



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

DESCRIPCIÓN Y ÁBACOS DE CÁLCULO DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO DE SECCIÓN PLANA RECTANGULAR CON VIGAS DE ACERO EMBEBIDAS PARA SU USO EN PASOS A DESNIVEL EN VÍAS URBANAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ROBERTO IGNACIO DURÁN OLIVA

PROFESOR GUÍA:
DAVID CAMPUSANO BROWN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
WILLIAM WRAGG LARCO
BORIS SÁEZ GARCÍA

SANTIAGO DE CHILE
2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil
POR: Roberto Ignacio Durán Oliva
FECHA: 12/07/2020
PROFESOR GUÍA: David Campusano Brown

DESCRIPCIÓN Y ÁBACOS DE CÁLCULO DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO DE SECCIÓN PLANA RECTANGULAR CON VIGAS DE ACERO EMBEBIDAS PARA SU USO EN PASOS A DESNIVEL EN VÍAS URBANAS

La altura estructural de un puente, correspondiente a la diferencia de cota entre los extremos superior e inferior de la superestructura encargada de resistir las cargas permanentes y de tránsito que lo solicitan, es una problemática común en su diseño.

Hoy en día, la gran mayoría de puentes para tránsito vehicular del país se construyen con uno de estos tres sistemas: vigas de hormigón armado con un tablero de losa de hormigón armado, vigas de hormigón pretensado con un tablero de losa de hormigón armado ó un sistema compuesto de vigas de acero conectadas a una losa de hormigón actuando en conjunto. En el caso del hormigón, la relación entre altura estructural y luz está entre 1/10 y 1/25; mientras que, para el acero, se tienen relaciones entre 1/20 y 1/35. Esto quiere decir que, para una luz típica de 20 m, las alturas varían entre 80 y 200 cm, y entre 80 y 100 cm para cada material, respectivamente.

Surge el interés de estudiar como alternativa para uso en Chile una tecnología de puentes consistente en losas de hormigón con vigas de acero totalmente embebidas en su sección, la cual permite reducir las alturas estructurales para una misma luz respecto a otros métodos de construcción.

El cálculo demuestra la capacidad de reducir la altura estructural del sistema propuesto, siendo eficiente para luces entre 20 y 35 m, y aceptable para luces entre 15 y 40 m, lográndose un promedio de relación entre altura estructural y luz de 1/34. Mientras que la mayor cantidad de material que utiliza el sistema propuesto respecto a los demás tendría validez si los ahorros por menor movimiento de tierras y mantención compensaran su costo en el proyecto. En luces menores a 15 m, la reducción de altura estructural respecto a otras tecnologías resulta no ser suficiente para justificar su uso.

Se concluye que, debido a la gran cantidad de proyectos de infraestructura necesarios en el país, la tecnología propuesta, sujeta a la solución de sus dificultades técnicas y asociada a las adecuadas condiciones de terreno y/o necesidades particulares, puede instalarse como una alternativa.

*A mis padres
En memoria de mi abuelo*

AGRADECIMIENTOS

Nada de esto sería posible sin el amor y el apoyo incondicional de mis padres. Se han esforzado tanto durante toda mi vida que me faltan palabras para agradecer todo lo que han hecho por mí. Son ustedes el pilar fundamental de mi vida y no es sino gracias a ustedes que el día de hoy me encuentro escribiendo estas palabras en esta página de mi trabajo de título.

Gracias a ustedes, al amor que siempre me han demostrado y que se han preocupado de cultivar día a día, es que soy la persona que soy hoy.

Quiero agradecer a mi madre, por nunca dejar de estar a mi lado. Siempre has estado ahí para darme una palabra de apoyo y para empujarme a lograr todas mis metas, y no tengo dudas de que puedo confiar en que seguirás siendo así. Eres el motor que me impulsa a dar lo mejor de mí día tras día. Te amo mucho.

Quiero agradecer a mi padre, por ser partícipe de todas mis pasiones. Contigo he vivido momentos imborrables que sin duda influyeron en este viaje, y espero que sigamos viviendo muchos más. Tu ejemplo de energía, de siempre seguir y nunca detenerte, me motiva a nunca dejar de esforzarme. Te amo mucho.

También agradecer todas las enseñanzas que me dejó mi abuelo, quien sin duda estaría muy feliz, muy orgulloso.

Agradecer también a mi abuela, siempre preocupada de mi carrera, siempre pendiente a mi desempeño, y quien también estaría muy feliz de verme terminando este proceso.

Gracias a todos los que ya partieron, agradezco todo lo que me entregaron. En su memoria también va este trabajo.

Gracias a mis amigos, los de siempre, los que he conocido en el camino y también los más nuevos. Sus palabras, cariño y chistes me han ayudado mucho.

Gracias a toda mi familia.

Y gracias a mis profesores, desde mis primeros días en el colegio hasta hoy. Y a mis auxiliares y ayudantes.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. OBJETIVOS GENERALES.....	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3. METODOLOGÍA.....	3
1.4. ALCANCES.....	4
1.5. ESTRUCTURA.....	4
CAPÍTULO II: SITUACIÓN ACTUAL Y PROYECCIÓN A FUTURO.....	6
2.1. TECNOLOGÍAS EN USO EN CHILE.....	6
2.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS TECNOLOGÍAS EN USO.....	7
2.2.1. PUENTES LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO.....	7
2.2.2. PUENTES DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO CON LOSA DE HORMIGÓN ARMADO.....	8
2.2.3. PUENTES DE VIGAS DE HORMIGÓN PRETENSADO CON LOSA DE HORMIGÓN ARMADO.....	9
2.2.4. PUENTES DE VIGAS DE ACERO CON LOSA DE HORMIGÓN ARMADO.....	9
2.3. PROYECCIÓN A FUTURO.....	10
2.3.1. PUENTES PARA CHILE 2009.....	10
2.3.1.1. PRIORIDADES DEL PROGRAMA PUENTES PARA CHILE.....	11
2.3.1.2. LA CALIDAD DE VIDA COMO FIN.....	11
2.3.2. CHILE 2020: OBRAS PÚBLICAS PARA EL DESARROLLO.....	11
2.3.2.1. MEDIO AMBIENTE Y CAMBIO CLIMÁTICO.....	12
2.3.2.2. PROGRAMA DE MODERNIZACIÓN PARTICIPATIVA DEL MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS.....	12
2.4. OPORTUNIDADES.....	12
CAPÍTULO III: DEFINICIÓN DEL SISTEMA.....	14
3.1. ASPECTOS GENERALES.....	14
3.1.1. TRÁNSITO.....	14
3.1.2. MATERIALES.....	14
3.1.2.1. ACERO ESTRUCTURAL.....	14
3.1.2.2. HORMIGÓN.....	15
3.1.2.3. ACERO DE REFUERZO.....	15
3.2. REQUERIMIENTOS NORMATIVOS PARA LA DEFINICIÓN DEL SISTEMA.....	16
3.2.1. LUZ LIBRE VERTICAL BAJO PASOS A DESNIVEL.....	16
3.2.2. ANCHO Y TIPOLOGÍA DE TABLEROS.....	17
3.2.3. CONSIDERACIONES SOBRE FUTURAS AMPLIACIONES.....	18
3.2.4. ESPESORES MÍNIMOS.....	18

3.2.5. REQUERIMIENTOS DEL ACERO DE REFUERZO	18
3.2.5.1. RECUBRIMIENTO MÍNIMO.....	18
3.2.5.2. CUANTÍA MÍNIMA	19
3.2.5.3. BARRAS MÍNIMAS Y ESPACIAMIENTO MÁXIMO.....	19
3.2.6. REQUERIMIENTOS RESPECTO A CONECTORES DE CORTE	20
3.2.6.1. PENETRACIÓN MÍNIMA Y RECUBRIMIENTO MÍNIMO.....	20
3.2.6.2. DISTANCIA MÍNIMA AL BORDE	20
3.2.6.3. SEPARACIÓN LONGITUDINAL MÁXIMA	20
3.3. DEFINICIÓN DEL SISTEMA	21
3.3.1. VIGAS DE ACERO.....	21
3.3.2. CONECTORES DE CORTE.....	22
3.3.3. RECUBRIMIENTOS.....	22
3.3.4. TABLERO	23
3.3.4.1. PISTA.....	23
3.3.4.2. PASILLO	23
3.3.4.3. BARANDA PEATONAL.....	23
3.3.4.4. BARRERA VEHICULAR	24
3.3.5. ANCHO TOTAL DE TABLERO	24
3.3.6. NÚMERO DE VIGAS DE ACERO.....	24
3.3.7. SEPARACIÓN ENTRE VIGAS DE ACERO	25
3.3.8. MODELACIÓN Y CÁLCULO	25
3.4. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL SISTEMA	25
3.5. FASES CONSTRUCTIVAS	27
CAPÍTULO IV: CRITERIOS DE DISEÑO	28
4.1. CARGAS	28
4.1.1. CARGAS PERMANENTES: DC, DW.....	28
4.1.1.1. CARGA MUERTA (DC).....	28
4.1.1.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)	28
4.1.2. CARGAS VIVAS: LL.....	29
4.1.2.1. NÚMERO DE FAJAS DE DISEÑO	29
4.1.2.2. CAMIÓN DE DISEÑO	29
4.1.2.3. TÁNDEM DE DISEÑO	29
4.1.2.4. CARGA DE FAJA DE DISEÑO.....	30
4.1.2.5. APLICACIÓN DE LA CARGA VEHICULAR DE DISEÑO (LL).....	30
4.1.3. COEFICIENTE DE IMPACTO DINÁMICO: IM	30
4.1.4. CARGA DE FATIGA.....	31
4.1.5. OTRAS CARGAS.....	31
4.2. ESTADOS LÍMITE	32
4.2.1. ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA	32
4.2.2. ESTADO LÍMITE DE EVENTO EXTREMO.....	33
4.2.3. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO	33
4.2.4. ESTADO LÍMITE DE FATIGA Y FRACTURA	34

4.3. COMBINACIONES DE CARGA	34
4.3.1. ECUACIÓN DE DISEÑO	34
4.3.2. MODIFICADOR DE CARGA.....	34
4.3.3. FACTORES DE CARGA.....	35
4.4. DISTRIBUCIÓN DE LAS CARGAS.....	36
4.4.1. DISTRIBUCIÓN DE CARGAS PERMANENTES.....	36
4.4.2. DISTRIBUCIÓN DE CARGAS VIVAS.....	36
4.5. DISEÑO DE LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO.....	37
4.5.1. ESPESOR MÍNIMO	38
4.5.2. ANCHO DE FRANJAS EQUIVALENTES	38
4.5.3. CARGAS VIVAS DE DISEÑO	39
4.5.4. ACERO DE REFUERZO	39
4.5.4.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL.....	40
4.5.4.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA	40
4.6. DISEÑO DE LAS VIGAS COMPUESTAS.....	40
4.6.1. DISEÑO A FLEXIÓN	40
4.6.1.1. FACTOR DE RESISTENCIA	40
4.6.1.2. ANCHO EFECTIVO COLABORANTE DE LA LOSA.....	41
4.6.1.3. SECUENCIA DE CARGA	41
4.6.1.4. SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO.....	41
4.6.1.5. SECCIÓN COMPUESTA EN EL LARGO PLAZO	42
4.6.1.6. MOMENTO PLÁSTICO	42
4.6.1.7. RESISTENCIA A FLEXIÓN POR PANDEO LATERAL TORSIONAL.....	42
4.6.1.8. MÉTODO DE CÁLCULO DE DEFORMACIONES.....	45
4.6.1.9. POSICIÓN DE CARGA VIVA QUE PRODUCE EL MAYOR MOMENTO.....	46
4.6.1.10. CONSTRUCCIÓN	47
4.6.1.10.1. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DURANTE ETAPAS CRÍTICAS DE CONSTRUCCIÓN.....	48
4.6.1.10.2. DEFORMACIÓN POR CARGAS MUERTAS	48
4.6.1.11. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO	48
4.6.1.11.1. DEFORMACIONES ELÁSTICAS	49
4.6.1.11.2. DEFORMACIONES PERMANENTES.....	49
4.6.1.12. ESTADO LÍMITE DE FATIGA	50
4.6.1.13. ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA.....	52
4.6.1.13.1. COMPACIDAD DE LA SECCIÓN COMPUESTA.....	52
4.6.1.13.2. SECCIONES COMPACTAS.....	52
4.6.1.13.3. SECCIONES NO COMPACTAS	53
4.6.1.13.4. DUCTILIDAD	54
4.6.2. DISEÑO A CORTE	54
4.6.2.1. FACTOR DE RESISTENCIA	54
4.6.2.2. POSICIÓN DE CARGA VIVA QUE PRODUCE EL MAYOR CORTE	54
4.6.2.3. RESISTENCIA AL CORTE.....	56

4.7. CONECTORES DE CORTE	57
4.7.1. FACTOR DE RESISTENCIA.....	57
4.7.2. RESISTENCIA A LA FATIGA.....	57
4.7.3. FUERZA DE CORTE NOMINAL	57
4.7.4. RESISTENCIA AL CORTE	58
4.7.5. NÚMERO DE CONECTORES DE CORTE.....	58
4.7.6. SEPARACIÓN LONGITUDINAL	59
4.8. DIAGRAMA DE FLUJO DEL DISEÑO	59
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ÁBACOS DE CÁLCULO	61
5.1. RESULTADOS	61
5.1.1. ESPESOR DE LOSAS Y RELACIONES ENTRE ALTURA ESTRUCTURAL Y LUZ	61
5.1.2. DIMENSIONES DE LAS VIGAS DE ACERO	62
5.1.3. ACERO DE REFUERZO	63
5.1.3.1. TRAMOS CENTRALES	63
5.1.3.1.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL.....	63
5.1.3.1.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA	64
5.1.3.2. VOLADIZOS.....	64
5.1.3.2.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL.....	64
5.1.3.2.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA	65
5.1.4. CONECTORES DE CORTE.....	65
5.1.5. REQUERIMIENTOS QUE CONTROLAN EL DISEÑO	67
5.2. ÁBACOS DE CÁLCULO.....	67
5.2.1. ALTURA DEL ALMA	68
5.2.2. ANCHO DEL ALA Y ESPESOR DEL ALA	68
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
6.1. RELACIONES ENTRE ALTURA ESTRUCTURAL Y LUZ.....	70
6.1.1. COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN ENTRE ALTURA ESTRUCTURAL Y LUZ	70
6.1.2. VALOR PROMEDIO DE LA RELACIÓN ENTRE ALTURA ESTRUCTURAL Y LUZ	71
6.2. ESPESOR DE LOSAS	71
6.2.1. COMPORTAMIENTO DEL ESPESOR DE LOSA.....	71
6.2.2. ESPESOR DE LOSAS Y ALTURA DE VIGAS.....	72
6.3. DIMENSIONES DE LAS VIGAS DE ACERO	73
6.4. ACERO DE REFUERZO	74
6.5. CONECTORES DE CORTE.....	75
6.6. REQUERIMIENTOS QUE CONTROLAN EL DISEÑO.....	75
6.7. CANTIDADES DE MATERIAL.....	77
6.7.1. HORMIGÓN	77
6.7.2. ACERO DE VIGAS.....	78

6.8. EJEMPLO DE USO DE ÁBACOS DE CÁLCULO	79
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES	82
BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXO A: DISEÑO DE LOSAS Y VERIFICACIONES	85
A.1. L = 10 m.....	85
A.2. L = 15 m.....	125
A.3. L = 20 m.....	165
A.4. L = 25 m.....	205
A.5. L = 30 m.....	245
A.6. L = 35 m.....	285
A.7. L = 40 m.....	325
ANEXO B: CATÁLOGO CINTAC DE PERFILES CANAL	365

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La altura estructural de un puente, correspondiente a la diferencia de cota entre los extremos superior e inferior de la superestructura encargada de resistir las cargas que lo solicitan, es una problemática común en su diseño.

Desde la estética con que el puente afecta el paisaje, a aspectos normativos como su revancha o espacio bajo su estructura respecto del Nivel de Aguas Máximo (N.A.M.) para el periodo de retorno que se considera para su estudio en las distintas etapas del proyecto, pasando también por problemas singulares, tales como resguardar el choque con estructuras preexistentes o zonas delimitadas de forma legal. La altura estructural es vital.

Hoy en día, gran parte de los puentes para tránsito vehicular del país se construyen utilizando uno de los siguientes sistemas; vigas de hormigón armado con un tablero de losa de hormigón armado, vigas de hormigón pretensado con un tablero de losa de hormigón armado ó un sistema compuesto de vigas de acero conectadas a una losa de hormigón actuando en conjunto, todas simplemente apoyadas en los extremos y con posible continuidad en apoyos intermedios. La elección de uno de los sistemas anteriores entrega los rangos de alturas estructurales posibles para cada puente. En el caso del hormigón, la relación entre altura estructural y luz está entre $1/10$ y $1/25$; mientras que, para el acero, se tienen relaciones entre $1/20$ y $1/25$. Esto quiere decir que, para una luz típica de 20 m, las alturas varían entre 80 y 200 cm, y entre 80 y 100 cm para cada material, respectivamente.

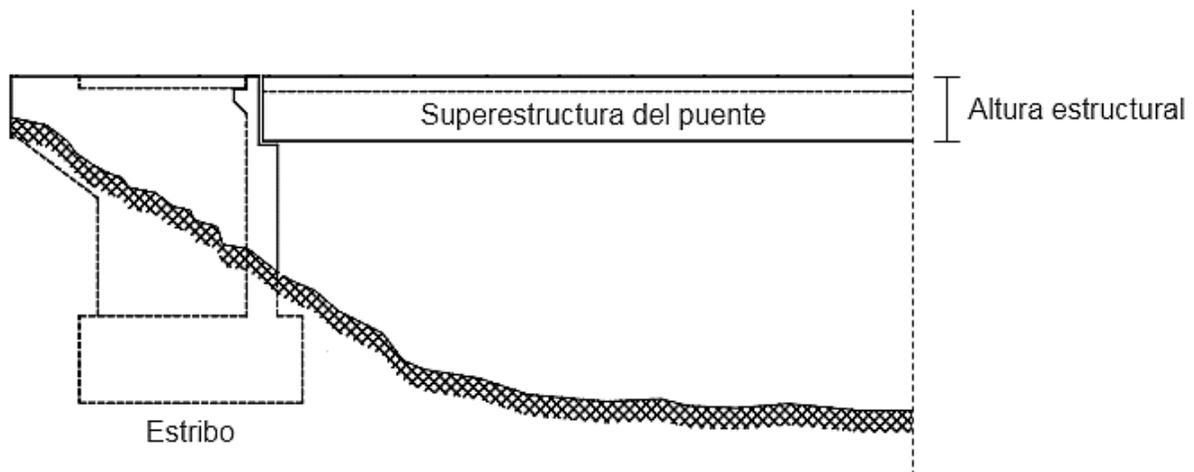


Figura 1.1: Altura estructural de un puente

En casos donde reducir la altura estructural resulta imposible debido a la tecnología utilizada, se debe elevar la rasante del camino en el cual se emplazará el puente. Esto provoca incurrir en costos adicionales, problemas con el terreno y las expropiaciones y daño al paisaje, o bien, dependiendo del obstáculo a cubrir, aumentar el volumen de excavaciones y, por ende, los costos asociados al movimiento de tierras del proyecto.

La solución podría estar en una tecnología que se ha usado ampliamente en Japón bajo la patente de River Bridge (KCSB) de la empresa JFE Engineering Corporation, iniciando en 1981 con el primer puente construido y teniendo alrededor de 420 puentes en la actualidad. El sistema consiste en una placa de acero soldada a vigas T sobre la cual se hormigona en sitio una losa de hormigón armado, sirviendo además como moldaje. Esta tecnología permite obtener relaciones entre altura estructural y luz entre 1/30 y 1/42, es decir, alturas entre 48 y 67 cm considerando una luz típica de 20 m.

Observando las ventajas de aquel sistema, surge el interés de plantear como alternativa para uso en Chile una tecnología consistente en losas de hormigón con vigas de acero totalmente embebidas en su sección, debiéndose estudiar su diseño estructural para distintas luces, los resultados de altura estructural que se obtengan, su método constructivo y su aplicabilidad en la ciudad, permitiendo aumentar la movilidad y la conectividad de ésta en la práctica.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVOS GENERALES

Los objetivos generales de este trabajo son:

- Estudiar una tecnología para puentes consistente en una losa de hormigón armado con vigas de acero embebidas en su sección, la cual permite reducir la altura estructural para una misma luz respecto a otros métodos de construcción.
- Estudiar la aplicabilidad de este método constructivo en ciudad, con luces acordes a este caso.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos son:

- Desarrollar una planilla de cálculo interactiva que permita fácilmente el dimensionamiento de la estructura para luces variables, logrando el diseño de:
 - Hormigón armado de la losa.
 - Vigas de acero a embeber.
 - Conectores de corte.
- Entregar los resultados obtenidos con la planilla de cálculo para luces entre 10 y 40 m.
- Estudiar el método constructivo de este tipo de puentes, estableciendo las etapas de la obra.
- Analizar las ventajas y desventajas que supone la aplicación del método en ciudades chilenas.

