4.4 Configuración de ejes S-DDD-DDD

En la Figura 4.38 se presenta el máximo momento flector generado por cada uno de los ocho vehículos, de siete ejes, de configuración S-DDD-DDD, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

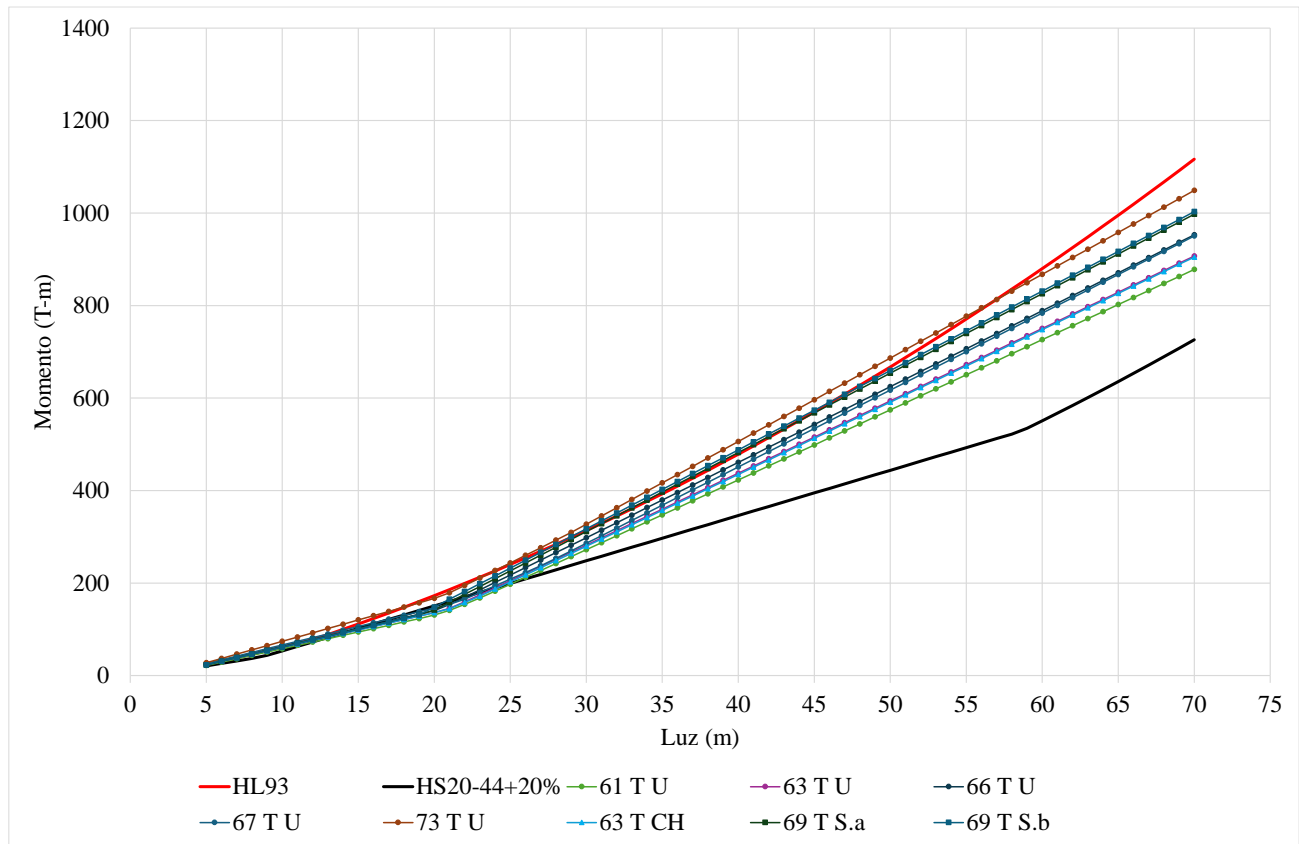
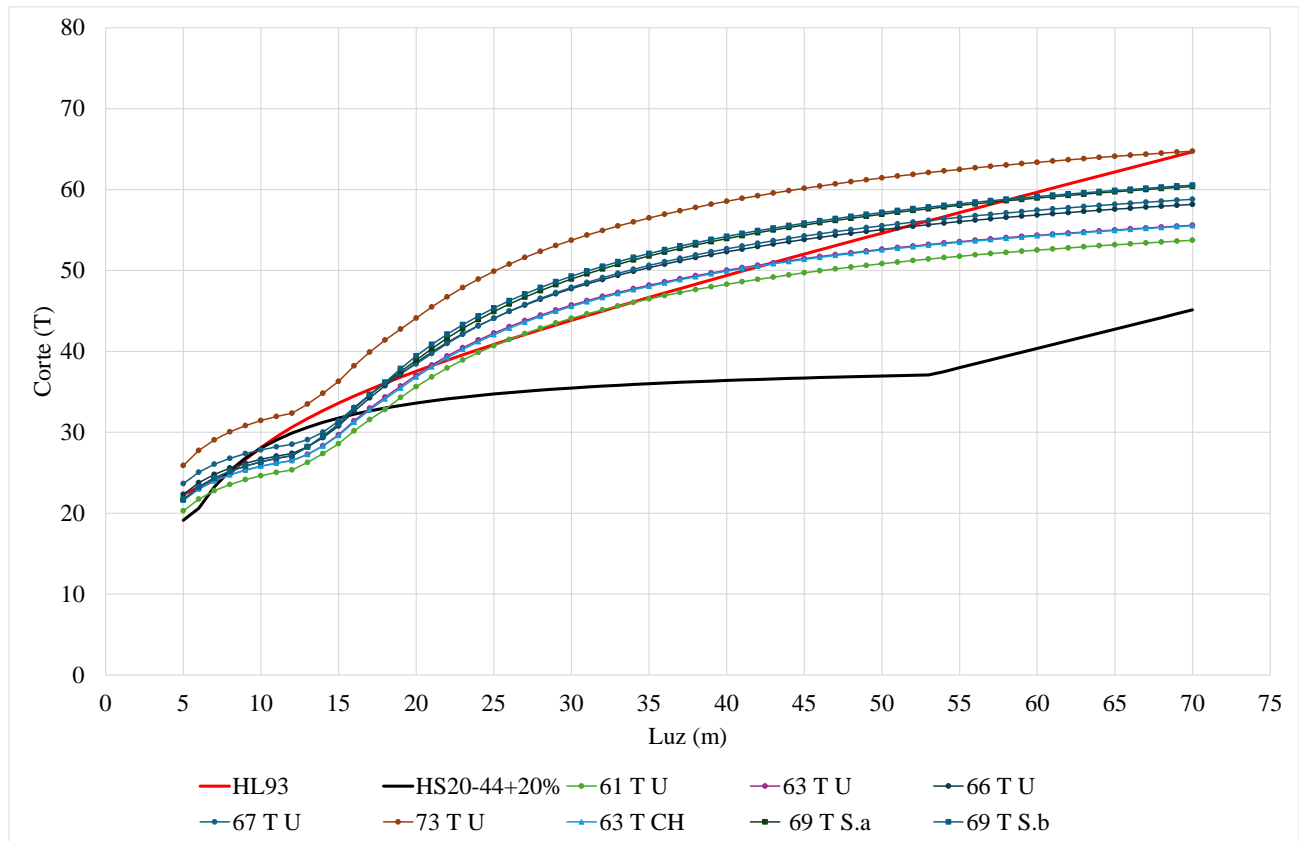


Figura 4.38 Momento flector configuración S-DDD-DDD

El momento de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en la Figura 4.38, en prácticamente la totalidad del rango de luz considerado. El momento de diseño HL93 es excedido por el vehículo 73 T U en luces de hasta aproximadamente 55 m. El vehículo 73 T U supera hasta en un 20% la demanda de momento HL93, para una luz de 9 m, excediendo los límites de diseño por servicio.



En la Figura 4.39 se presenta el máximo corte generado por cada uno de los ocho vehículos, de siete ejes, de configuración S-DDD-DDD, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

Figura 4.39 Fuerza cortante configuración S-DDD-DDD

El corte de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en la Figura 4.39, en prácticamente la totalidad del rango de luz considerado. El corte de diseño HL93 es excedido por las configuraciones vehiculares presentadas en la Figura 4.39 para luces intermedias entre 20 y 55 metros, dependiendo del vehículo. El vehículo 73 T U supera la demanda de corte HL93 en la totalidad de las luces consideradas. El vehículo 73 T U supera hasta en un 23% la demanda de corte HL93, para una luz de 28 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

4.4.5 Configuración de ejes SG-SG-SG-SG-SG

En el Anexo 4 se presenta el máximo momento flector generado por cada una de las seis grúas autopropulsadas, de cinco ejes, de configuración SG-SG-SG-SG-SG, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El momento de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 4. El momento de diseño HL93 es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 4 para luces menores a aproximadamente 55 m. La grúa 70 T S supera la demanda de momento HL93 en la totalidad de las luces consideradas. La grúa 70 T S supera hasta en un 73% la demanda de momento HL93, para una luz de 12 m, excediendo los límites de diseño por servicio y acercándose a los límites de diseño por resistencia.

En el Anexo 4 se presenta el máximo corte generado por cada una de las seis grúas autopropulsadas, de cinco ejes, de configuración SG-SG-SG-SG-SG, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El corte de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 4. El corte de diseño HL93 es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 4 para luces menores a aproximadamente 55 m. La grúa 70 T S supera la demanda de corte HL93 en la totalidad de las luces consideradas. La grúa 70 T S supera hasta en un 64% la demanda de corte HL93, para una luz de 11 m, excediendo los límites de diseño por servicio y acercándose a los límites de diseño por resistencia.

4.4.6 Configuración de ejes SG-SG-SG-SG

En el Anexo 5 se presenta el máximo momento flector generado por cada una de las cuatro grúas autopropulsadas, de cuatro ejes, de configuración SG-SG-SG-SG, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El momento de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 5. El momento de diseño HL93 es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 5 para luces menores a 30 m. La grúa 56 T S supera la demanda de momento HL93 en luces de hasta 45 m. La grúa 56 T S supera hasta en un 43% la demanda de momento HL93, para una luz de 12 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

En el Anexo 5 se presenta el máximo corte generado por cada una de las cuatro grúas autopropulsadas, de cuatro ejes, de configuración SG-SG-SG-SG, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El corte de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 5. El corte de diseño HL93 es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en la Anexo 5 para luces menores de aproximadamente 30 m. La grúa 56 T S supera la demanda de corte HL93 en luces de hasta aproximadamente 45 m. La grúa 56 T S supera hasta en un 44% la demanda de corte HL93, para una luz de 8 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

4.4.7 Configuración de ejes SG-SGSG-SGSG

En el Anexo 6 se presenta el máximo momento flector generado por cada una de las tres grúas autopropulsadas, de cinco ejes, de configuración SG-SGSG-SGSG, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El momento de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 6. El momento de diseño HL93 es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 6 para luces menores a aproximadamente 55 m. La grúa 65 T U supera la demanda de momento HL93 en luces de hasta aproximadamente 60 m. La grúa 65 T U supera hasta en un 54% la demanda de momento HL93, para una luz de 13 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

En el Anexo 6 se presenta el máximo corte generado por cada una de las tres grúas autopropulsadas, de cinco ejes, de configuración SG-SGSG-SGSG, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El corte de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 6. El corte de diseño HL93 es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 6 para luces menores a aproximadamente 55 m. La grúa 65 T U supera la demanda de corte HL93 en luces de hasta aproximadamente 60 m. La grúa 65 T U supera hasta en un 47% la demanda de corte HL93, para una luz de 12 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

4.4.8 Configuración de ejes SGSG-SGSG-SGSG

En la Figura 4.40 se presenta el máximo momento flector generado por cada una de las cuatro grúas autopropulsadas, de seis ejes, de configuración SGSG-SGSG-SGSG, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

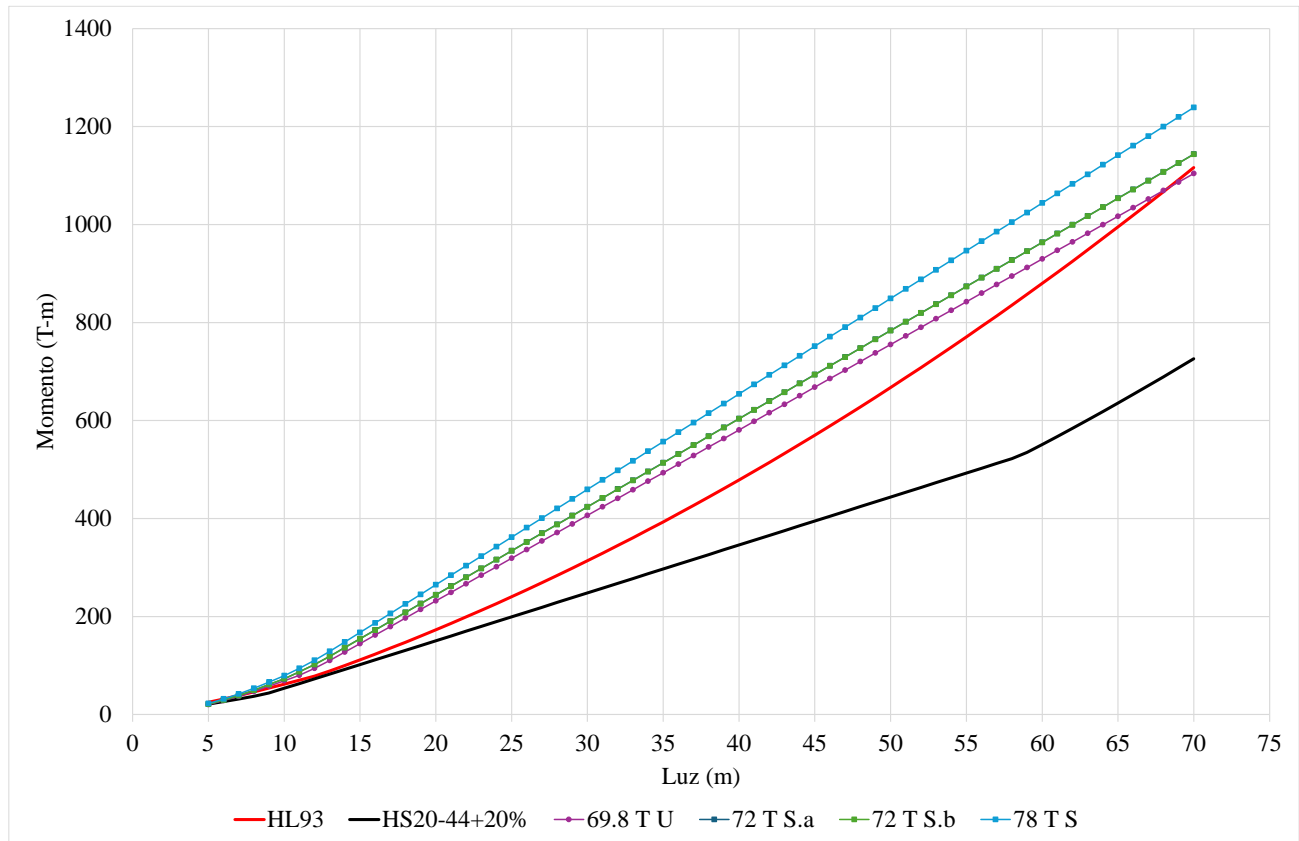


Figura 4.40 Momento flector configuración SGSG-SGSG-SGSG

El momento de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en la Figura 4.40. El momento de diseño HL93 es también excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en la Figura 4.40, en prácticamente la totalidad del rango de luz considerado. La grúa 78 T S supera hasta en un 53% la demanda de momento HL93, para una luz de 19 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

En la Figura 4.41 se presenta el máximo corte generado por cada una de las cuatro grúas autopropulsadas, de seis ejes, de configuración SGS-GSG-SGS, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

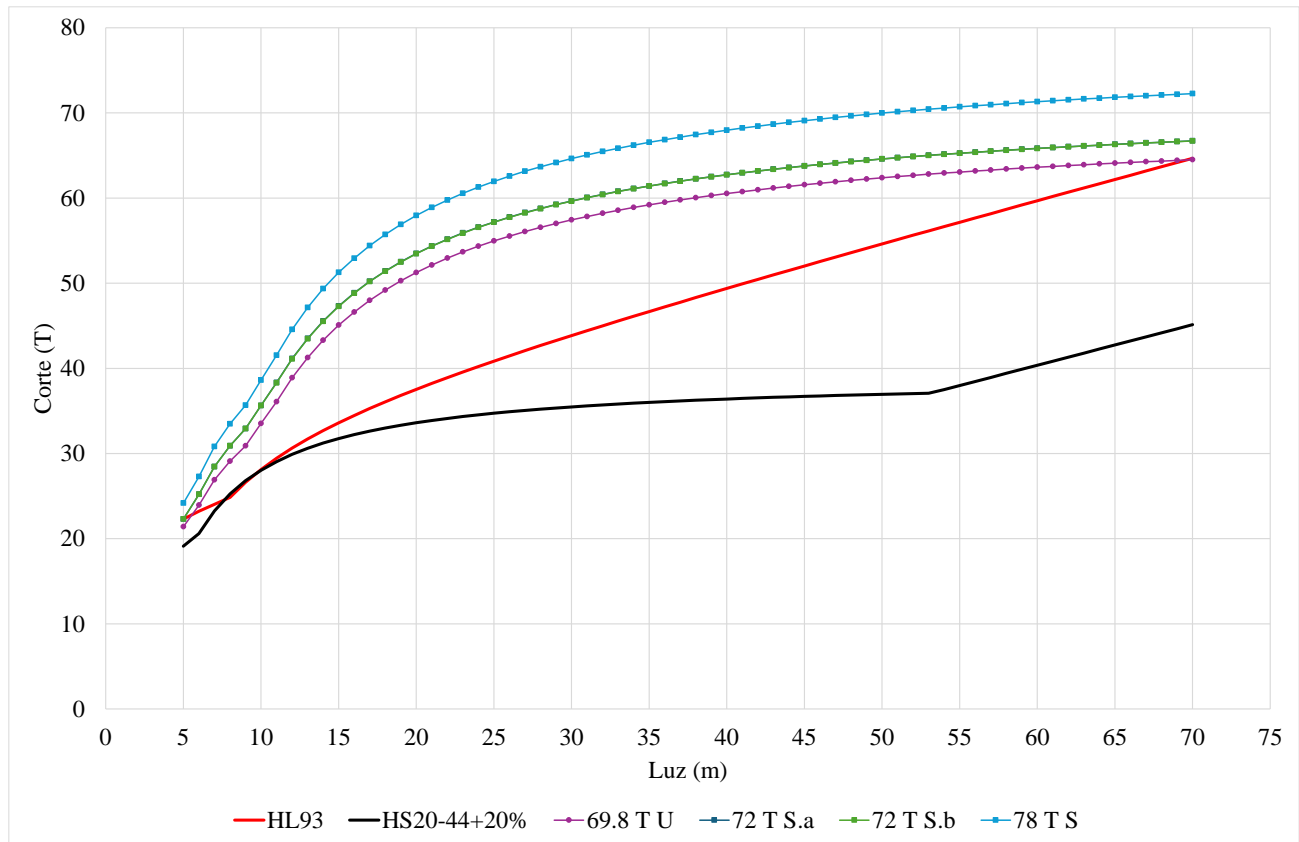


Figura 4.41 Fuerza cortante configuración SGS-GSG-SGS

El corte de diseño HS20-44+20% es excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en la Figura 4.41. El corte de diseño HL93 es también excedido por todas las configuraciones vehiculares presentadas en la Figura 4.41, en prácticamente la totalidad del rango de luz considerado. La grúa 78 T S supera hasta en un 55% la demanda de corte HL93, para una luz de 19 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