1.3. METODOLOGÍA

Con el fin de cumplir los objetivos de este trabajo, se seguirá la siguiente metodología:

- Se realizará una revisión bibliográfica sobre puentes construidos en la ciudad de Santiago y en el país a lo largo de la historia, desde un punto de vista ingenieril.
- Se realizará una investigación sobre las tecnologías y métodos constructivos utilizados en la construcción de puentes en el Santiago de Chile actual y en el pasado, con el fin de utilizar estos parámetros como base para evaluar el desempeño del método propuesto.
- Se revisarán los requerimientos con que se evalúan los proyectos de puentes a construirse en el futuro en el país por parte de los organismos encargados.
- Se estudiará la normativa referente al diseño de estructuras de puentes en Chile, centrándose en el Manual de Carreteras y la norma AASHTO.
- Se establecerá la sección transversal a estudiar, definiendo materiales, ancho de tablero, recubrimientos, separaciones de las vigas de acero y demás elementos que la compongan.
- Se definirán los criterios de diseño a utilizar, especificando materiales, cargas, estados límite y combinaciones de carga.
- Se realizará una planilla de cálculo para luces y alturas estructurales variables.
- Se realizará un proceso iterativo que permita obtener la altura estructural necesaria para cumplir de forma óptima los requerimientos definidos en los criterios de diseño para cada luz a estudiar, aumentando las luces cada 5 m.
- Se realizarán ábacos de cálculo que permitan el pre dimensionamiento de estructuras que utilicen la tecnología propuesta, a partir de los resultados obtenidos para las luces en estudio.
- Se investigarán las fases constructivas que requeriría el método.
- Se compararán los resultados de altura estructural con los existentes en la actualidad.

- Se compararán los aspectos que supone la construcción de puentes utilizando esta tecnología, con respecto a la de los existentes en la actualidad.

1.4. ALCANCES

La tecnología planteada será estudiada bajo las siguientes condiciones:

- Se estudiarán tramos simplemente apoyados.
- Se estudiarán puentes sin esviaje.
- Se estudiarán luces entre 10 y 40 m, en intervalos de 5 m.
- Se estudiará sólo el cálculo de la superestructura.
- Se utilizarán criterios para puentes urbanos, aun cuando la tecnología pueda ser ampliada a todo tipo de puentes.

1.5. ESTRUCTURA

Este informe consta de 7 Capítulos, los cuales se definen brevemente a continuación:

- Capítulo I: Introducción:

Se plantea el problema en el cual se basa este trabajo de título y se describen sus objetivos, metodología y alcances.

- Capítulo II: Situación actual y proyección a futuro:

Se describe la actualidad respecto a puentes emplazados en nuestro país, programas a futuro para éstos, y los principales sistemas estructurales utilizados. Finalmente, se discuten las posibles oportunidades de un sistema nuevo y, en particular, uno que reduzca la altura estructural.

- Capítulo III: Definición del sistema:

Se definen los materiales y requerimientos normativos y aspectos respecto a tránsito y geometría que deben contemplar los modelos realizados. Utilizando lo anterior, se define la sección transversal típica del sistema, sus partes y las fases que supondría su construcción.

- Capítulo IV: Criterios de diseño:

Se definen las cargas, estados límite, combinaciones de carga y verificaciones a realizar durante el diseño de las estructuras a calcular, con el fin de plasmarlos en una planilla de cálculo. Finalmente, se presenta el diagrama de flujo que rige el proceso iterativo hacia la obtención de resultados.

- Capítulo V: Resultados y Ábacos de Cálculo:

Se presentan los resultados obtenidos para los elementos estructurales del sistema tras la verificación por medio de la planilla de cálculo, y los ábacos de cálculo para el pre dimensionamiento de estructuras que utilicen la tecnología propuesta.

- Capítulo VI: Análisis de resultados:

Se discuten los principales aspectos observados en los resultados, tales como su comportamiento aparente, peso de las estructuras, particularidades encontradas durante el diseño y el porqué de ellas. Posteriormente, se compara el sistema con algunas de las tecnologías en uso, y se da un ejemplo de la utilización de los ábacos de cálculo obtenidos.

- Capítulo VII: Conclusiones:

Se concluye sobre el cumplimiento de los objetivos planteados, aprendizajes adquiridos y el trabajo de título en general.

CAPÍTULO II: SITUACIÓN ACTUAL Y PROYECCIÓN A FUTURO

2.1. TECNOLOGÍAS EN USO EN CHILE

Al año 2009, Chile contaba con aproximadamente 12.007 puentes y estructuras afines ubicadas en rutas urbanas e interurbanas (Ministerio de Obras Públicas, 2009). De ellas, 4.757 correspondían a pasos a desnivel y pasarelas, y 7.250 a puentes, tanto bajo la tuición de la Dirección de Vialidad como concesionados.

De acuerdo a la presentación *Infraestructura Vial en Chile* realizada en 2016 por el Director Nacional Walter Brüning Maldonado, alrededor de 1.064 estructuras correspondían a puentes de longitud mayor a 30 m administrados por la Dirección de Vialidad (Brüning, 2016).

La infraestructura de estos puentes, en general, está construida en hormigón armado, con superestructuras distribuidas equitativamente en configuraciones de vigas de hormigón y vigas metálicas, ambas con losas de hormigón, más un leve porcentaje de puentes de superestructura puramente metálica.

Las Tablas 2.1 y 2.2 muestran la distribución de tecnología utilizada para la superestructura de los 1.064 puentes de longitud mayor a 30 m construidos en todo el país al 2016. De ellos, un 49.7% está construido con superestructuras de hormigón, un 47.5% con sistemas compuestos de acero y hormigón, y un 2.8% sólo con acero.

Tabla 2.1: Superestructuras de puentes con longitud mayor a 30 m en el país
Fuente: Brüning, 2016

Región	Superestructura			
	Hormigón	Metálica	Metálica y Hormigón	Sin Clasificar
Arica y Parinacota	2		5	
Tarapacá	2	3		
Antofagasta	3	4		
Atacama	12		3	
Coquimbo	18		31	3
Valparaíso	31	18	3	1
Metropolitana	39		20	

Tabla 2.2: Superestructuras de puentes con longitud mayor a 30 m en el país
(continuación)

Fuente: Brüning, 2016

Región	Superestructura			
	Hormigón	Metálica	Metálica y Hormigón	Sin Clasificar
O'Higgins	31		32	2
Maule	90		50	
Biobío	79		66	1
Araucanía	84	1	72	
Los Ríos	44		39	
Los Lagos	73	2	86	
Aysén	4	2	94	
Magallanes	9	1	4	
Subtotal	521	31	505	7
			Total	1064

Los pasos a desnivel en las vías urbanas del país mantienen la tónica mostrada por los 1.064 puentes descritos, por lo que se describirán las principales características de las tecnologías que se encuentran mayoritariamente en uso, correspondientes a:

- Puentes de hormigón:
 - Puentes losas de hormigón armado.
 - Puentes de vigas de hormigón armado con losa de hormigón armado.
 - Puentes de vigas de hormigón pretensado con losa de hormigón armado.
- Puentes de vigas de acero con losa de hormigón armado.

2.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS TECNOLOGÍAS EN USO

2.2.1. PUENTES LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO

Los puentes losas de hormigón armado corresponden a un método simple y económico para soluciones de luces cortas, tales como pasos a desnivel donde el obstáculo es una vía de una pista, pasos peatonales, ciclovías, etc. (Nedev, Khan, 2011). En nuestro país, se utilizan tanto en sistemas simplemente apoyados como monolíticos con sus estribos, lo que evita la necesidad de juntas de expansión y apoyos.



Figura 2.1: Puente losa de hormigón armado (Nedev, Khan, 2011)

- **Luces típicas:** 4 – 20 m (Nedev, Khan, 2011).
- **Relación entre altura estructural y luz:** 1/25 (Nedev, Khan, 2011).

2.2.2. PUENTES DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO CON LOSA DE HORMIGÓN ARMADO



Figura 2.2: Puente de vigas de hormigón armado con losa de hormigón armado (Nedev, Khan, 2011)

Los puentes de vigas de hormigón armado con losa de hormigón armado tienen utilidad en luces mayores que las de los puentes losas descritos en la Sección 2.2.1. Su sección transversal corresponde a una del tipo T, donde la losa de hormigón armado actúa en conjunto con las vigas sumándoles un ancho efectivo colaborante (Nedev, Khan, 2011). Raramente se diseñan como puentes continuos, y tienen la ventaja de poder diseñarse para distintas formas de vía, lo que les da una gran versatilidad.

- **Luces típicas:** Sobre 24 m (Nedev, Khan, 2011).
- **Relación entre altura estructural y luz:** 1/10 – 1/14 (Nedev, Khan, 2011).

2.2.3. PUENTES DE VIGAS DE HORMIGÓN PRETENSADO CON LOSA DE HORMIGÓN ARMADO

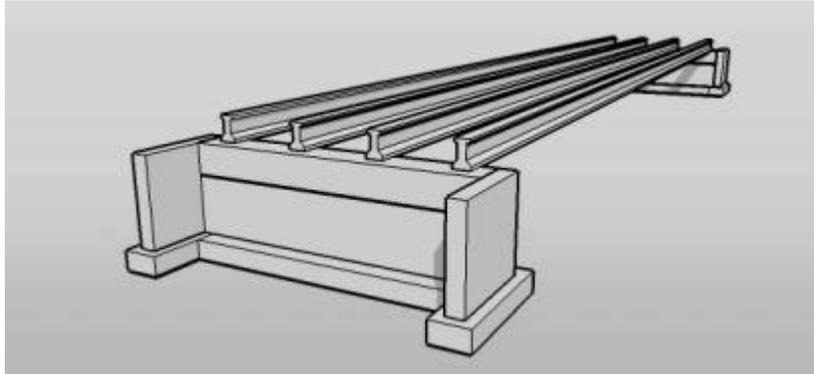


Figura 2.3: Puente de vigas de hormigón pretensado con losa de hormigón armado (Nedev, Khan, 2011).

Para este tipo de puentes se utilizan vigas de hormigón pretensado prefabricadas en plantas, donde se hormigonan alrededor de cables previamente traccionados. Generalmente, esta solución se utiliza en tramos simplemente apoyados, pudiendo concatenarse en puentes de más de un tramo sin transmisión de cargas entre cada uno de ellos. Tras la disposición de las vigas en sus apoyos, se hormigona en sitio una losa que posteriormente actuará en conjunto con ellas en la resistencia de cargas.

- **Luces típicas:** 15 – 30 m (Nedev, Khan, 2011).
- **Relación entre altura estructural y luz:** 1/14 – 1/25 (Nedev, Khan, 2011).

2.2.4. PUENTES DE VIGAS DE ACERO CON LOSA DE HORMIGÓN ARMADO

Este tipo de puentes es el único de los utilizados ampliamente en nuestro país para uso vehicular que contiene elementos estructurales metálicos. Su construcción es similar al de los puentes de la Sección 2.2.3, donde tras la colocación de vigas de acero equiespaciadas, se hormigona en sitio sobre ellas una losa. La losa de hormigón actúa en conjunto con las vigas gracias a la disposición de conectores de corte, los que evitan el desplazamiento relativo entre ambos materiales y permiten la transmisión de cargas.



Figura 2.4: Puente de vigas de acero con losa de hormigón armado (Nedev, Khan, 2011).

- **Luces típicas:** Sobre 20 m (Nedev, Khan, 2011).
- **Relación entre altura estructural y luz:** 1/20 – 1/25 para tramos simplemente apoyados (Nedev, Khan, 2011).

2.3. PROYECCIÓN A FUTURO

Durante los años 2009 y 2010, el Ministerio de Obras Públicas hizo públicos dos documentos referentes a obras a realizar para contar con una mejor infraestructura a nivel país el año 2020; *Puentes para Chile 2009*, y *Chile 2020: Obras Públicas para el Desarrollo*. En estos documentos, se detallan las zonas en las que se enfoca el desarrollo de proyectos, así como los problemas que se busca solucionar o aminorar. A continuación, se detallan los principales puntos de cada documento, con el fin de evidenciar las oportunidades que pudieran posicionar la alternativa propuesta como competitiva.

2.3.1. PUENTES PARA CHILE 2009

Este documento, publicado el año 2009, evidencia la necesidad que tiene el Ministerio de Obras Públicas de incorporar una visión de mediano y largo plazo para pensar en la infraestructura que el país requeriría en 2020, debido a que ese es el tiempo que suelen tomar las obras de envergadura entre su concepción y su construcción (Dirección de Vialidad, 2009).

En este contexto, surge el programa Puentes para Chile, una iniciativa que comprendería la construcción, reparación y reposición de puentes de longitudes iguales o superiores a 40 m de las principales rutas del país, haciéndose cargo también de intervenciones en puentes y estructuras de menor longitud en áreas urbanas y rurales, buscando el desarrollo y la conectividad oportuna (Dirección de Vialidad, 2009).

La crisis financiera global de 2008 es también un aspecto clave para este programa, puesto que este fenómeno provocó que el país reorientara su presupuesto hacia proyectos que generaran la mayor cantidad posible de empleos, siendo las obras de infraestructura un claro ejemplo (Dirección de Vialidad, 2009).

2.3.1.1. PRIORIDADES DEL PROGRAMA PUENTES PARA CHILE

El programa Puentes para Chile plantea como prioridad 5 desafíos técnicos al 2020 (Dirección de Vialidad, 2009):

1. El incremento de la demanda y solicitudes estructurales para cargas especiales, lo que ocasiona la disminución de la vida útil de los puentes.
2. Mejoramiento y actualización en materia de seguridad vial (barreras de contención, tránsito peatonal segregado, iluminación, etc.).
3. Ampliación de la capacidad en calzadas para responder a los requerimientos de flujos.
4. Resolver las insuficiencias en capacidad hidráulica.
5. Actualización de las estructuras antiguas para cumplir con las normativas vigentes.

2.3.1.2. LA CALIDAD DE VIDA COMO FIN

La mejora en la conectividad de las ciudades y zonas rurales del país que plantea el programa Puentes para Chile es un factor clave para que las personas puedan acceder a una mejor calidad de vida, debido a la posibilidad de generar nuevos empleos para ellas, satisfacer de mejor forma sus necesidades de educación y salud, disminuir sus tiempos de traslado y permitirles gozar de mayor forma su tiempo libre al poder optar a más alternativas de esparcimiento (Dirección de Vialidad, 2009).

2.3.2. CHILE 2020: OBRAS PÚBLICAS PARA EL DESARROLLO

La Misión del Ministerio de Obras Públicas es proveer al país de servicios de infraestructura para la conectividad, la protección del territorio y las personas, la edificación pública y el aprovechamiento óptimo de los recursos hídricos, asegurando el cumplimiento de los estándares de servicio y la calidad de las obras, la provisión de agua,

el cuidado de los recursos hídricos y del medio ambiente, para contribuir al desarrollo sustentable y a la competitividad del país, promoviendo la equidad, la calidad de vida y la igualdad de oportunidades de las personas (Ministerio de Obras Públicas, 2010).

Este plan viene a continuar con esta misión, incorporando problemáticas propias del Siglo XXI y la necesidad de un cambio de mentalidad hacia los proyectos, destacando la sustentabilidad y la modernización del Ministerio de Obras Públicas.

2.3.2.1. MEDIO AMBIENTE Y CAMBIO CLIMÁTICO

No hay duda de que el cambio climático es una realidad, y sus potenciales efectos podrían generar desastres naturales que afecten de mayor forma la infraestructura. Por esta razón, para el futuro se demandan obras de mayor calidad y resistencia, lo que también se exige para los puentes.

La Comisión Nacional de Medioambiente, en 2006, proyectó para el país un aumento en el nivel del mar de entre 30 y 50 cm en los próximos cincuenta años, sumándose a esto variaciones de entre un 10 y 20 por ciento en la velocidad del viento (Ministerio de Obras Públicas, 2010).

2.3.2.2. PROGRAMA DE MODERNIZACIÓN PARTICIPATIVA DEL MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Iniciado a cabalidad el año 2008, este programa se plantea como una iniciativa de transformación del Ministerio de Obras Públicas, buscando fortalecer y perfeccionar su labor, aprovechando nuevas tecnologías de administración, gestión e información (Ministerio de Obras Públicas, 2010).

Destaca el punto *Gestión Integrada de Proyectos*, el cual tiene como fin diseñar e implementar una visión que modernice los procesos de diseño, construcción, mantención y explotación de las obras.

2.4. OPORTUNIDADES

Con las proyecciones a futuro y la constante necesidad de obras de infraestructura, plantear una nueva alternativa al momento de diseñar un proyecto de puentes, pasos a desnivel y obras afines tiene oportunidades que tomar.

¿Por qué hay oportunidades para una nueva alternativa?

Una nueva alternativa, que pueda competir con las tecnologías en uso, puede posicionarse en el mercado debido a los siguientes puntos:

1. Hay necesidad de diseñar obras de infraestructura para la mejora de la conectividad y la calidad de vida.
2. Se requieren proyectos de reposición de puentes antiguos.
3. Se requieren proyectos de construcción de puentes nuevos.
4. Se requiere actualizar puentes antiguos para cumplir con la normativa vigente.
5. Los pasos a desnivel con autopistas y líneas férreas son un punto clave en la mejora de la conectividad urbana, una nueva alternativa para su diseño es de utilidad.
6. Los efectos del cambio climático pueden influir en el cumplimiento de revancha respecto al nivel de aguas máximo, capacidad hidráulica y seguridad de puentes existentes, pudiendo requerirse el reemplazo de algunos de ellos.

¿Por qué una alternativa que reduzca la altura estructural?

La altura estructural es vital en nuevos proyectos, tanto de reposición o actualización de puentes existentes, como de construcción de puentes nuevos. Esto es debido a los siguientes puntos:

1. Una alternativa de menor altura estructural cubre la necesidad de pasos a desnivel con autopistas y líneas férreas con menores volúmenes de excavación para un mismo requerimiento de luz libre bajo la estructura, reduciendo costos de movimiento de tierras. Los requerimientos de luz libre se detallan con mayor claridad en la Sección 3.2.1.
2. El aumento en el nivel del mar provoca la necesidad de cumplir con una revancha de estructuras existentes respecto al nuevo nivel de aguas máximo (N.A.M.), en especial en zonas costeras y sus alrededores, donde los cursos de agua tomarán parte de ese aumento. Una alternativa de altura estructural reducida previene la necesidad de aumentar el nivel de la rasante del camino, o disminuye este aumento, reduciendo o eliminando los costos de movimiento de tierras por rellenos y terraplenes.
3. Una alternativa de menor altura estructural luce más esbelta e impacta de una mejor manera en el paisaje, teniéndose estructuras visualmente más amigables que las de altura estructural mayor. Este punto podría ser tomado en consideración bajo las visiones actuales y futuras.

CAPÍTULO III: DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Este capítulo tiene por fin la definición de los aspectos claves del sistema, tales como el tránsito que debe resistir, los materiales que componen su sección transversal, y la geometría y partes de su estructura. Posteriormente, se utilizará lo aquí definido como punto inicial de la verificación estructural para cada luz en estudio.

3.1. ASPECTOS GENERALES

3.1.1. TRÁNSITO

Para la definición del sistema, la modelación y la obtención de resultados, se considerará que el paso a desnivel corresponde a un puente urbano de dos pistas, una en cada dirección, ubicado en un camino primario.

El Manual de Carreteras, en su Volumen 2, define el tránsito medio diario anual TMDA o ADTT para un camino de estas características como:

$$ADTT = 3000$$

3.1.2. MATERIALES

3.1.2.1. ACERO ESTRUCTURAL

El acero estructural del sistema será de calidad A709M Gr. 50, cuya tensión de fluencia es de:

$$F_y = 3515 \frac{kgf}{cm^2}$$

Y su módulo de elasticidad es de:

$$E_s = 2100 \frac{tonf}{cm^2}$$

3.1.2.2. HORMIGÓN

El hormigón a utilizar en las losas de hormigón armado será de calidad G25, cuya resistencia específica a compresión es de:

$$f'_c = 250 \frac{kgf}{cm^2}$$

Su módulo de elasticidad se calcula como:

$$E_c = 15100\sqrt{f'_c} MPa = 238.8 \frac{tonf}{cm^2}$$

Además, su módulo de rotura se calcula como:

$$f_r = 0.24\sqrt{f'_c} ksi = 31.819 \frac{kgf}{cm^2}$$

3.1.2.3. ACERO DE REFUERZO

Para el acero de refuerzo del hormigón armado, se utilizarán barras de calidad A630-420H, cuya tensión de fluencia es de:

$$f_y = 4200 \frac{kgf}{cm^2}$$

Su módulo de elasticidad es:

$$E_s = 2100 \frac{tonf}{cm^2}$$

Y su tensión de rotura es:

$$f_u = 6300 \frac{kgf}{cm^2}$$

3.2. REQUERIMIENTOS NORMATIVOS PARA LA DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Los siguientes criterios corresponden a aspectos que, por la normativa chilena, deben contemplar los diseños de puentes, pasos a desnivel y estructuras afines en vías urbanas, pudiendo influir o no en su cálculo estructural.

Se describirán los criterios que tienen más concordancia con los alcances de este trabajo; los requerimientos de luces libres bajo pasos a desnivel, el ancho y tipología de tableros, espesores mínimos de elementos de acero estructural, mínimos referentes al refuerzo de acero de losas de hormigón armado, y requerimientos respecto a conectores de corte.

3.2.1. LUZ LIBRE VERTICAL BAJO PASOS A DESNIVEL

Un aspecto clave en las oportunidades del sistema propuesto es la disminución de trabajos de movimiento de tierras para mantener la luz libre vertical mínima bajo la estructura, como se expuso en la Sección 2.4.

El Volumen 3 del Manual de Carreteras, en su lámina 3.1003.102(1) A, impone la luz libre vertical mínima que deben cumplir todos los pasos a desnivel con autopistas, la cual se indica en la Figura 3.1 para calzadas separadas.

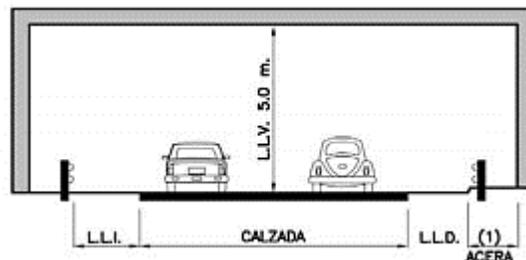


Figura 3.1: Luces libres en calzadas separadas (Manual de Carreteras, 2018)

donde:

L.L.V: luz libre vertical.

L.L.D: luz libre derecha, no estudiada en los alcances de este trabajo.

L.L.I: luz libre izquierda, no estudiada en los alcances de este trabajo.

En el caso de pasos a desnivel sobre vías férreas, las luces libres son establecidas por la Empresa de Ferrocarriles del Estado, pudiendo ser distintas a las mostradas en esta sección.

3.2.2. ANCHO Y TIPOLOGÍA DE TABLEROS

La sección 3.1003.101 del Volumen 3 del Manual de Carreteras define las secciones transversales tipo de un puente y, en estricto rigor, cómo se debe conformar su tablero. En la lámina 3.1003.101.A, que se muestra en la Figura 3.2, se indica la tipología típica de un puente emplazado en zonas urbanas.

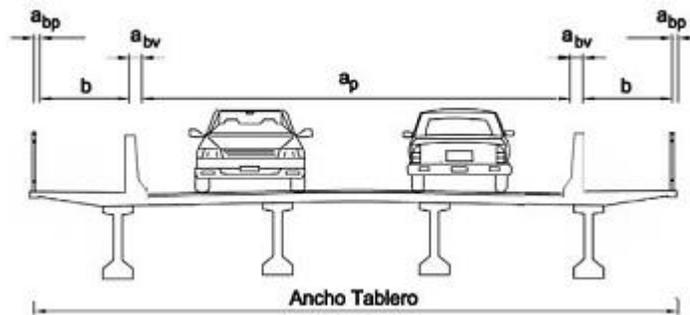


Figura 3.2: Tablero de puentes emplazados en zonas urbanas (Manual de Carreteras, 2018)

donde:

a_{bp} : ancho de baranda peatonal.

b : ancho de pasillo.

a_{bv} : ancho de barrera vehicular.

a_p : ancho de pista.

El ancho mínimo de pista en puentes urbanos es de 8.0 m, y el tablero debe contemplar barreras vehiculares para la separación entre el tránsito y los peatones, así como barandas de seguridad para los peatones en sus extremos.

El ancho mínimo de pasillos para uso peatonal es de 1.5 m.

Finalmente, el ancho total del tablero estará dado por:

$$a_{\text{tablero}} = a_p + 2a_{bp} + 2b + 2a_{bv}$$

3.2.3. CONSIDERACIONES SOBRE FUTURAS AMPLIACIONES

Con excepción de aquellos casos en que una futura ampliación de la vía sea impensada, la resistencia de las vigas exteriores de un puente no debe ser menor que la de las vigas interiores (AASHTO LRFD, 2012).

En el caso de pasos a desnivel en vías urbanas, esta futura ampliación es posible y altamente probable debido al constante crecimiento de las ciudades, el parque automotriz y la necesidad de movilidad. Por ende, se deben utilizar vigas de igual resistencia en toda la superestructura del sistema.

3.2.4. ESPESORES MÍNIMOS

La sección 3.1003.802 del Volumen 3 del Manual de Carreteras define que se deberán respetar los siguientes espesores mínimos para las vigas de acero.

- Alas: 12 mm.
- Almas: 12 mm.

3.2.5. REQUERIMIENTOS DEL ACERO DE REFUERZO

3.2.5.1. RECUBRIMIENTO MÍNIMO

El Volumen 3 del Manual de Carreteras define en su sección 3.1003.604 que el recubrimiento mínimo para el acero de refuerzo en hormigón expuesto a la intemperie es de 5.0 cm.

3.2.5.2. CUANTÍA MÍNIMA

Las cuantías mínimas de acero de refuerzo en cada cara y en cada dirección en función del espesor de la losa por metro de largo están dadas por la tabla 3.1003.609.A del Volumen 3 del Manual de Carreteras, la cual se indica a continuación:

Tabla 3.1: Cuantías mínimas de acero de refuerzo en cada cara y en cada dirección en función del espesor de la losa por metro de largo (Manual de Carreteras, 2018)

Espesor (cm)	Cuantía mínima (0/00)
20	1.57
25	1.255
30	1.2
35	1.1
40	1
50	0.9
60	0.9
70	0.9
80	0.9
90	0.9
100	0.9
110	0.9
120	0.9
130	0.9
140	0.9
150	0.9

3.2.5.3. BARRAS MÍNIMAS Y ESPACIAMIENTO MÁXIMO

La armadura mínima a disponer en elementos de hormigón armado de espesores menores a 120 cm es de ϕ 10 @ 25, con un espaciamiento máximo de 25 cm (Manual de Carreteras, 2018).

En el caso de elementos de espesor mayor a 120 cm, el diámetro mínimo de barras es de ϕ 18 y el espaciamiento máximo, de 25 cm (Manual de Carreteras, 2018).

3.2.6. REQUERIMIENTOS RESPECTO A CONECTORES DE CORTE

En sistemas compuestos de hormigón y acero, se deben disponer conectores de corte con el objetivo de materializar la acción conjunta entre ambos materiales, transmitiendo las cargas de corte en la interfaz entre ellos (AASHTO LRFD, 2012).

Los conectores de corte que la norma AASHTO permite calcular utilizando sus disposiciones son del tipo stud y perfiles canal de acero estructural. Para los alcances de este trabajo, se utilizarán conectores del tipo canal.

Los conectores de corte deben ser dispuestos, según la norma AASHTO LRFD, en toda la luz de los puentes simplemente apoyados. Además, deben ser capaces de resistir tanto el movimiento relativo horizontal como vertical entre el hormigón y el acero, actuando como anclaje entre los dos.

A continuación, se enumeran los requerimientos que la norma AASHTO indica para los conectores de corte de tipo canal.

3.2.6.1. PENETRACIÓN MÍNIMA Y RECUBRIMIENTO MÍNIMO

Los conectores de corte deben penetrar un mínimo de 50 mm en el hormigón, y mantener un recubrimiento libre mínimo de 50 mm.

Los canales a utilizar como conectores de corte se deben disponer de forma tal que su sección transversal sea perpendicular a la sección transversal de las vigas principales, y deben ser soldados al ala de éstas tanto por la zona delantera como la trasera.

3.2.6.2. DISTANCIA MÍNIMA AL BORDE

Los conectores de corte deben ser dispuestos de forma tal que su distancia al borde del ala a la cual están soldados no sea menor a 1 pulgada.

3.2.6.3. SEPARACIÓN LONGITUDINAL MÁXIMA

Los conectores de corte no deben estar separados longitudinalmente entre sí más de 600 mm. La separación longitudinal entre conectores se ilustra en la Figura 3.4.

3.3. DEFINICIÓN DEL SISTEMA

3.3.1. VIGAS DE ACERO

Se considerarán vigas de acero de perfil doble T doblemente simétricas, vale decir, con sus alas de igual dimensión. Las vigas a diseñar se grafican en la Figura 3.3.

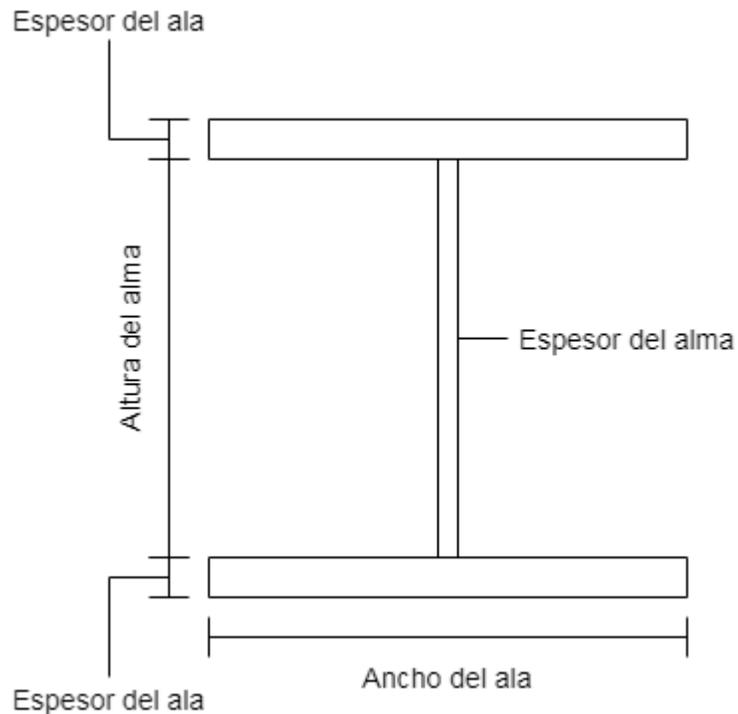


Figura 3.3: Vigas de acero del sistema

Se mantendrá un espesor de alma fijo de 16 mm con el fin de modificar sólo las dimensiones de altura de alma, ancho de ala y espesor de ala en cada repetición del proceso iterativo en el estudio.

Se impondrá un límite al ancho de alas de 420 mm, para lograr un espacio mínimo entre alas de vigas adyacentes de 180 mm. Esta dimensión se sustenta en la separación entre vigas de acero descrita en la Sección 3.3.7.

Respecto al espesor de alas, los espesores disponibles en el mercado son de 18, 20, 22, 25, 28, 32, 40 y 50 mm, por lo que se utilizarán estos valores.

3.3.2. CONECTORES DE CORTE

Como se estipuló en la Sección 3.2.6, se utilizarán conectores de corte de perfil canal, cuyas características se grafican en la Figura 3.4.

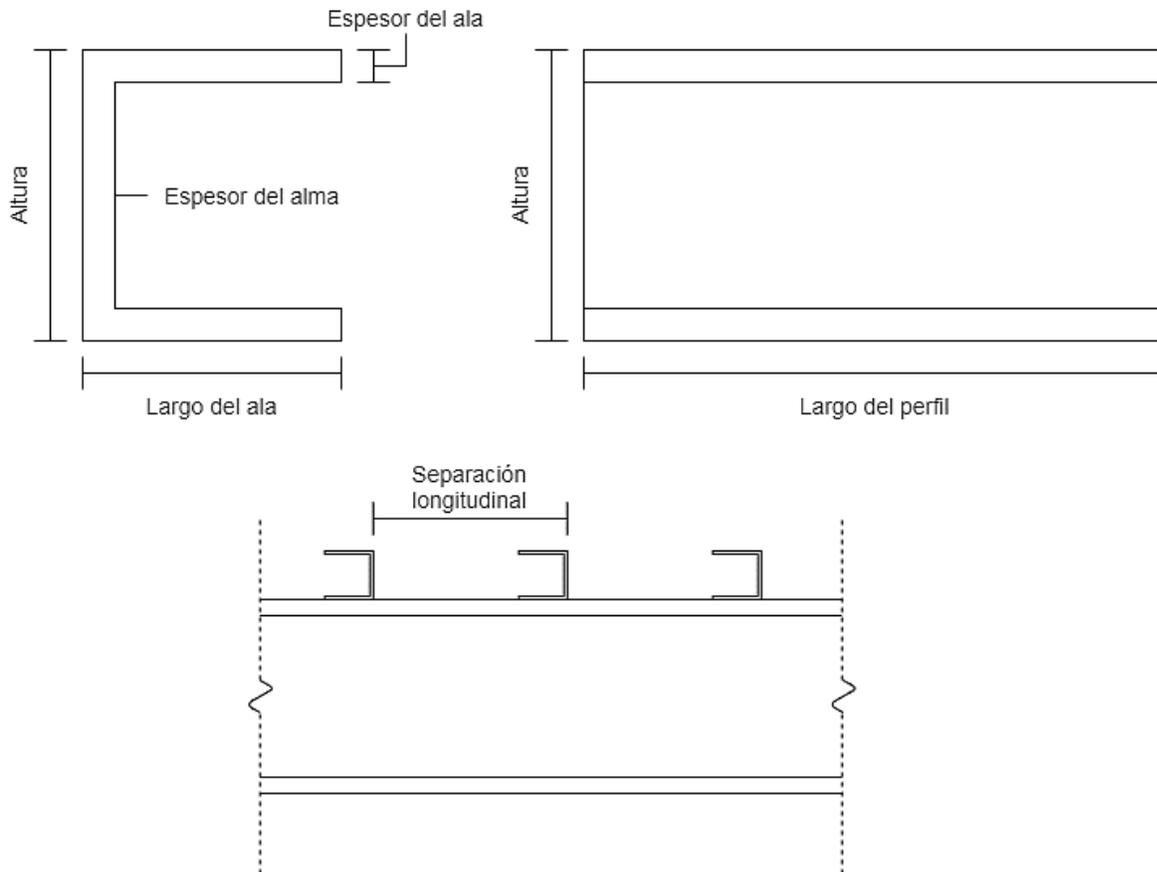


Figura 3.4: Conectores de corte del sistema

Utilizando el catálogo comercial Cintac de febrero de 2019, incluido en el Anexo B, se utilizará como conectores de corte el perfil canal de espesor de 4 mm y altura de 80 mm. Esta altura permitirá no elevar innecesariamente las alturas estructurales a obtener.

3.3.3. RECUBRIMIENTOS

Para el acero de refuerzo, se considerará el recubrimiento mínimo de 50 mm descrito en la Sección 3.2.5.1.

Para el resto del acero de la estructura, vale decir, los conectores de corte y las vigas de acero en su zona inferior, se considerará un recubrimiento de 70 mm. Esto con el fin de no interferir con la disposición del acero de refuerzo.

3.3.4. TABLERO

Para cumplir los requerimientos de ancho y tipología de tableros descritos en la Sección 3.2.2, se considerarán los puntos a continuación, utilizando la nomenclatura de la Figura 3.2.

3.3.4.1. PISTA

Para la pista, se utilizará el ancho mínimo estipulado por el Volumen 3 del Manual de Carreteras. Así:

$$a_p = 8.0 \text{ m}$$

Además, la pista contará con un pavimento de hormigón de 5.0 cm de espesor.

3.3.4.2. PASILLO

Para los pasillos peatonales, se mantendrá el criterio de utilizar el ancho mínimo estipulado por el Volumen 3 del Manual de Carreteras. Así:

$$b = 1.5 \text{ m}$$

Los pasillos también contarán con un pavimento de hormigón de 5.0 cm de espesor.

3.3.4.3. BARANDA PEATONAL

Se considerará una baranda liviana, cuyo ancho a usar dentro del tablero será de:

$$a_{bp} = 0.15 \text{ m}$$

Con un peso por unidad de largo de:

$$P_{bp} = 0.05 \frac{\text{tonf}}{m}$$

3.3.4.4. BARRERA VEHICULAR

Se considerará una barrera vehicular de hormigón armado tipo F alta, cuyo ancho a usar dentro del tablero será de:

$$a_{bv} = 0.365 \text{ m}$$

Con un área transversal de:

$$A_{bv} = 2550 \text{ cm}^2$$

3.3.5. ANCHO TOTAL DE TABLERO

Utilizando los anchos de las Secciones 3.3.4.1, 3.3.4.2, 3.3.4.3 y 3.3.4.4, se tiene el siguiente ancho total para el tablero del sistema a modelar:

$$a_{\text{tablero}} = 12.03 \text{ m}$$

3.3.6. NÚMERO DE VIGAS DE ACERO

Con el fin de obtener los menores esfuerzos posibles para cada viga de acero, pudiendo así llegar a menores alturas estructurales y resguardar la economía del puente, se utilizará un número de vigas de:

$$N_v = 20$$

3.3.7. SEPARACIÓN ENTRE VIGAS DE ACERO

Las vigas de acero se dispondrán de forma centrada en el tablero de la estructura, a una separación uniforme de:

$$S = 0.6m$$

3.3.8. MODELACIÓN Y CÁLCULO

Para efectos de modelación y cálculo, se considerará que el sistema se comporta como todo puente de vigas compuestas. Este aspecto se justifica en el apoyo de la superestructura en las zonas donde se ubican las vigas de acero y en la resistencia por flexión del sistema conjunto entre éstas y el hormigón armado.

3.4. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL SISTEMA

Finalmente, tras la definición de los aspectos del sistema realizada en la Sección 3.3, se tiene la sección transversal para cada viga compuesta que se muestra en la Figura 3.5.

El esquema muestra la ubicación del conector de corte sobre el ala superior de cada viga de acero, mientras se mantiene el recubrimiento de hormigón de 70 mm definido en la Sección 3.3.3, a ambos extremos del conjunto viga – conector.

De forma adicional, se puede consultar la sección transversal del tablero completo en la Figura 3.6. En ella, se incluyen los elementos de seguridad peatonal, y se visualizan las vigas embebidas dentro de la losa en su disposición centrada y a separación constante. Las dimensiones se encuentran en metros.

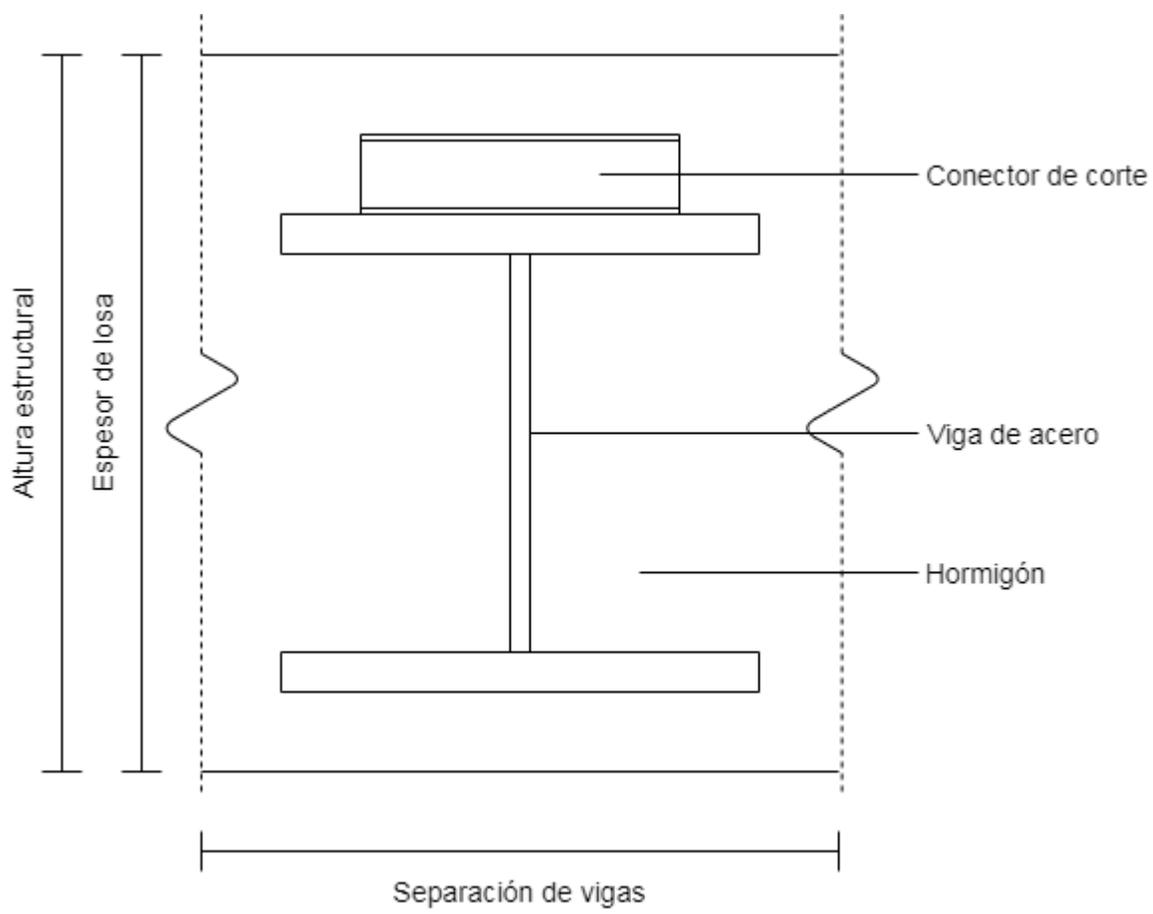


Figura 3.5: Sección transversal de cada viga compuesta

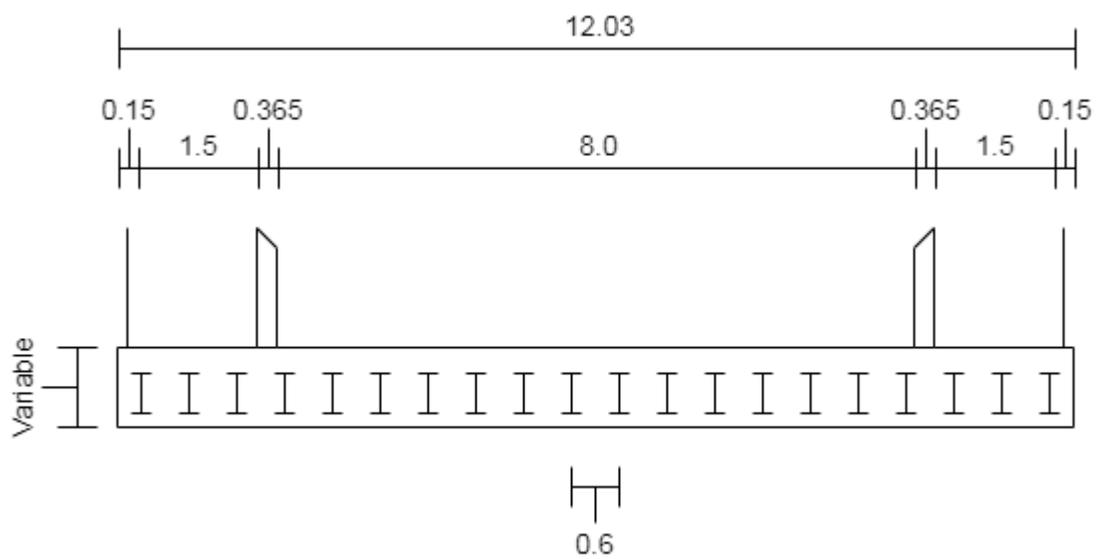


Figura 3.6: Sección transversal del tablero

3.5. FASES CONSTRUCTIVAS

La secuencia de construcción de la superestructura del sistema consta de los siguientes pasos, tras el fin de la construcción de la infraestructura:

1. Instalación de apoyos elastoméricos bajo la posición de cada viga de acero.
2. Instalación de barras de anclaje sísmico y topes que mantengan las vigas en su posición antes del fraguado del hormigón.
3. Instalación y montaje de las vigas de acero.
4. Soldadura de los conectores de corte.
5. Instalación de moldaje, el cual debe ser sostenido por las vigas de acero mediante un sistema que no se incluye en los alcances de este trabajo.
6. Disposición de barras de refuerzo inferiores.
7. Disposición de barras de refuerzo superiores.
8. Vaciado de hormigón.
9. Curado de hormigón.
10. Retiro de moldaje.
11. Instalación de barandas peatonales y barreras vehiculares.
12. Pavimentación.