4.4.9 Configuración de ejes SGSG-SGSG

En el Anexo 7 se presenta el máximo momento flector generado por cada una de las cuatro grúas autopropulsadas, de cuatro ejes, de configuración SGSG-SGSG, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El momento de diseño HS20-44+20% es excedido por prácticamente todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 7 para luces mayores a 40 m, exceptuando la grúa 39 T S. El momento de diseño HL93 es excedido por la grúa 51.2 T U en luces de hasta 35 m. La grúa 51.2 T U supera hasta en un 32% la demanda de momento HL93, para una luz de 12 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

En el Anexo 7 se presenta el máximo corte generado por cada una de las cuatro grúas autopropulsadas, de cuatro ejes, de configuración SGSG-SGSG, al transitar por puentes de distinta luz. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

El corte de diseño HS20-44+20% es excedido por prácticamente todas las configuraciones vehiculares presentadas en el Anexo 7 para luces mayores a 25 m, exceptuando la grúa 39 T S. El corte de diseño HL93 es excedido por la grúa 51.2 T U en luces de hasta 35 m. La grúa 51.2 T U supera hasta en un 33% la demanda de corte HL93, para una luz de 8 m, excediendo los límites de diseño por servicio.

4.4.10 Tren de carga más desfavorable por configuración de ejes

En la Figura 4.56 se presenta el máximo momento flector generado por los trenes de carga más desfavorables para cada una de las configuraciones de ejes analizadas en este estudio. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

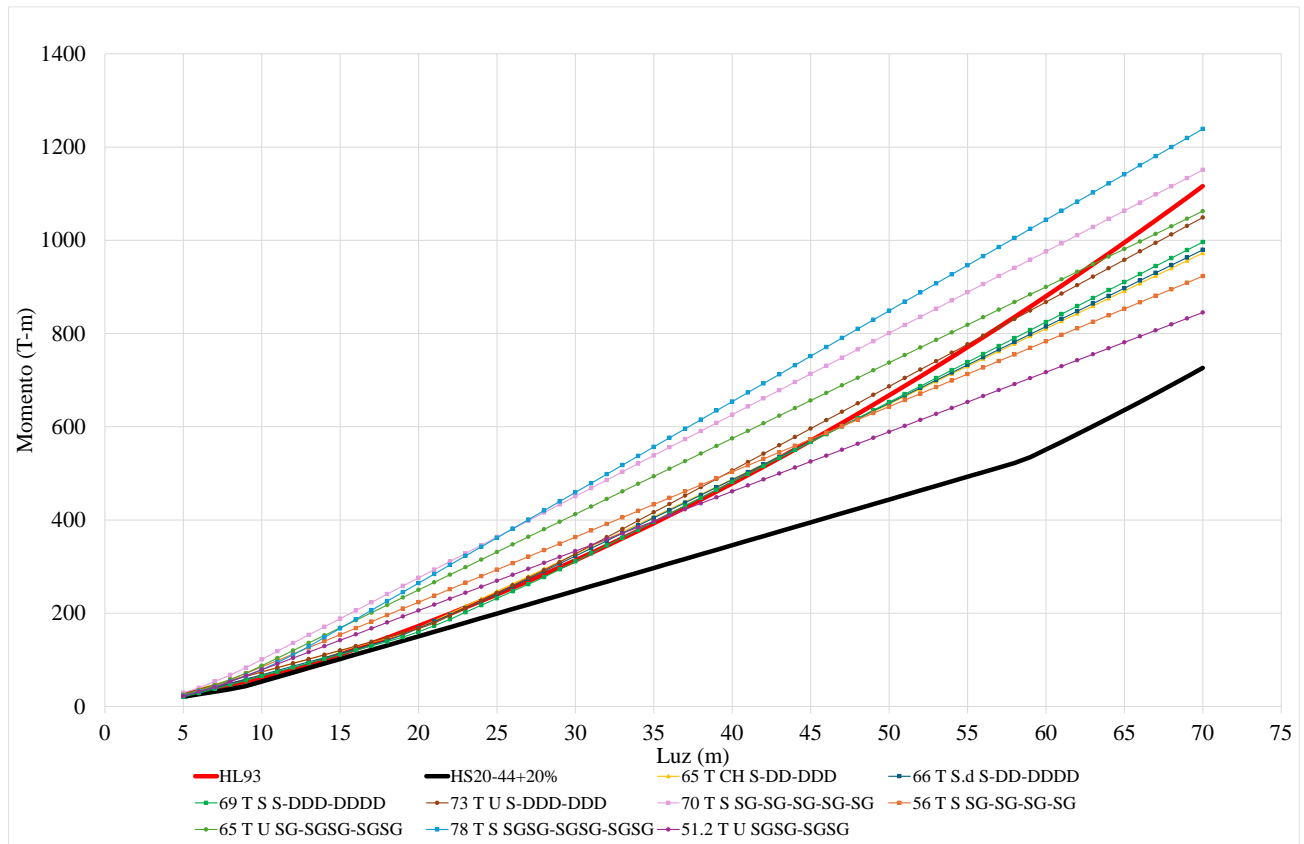


Figura 4.35 Momento flector Tren de carga más desfavorable por configuración de ejes

En la Figura 4.57 se presenta el máximo corte generado por los trenes de carga más desfavorables para cada una de las configuraciones de ejes analizadas en este estudio. Se incluyen también las demandas de diseño (HL93 y HS20-44+20%) para el rango de luces considerado.

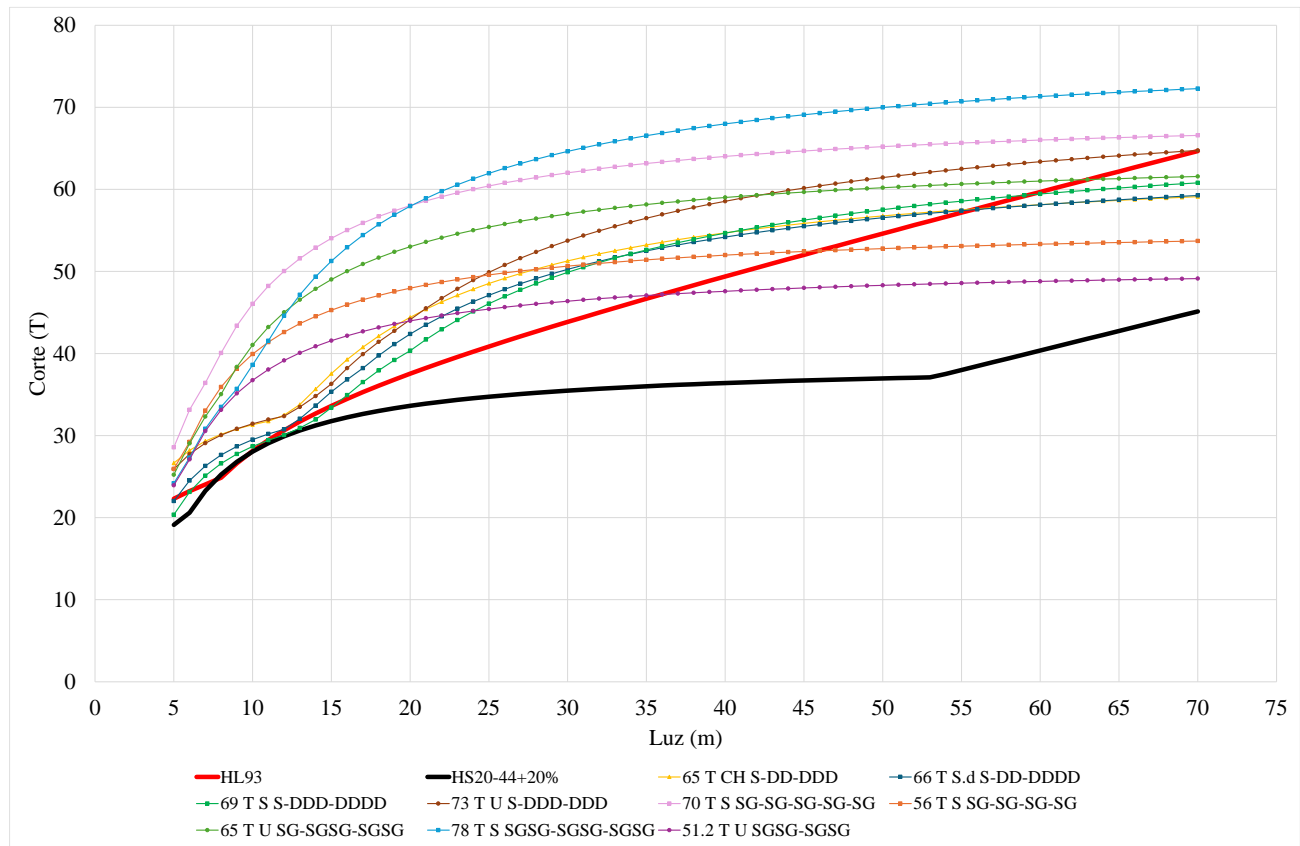


Figura 4.36 Fuerza cortante Tren de carga más desfavorable por configuración de ejes

Los gráficos que comparan los momentos y cortes máximos generados por diferentes configuraciones vehiculares con los trenes de diseño HL93 y HS20-44+20% revelan que los trenes de carga elaborados para este estudio generan efectos más desfavorables que las consideradas en los estudios de referencia en 5 de las 9 configuraciones analizadas. Esto muestra la importancia de incorporar nuevos trenes de carga realistas y representativos en los análisis estructurales.