CAPÍTULO IV: CRITERIOS DE DISEÑO

Este capítulo tiene por fin definir los criterios a considerar y requerimientos a cumplir en el diseño de la estructura para cada luz en estudio. Estos se extraen de la norma AASHTO LRFD, en su 6ª edición de 2012 y, cuando se indique, del Volumen 3 del Manual de Carreteras de 2018.

Se definen las cargas, los estados límite, las combinaciones de carga y el diseño de la losa de hormigón armado, las vigas compuestas y los conectores de corte.

Finalmente, se presenta el diagrama de flujo del proceso iterativo de diseño.

4.1. CARGAS

4.1.1. CARGAS PERMANENTES: DC, DW

4.1.1.1. CARGA MUERTA (DC)

La carga muerta corresponde al peso de todos los componentes de la estructura, es decir, el peso propio de la losa con vigas embebidas. Los pesos se calculan según la Tabla 4.1.

4.1.1.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

La carga muerta superpuesta corresponde al peso de todos los componentes y adjuntos permanentemente sostenidos por la estructura, es decir, el peso propio de barreras de contención, pasillos, barandas y pavimentos. Los pesos se calculan según la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Peso específico de materiales (Manual de Carreteras, 2018)

Material	Peso específico (ton/m ³)
Hormigón armado	2.50
Acero de refuerzo	7.85
Acero de vigas	8.00

4.1.2. CARGAS VIVAS: LL

4.1.2.1. NÚMERO DE FAJAS DE DISEÑO

De acuerdo a la norma AASHTO LRFD, para fajas de tránsito de menos de 3.66 m de ancho, el número de fajas de diseño debe ser tomado igual al número de fajas de tránsito del puente. Los modelos cuentan con tableros de dos fajas de tránsito de 4.0 m de ancho cada una, por lo que se considerarán dos fajas de diseño de 4.0 m de ancho cada una.

4.1.2.2. CAMIÓN DE DISEÑO

En Chile, para el diseño de puentes definitivos se utiliza el camión HS20-44 de la norma AASHTO, incrementando sus cargas en un 20%. Las cargas y separaciones de este camión, para cada uno de sus tres ejes, se muestran en la Figura 4.1. La separación transversal entre ruedas se debe considerar como 1.83 m.

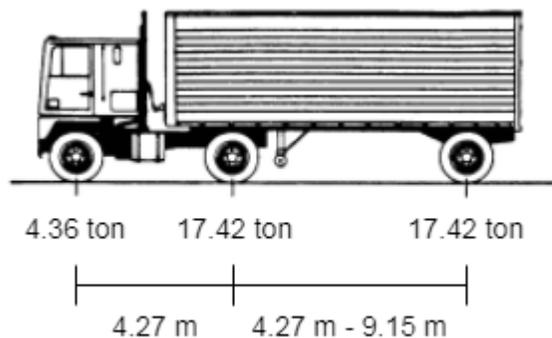


Figura 4.1: Camión de diseño

4.1.2.3. TÁNDEM DE DISEÑO

El tándem de diseño consiste en un par de ejes de 11.34 ton espaciados 1.22 m. La distancia transversal entre ruedas debe ser tomada como 1.83 m.

4.1.2.4. CARGA DE FAJA DE DISEÑO

La carga de faja consiste en una carga de 0.952 ton/m uniformemente distribuida en la dirección longitudinal sobre un ancho de 3.05 m en dirección transversal. Toda la longitud de la faja de diseño debe ser cargada con la carga de faja de diseño.

4.1.2.5. APLICACIÓN DE LA CARGA VEHICULAR DE DISEÑO (LL)

La carga viva vehicular, debido a que se estudian tramos simplemente apoyados y no aparecen momentos negativos, consistirá en una combinación entre:

- Un camión de diseño ó un tándem de diseño, y
- La carga de faja de diseño.

La carga vehicular de diseño debe ser posicionada de forma que produzca los efectos más desfavorables.

Finalmente, no se deben considerar nunca fracciones de cargas de faja, camiones de diseño ni tándems de diseño.

4.1.3. COEFICIENTE DE IMPACTO DINÁMICO: IM

Los efectos estáticos de las cargas del camión de diseño y el tándem de diseño deben ser aumentados por el factor indicado en la Tabla 4.2 para la consideración de sus cargas dinámicas.

El valor mostrado en la tabla no se debe aplicar a la carga de faja de diseño.

Tabla 4.2: Coeficiente de impacto dinámico (AASHTO LRFD)

Estado límite	IM
Estado límite de fatiga	15%
Todos los demás estados límite	33%

4.1.4. CARGA DE FATIGA

La carga de fatiga corresponde a un camión de diseño con separación fija de 9.15 m entre sus ejes de 17.42 ton. Además, el coeficiente de impacto dinámico (IM) de la Sección 4.1.3 deberá ser aplicado también a esta carga de fatiga. Las cargas y separaciones de este camión, para cada uno de sus tres ejes, se muestran en la Figura 4.2. La separación transversal entre ruedas se debe considerar como 1.83 m.

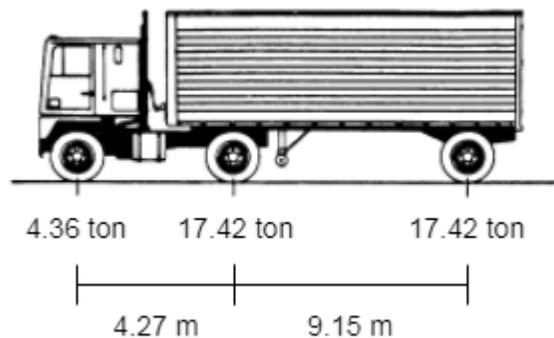


Figura 4.2: Camión para carga de fatiga

La frecuencia asociada a la carga de fatiga deberá ser tomada como:

$$ADTT_{SL} = p \cdot ADTT$$

donde:

$ADTT_{SL}$: número de camiones promedio por día en una faja de tránsito durante la vida útil de diseño.

p : 0.85 para dos fajas de tránsito.

$ADTT$: número de camiones promedio por día en una dirección durante la vida útil de diseño, determinado en la Sección 3.1.1.

4.1.5. OTRAS CARGAS

Los puentes a diseñar se encuentran sometidos además a otras cargas que, por lo general, no controlan el diseño. Dentro de ellas se encuentran:

- Cargas de viento.
- Carga viva peatonal.
- Fuerzas térmicas.
- Fuerzas de arranque.

Como lo indica el Volumen 3 del Manual de Carreteras, sólo se deben considerar los efectos de estas cargas bajo circunstancias especiales, por lo que no se incluirán en el diseño.

4.2. ESTADOS LÍMITE

La norma AASHTO LRFD define cuatro tipos de estados límite a considerar en el diseño, los de Resistencia, Evento Extremo, Servicio, y Fatiga y Fractura. Cada uno de estos tipos de estados límite contempla distintas combinaciones y cargas a considerar.

Por otra parte, dadas las condiciones, cargas no consideradas y alcances de este trabajo, no todos los estados límite definidos por la norma serán utilizados en el diseño.

A continuación, se definen todos los estados límite descritos en la norma AASHTO LRFD, y se especifica en cada caso con cuáles de ellos se trabajará en el diseño.

4.2.1. ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

Los estados límite de resistencia se utilizan para asegurar que, tanto local como globalmente, el puente cuente con la resistencia y estabilidad necesarias para ser capaz de tomar la carga que se espera que lo solicite durante su vida de diseño.

- **Resistencia I:** Combinación básica de carga que considera uso vehicular normal sin viento.
- **Resistencia II:** Combinación de carga que considera uso de vehículos especiales de diseño sin viento.
- **Resistencia III:** Combinación de carga que considera puentes sometidos a vientos de 55 mph.
- **Resistencia IV:** Combinación de carga con relaciones altas entre cargas permanentes y cargas vivas, utilizada en puentes que superan los 60 m.
- **Resistencia V:** Combinación de carga que considera uso vehicular normal con vientos de 55 mph.

Para el diseño, se considerará sólo el estado límite de **Resistencia I**, debido a la no consideración de cargas de viento, el no uso de vehículos especiales distintos al camión de diseño y el diseño de puentes de hasta 40 m.

4.2.2. ESTADO LÍMITE DE EVENTO EXTREMO

Los estados límite de evento extremo se utilizan para asegurar que las estructuras permanezcan en pie tras catástrofes tales como sismos, inundaciones, choques de vehículos o hielos. Estos eventos se consideran únicos durante la vida de diseño del puente, pudiendo tener periodos de retorno mucho mayores a ésta.

- **Evento Extremo I:** Combinación de carga que incluye el efecto del sismo.
- **Evento Extremo II:** Combinación de carga que considera cargas de hielo, choque de naves y vehículos, inundaciones y otros eventos hidráulicos.

Para el diseño, no se considerará el estado límite de Evento Extremo, puesto que el sismo no influye en el cálculo de la superestructura.

4.2.3. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

Los estados límite de servicio son restricciones a los esfuerzos, deformaciones y grietas bajo condiciones normales de servicio del puente. Estos estados límite incluyen recomendaciones tomadas de la experiencia que no siempre pueden ser derivadas del sólo estudio de la resistencia.

- **Servicio I:** Combinación de carga que considera el uso operacional normal del puente y todas las cargas con su valor nominal, utilizada en estructuras de hormigón armado para el control de grietas.
- **Servicio II:** Combinación de carga utilizada para evitar la fluencia de estructuras de acero y el deslizamiento de conexiones de deslizamiento crítico debido a cargas vivas vehiculares.
- **Servicio III:** Combinación de carga para análisis longitudinal relativo a la tracción de superestructuras de hormigón pretensado para el control de grietas.
- **Servicio IV:** Combinación de carga relacionada sólo con la tracción de columnas de hormigón pretensado para el control de grietas.

Para el diseño, se considerarán los estados límite de **Servicio I** y **Servicio II**, según corresponda.

4.2.4. ESTADO LÍMITE DE FATIGA Y FRACTURA

Los estados límite de fatiga y fractura son restricciones en el rango de los esfuerzos, como resultado de un número esperado de ciclos de solicitaciones. Se intenta limitar el crecimiento de grietas en la estructura con el fin de evitar la fractura durante la vida de diseño del puente.

- **Fatiga I:** Combinación de carga de fatiga y fractura que considera una vida de ciclos de carga infinitos.
- **Fatiga II:** Combinación de carga de fatiga y fractura que considera una vida de ciclos de carga finitos.

Para el diseño, se considerará sólo el estado límite de **Fatiga I**.

4.3. COMBINACIONES DE CARGA

4.3.1. ECUACIÓN DE DISEÑO

De acuerdo con el método LRFD, cada componente debe ser diseñado para cumplir con la siguiente ecuación en cada estado límite:

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n$$

donde:

η_i : modificador de carga

γ_i : factores de carga

Q_i : cargas de diseño

ϕ : factor de resistencia

R_n : resistencia nominal

4.3.2. MODIFICADOR DE CARGA

El modificador de carga η_i contiene consideraciones sobre la ductilidad D, resistencia R e importancia I de operación en los puentes, en las siguientes fórmulas:

Para cargas donde un factor de carga máximo es apropiado,

$$\eta_i = \eta_D \eta_R \eta_I$$

Mientras que, para cargas donde un factor de carga mínimo es apropiado,

$$\eta_i = \frac{1}{\eta_D \eta_R \eta_I}$$

Para efectos de este trabajo, los tres factores que influyen en el modificador de carga serán considerados con un valor de 1.0, el cual hace referencia a puentes de funcionamiento normal tanto en ductilidad, resistencia e importancia.

4.3.3. FACTORES DE CARGA

A continuación, se indican los factores para la combinación de cargas de cada estado límite de diseño.

Tabla 4.3: Combinaciones y factores de carga

Estado Límite	DC	DW	LL IM
Resistencia I	1.25	1.5	1.75
Servicio I	1	1	1
Servicio II	1	1	1.3
Fatiga I (Sólo LL e IM)	N/A	N/A	1.5

4.4. DISTRIBUCIÓN DE LAS CARGAS

A continuación, se especifican las provisiones que se deben tomar para distribuir las cargas. Para utilizar estas provisiones, la estructura debe cumplir con lo siguiente:

- Espesor de losa constante.
- Número de vigas no menor a 4.
- Las vigas son paralelas y cuentan con aproximadamente igual rigidez.
- La zona de tránsito vehicular contenida en el voladizo es menor a 0.9 m.
- La curvatura en planta no excede un valor dado por el artículo 4.6.1.2.4 de la norma AASHTO LRFD, lo cual no aplica para las estructuras analizadas, sin curvatura en planta.
- La sección transversal es consistente con la de un puente de vigas y losa, tal como se explica en la Sección 3.3.8 de este trabajo.

Como se especifica en el Capítulo 3, las estructuras modeladas cumplen con estas condiciones.

4.4.1. DISTRIBUCIÓN DE CARGAS PERMANENTES

Cuando los puentes cumplen con las condiciones especificadas anteriormente, la carga muerta y la carga muerta superpuesta pueden ser distribuidas uniformemente entre todas sus vigas.

4.4.2. DISTRIBUCIÓN DE CARGAS VIVAS

La norma AASHTO LRFD entrega una fórmula de distribución de cargas vivas para el caso en que se asume que la sección transversal actúa como un diafragma que se deforma y rota como un cuerpo rígido.

Este factor de distribución se expresa como una fracción de los esfuerzos obtenidos, para momento o corte, debido a las cargas vivas de diseño, y se calcula como:

$$g = m \cdot \left(\frac{N_L}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot \sum_0^{N_L} e}{\sum_0^{N_b} x_i^2} \right)$$

donde:

N_L : número de vías cargadas

N_b : número de vigas

e : excentricidad de la carga viva respecto al centro de gravedad del sistema de vigas

X_{ext} : distancia horizontal de la viga exterior al centro de gravedad del sistema de vigas

x_i : distancia horizontal de cada viga respecto al centro de gravedad del sistema de vigas

El valor del factor de presencia múltiple m es de 1.20 para una vía cargada, y de 1.0 para dos vías cargadas.

4.5. DISEÑO DE LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO

La losa de hormigón armado en la que se embeben las vigas de acero será diseñada según las disposiciones de la sección 9.7.3 de la norma AASHTO LRFD, la cual hace referencia al diseño según el método tradicional.

El método tradicional se basa en la flexión, modelando la losa como una serie de franjas, denominadas franjas equivalentes. Las franjas equivalentes serán diseñadas como vigas simplemente apoyadas en los elementos soportantes que, para estos efectos, se consideran infinitamente rígidos.

Para estas franjas, la distancia entre apoyos corresponde a la distancia horizontal entre vigas de acero, considerando la dirección principal de la losa como la transversal al tráfico.

Gráficamente, las franjas equivalentes pueden comprenderse como se indica en las Figuras 4.3 y 4.4.

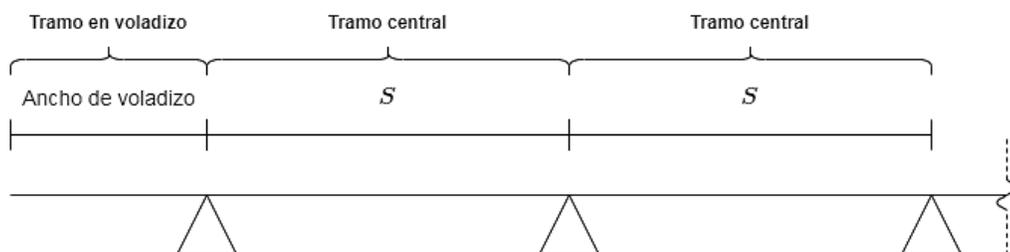


Figura 4.3: Franjas equivalentes (Vista transversal)

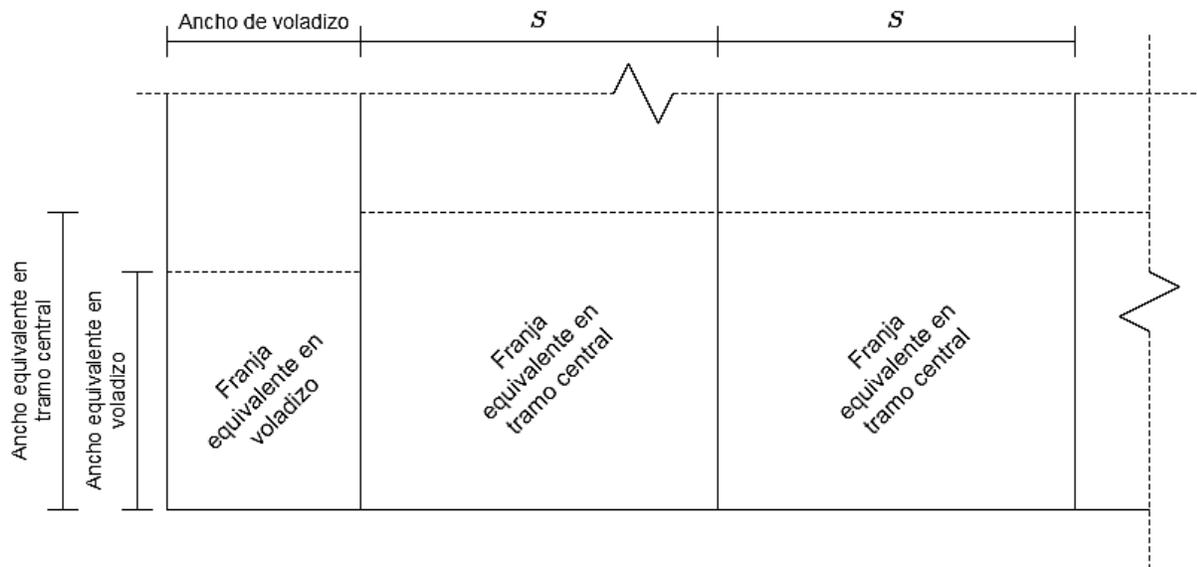


Figura 4.4: Franjas equivalentes (Vista en planta)

4.5.1. ESPESOR MÍNIMO

El espesor de la losa no debe ser menor a 18 cm.