Al analizar el momento flector, los mayores porcentajes de excedencia ocurren en vanos cortos, con valores máximos en vanos de 7 a 13 metros, salvo la configuración de grúa SGSG-SGSG-SGSG, que presenta su máximo porcentaje de excedencia en un vano de 19 metros.

Para la fuerza de corte, los porcentajes de excedencia se dividen según la configuración en dos rangos de vano. En vanos de 7 a 12 metros, se registran los mayores porcentajes de excedencia para cinco

configuraciones, cuatro correspondientes a grúas autopropulsadas y una configuración correspondiente a camiones. En los vanos medianos entre 19 y 29 metros, se registran los mayores porcentajes de excedencia para tres configuraciones correspondiente a camiones y la configuración de grúa SGSG-SGSG-SGSG.

Estos resultados destacan la influencia de la distribución de las cargas por eje y la longitud del vano en el comportamiento estructural.

En términos de momento flector, el tren de carga de 70 toneladas de configuración SG-SG-SG-SG-SG es el más desfavorable en vanos de 5 a 25 metros, presentando un 73% de excedencia en un vano de 12 metros. Para vanos superiores a 25 metros, el tren de carga de 78 toneladas de configuración SGSG-SGSG-SGSG resulta el más desfavorable, presentando un 51% de excedencia en un vano de 25 metros.

En términos de fuerza cortante, el tren de carga de 70 toneladas de configuración SG-SG-SG-SG-SG es el más desfavorable en vanos de 5 a 20 metros, presentando un 64% de excedencia en un vano de 11 metros. Para vanos superiores a 20 metros, el tren de carga de 78 toneladas de configuración SGSG-SGSG-SGSG resulta el más desfavorable, presentando un 54% de excedencia en un vano de 20 metros.

Cabe destacar que ambos trenes de carga corresponden a grúas autopropulsadas y fueron elaborados en este estudio.

La comparación entre los trenes de carga propuestos y los trenes normativos HS20-44+20% y HL-93 mostró que los modelos actualmente utilizados subestiman los efectos reales de los vehículos con sobrecarga.

4.5 Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron identificar que los vehículos autopropulsados y las configuraciones de tres conjuntos de ejes, especialmente la S-DD-DDD, son predominantes dentro de los permisos otorgados entre los años 2018 y 2023.

El análisis geográfico evidenció una alta concentración de tránsito con sobrepeso en las regiones de correspondientes al norte del país, en particular, la región de Antofagasta, además de la región del BioBío, lo que implica una mayor demanda estructural acumulada en la infraestructura de estas zonas.

A partir de los datos, se desarrollaron trenes de carga representativos para las configuraciones más frecuentes. Estos trenes permitieron evaluar el comportamiento estructural de los puentes frente a diferentes longitudes de vano, destacándose que los efectos más críticos, tanto en momento flector como en fuerza cortante, se asociaron a configuraciones de grúas autopropulsadas actuando sobre vanos cortos y medianos.

La comparación con los trenes de diseño normativos mostró que el patrón HS20-44+20% fue ampliamente superado por casi todas las configuraciones analizadas. El patrón HL-93, si bien presentó demandas más cercanas a los trenes de diseño, también fue superado en varios escenarios. Solo una de las configuraciones evaluadas se aproximó a los límites de diseño por resistencia, sin llegar a excederlos.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

El presente trabajo abordó el análisis de los efectos de los vehículos con sobrecarga en puentes simplemente apoyados menores y medianos, con vanos comprendidos entre 5 y 70 metros. Se realizó la caracterización de los tipos de vehículos con sobrecarga más comunes, la elaboración de trenes de carga representativos basados en datos reales, modelos estadísticos y estudios de referencia. Además, se compararon el momento flector y la fuerza cortante de diferentes escenarios de carga con los trenes de diseño HS20-44+20% y HL-93.

Los resultados muestran que, a nivel nacional, el 86,7% corresponde a vehículos autopropulsados, seguidos por camiones tracto con remolque con un 9,1% y camiones tracto con semirremolque con un 4,2%. En cuanto a la cantidad de conjunto de ejes, el 70,7% de los vehículos poseen tres conjuntos de ejes, seguido por configuraciones de cuatro con un 17,1% y cinco conjuntos de ejes con un 7,2%. Las configuraciones de ejes más frecuentes identificadas fueron S-DD-DDD con un 21,1%, S-DD-DDDD con un 12% y S-DDD-DDDD con un 11,9%. (Donde S: rodado simple y D: rodado doble). Además, se observó que el peso bruto total (PBT) de los vehículos con sobrecarga se concentra principalmente entre 50 y 75 toneladas. Estos resultados resaltan la necesidad de considerar diversas configuraciones vehiculares representativas en los análisis estructurales de puentes, ya que el impacto de la sobrecarga no solo depende del peso total del vehículo, sino también de la disposición de sus ejes y la distribución de la carga sobre la infraestructura.

El análisis geográfico permitió identificar que la Región de Antofagasta concentra la mayor cantidad de permisos de sobrecarga (más de 23.000 registros entre el año 2018 y el año 2022) y mayor número de pasadas (aproximadamente 28.000 pasadas entre el año 2018 al año 2022). Otras regiones del norte, como Atacama y Coquimbo, también presentan una alta concentración de permisos y pasadas, mientras que en la zona central y sur destacan Valparaíso, la Región Metropolitana y la Región del Biobío.

El análisis del número de pasadas de los vehículos con sobrecarga permite obtener una visión más realista de las cargas acumuladas en distintos sectores de la red vial. Permite evaluar el desgaste estructural de los puentes, ya que regiones con un alto volumen de tránsito de vehículos con sobrecarga, como Antofagasta y Biobío, pueden estar expuestas a mayores demandas estructurales en

comparación con otras zonas donde el flujo es menor. Además, permite identificar rutas críticas y diseñar estrategias de monitoreo y fiscalización más efectivas.

Dentro de las configuraciones evaluadas, se identificó que las grúas autopropulsadas, aunque menos frecuentes, generan un impacto estructural más desfavorable, por lo que se incluyeron en los trenes de carga propuestos.

Los resultados indicaron que, en 5 de las 9 configuraciones de ejes analizadas, los trenes de carga elaborados en este estudio generaron solicitaciones más desfavorables que los de estudios referenciados.

La comparación entre los trenes de carga propuestos y los trenes normativos HS20-44+20% y HL-93 mostró que los modelos actualmente utilizados subestiman los efectos de los vehículos con sobrecarga. En particular, el tren normativo HS20-44+20% fue superado prácticamente por todos los trenes de carga evaluados, tanto en momento flector como en fuerza cortante. El tren HL-93 mostró demandas de momento flector y fuerza cortante más cercanas a las producidas por los vehículos con sobrecarga en ciertos escenarios, especialmente para camiones menos sobrecargados y vanos de mayor longitud. Sin embargo, en la mayoría de los casos evaluados, las cargas vehiculares analizadas superaron las demandas de diseño establecidas. Al analizar el momento flector, los mayores porcentajes de excedencia en relación con el tren de diseño HL-93 ocurren en vanos cortos, con valores máximos en vanos menores a 15 metros, salvo la configuración de grúa SGSG-SGSG-SGSG, que presenta su máximo porcentaje de excedencia en un vano de 19 metros. Para la fuerza de corte, los porcentajes de excedencia se dividen según la configuración en dos rangos de vano. En vanos menores a 15 metros, se registran los mayores porcentajes de excedencia para cinco configuraciones, cuatro correspondientes a grúas autopropulsadas y una configuración correspondiente a camiones. En los vanos medianos, entre 20 y 30 metros, se registran los mayores porcentajes de excedencia para tres configuraciones correspondiente a camiones y la configuración de grúa SGSG-SGSG-SGSG. Tanto en momento flector como en fuerza cortante, se presentaron mayores porcentajes de excedencia en las configuraciones correspondientes a grúas autopropulsadas, acercándose a los límites de diseño por resistencia en la configuración SGSG-SGSG-SGSG, con el tren de carga 78 T S. Estos resultados destacan la influencia de la distribución de las cargas por eje y la longitud del vano en el comportamiento estructural.

Estos resultados evidencian que los vehículos con sobrecarga, en especial las grúas autopropulsadas, generan demandas estructurales en los puentes simplemente apoyados que superan ampliamente a los estándares de diseño, acercándose, para algunos vanos, a los límites de diseño por resistencia, lo cual implicaría un potencial riesgo de colapso parcial o total de la estructura.