4.5.2. ANCHO DE FRANJAS EQUIVALENTES

El ancho de las franjas equivalentes para una losa de hormigón colado en sitio se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.4: Ancho de franjas equivalentes (AASHTO LRFD)

Zona	Ancho de la franja equivalente (m)
Voladizo	$1.2 + 10 X$
Central	$0.7 + 6.6 S$

donde:

X : distancia de la carga hasta el apoyo (m).

S : espaciamiento entre vigas (m).

4.5.3. CARGAS VIVAS DE DISEÑO

En losas cuya dirección principal es transversal al tráfico, las cargas vivas que se deben aplicar son solamente los ejes del camión de diseño ó el tándem de diseño.

Para considerar el caso más desfavorable, se considerará como carga de rueda puntual la mitad de los ejes más pesados posibles dentro del ancho efectivo, posicionados transversalmente en el centro del tramo.

El momento máximo de lo descrito anteriormente se da bajo la carga de rueda puntual, como muestra la Figura 4.5.

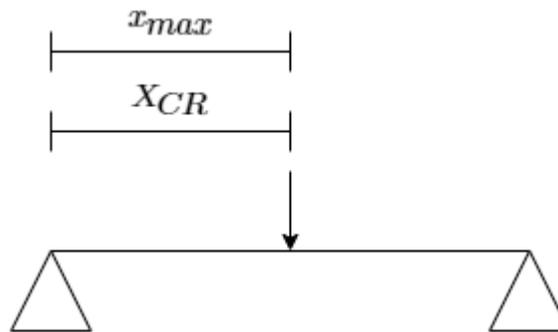


Figura 4.5: Posición de la carga viva de diseño en la franja equivalente

donde:

x_{max} : Punto de momento máximo.

X_{CR} : Posición de la carga de rueda puntual.

4.5.4. ACERO DE REFUERZO

El método tradicional se aplica a losas de hormigón armadas con cuatro capas de refuerzo, dos en cada dirección.

4.5.4.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

El refuerzo requerido en la dirección principal de diseño, definida para este sistema como perpendicular al tránsito vehicular, se debe calcular utilizando los esfuerzos obtenidos para la franja equivalente y dividiendo éstos en el ancho de la franja, obteniendo así el esfuerzo total por unidad de ancho.

El refuerzo en la dirección principal se debe disponer en dos capas.

4.5.4.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

El refuerzo requerido en la dirección secundaria es un refuerzo de distribución y se calcula como un porcentaje del refuerzo en la dirección principal, como se muestra a continuación:

$$\frac{121}{\sqrt{S}} \leq 67\%$$

El refuerzo en la dirección secundaria también se debe disponer en dos capas.

4.6. DISEÑO DE LAS VIGAS COMPUESTAS

Las vigas de la superestructura se diseñan como compuestas con la losa de hormigón, conectándose a ella mediante conectores de corte.

4.6.1. DISEÑO A FLEXIÓN

4.6.1.1. FACTOR DE RESISTENCIA

Para el diseño de los elementos a flexión, la norma AASHTO LRFD indica que se debe utilizar un factor de resistencia de $\phi_f = 1.0$.

4.6.1.2. ANCHO EFECTIVO COLABORANTE DE LA LOSA

El ancho efectivo colaborante de la losa, para la determinación de la inercia de la sección transversal de la estructura, su rigidez y resistencia a la flexión, debe ser calculado como el ancho tributario perpendicular al eje de la viga.

En el caso de las vigas interiores de la estructura, esto corresponde a la mitad de distancia hasta la viga adyacente hacia ambos costados de la viga en estudio; mientras que, en el caso de las vigas exteriores, corresponde a la mitad de distancia hasta la próxima viga interior, más el ancho total del voladizo.

4.6.1.3. SECUENCIA DE CARGA

Los esfuerzos elásticos en cualquier punto de la sección compuesta debido a la acción de las cargas aplicadas, será la suma de los esfuerzos causados por las cargas aplicadas de forma separada a:

- La sección de acero.
- La sección compuesta en el corto plazo.
- La sección compuesta en el largo plazo.

Para calcular los esfuerzos de flexión, la sección compuesta debe ser tomada como el área de acero y el área de hormigón colaborante transformada. El área de hormigón bajo el eje neutro, es decir, en tracción, no debe ser considerada para el estado límite de resistencia.

4.6.1.4. SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO

La sección compuesta en el corto plazo se utiliza para cargas transitorias, para los alcances de este trabajo, las cargas vivas (LL) y el coeficiente de impacto dinámico (IM). Para el cálculo de esta sección, se considera que el hormigón actúa de forma íntegra con el acero para resistir estas cargas que no se mantienen en el tiempo.

Para cargas transitorias que se asumen aplicadas a la sección compuesta en el corto plazo, el área de hormigón debe ser transformada mediante la razón entre módulos de elasticidad n :

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

4.6.1.5. SECCIÓN COMPUESTA EN EL LARGO PLAZO

La sección compuesta en el largo plazo se utiliza para las cargas permanentes que actúan posteriormente al curado del hormigón, es decir, en el caso del sistema de losa con vigas totalmente embebidas, la carga muerta superpuesta (DW). Se asume que esta carga que se mantiene en el tiempo de forma permanente causa creep en el hormigón, por lo que la acción de éste no es íntegra, sino que se ve mermada.

Para cargas permanentes que se asumen aplicadas a la sección compuesta en el largo plazo, el área de hormigón debe ser transformada mediante la razón entre módulos de elasticidad para el largo plazo, $3n$.

4.6.1.6. MOMENTO PLÁSTICO

El momento plástico M_p debe ser calculado como el que causa un equilibrio entre los esfuerzos de tracción y compresión en torno al eje neutro plástico de la sección.

Para las secciones compuestas, se debe considerar la tensión de fluencia en toda la viga de acero, así como al hormigón como un esfuerzo compresivo rectangular de magnitud $0.85f'_c$, sin considerar el hormigón en tracción.

4.6.1.7. RESISTENCIA A FLEXIÓN POR PANDEO LATERAL TORSIONAL

Para el chequeo en etapas de construcción, se debe considerar que las vigas de acero tienen un largo no arriostrado igual a la luz en estudio, puesto que el arriostramiento continuo causado por el endurecimiento del hormigón aún no se ha materializado. En este caso, se define la longitud límite para resistir por fluencia:

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}}$$

Y la longitud límite para el pandeo lateral torsional inelástico:

$$L_r = 1.95r_t \frac{E_s}{F_{yr}} \sqrt{\frac{J}{S_{xc}h} + \sqrt{\left(\frac{J}{S_{xc}h}\right)^2 + 6.76\left(\frac{F_{yr}}{E_s}\right)^2}}$$

donde:

F_{yc} : tensión de fluencia del ala en compresión (kgf/cm²).

r_y : radio de giro sobre el eje y (mm).

J : constante torsional (mm⁴).

S_{xc} : módulo elástico de la sección en torno al eje x para el ala en compresión (mm³).

h : distancia entre los centroides de las alas (mm).

El radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional se define como:

$$r_t^2 = \frac{I_y h}{2S_{xc}}$$

I_y : momento de inercia respecto al eje y (mm⁴).

La tensión en el ala en compresión en el punto de fluencia de la sección se define como:

$$F_{yr} = \min(0.7F_{yc}, F_{yt}S_{xt}/S_{xc}, F_{yw}) \geq 0.5F_{yc}$$

F_{yw} : tensión de fluencia del alma (kgf/cm²).

S_{xt} : módulo elástico de la sección en torno al eje x para el ala en tracción (mm³).

También se define el factor de modificación por pandeo lateral torsional:

$$C_b = \frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C}$$

donde:

M_{max} : valor absoluto del máximo momento en el segmento no arriostrado (tonf-m).

M_A : valor absoluto del momento en el primer cuarto del segmento no arriostrado (tonf-m).

M_B : valor absoluto del momento en el centro del segmento no arriostrado (tonf-m).

M_C : valor absoluto del momento en el tercer cuarto del segmento no arriostrado (tonf-m).

Así, cuando $L_b \leq L_p$:

$$M_{nc} = R_{pc}M_{yc} = F_{yc}Z_{xc}$$

, cuando $L_p < L_b \leq L_r$:

$$M_{nc} = C_b \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr}S_{xc}}{R_{pc}M_{yc}} \right) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] R_{pc}M_{yc} \leq R_{pc}M_{yc}$$

, y cuando $L_r < L_b$:

$$M_{nc} = F_{cr}S_{xc} \leq R_{pc}M_{yc}$$

donde:

L_b : largo no arriostrado (m).

M_{nc} : resistencia nominal a la flexión en el ala en compresión (tonf-m).

R_{pc} : factor de plastificación del alma para el ala en compresión.

M_{yc} : momento de fluencia para el ala en compresión (tonf-m).

El factor de plastificación del alma está dado por:

$$R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}}$$

Por último, la tensión crítica se define como:

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E_s}{(L_b/r_t)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{J}{S_{xc} h} \left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2}$$

4.6.1.8. MÉTODO DE CÁLCULO DE DEFORMACIONES

Las deformaciones máximas por flexión se deben calcular utilizando el método de doble integración:

$$\Delta = \int_0^{x_{max}} \left(\int_0^x \frac{M(x)}{E_s I} dx \right) dx - x_{max} \cdot \int_0^{x_{max}} \frac{M(x)}{E_s I} dx$$

donde:

$M(x)$: Momento en función de la longitud (tonf-m).

I : Momento de inercia en consideración (mm⁴).

Para las cargas consideradas, x_{max} corresponde tanto al punto de momento máximo como al punto de máxima deformación por flexión.

En el caso de deformaciones por cargas uniformemente distribuidas, la fórmula anterior puede ser simplificada a:

$$\Delta = \frac{5qL^4}{384E_s I}$$

donde:

q : Carga uniformemente distribuida (tonf/m).

4.6.1.9. POSICIÓN DE CARGA VIVA QUE PRODUCE EL MAYOR MOMENTO

Como se indica en la Sección 4.1.2.5, la carga vehicular de diseño debe ser posicionada transversalmente de forma que produzca los efectos más desfavorables.

En el caso de solicitaciones por momento, para obtener la posición del camión de diseño que produce el mayor momento, se debe calcular la posición δ de la resultante del peso de sus ejes respecto al segundo de ellos. Para esto, se debe considerar que los dos últimos ejes están a la distancia mínima de 4.27 m.

Luego, la posición que produce el mayor momento para el camión de diseño es aquella en que su segundo eje se ubica a una distancia $\delta/2$ del centro de la luz, como muestra la Figura 4.6. En ella, también se indica que el momento máximo se da bajo el segundo eje del camión, a una distancia x_{max} del apoyo.

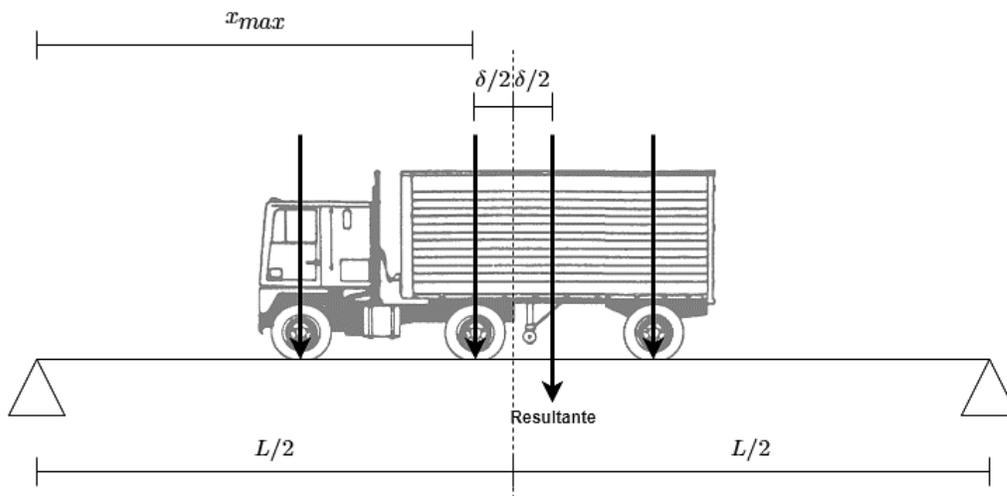


Figura 4.6: Posición de camión de diseño que produce el mayor momento

En el caso del tándem de diseño, se utiliza el mismo procedimiento, considerando que los ejes del tándem son los dos últimos de un camión. La Figura 4.7 muestra la posición que produce el mayor momento para el tándem de diseño.

La posición para la carga de fatiga se calcula de igual forma que en el caso del camión de diseño, sin embargo, se debe considerar la distancia fija de 9.15 m entre sus dos últimos ejes. Esto se muestra en la Figura 4.8.

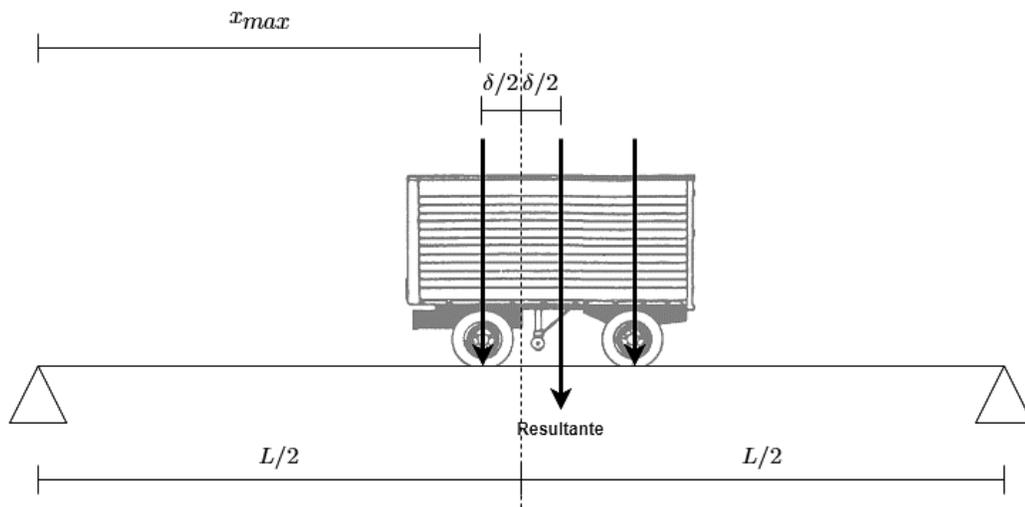


Figura 4.7: Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento

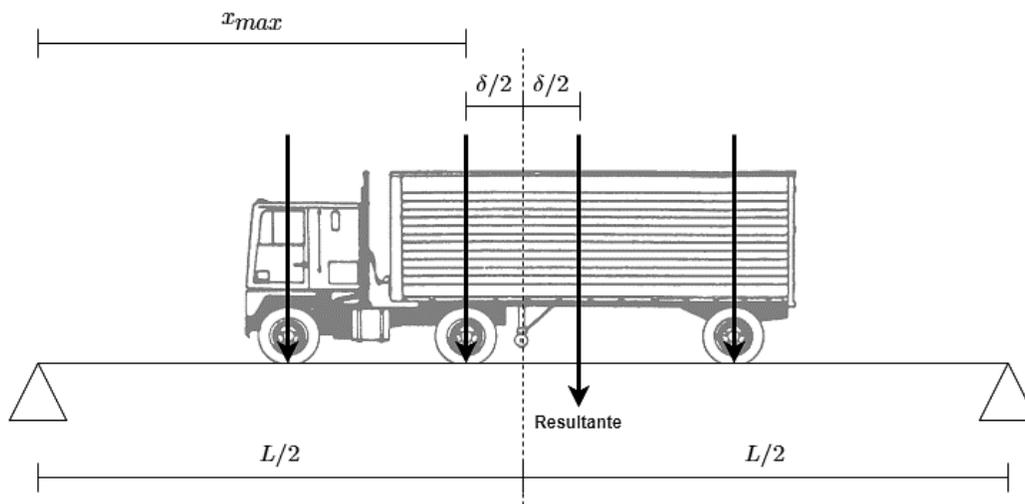


Figura 4.8: Posición de carga de fatiga que produce el mayor momento

4.6.1.10. CONSTRUCCIÓN

Se debe chequear la estabilidad de la estructura durante las etapas críticas de su construcción. Se considerará como una etapa crítica de construcción la situación de hormigón colado antes de fraguar, con cargas muertas resistidas en solitario por las vigas de acero antes de materializarse una sección compuesta. Para esto, se debe considerar que el moldaje que soporta el hormigón es sostenido por las vigas de acero mediante un sistema que no se incluye en los alcances de este trabajo, como se indica en la Sección 3.5.

4.6.1.10.1. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DURANTE ETAPAS CRÍTICAS DE CONSTRUCCIÓN

La sección de acero debe cumplir con los siguientes requerimientos durante las etapas críticas de construcción:

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{yc}$$
$$f_{bu} \leq \phi_f F_{nc}$$

donde:

f_{bu} : esfuerzo en el ala en compresión sin considerar pandeo lateral (kgf/cm²).

F_{yc} : tensión de fluencia del ala en compresión (kgf/cm²).

F_{nc} : resistencia nominal a flexión del ala en compresión (kgf/cm²).

La resistencia nominal a flexión del ala en compresión puede ser calculada como:

$$F_{nc} = \frac{M_{nc}}{S_{xc}}$$

4.6.1.10.2. DEFORMACIÓN POR CARGAS MUERTAS

Se debe calcular la deformación para el peso del acero y del hormigón armado por separado. La contraflecha que se debe dar a las vigas de acero se especifica como la suma entre las deformaciones por peso muerto de ambos elementos.

4.6.1.11. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

La norma AASHTO LRFD define, en ausencia de otros requerimientos, que la deflexión máxima en puentes vehiculares de acero, aluminio u hormigón será de:

$$\frac{L}{800}$$

4.6.1.11.1. DEFORMACIONES ELÁSTICAS

Al investigar la deformación máxima absoluta de un sistema de vigas rectas, se deben cargar todas las fajas de diseño, y todos los elementos de soporte se consideran deformándose de igual forma.

Para calcular la deformación de una viga compuesta en particular, se debe utilizar la rigidez del sistema completo, dividida en el número de vigas.

Las cargas y factores a utilizar deben ser los de la combinación de carga de Servicio I de la Tabla 4.3, incluida en la Sección 4.3.3 de este trabajo.

4.6.1.11.2. DEFORMACIONES PERMANENTES

Se deben estudiar los esfuerzos inducidos en el acero debido a las deformaciones causadas por las cargas y factores de la combinación de carga de Servicio II de la Tabla 4.3, incluida en la Sección 4.3.3 de este trabajo.

Utilizando la sección compuesta transformada a hormigón, se debe verificar que el hormigón en tracción cumpla con la siguiente condición:

$$f \leq 2f_r$$

donde:

f : máximo esfuerzo de tracción en el hormigón (kgf/cm²).

f_r : módulo de ruptura del hormigón (kgf/cm²).

Si el límite se cumple, para obtener los esfuerzos en el acero se debe utilizar la sección compuesta en el corto y en el largo plazo, según corresponda, considerando el hormigón como efectivo tanto en compresión como en tracción.

Si el límite no se cumple, se permite obtener los esfuerzos en el acero considerando sólo la sección de acero sin el aporte del hormigón.

Las alas de la viga de acero deben cumplir la siguiente condición:

$$f_f \leq 0.95F_{yf}$$

donde:

f_f : máximo esfuerzo en el ala (kgf/cm²).
 F_{yf} : tensión de fluencia del ala (kgf/cm²).

Adicionalmente, el hormigón en tracción debe cumplir la siguiente condición, definida según criterios del profesor guía:

$$f \leq 4f_r$$

donde:

f : máximo esfuerzo de tracción en el hormigón (kgf/cm²).
 f_r : módulo de ruptura del hormigón (kgf/cm²).

4.6.1.12. ESTADO LÍMITE DE FATIGA

Las alas de los miembros en flexión deben ser investigadas en el estado límite de fatiga, para el cual se debe verificar el siguiente requerimiento:

$$V_u \leq V_{cr}$$

donde:

V_u : corte en el alma de la sección debido a la carga permanente no mayorada más la carga de fatiga mayorada (tonf).

La resistencia a corte por pandeo se define como:

$$V_{cr} = CV_p$$

La relación entre la resistencia a corte por pandeo y la resistencia a corte por fluencia, cuando $\frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{E_s k}{F_{yw}}}$, se define como:

$$C = 1.0$$

, cuando $1.12 \sqrt{\frac{E_s k}{F_{yw}}} < \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \sqrt{\frac{E_s k}{F_{yw}}}$:

$$C = \frac{1.12}{D/t_w} \sqrt{\frac{E_s k}{F_{yw}}}$$

, y cuando $1.40 \sqrt{\frac{E_s k}{F_{yw}}} < \frac{D}{t_w}$:

$$C = \frac{1.12}{(D/t_w)^2} \frac{E_s k}{F_{yw}}$$

El coeficiente de pandeo por corte, para una viga continuamente arriostrada es:

$$k = 5$$

Y la resistencia a corte por fluencia, se define como:

$$V_p = 0.58 F_{yw} D t_w$$

4.6.1.13. ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

4.6.1.13.1. COMPACIDAD DE LA SECCIÓN COMPUESTA

La sección compuesta calificará como compacta si:

- La tensión de fluencia de las alas no supera los 4921 kgf/cm².
- El alma cumple con la relación $\frac{D}{t_w} \leq 150$.
- La sección cumple el límite:

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}}$$

donde:

D_{cp} : profundidad del alma en compresión al momento plástico (mm).