Se recomienda considerar y generar bases de datos más completas, que incluyan todas las dimensiones vehiculares necesarias para la determinación de demandas estructurales (corte, momento y otros efectos). Esto debería incluir, al menos, la distancias entre ejes y distancias entre conjuntos de ejes. Asimismo, se recomienda la evaluación del impacto de la fatiga estructural debido a la circulación reiterada de vehículos con sobrecarga, ya que permitiría cuantificar con el deterioro progresivo de la infraestructura vial.

Los hallazgos de este estudio son de interés para la Dirección de Vialidad, ya que proporcionan información estructural técnica para la fiscalización del transporte de cargas especiales y el diseño y conservación de infraestructura adaptada a las condiciones reales del tránsito vehicular. La identificación de configuraciones vehiculares con sobrecarga más críticas permite mejorar la toma de decisiones en materia de regulación y mantenimiento.

REFERENCIAS

- Dirección de Vialidad. (2023). *Manual de autorizaciones para transportes especiales (versión 2023)*. Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2002). *Standard specifications for highway bridges* (17th ed.). AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2012). *LRFD bridge design specifications* (6th ed.). AASHTO.
- MOP. (2023). *Manual de carreteras vol. 3: Instrucciones y criterios de diseño*. Ministerio de Obras Públicas.
- Han, W., Wu, J., Cai, C. S., & Chen, S. (2015). Characteristics and dynamic impact of overloaded extra heavy trucks on typical highway bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 20(2), 1-11.
- Aggarwal, V., & Parameswaran, L. (2015). Effect of overweight trucks on fatigue damage of a bridge. In *Advances in Structural Engineering: Materials, Volume Three*. Springer India, 1-9.
- Chou, C. P. J. (1996). Effect of overloaded heavy vehicles on pavement and bridge design. *Transportation research record*, 1539, 1-8.
- Lou, P., Nassif, H., Su, D., & Truban, P. (2017). Impact of overweight trucks on the service life of bridge girders. *Transportation Research Record*, 2642, 1-15.
- Unión V., A. (2009). *Estudio comparativo del camión de diseño HL-93 de la Norma LRDF v/s camión Bitren y cargas especiales frecuentes (Versión 1)*. Dirección Nacional de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Unión V., A. (2012). *Estudio de definición de cargas especiales de sobrecarga para el puente Chacao*. Dirección Nacional de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

Instituto Nacional de Estadísticas. (2023). Transporte y comunicaciones. INE.

ANEXO 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

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

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

Vinculación
<p>Esta memoria de título contribuye al ODS 9 al analizar los efectos de vehículos con sobrecarga en puentes, identificando las configuraciones vehiculares más críticas y las zonas geográficas con mayor tránsito de estos vehículos. La investigación revela que las configuraciones de vehículos sobrecargados frecuentemente exceden las demandas de diseño de los puentes, comprometiendo su vida útil y seguridad. Específicamente, se identificó que el patrón de carga normativo HS20-44+20% es superado por la mayoría de los vehículos evaluados, y que las grúas autopropulsadas generan las mayores excedencias en momento flector y fuerza cortante. Estos resultados permiten un monitoreo y fiscalización más efectivos, enfocándose en las regiones y tipos de vehículos que representan el mayor riesgo para la infraestructura vial, optimizando así la gestión y mantenimiento de estas infraestructuras.</p>