4.6.1.13.2. SECCIONES COMPACTAS

Las secciones compactas deben cumplir, en el estado límite de resistencia, con el siguiente requerimiento:

$$M_u \leq \phi_f M_n$$

Si $D_p \leq 0.1D_t$:

$$M_n = M_p$$

, si no:

$$M_n = M_p \left(1.07 - 0.7 \frac{D_p}{D_t} \right)$$

donde:

D_p : distancia entre el borde superior de la losa de hormigón y el eje neutro plástico (mm).

D_t : altura total de la sección compuesta (mm).

4.6.1.13.3. SECCIONES NO COMPACTAS

En el estado límite de resistencia, el ala en compresión de una sección no compacta debe cumplir:

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{nc}$$

donde:

f_{bu} : esfuerzo en el ala en compresión sin considerar pandeo lateral (kgf/cm²).

F_{nc} : resistencia nominal a flexión del ala en compresión (kgf/cm²).

Además, el ala en tracción debe cumplir:

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{nt}$$

donde:

f_{bu} : esfuerzo en el ala en tracción sin considerar pandeo lateral (kgf/cm²).

F_{nt} : resistencia nominal a flexión del ala en tracción (kgf/cm²).

La resistencia nominal a flexión del ala en compresión está dada por:

$$F_{nc} = F_{yc}$$

Y la resistencia nominal a flexión del ala en tracción está dada por:

$$F_{nt} = F_{yt}$$

4.6.1.13.4. DUCTILIDAD

Tanto las secciones compactas como las no compactas deben cumplir con el siguiente requerimiento de ductilidad:

$$D_p \leq 0.42D_t$$

4.6.2. DISEÑO A CORTE

4.6.2.1. FACTOR DE RESISTENCIA

Para la verificación de los elementos al corte, la norma AASHTO LRFD indica que se debe utilizar un factor de resistencia de $\phi_v = 1.0$.

4.6.2.2. POSICIÓN DE CARGA VIVA QUE PRODUCE EL MAYOR CORTE

Como se indica en la Sección 4.1.2.5, la carga vehicular de diseño debe ser posicionada transversalmente de forma que produzca los efectos más desfavorables.

En el caso de solicitaciones por corte, la posición del camión de diseño que produce el mayor esfuerzo es aquella en que se ubica su último eje sobre el apoyo de la viga compuesta. Además, se debe considerar que los dos últimos ejes están a la distancia mínima de 4.27 m. El corte máximo V_{max} se da en el apoyo, como muestra la Figura 4.9.

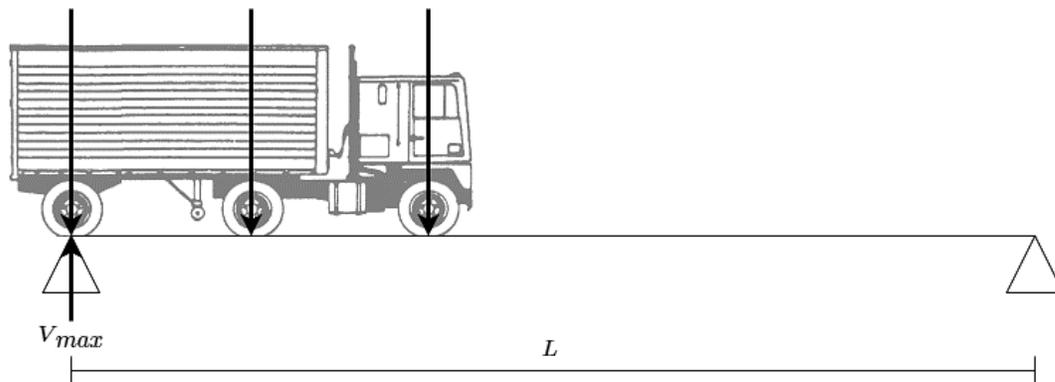


Figura 4.9: Posición de camión de diseño que produce el mayor corte

En el caso del tándem de diseño, se debe ubicar también el último de sus ejes sobre el apoyo, como se muestra en la Figura 4.10.

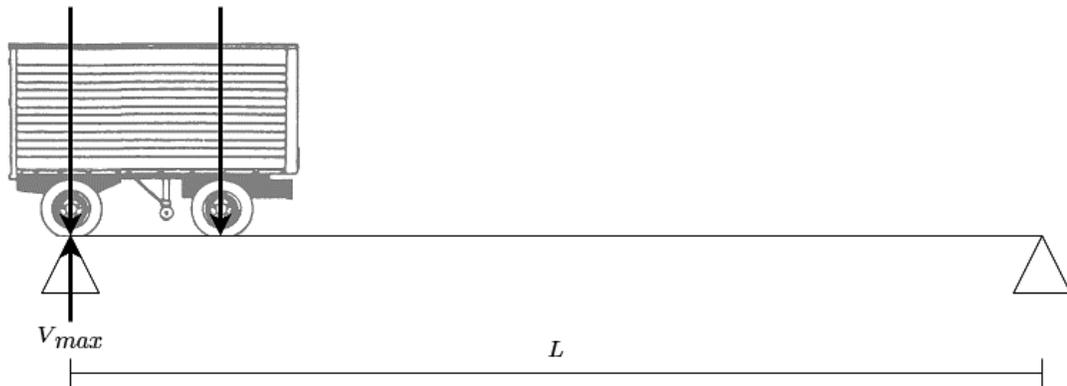


Figura 4.10: Posición de tándem de diseño que produce el mayor corte

La posición para la carga de fatiga es la misma que en el caso del camión de diseño, sin embargo, se debe considerar la distancia fija de 9.15 m entre sus dos últimos ejes. Esto se muestra en la Figura 4.11.

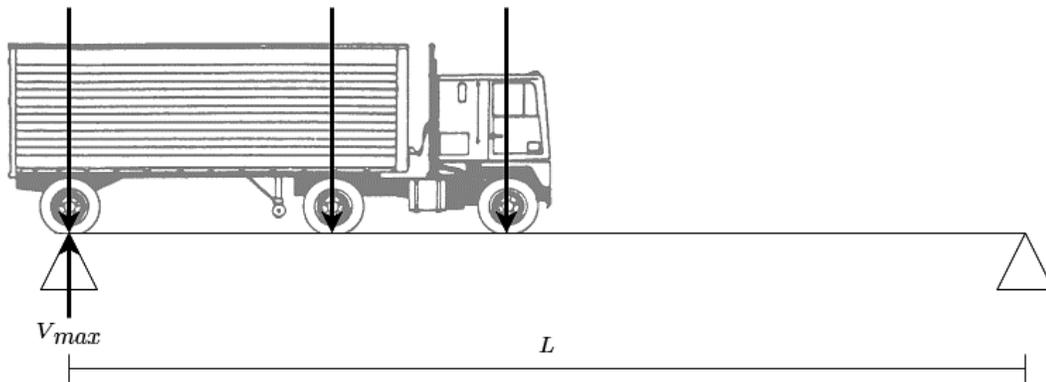


Figura 4.11: Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte

4.6.2.3. RESISTENCIA AL CORTE

En el estado límite de resistencia, las almas de las vigas deben cumplir con el siguiente requerimiento:

$$V_u \leq \phi_v V_n$$

donde:

V_u : corte en el alma debido a las cargas mayoradas (tonf).

La resistencia al corte de un alma en su extremo, para vigas continuamente arriostradas como en el caso compuesto, se define como:

$$V_n = C V_p$$

, cuando $\frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{E_s k}{F_{yw}}}$:

$$C = 1.0$$

, cuando $1.12 \sqrt{\frac{E_s k}{F_{yw}}} < \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \sqrt{\frac{E_s k}{F_{yw}}}$:

$$C = \frac{1.12}{D/t_w} \sqrt{\frac{E_s k}{F_{yw}}}$$

, y cuando $1.40 \sqrt{\frac{E_s k}{F_{yw}}} < \frac{D}{t_w}$:

$$C = \frac{1.12}{(D/t_w)^2} \frac{E_s k}{F_{yw}}$$

Y:

$$V_p = 0.58F_{yw}Dt_w$$

4.7. CONECTORES DE CORTE

4.7.1. FACTOR DE RESISTENCIA

Para la verificación de los conectores de corte, la norma AASHTO LRFD indica que se debe utilizar un factor de resistencia de $\phi_{sc} = 0.85$.

4.7.2. RESISTENCIA A LA FATIGA

Para un conector de corte canal individual, cuando el ADTT de la faja de tránsito del puente es mayor o igual a 1850 camiones por día, se debe utilizar la combinación de Fatiga I, incluida en la Tabla 4.3 de la Sección 4.3.3 de este trabajo, y su resistencia a la fatiga Z_r (tonf) se definirá como:

$$Z_r = 0.375w$$

donde:

w : largo del ala del canal en la dirección longitudinal del puente (cm).

4.7.3. FUERZA DE CORTE NOMINAL

En tramos simplemente apoyados, la fuerza de corte total nominal P entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga viva más impacto se define como:

$$P = P_p$$

La fuerza longitudinal total en la losa de hormigón en el punto de máximo momento por carga viva más impacto P_p (tonf) debe ser tomada como:

$$P_p = \min(0.85f'_c b_c t_c, F_{yw} D t_w + F_{yt} b_{ft} t_{ft} + F_{yc} b_{fc} t_{fc})$$

donde:

b_c : ancho efectivo de la losa de hormigón (mm).
 t_c : espesor de la losa de hormigón (mm).

4.7.4. RESISTENCIA AL CORTE

La resistencia al corte de un conector de corte individual Q_r está dada por:

$$Q_r = \phi_{sc} Q_n$$

La resistencia nominal Q_n (tonf), se define como:

$$Q_n = 0.3(t_{fsc} + 0.5t_{wsc})L_c \sqrt{f'_c E_c}$$

donde:

t_{fsc} : espesor del ala del conector de corte (mm).
 t_{wsc} : espesor del alma del conector de corte (mm).
 L_c : largo del perfil del conector de corte (mm).

4.7.5. NÚMERO DE CONECTORES DE CORTE

La cantidad mínima de conectores de corte entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga, indicado en la Figura 4.8, está dada por:

$$n_{sc} = \frac{P}{Q_r}$$

4.7.6. SEPARACIÓN LONGITUDINAL

La separación longitudinal entre conectores de corte p_{sc} debe cumplir con el siguiente requerimiento:

$$p_{sc} \leq \frac{nZ_r}{V_{fat}}$$

La resistencia longitudinal a corte por fatiga por unidad de largo está dada por:

$$V_{fat} = \frac{V_f Q}{I}$$

donde:

V_f : corte vertical debido a la combinación de carga de fatiga (tonf).

Q : primer momento del área transformada de hormigón en torno al eje neutro de la sección compuesta en el corto plazo (cm³).

I : inercia de la sección compuesta en el corto plazo (cm⁴).

Además, la separación longitudinal no debe exceder el máximo normativo de 600 mm indicado en la Sección 3.2.6.3, y debe ser tal que el número de conectores de corte necesarios entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga indicado en la Sección 4.7.5 se logre disponer.

4.8. DIAGRAMA DE FLUJO DEL DISEÑO

La Figura 4.12 muestra el diagrama de flujo del proceso iterativo de diseño que se sigue para la determinación de resultados. Este diagrama rige las memorias de cálculo incluidas en el Anexo A, para cada luz en estudio.

El proceso se basa en el cumplimiento de los requerimientos descritos en este capítulo a partir del sistema definido en el Capítulo 3.

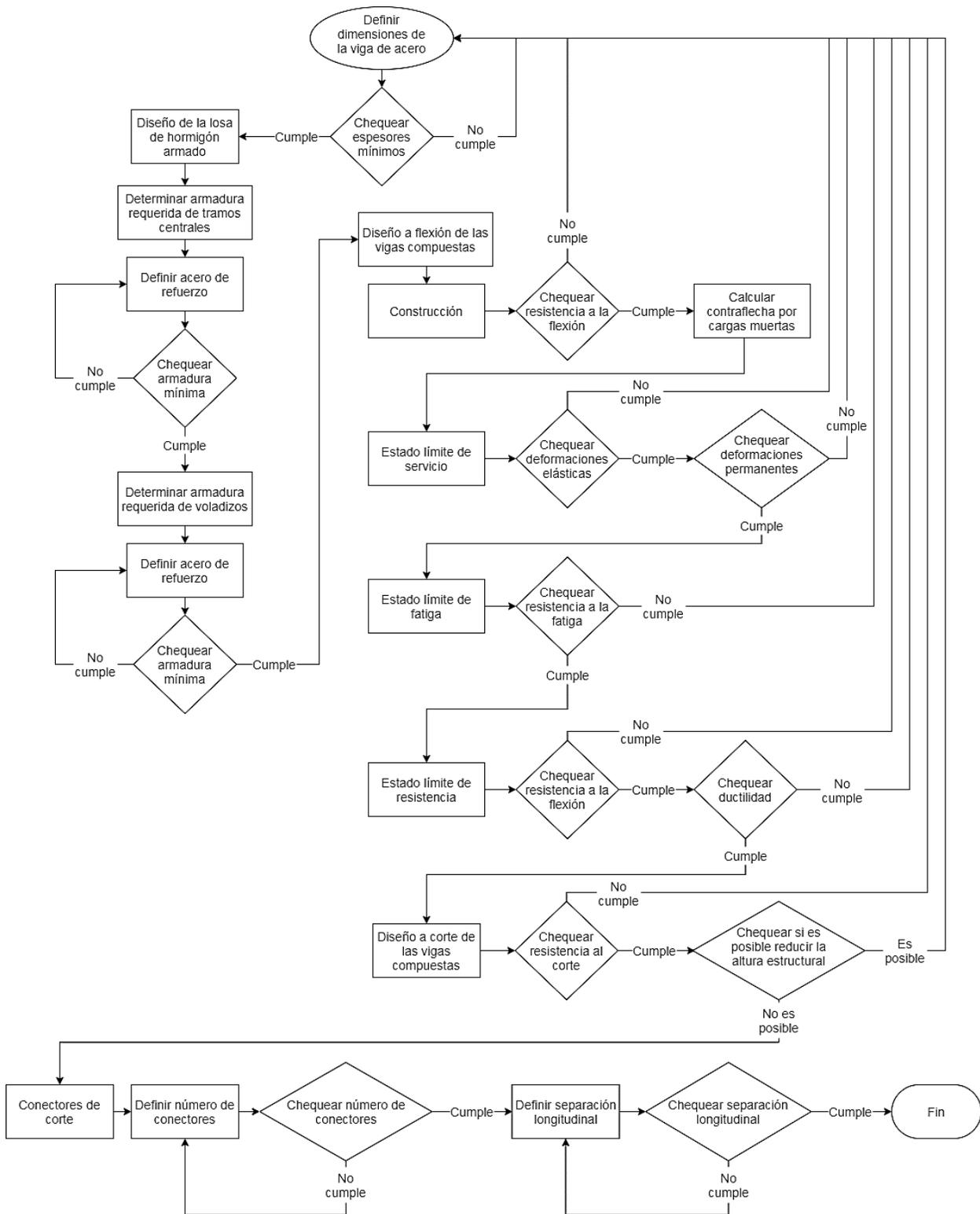


Figura 4.12: Diagrama de flujo del diseño

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ÁBACOS DE CÁLCULO

En este capítulo se presentan las dimensiones obtenidas para cada elemento estructural del sistema, resultados extraídos de las memorias de cálculo incluidas en el Anexo A para cada luz en estudio.

Se incluye además el requerimiento que controla el diseño de cada luz, es decir, el que no permite una mayor reducción en la altura estructural obtenida que resulte eficiente.

Finalmente, se presentan los ábacos de cálculo que permiten el pre dimensionamiento de estructuras que utilicen el sistema propuesto para luces intermedias entre las estudiadas.

5.1. RESULTADOS

A continuación, se detallan los resultados extraídos de las memorias de cálculo para las superestructuras diseñadas.

5.1.1. ESPESOR DE LOSAS Y RELACIONES ENTRE ALTURA ESTRUCTURAL Y LUZ

La Tabla 5.1 muestra los espesores de losa obtenidos para cada luz en estudio y su correspondiente relación entre altura estructural y luz. La Figura 5.1 se adjunta como apoyo gráfico.

Tabla 5.1: Espesor de losas y relaciones entre altura estructural y luz

Luz (m)	Espesor de losa (cm)	Relación altura estructural / luz
10	41.4	1/24
15	47	1/32
20	57	1/35
25	70	1/36
30	88	1/34
35	99	1/35
40	126	1/32

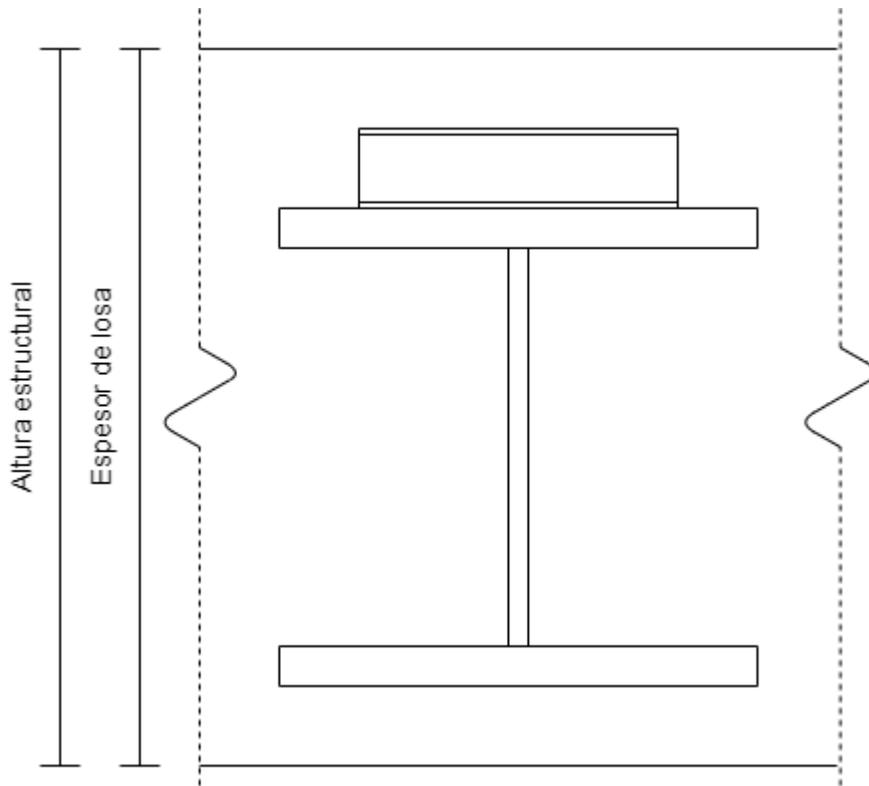


Figura 5.1: Espesor de losa o altura estructural

5.1.2. DIMENSIONES DE LAS VIGAS DE ACERO

La Tabla 5.2 muestra las dimensiones de las vigas de acero obtenidas para cada luz en estudio. La Figura 5.2 se adjunta como apoyo gráfico.

Tabla 5.2: Dimensiones de las vigas de acero

Luz (m)	Altura del alma (mm)	Espesor del alma (mm)	Ancho del ala (mm)	Espesor del ala (mm)
10	150	16	300	22
15	170	16	400	40
20	270	16	400	40
25	400	16	420	40
30	580	16	420	40
35	670	16	420	50
40	940	16	420	50

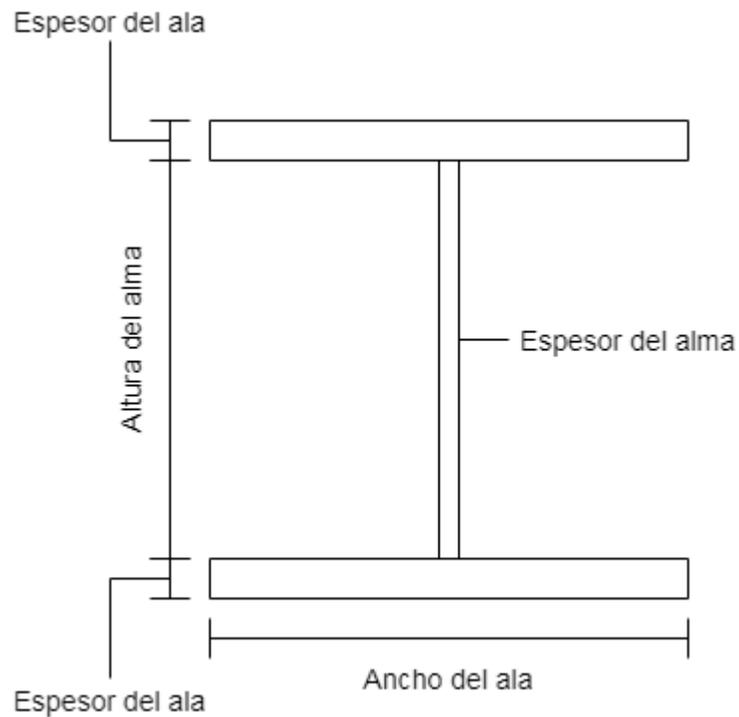


Figura 5.2: Dimensiones de las vigas de acero

5.1.3. ACERO DE REFUERZO

A continuación, se indican las barras de acero dispuestas en los tramos centrales y en voladizo de las losas de cada luz en estudio.