ANEXO 4.1 Momento flector y Fuerza cortante S-DD-DDD

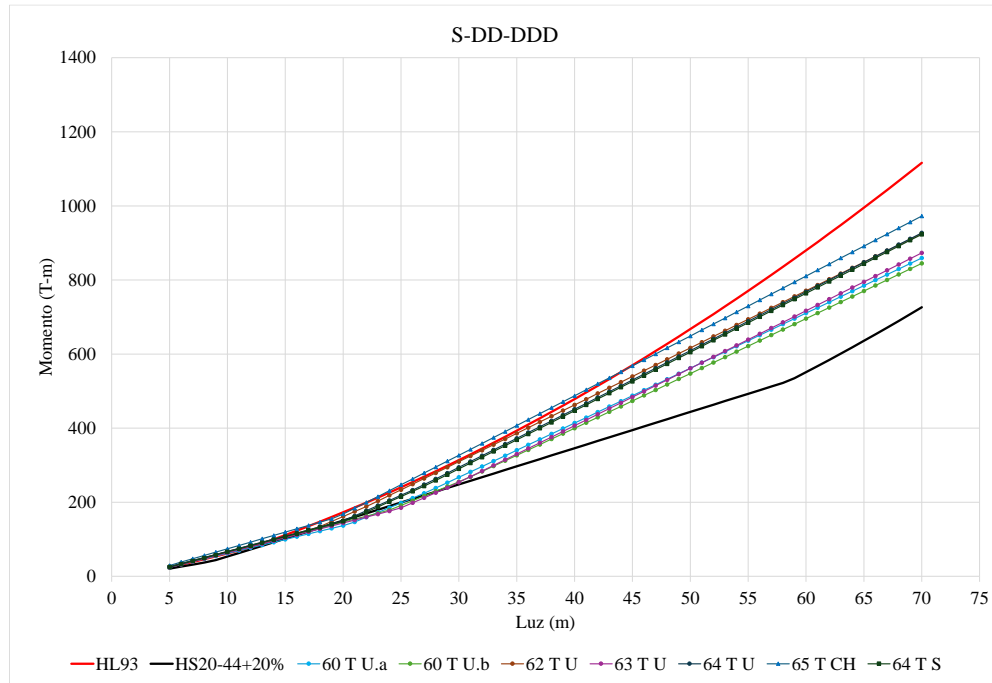


Figura A.4.1.1 Momento flector configuración S-DD-DDD

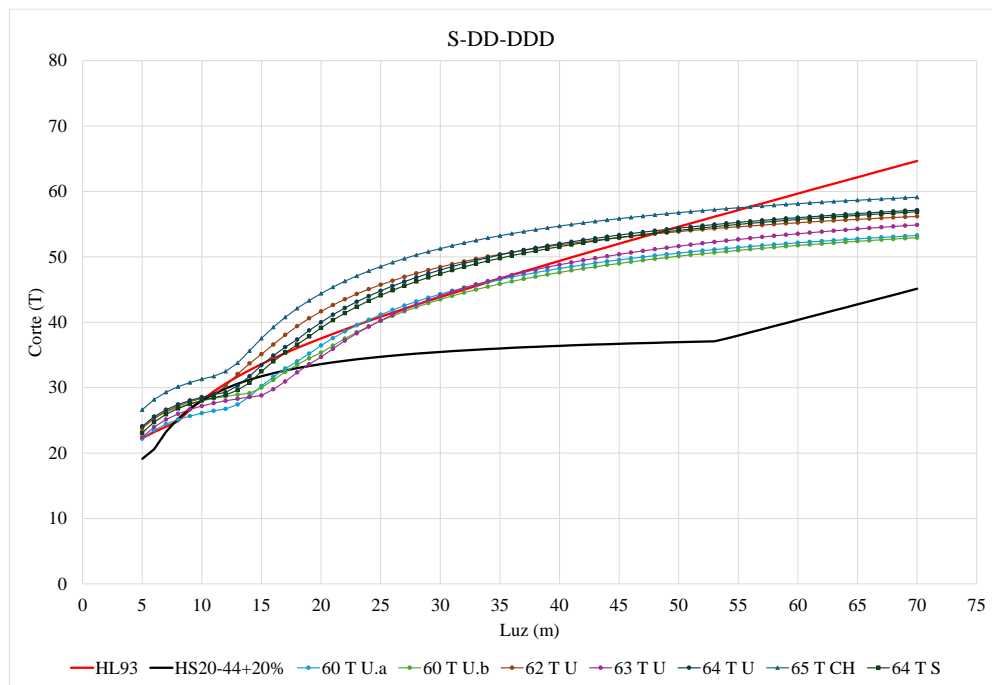


Figura A.4.1.2 Fuerza cortante configuración S-DD-DDD

ANEXO 4.2 Momento flector y Fuerza cortante S-DD-DDDD

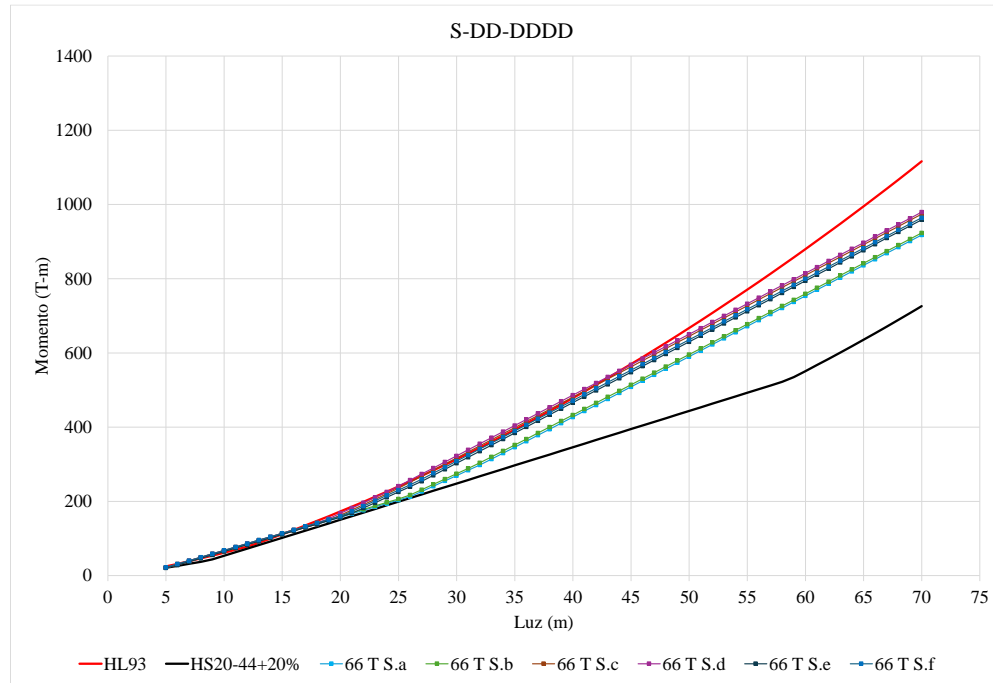


Figura A.4.2.1 Momento flector configuración S-DD-DDDD

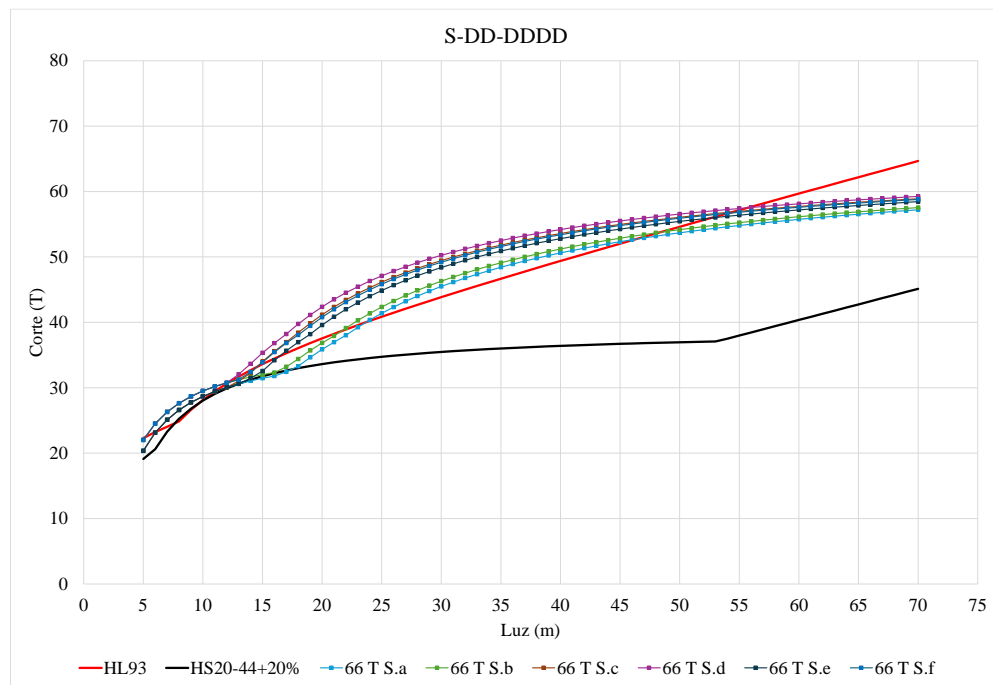


Figura A.4.2.2 Fuerza cortante configuración S-DD-DDDD

ANEXO 4.3 Momento flector y Fuerza cortante S-DDD-DDDD

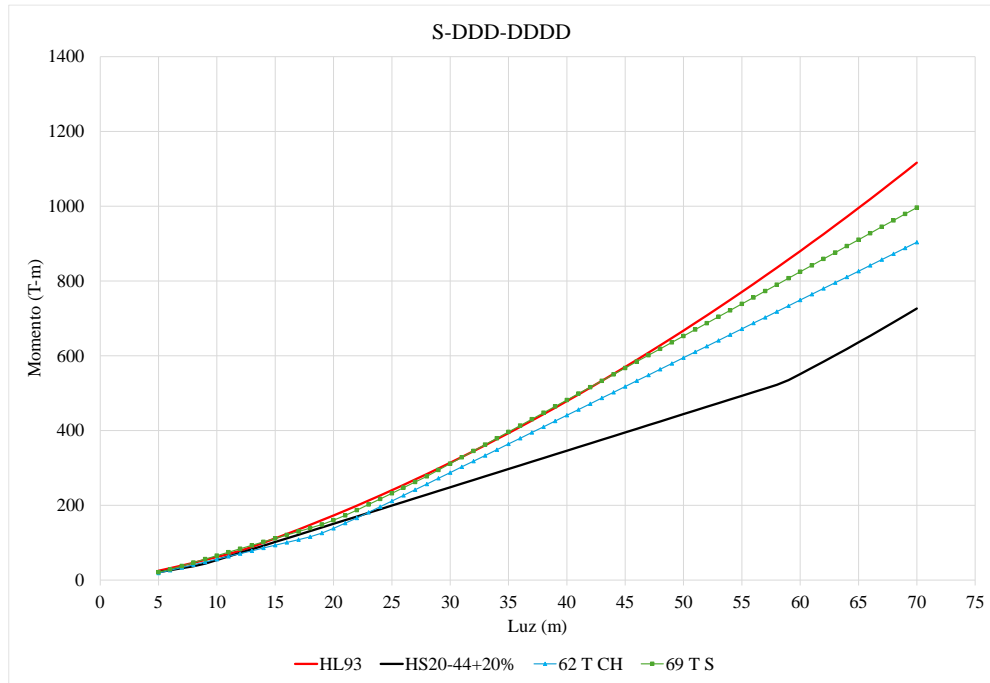


Figura A.4.3.1 Momento flector configuración S-DDD-DDDD

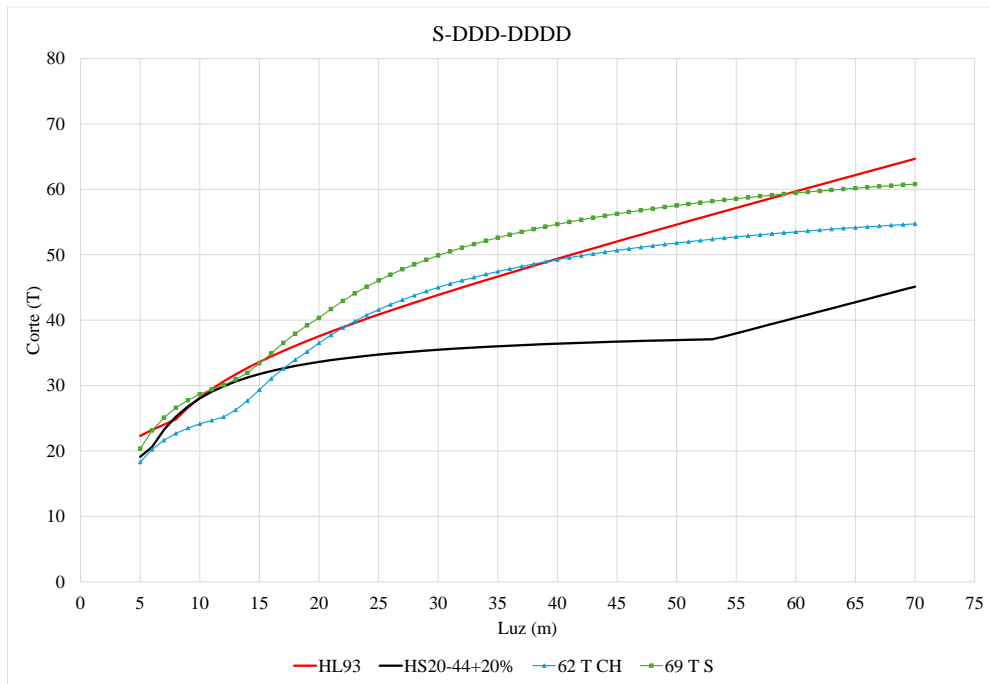


Figura A.4.3.2 Fuerza cortante configuración S-DDD-DDDD

ANEXO 4.4 Momento flector y Fuerza cortante SG-SG-SG-SG-SG

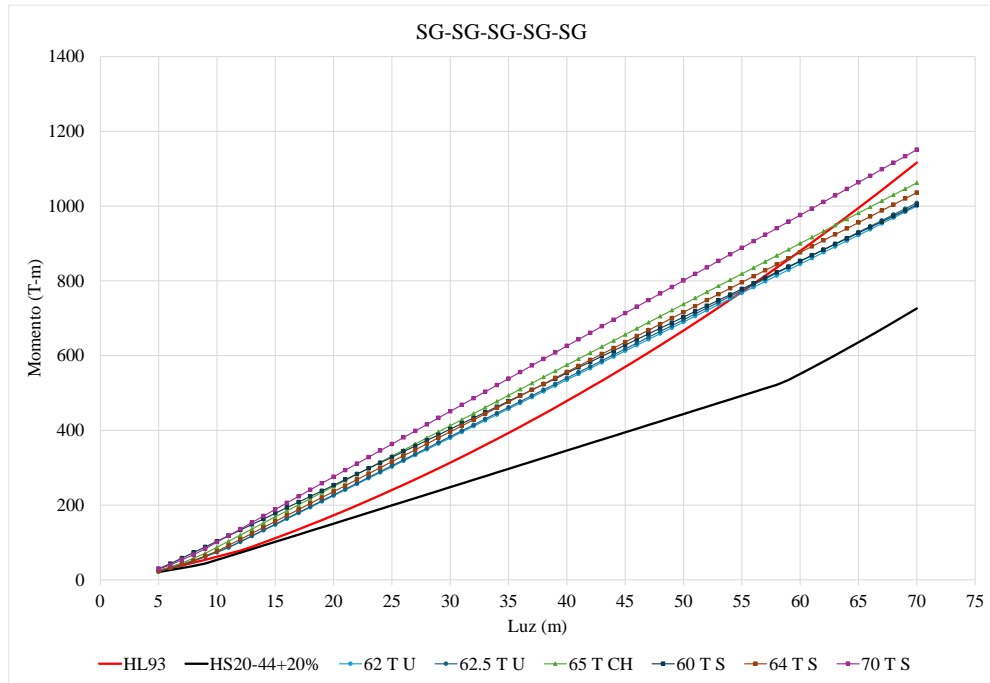


Figura A.4.4.1 Momento flector configuración SG-SG-SG-SG-SG

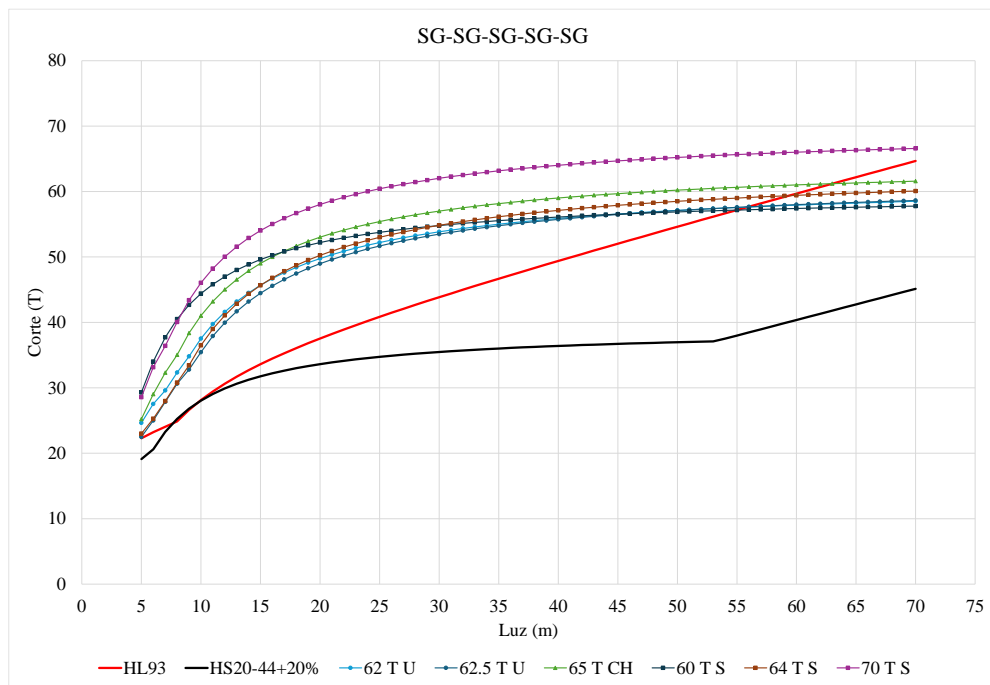


Figura A.4.4.2 Fuerza cortante configuración SG-SG-SG-SG-SG

ANEXO 4.5 Momento flector y Fuerza cortante SG-SG-SG-SG

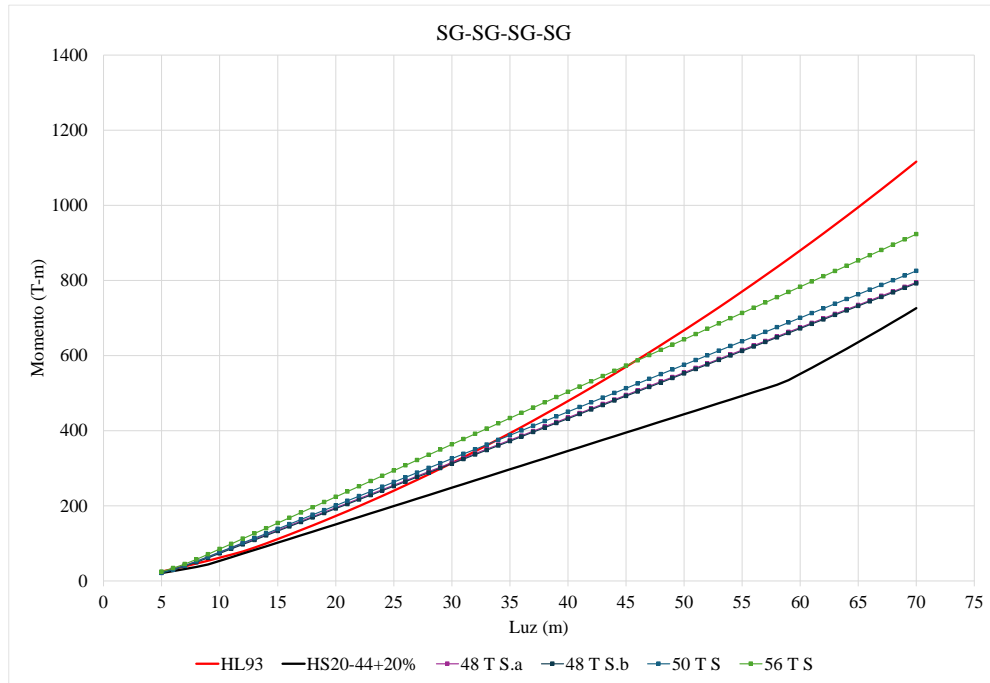


Figura A.4.5.1 Momento flector configuración SG-SG-SG-SG