Se utilizó el criterio de barras mínimas y espaciamiento máximo según espesor descrito en la Sección 3.2.5.3.

5.1.3.1. TRAMOS CENTRALES

5.1.3.1.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

La Tabla 5.3 muestra las barras de acero dispuestas en cada capa para la dirección principal de los tramos centrales en cada luz en estudio.

Tabla 5.3: Acero de refuerzo en dirección principal en tramos centrales

Luz (m)	Capa 1	Capa 2
10	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
15	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
20	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
25	ϕ 10 @ 20	ϕ 10 @ 25
30	ϕ 10 @ 20	ϕ 12 @ 25
35	ϕ 12 @ 25	ϕ 12 @ 25
40	ϕ 18 @ 25	ϕ 18 @ 25

5.1.3.1.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

La Tabla 5.4 muestra las barras de acero dispuestas en cada capa para la dirección secundaria de los tramos centrales en cada luz en estudio.

Tabla 5.4: Acero de refuerzo en dirección secundaria en tramos centrales

Luz (m)	Capa 1	Capa 2
10	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
15	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
20	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
25	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
30	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
35	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
40	ϕ 18 @ 25	ϕ 18 @ 25

5.1.3.2. VOLADIZOS

5.1.3.2.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

La Tabla 5.5 muestra las barras de acero dispuestas en cada capa para la dirección principal de los tramos en voladizo en cada luz en estudio.

Tabla 5.5: Acero de refuerzo en dirección principal en voladizos

Luz (m)	Capa 1	Capa 2
10	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
15	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
20	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
25	ϕ 10 @ 20	ϕ 10 @ 25
30	ϕ 10 @ 20	ϕ 12 @ 25
35	ϕ 12 @ 25	ϕ 12 @ 25
40	ϕ 18 @ 25	ϕ 18 @ 25

5.1.3.2.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Por último, la Tabla 5.6 muestra las barras de acero dispuestas en cada capa para la dirección principal de los tramos en voladizo en cada luz en estudio.

Tabla 5.6: Acero de refuerzo en dirección secundaria en voladizos

Luz (m)	Capa 1	Capa 2
10	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
15	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
20	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
25	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
30	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
35	ϕ 10 @ 25	ϕ 10 @ 25
40	ϕ 18 @ 25	ϕ 18 @ 25

5.1.4. CONECTORES DE CORTE

La Tabla 5.7 indica las propiedades de los conectores de corte dispuestos en cada luz en estudio. La Figura 5.3 se adjunta como apoyo gráfico.

Como indica la Sección 3.3.2, se utiliza el mismo perfil canal en todas las luces, mientras que se cambian los valores referentes a largo del perfil, número y separación longitudinal.

Tabla 5.7: Propiedades de los conectores de corte

Luz (m)	Altura (mm)	Largo del ala (mm)	Largo del perfil (mm)	Espesor del alma (mm)	Espesor del ala (mm)	Número	Separación longitudinal (mm)
10	80	40	200	4	4	23	130
15	80	40	300	4	4	17	330
20	80	40	300	4	4	21	390
25	80	40	300	4	4	26	410
30	80	40	300	4	4	32	410
35	80	40	300	4	4	36	430
40	80	40	300	4	4	46	390

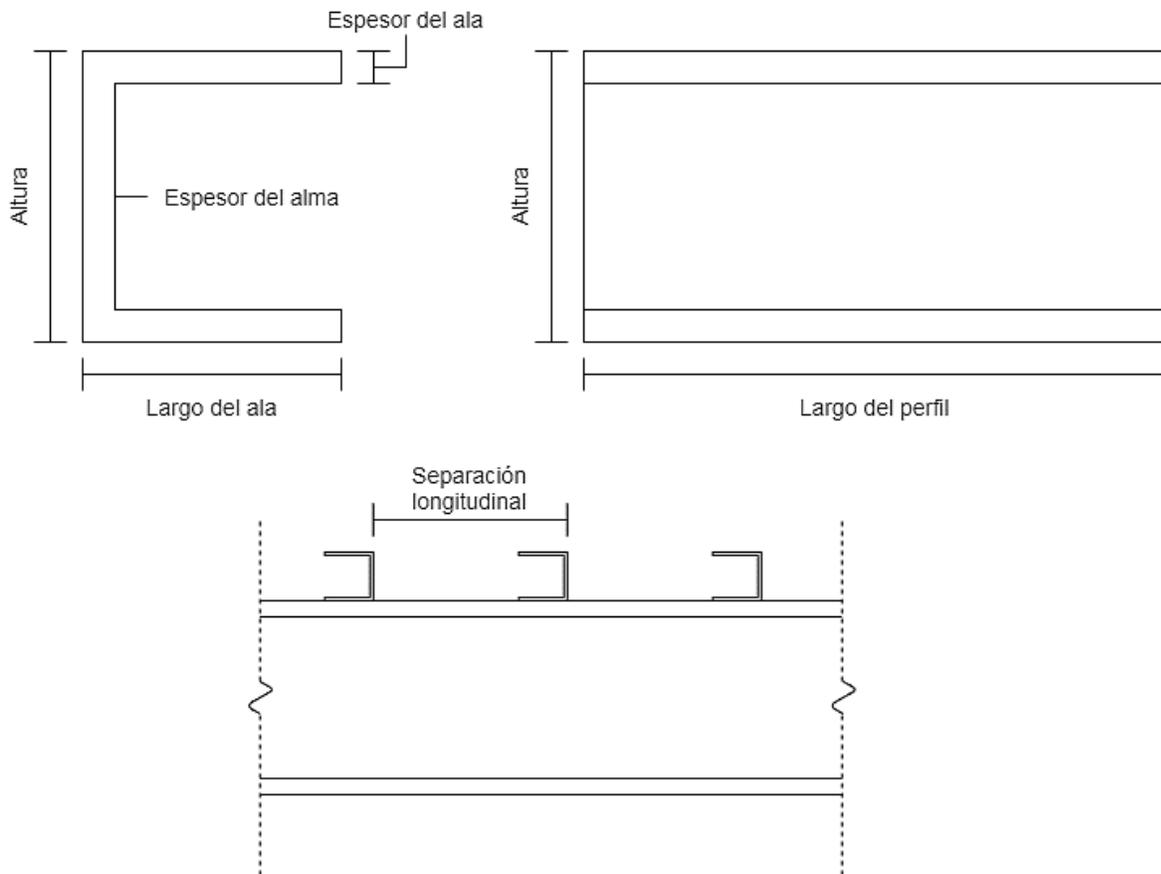


Figura 5.3: Propiedades de los conectores de corte

5.1.5. REQUERIMIENTOS QUE CONTROLAN EL DISEÑO

La Tabla 5.8 muestra el requerimiento que controla el diseño para cada luz en estudio, no permitiendo una mayor reducción en la altura estructural obtenida que resulte eficiente.

Se indica el nombre del requerimiento, así como el estado límite y la sección del Capítulo 4 referente a aquel criterio.

Tabla 5.8: Requerimientos que controlan el diseño

Luz (m)	Requerimiento que controla el diseño	Estado límite	Sección
10	Ductilidad	Estado límite de resistencia	4.6.1.13.4
15	Esfuerzo de tracción en el hormigón por deformaciones permanentes	Estado límite de servicio	4.6.1.11.2
20	Esfuerzo de tracción en el hormigón por deformaciones permanentes	Estado límite de servicio	4.6.1.11.2
25	Resistencia a flexión	Estado límite de resistencia	4.6.1.13.2
30	Resistencia a flexión	Estado límite de resistencia	4.6.1.13.2
35	Resistencia a flexión	Estado límite de resistencia	4.6.1.13.2
40	Resistencia a flexión	Estado límite de resistencia	4.6.1.13.2

5.2. ÁBACOS DE CÁLCULO

Para obtener los ábacos de cálculo que permiten el pre dimensionamiento de nuevas estructuras a partir de los resultados obtenidos para cada luz en estudio, se utilizan las tablas encontradas en la Sección 5.1.

En particular, se debe considerar que las dimensiones de las vigas de acero determinan la altura estructural de cada luz, por lo que son ellas, resumidas en la Tabla 5.2, las que se incluyen en los ábacos de cálculo.

Así, estos ábacos determinan la viga de acero a embeber para una luz en particular, cuando se encuentra dentro del rango estudiado entre 10 y 40 m. Esta debe ser utilizada como punto de partida en el proceso iterativo de la planilla de cálculo

programada y su respectiva losa debe ser verificada estructuralmente, permitiendo además la determinación del acero de refuerzo y los conectores de corte.

5.2.1. ALTURA DEL ALMA

En primer lugar, se debe determinar la altura de alma trazando una línea horizontal que intersecta ambas reglas verticales del ábaco incluido en la Figura 5.4.

5.2.2. ANCHO DEL ALA Y ESPESOR DEL ALA

Utilizando la altura del alma obtenida mediante el primer ábaco, se procede a obtener las dimensiones de las alas trazando una línea horizontal que intersecta las reglas verticales del ábaco incluido en la Figura 5.5.

Las zonas marcadas mediante rectángulos corresponden a rangos para los cuales las dimensiones a determinar se mantienen fijas.

El espesor del alma se considera también fijo de 16 mm, como se indica en la Sección 3.3.1 y como se utilizó en todos los cálculos de este trabajo.

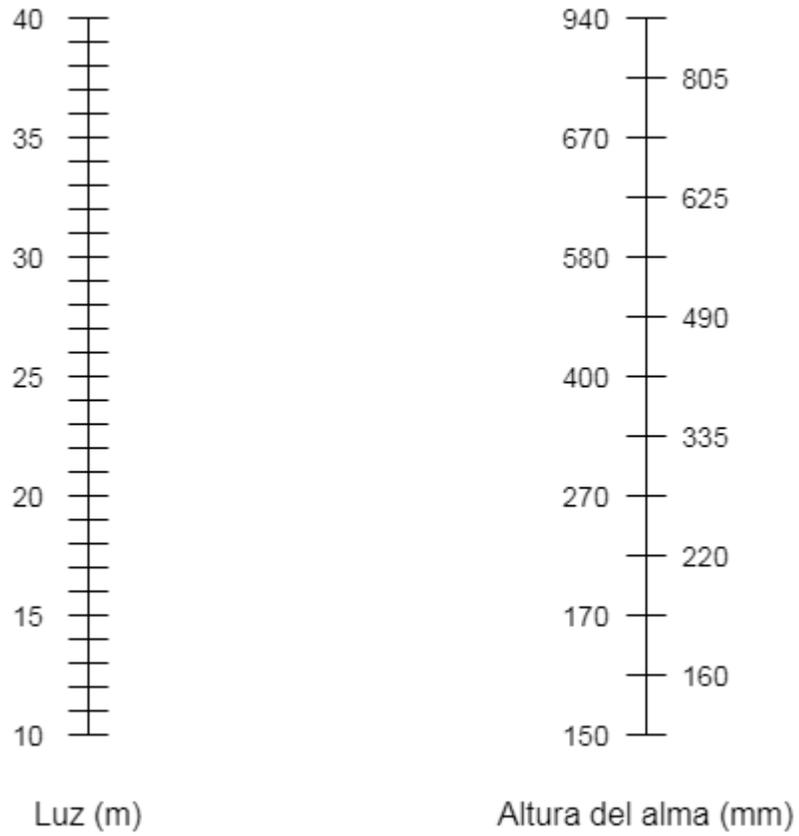


Figura 5.4: Ábaco de cálculo para determinar la altura del alma

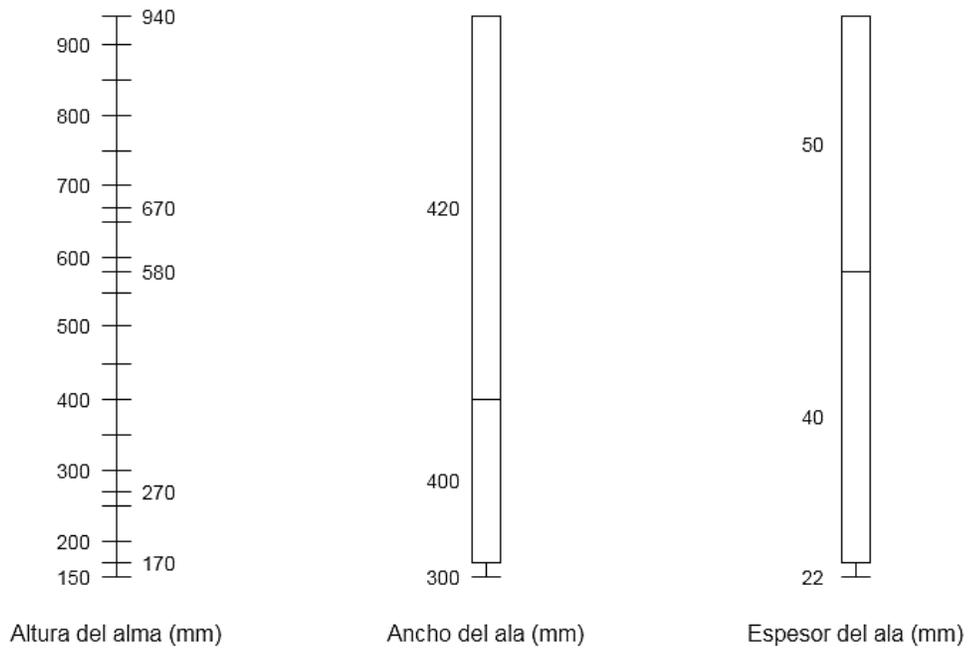


Figura 5.5: Ábaco de cálculo para determinar el ancho del ala y el espesor del ala

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se lleva a cabo un análisis de los resultados obtenidos para los principales focos del trabajo. Se hace énfasis en las relaciones entre altura estructural y luz obtenidas y su comportamiento respecto a los cambios en la luz.

Se realizan también análisis respecto a la cantidad de materiales utilizados en las losas de hormigón y sus respectivas vigas embebidas, con el fin de comparar estos valores con los de otras tecnologías en uso.

6.1. RELACIONES ENTRE ALTURA ESTRUCTURAL Y LUZ

6.1.1. COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN ENTRE ALTURA ESTRUCTURAL Y LUZ

La Sección 5.1.1 describe los resultados obtenidos para el espesor de losas y las relaciones entre altura estructural y luz. Los resultados indican relaciones entre altura estructural y luz entre 1/24 y 1/36.

A excepción de la relación obtenida para la luz de 10 m, las demás oscilan entre 1/32 y 1/36, valores eficientes y comparables a los entregados por la tecnología River Bridge descrita en la Sección 1.1. La Figura 6.1 muestra este comportamiento.

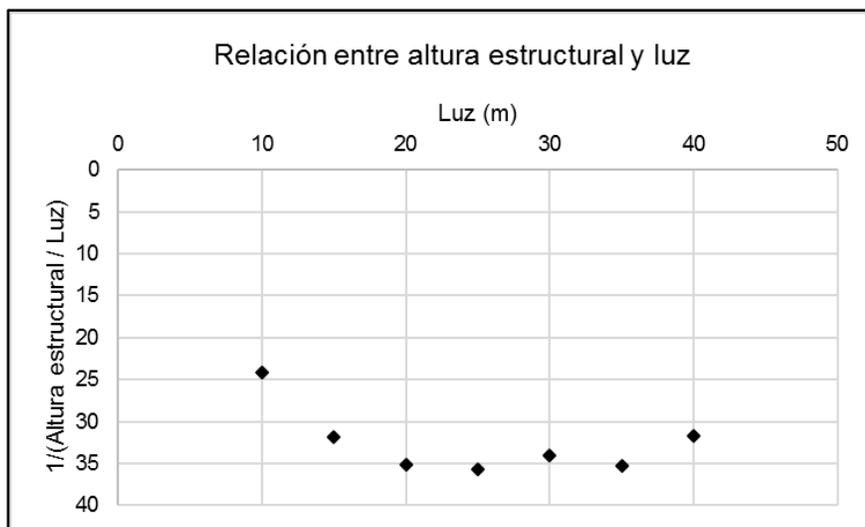


Figura 6.1: Relación entre altura estructural y luz

La luz de 10 m presenta una relación de 1/24, lejana a los demás valores, esto debido al requerimiento de ductilidad al cual se hace relación en la Tabla 5.8, explicación que se realiza en mayor profundidad en la Sección 6.6. Tras esto, las relaciones tienden a ir mejorando hasta alcanzar un valor de 1/36 al llegar a la luz de 25 m. Posteriormente, el valor salta a 1/34 para la luz de 30 m y, tras mejorar a 1/35 en los 35 m, vuelve a aumentar significativamente hasta los 1/32.

Sin considerar el salto ocurrido en la luz de 30 m, se puede ver un comportamiento parabólico que indica como más eficiente la reducción de altura estructural del sistema entre los 20 y los 35 m. Esto puede explicarse en valores óptimos entre la resistencia que brinda la estructura diseñada y la flexión que provocan las solicitaciones, las cuales aumentan a una razón mayor a 1:1 a medida que aumentan a las luces.

Se puede argumentar también que el sistema es eficiente en reducir las alturas estructurales respecto a las tecnologías actualmente en uso en nuestro país (Sección 2.2), desde los 15 m en adelante, eliminando su competencia para este ítem si la luz corresponde a 10 m.

6.1.2. VALOR PROMEDIO DE LA RELACIÓN ENTRE ALTURA ESTRUCTURAL Y LUZ

Utilizando los resultados de la Tabla 5.1, se tiene que el valor promedio de la relación entre altura estructural y luz para las luces estudiadas corresponde a 1/32. Si no se considera la relación obtenida para la luz de 10 m, este promedio mejora a 1/34.

Para el rango observado como eficiente en la Sección 6.1.1 entre los 20 y 35 m, el valor promedio para la relación entre altura estructural y luz mejora a 1/35. La mejoría es leve, en un grado producto del salto en la relación obtenida para la luz de 30 m que se observa en la Figura 6.1.

6.2. ESPESOR DE LOSAS

6.2.1. COMPORTAMIENTO DEL ESPESOR DE LOSA

La Sección 5.1.1 describe los resultados obtenidos para el espesor de losas y las relaciones entre altura estructural y luz. La Figura 6.2 muestra el comportamiento de estos espesores respecto al aumento en las luces en estudio.

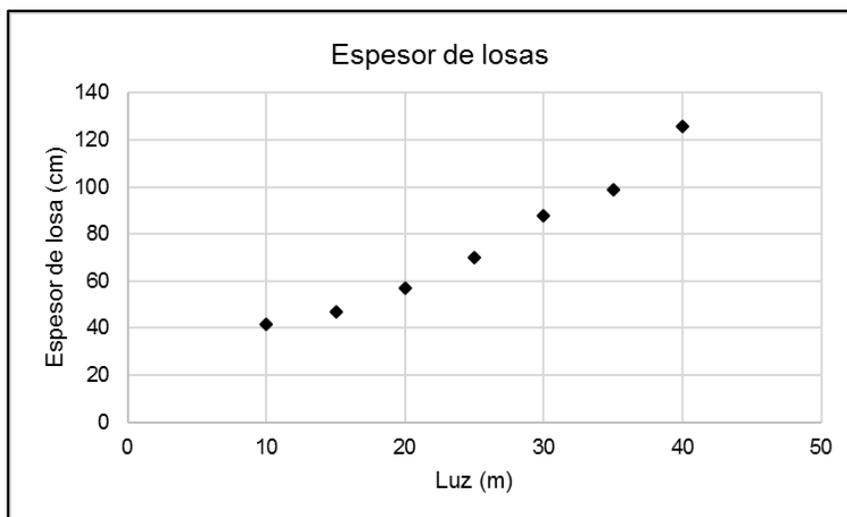


Figura 6.2: Espesor de losas

6.2.2. ESPESOR DE LOSAS Y ALTURA DE VIGAS

La Tabla 6.1 compara el espesor total de las secciones transversales obtenidas con sus respectivas alturas de viga.

Tabla 6.1: Espesor de losa y altura de viga

Luz (m)	Espesor de losa (cm)	Altura de viga (cm)	Altura de viga / Espesor de losa
10	41.4	19.4	47%
15	47	25	53%
20	57	35	61%
25	70	48	69%
30	88	66	75%
35	99	77	78%
40	126	104	83%

Como fue definido en la Sección 3.3, la diferencia entre ambas dimensiones no es más que el recubrimiento superior e inferior de 7 cm sumado a la altura de los conectores de corte, de 8 cm. Esto suma una diferencia total de 22 cm. Así, y como se explica en la Sección 5.2, los ábacos de cálculo sólo necesitan calcular las dimensiones de la viga para determinar la sección inicial del proceso iterativo de diseño.