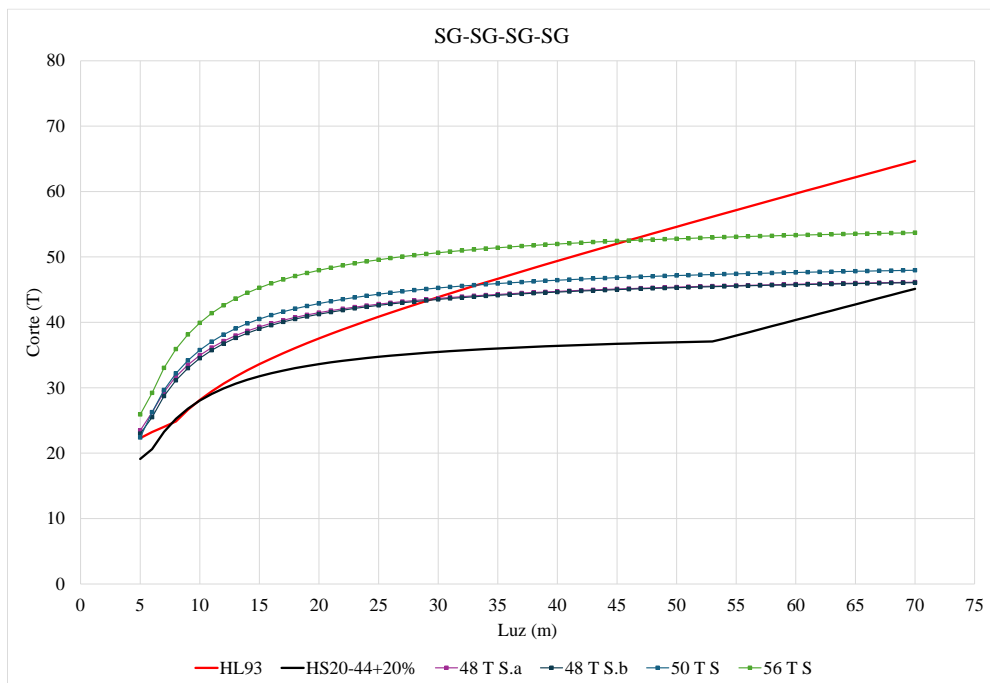


Figura A.4.5.2 Fuerza cortante configuración SG-SG-SG-SG

ANEXO 4.6 Momento flector y Fuerza cortante SG-SGSG-SGSG

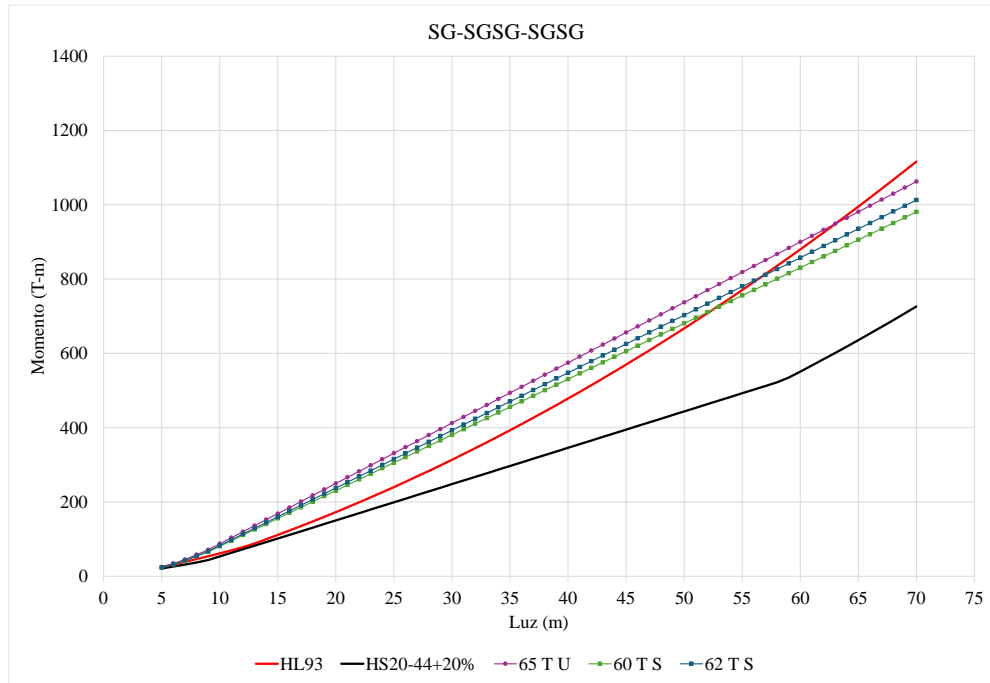


Figura A.4.6.1 Momento flector configuración SG-SGSG-SGSG

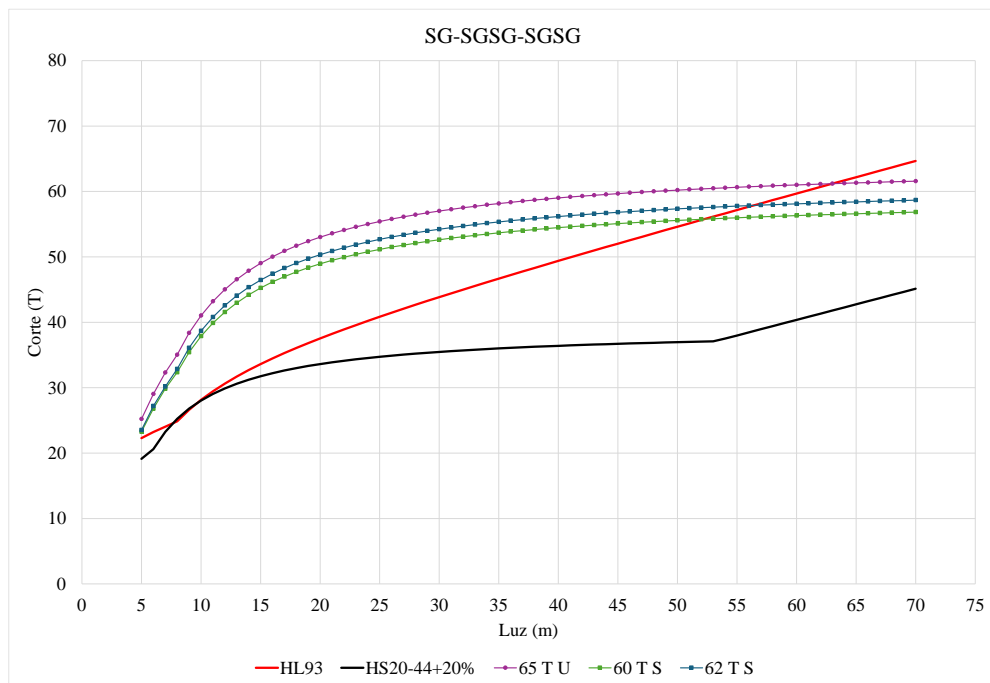


Figura A.4.6.2 Fuerza cortante configuración SG-SGSG-SGSG

ANEXO 4.7 Momento flector y Fuerza cortante SGSG-SGSG

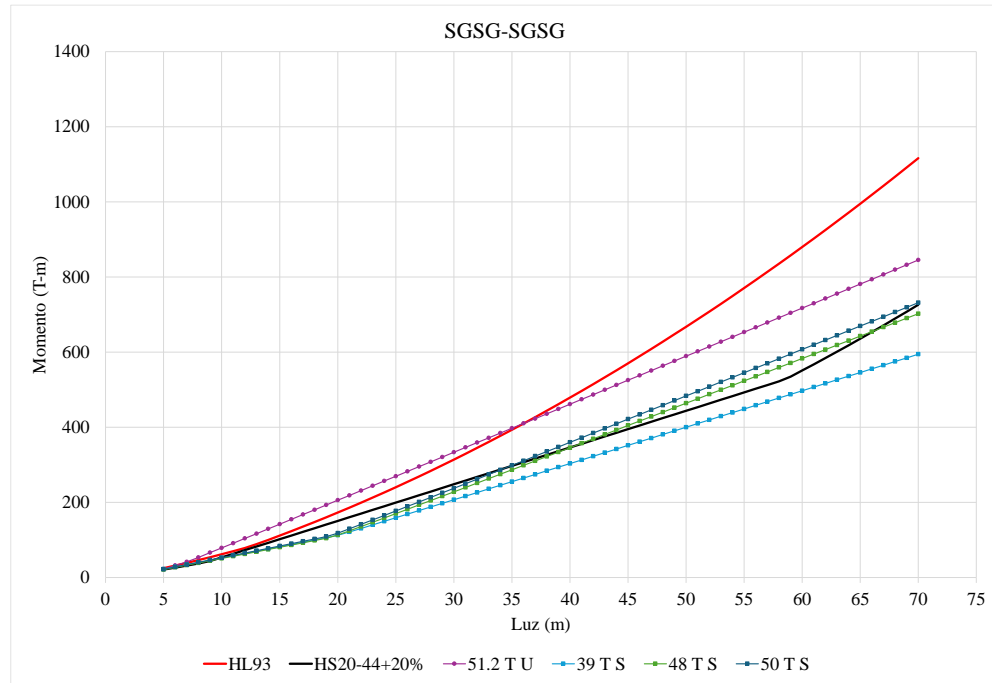


Figura A.4.7.1 Momento flector configuración SGSG-SGSG

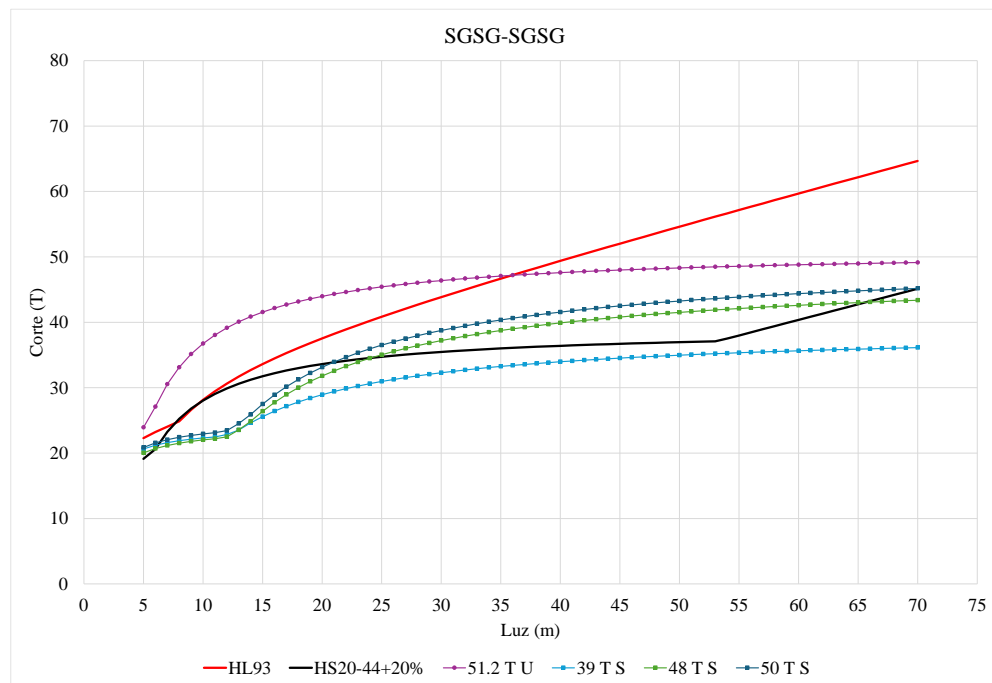


Figura A.4.7.2 Fuerza cortante configuración SGSG-SGSG

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

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Sofía Valentina Chávez Montiel
Título de la memoria : Efectos de vehículos con sobrecarga en puentes simplemente apoyados.
Fecha de la presentación oral :
17/04/2025
Profesor(es) Guía : Víctor Aguilar
Profesor(es) Revisor(es) : Tomás Echaveguren
Concepto :
Calificación :

Resumen (máximo 200 palabras)

Este estudio analiza el impacto del tránsito de vehículos con sobrecarga en puentes simplemente apoyados de 5 a 70 metros de vano en Chile. A partir de bases de datos de permisos de sobrepeso (2018-2023), se caracterizaron los tipos de vehículos más comunes, las regiones con mayor tránsito y se definieron trenes de carga representativos, evaluándolos en términos de momento flector y fuerza cortante.

Los resultados muestran que el tren normativo HS20-44+20% fue superado en prácticamente todos los casos, mientras que el HL-93, aunque presentó demandas más acordes en algunos escenarios, también fue superado en numerosas ocasiones. Los mayores excesos de momento flector se registraron en vanos menores a 15 metros, y en fuerza cortante, las grúas fueron más críticas en vanos cortos y los camiones en vanos medianos. En general, las grúas autopropulsadas presentaron las mayores excedencias, acercándose a los límites de diseño por resistencia en una de las configuraciones.

Estos hallazgos resaltan la influencia de la distribución de cargas por eje y la longitud del vano en el comportamiento estructural, proporcionando información clave para la fiscalización del transporte de cargas especiales y la identificación de configuraciones vehiculares más críticas en las zonas con mayor tránsito.