Respecto a los porcentajes observados y al hecho anterior, se puede argumentar que las vigas de acero tienen una mayor participación en la resistencia del sistema completo a medida que las luces aumentan, al tiempo que el hormigón comienza a aliviar sus esfuerzos. Esto se explica además en los requerimientos que controlan el diseño resumidos en la Tabla 5.8, los cuales dejan de ser respectivos netamente al hormigón a partir de la luz de 25 m, mostrando que el acero estructural comienza a trabajar en mayor medida, lo que se explica con mayor detalle en la Sección 6.6.

6.3. DIMENSIONES DE LAS VIGAS DE ACERO

La Tabla 5.2 muestra las dimensiones de las vigas de acero obtenidas para cada luz en estudio. En ella, se puede observar que la altura de vigas tiene el mismo comportamiento que el espesor de losas detallado en la Figura 6.2.

Por otra parte, y como se observa además en los ábacos de cálculo, los anchos de ala tienen un comportamiento en escalones, manteniéndose en valores fijos de 400 y 420 mm para más de una luz. Esto se ilustra en la Figura 6.3.

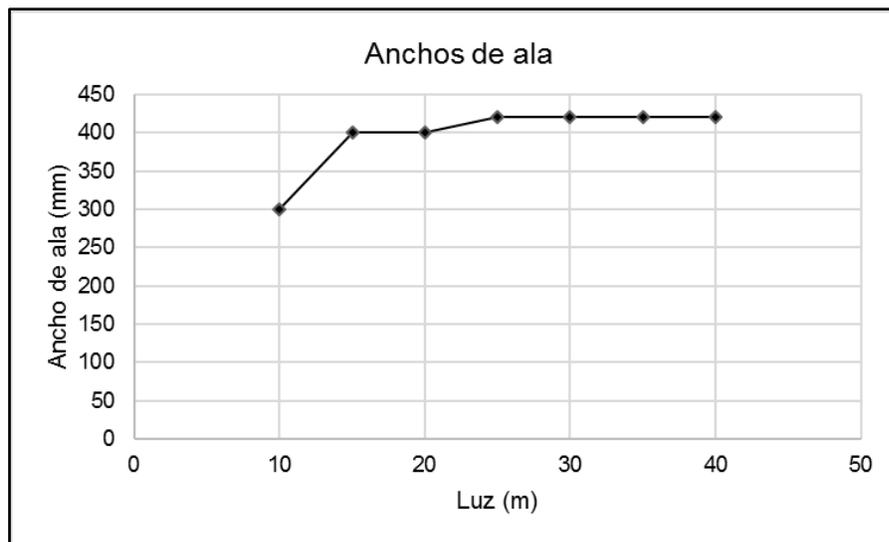


Figura 6.3: Anchos de ala

Es correcto decir que el valor se hace constante en 420 mm debido a que ese es el límite que se impuso al aumento en el ancho del ala para cada luz en la Sección 3.3.1. Esto impide obtener menores alturas estructurales en las luces de 25 m en adelante a partir de un aumento de esta dimensión. Sin embargo, hay razones que no permiten que las luces anteriores a estas utilicen este valor máximo de 420 mm.

En el caso de la luz de 10 m, un aumento en el ancho del ala con el fin de reducir la altura estructural resultó fallido, comenzando a regir el requerimiento de ductilidad detallado en la Tabla 5.8.

Para las luces siguientes, de 15 y 20 m, el aumento de ancho de alas de 400 a 420 mm, para llevarlas al límite establecido no resultó ser eficiente. Este aumento generaba disminuciones en la altura estructural que no justificaban el aumento de material.

Respecto a los espesores de ala, el comportamiento de escalones es similar, manteniéndose en valores fijos de 40 y 50 mm para más de una luz. Esto se ilustra en la Figura 6.4.

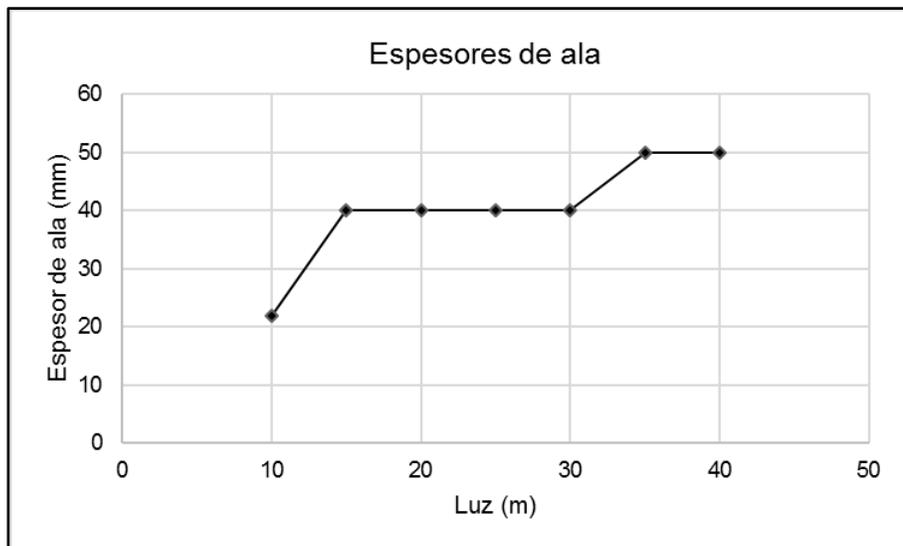


Figura 6.4: Espesores de ala

La explicación para no aumentar al límite máximo de 50 mm el espesor de todas las alas en busca de menores alturas estructurales es similar a la del caso del ancho de alas. La luz de 10 m no lo permite debido al requerimiento de ductilidad, y en las luces de 15, 20, 25 y 30 m este aumento de espesor no probaba disminuir suficientemente la altura como para justificar el mayor uso de acero.

6.4. ACERO DE REFUERZO

La Sección 5.1.3 indica los resultados obtenidos para el acero de refuerzo dispuesto en la losa de hormigón armado de cada luz.

El diseño de las losas de hormigón armado, tanto en sus tramos centrales como en los voladizos resultó regido por los requerimientos de cuantía mínima determinados a partir de la Tabla 3.1, por lo que dependieron únicamente de los espesores de losa obtenidos.

Para cualquier luz intermedia entre las estudiadas, e incluso fuera de este rango, se entiende que este comportamiento se mantiene, por lo que el acero de refuerzo es proporcional a la altura de sección para cualquier estructura diseñada con este sistema.

El acero de refuerzo fue calculado utilizando dos capas de acero en la dirección primaria y dos en la dirección secundaria, como se requería según la Sección 4.5.

6.5. CONECTORES DE CORTE

La Tabla 5.7 indica las propiedades de los conectores de corte dispuestos en cada luz en estudio.

Como indica la Sección 3.3.2, se utiliza el mismo perfil canal en todas las luces, mientras que se cambian los valores referentes a largo del perfil, número y separación longitudinal.

Respecto al largo de perfil, se utilizó el mayor posible dentro de los límites establecidos para la distancia mínima al borde en la Sección 3.2.6.2, redondeado a los 100 mm. Cabe indicar que de entre las dimensiones modificables de los conectores de corte, el largo del perfil es el más determinante a la hora de reducir el número requerido, como indica la fórmula de la Sección 4.7.4.

Para el número de conectores, se utilizó el menor entero que cumpliera con los requerimientos asociados.

En el caso de la separación longitudinal, se utilizó la máxima posible dentro de los requerimientos, redondeada a los 10 mm.

6.6. REQUERIMIENTOS QUE CONTROLAN EL DISEÑO

El objetivo principal del sistema estructural propuesto en este trabajo es la reducción de altura estructural para una misma luz respecto a otros. Por esto, un punto

vital para comprender los resultados obtenidos es saber qué requerimiento es el que no permitió una mayor reducción en la altura estructural obtenida que resultara eficiente.

La capacidad de reducción de altura estructural de la tecnología propuesta no podría ser tal si no se considera que el moldaje que soporta el hormigón colado antes de fraguar es sostenido por las vigas de acero mediante un sistema que no se incluye en los alcances de este trabajo, como se explicó en las Secciones 3.5 y 4.6.1.10. Así, los esfuerzos elásticos en el hormigón se activan sólo para las cargas que sostiene la sección compuesta en el corto plazo y la sección compuesta en el largo plazo, es decir, la carga muerta superpuesta (DW) y las cargas vivas (LL), respectivamente.

Otra implicancia de lo anterior es la contraflecha que debe darse a las vigas de acero para contrarrestar la deformación por cargas muertas, calculada según la Sección 4.6.1.10.2.

La Tabla 5.8 resume el requerimiento que se observó controlando el diseño para cada luz en estudio, lo que explica asuntos como la relación entre altura estructural y luz y las dimensiones de las vigas de acero de ciertas luces.

Se observa que el diseño para la luz de 10 m está controlado por el requerimiento de ductilidad de la Sección 4.6.1.13.4. Este requerimiento indica que hay distancia desde el borde superior de la losa hasta el eje neutro plástico límite respecto a la altura total de la sección. Así, tal mejora como el aumento en las dimensiones de las alas de la viga de acero resultó no permitir una reducción en la altura estructural de la losa diseñada, debido a que una menor altura total, bajo una distancia al eje neutro plástico similar escapaba de los límites del requerimiento. Esto explica la relación entre altura estructural y luz lejos del promedio.

Para las luces de 15 y 20 m, el diseño está controlado por el requerimiento de esfuerzo de tracción en el hormigón de la Sección 4.6.1.11.2. Este requerimiento pone un límite al esfuerzo en la fibra extrema del hormigón en tracción que sólo se puede cumplir mediante el logro de una adecuada inercia de la viga de acero. Si bien el aumento en la inercia al aumentar las dimensiones de las alas podría permitir disminuir la altura de la viga, una menor distancia entre ellas hace que el aumento de inercia no sea suficiente y no justifique el mayor uso de material.

El diseño de las cuatro luces más altas está condicionado por la resistencia a flexión en su estado límite de resistencia, indicado en la Sección 4.6.1.13.2. Este requerimiento es netamente dependiente de la capacidad de soportar el momento que posee la sección compuesta, la cual resiste gracias a su momento plástico. Es así como aumentar las dimensiones de la viga de acero se hace más eficiente a medida que aumenta la luz, siendo el caso del ancho de alas. Aumentar el espesor de alas, sin

embargo, comienza a ser eficiente para reducir significativamente la altura estructural en las luces de 35 y 40 m, no permitiendo que se escapen del promedio ni del valor esperado mientras mantienen un uso de material moderado.

En trabajos futuros se deberán estudiar además dos puntos que pudieran sumarse a los requerimientos considerados; la deformación plástica del sistema en el tiempo, que potencialmente podría ir traspasando esfuerzos al hormigón; y el nivel de seguridad que implica admitir el límite de esfuerzo de tracción en el hormigón por deformaciones permanentes sin considerar fisuración posible por retracción o deformaciones térmicas.

6.7. CANTIDADES DE MATERIAL

6.7.1. HORMIGÓN

La Tabla 6.2 muestra el volumen de hormigón por metro lineal de estructura y por metro cuadrado de losa para las seis luces en estudio, determinado de forma aproximada a partir de las dimensiones de espesor de losa y ancho total de tablero, sin restar el volumen ocupado por las vigas de acero embebidas. La Figura 6.5 se adjunta como apoyo gráfico.

Tabla 6.2: Volúmenes de hormigón por metro lineal y por metro cuadrado

Luz (m)	Volumen de hormigón por metro lineal (m ³ /m)	Volumen de hormigón por metro cuadrado (m ³ /m ²)*
10	4.98	0.41
15	5.65	0.47
20	6.86	0.57
25	8.42	0.70
30	10.59	0.88
35	11.91	0.99
40	15.16	1.26

*: El volumen de hormigón por metro cuadrado corresponde al espesor de losa.

Estos volúmenes permiten comparar la utilización de hormigón del sistema respecto a las tecnologías actualmente en uso. En particular, se compara el resultado obtenido para la luz de 20 m con los puentes losas de hormigón armado (Sección 2.2.1) y los puentes de vigas de acero con losa de hormigón armado (Sección 2.2.4), bajo el supuesto de que el tablero mantiene un ancho total de 12.03 m.

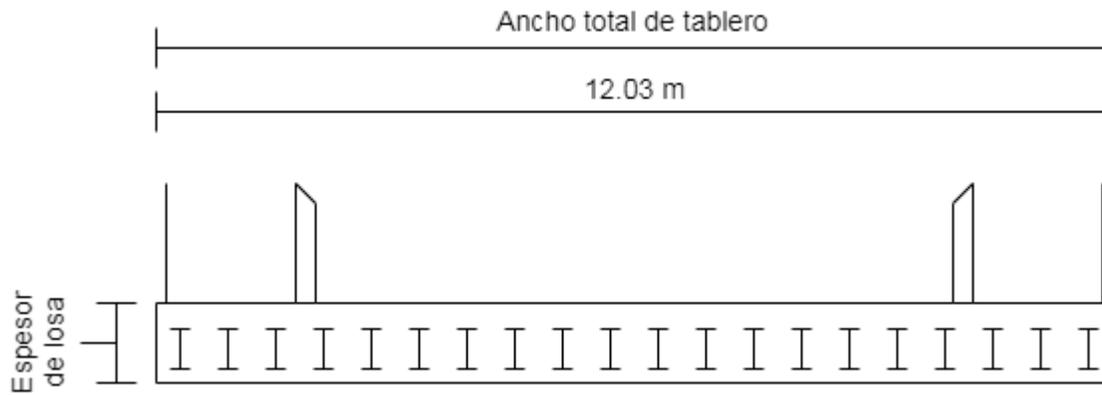


Figura 6.5: Espesor de losa y ancho total de tablero

En el caso de la primera tecnología, un puente losa de hormigón armado de relación entre altura estructural y luz de $1/25$ tendría un volumen de hormigón por metro lineal de estructura de $9.62 \text{ m}^3/\text{m}$ y un volumen de hormigón por metro cuadrado de losa de $0.8 \text{ m}^3/\text{m}^2$. El sistema propuesto, en comparación con este puente, utilizaría un 29% menos de hormigón para una luz de 20 m.

En el caso de la segunda tecnología, considerando que sobre las vigas de acero se ubica una losa de hormigón de 25 cm, un puente de vigas de acero con losa de hormigón armado tendría un volumen de hormigón por metro lineal de estructura de $3 \text{ m}^3/\text{m}$ y un volumen de hormigón por metro cuadrado de losa de $0.25 \text{ m}^3/\text{m}^2$. El sistema propuesto, en comparación con este puente, utilizaría un 128% más de hormigón para una luz de 20 m.

6.7.2. ACERO DE VIGAS

La Tabla 6.3 muestra los kg de acero de vigas por metro lineal de estructura y los kg de acero de vigas por metro cuadrado de losa para las seis luces en estudio, determinados a partir de las dimensiones de la Tabla 5.2. El peso no incluye el acero de los conectores de corte.

Estos pesos permiten comparar la utilización de acero del sistema respecto a las tecnologías en uso. En particular, se compara el resultado obtenido para la luz de 20 m con los puentes de vigas de acero con losa de hormigón armado (Sección 2.2.4), bajo el supuesto de que el tablero mantiene un ancho total de 12.03 m.

Tabla 6.3: Kg de acero de vigas por metro lineal y por metro cuadrado

Luz (m)	Acero de vigas por metro lineal (kg/m)	Acero de vigas por metro cuadrado (kg/m ²)
10	2496	207
15	5555	462
20	5811	483
25	6400	532
30	6861	570
35	8435	701
40	9126	759

Considerando que cada viga de un puente de vigas de acero con losa de hormigón armado mantiene un área similar a las vigas diseñadas, y considerando el número utilizado ampliamente de 4 vigas por puente, éste tendría 1162 kg de acero de vigas por metro lineal de estructura y 97 kg de acero de vigas por metro cuadrado de losa. El sistema propuesto, en comparación con este puente, utilizaría un 400% más de acero de vigas para una luz de 20 m.

Sumando los valores comparativos para ambos materiales con respecto a la tecnología de puentes de vigas de acero con losa de hormigón armado, la mayor cantidad de material que utiliza el sistema propuesto tendría validez si los volúmenes de movimiento de tierras ahorrados, ya sea por menores excavaciones o menores elevaciones de rasante, compensaran su costo en el proyecto. A esto también se puede sumar el ahorro en mantención a lo largo de la vida útil de la estructura por no necesitar revestir las vigas de acero para evitar la corrosión al no estar éstas al aire libre, sino embebidas en la losa de hormigón.

La reducción de altura estructural podría dar nociones sobre el ahorro de movimiento de tierras. Si se considera que un puente de vigas de acero con losa de hormigón armado puede llegar a tener una relación entre altura estructural y luz de 1/20, utilizar el sistema propuesto reduciría la altura de 100 cm a 57 cm. Los volúmenes de excavación para un potencial paso a desnivel se verían ampliamente reducidos, mientras que lo propio pasaría con los volúmenes de relleno necesarios para una potencial elevación de rasante en otro tipo de puentes.

6.8. EJEMPLO DE USO DE ÁBACOS DE CÁLCULO

A continuación, se ejemplifica el uso de los ábacos de cálculo que resultaron del estudio, incluidos en las Figuras 5.4 y 5.5.

Se buscará el pre dimensionamiento de la estructura correspondiente a una luz de 22 m, con el cual iniciar el proceso iterativo de diseño que permite la planilla de cálculo programada.

En primer lugar, se debe determinar la altura del alma de la viga de acero utilizando el primer ábaco de cálculo. Para esto, se traza una línea horizontal en la luz de 22 m y se observa su intersección en la regla de altura del alma.

La intersección da como resultado una altura del alma de 332 mm, como se puede observar en la Figura 6.6. Para el uso de una altura de alma redondeada a los 10 mm, se escoge un valor de 330 mm.

Utilizando la altura del alma obtenida en el paso anterior, se traza una línea horizontal en aquel valor de la regla correspondiente en el segundo ábaco de cálculo y se observa su intersección en las reglas de ancho del alma y espesor del alma.

La intersección da como resultado un ancho del ala de 400 mm y un espesor del ala de 40 mm, como se puede observar en la Figura 6.7.

Sumando a estos valores los recubrimientos y la altura de los conectores de corte, se obtiene un espesor de losa de pre dimensionamiento de 63 cm, con una relación entre altura estructural y luz de 1/35.

Las dimensiones obtenidas deben ser introducidas en la planilla de cálculo y verificadas, pudiendo aumentar o disminuir según los resultados que se observen. Sin embargo, dado el valor obtenido para la relación entre altura estructural y luz, se estaría en valores muy cercanos a los óptimos.

Finalmente, y como se explicó en la Sección 5.2, utilizando estas dimensiones y la planilla de cálculo, se pueden obtener el acero de refuerzo y los conectores de corte asociados a esta luz.

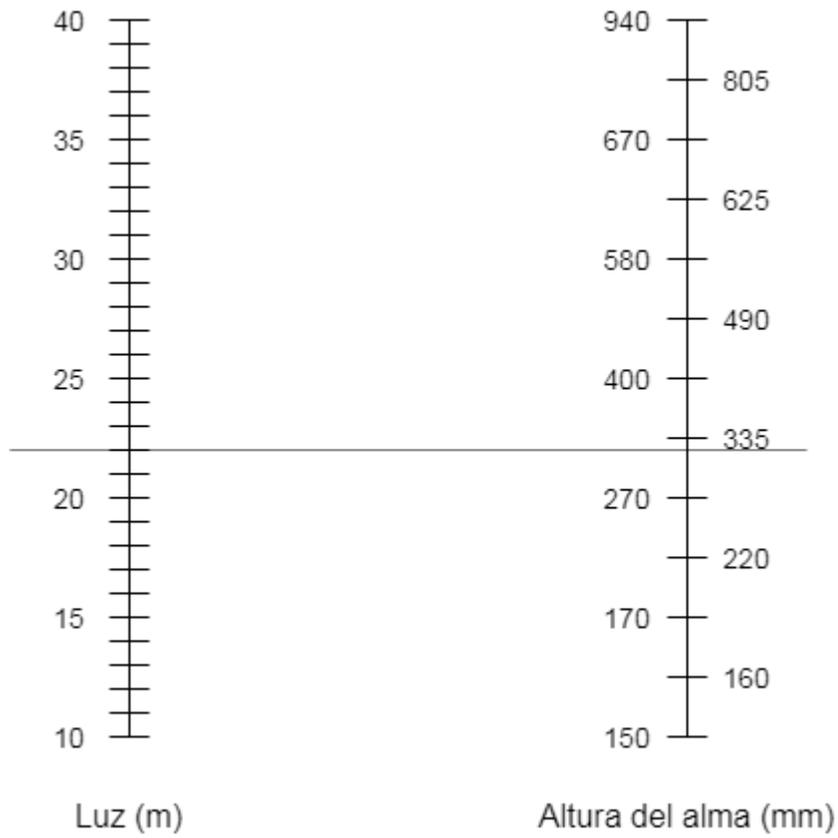


Figura 6.6: Ejemplo de uso de ábacos de cálculo (Parte 1)

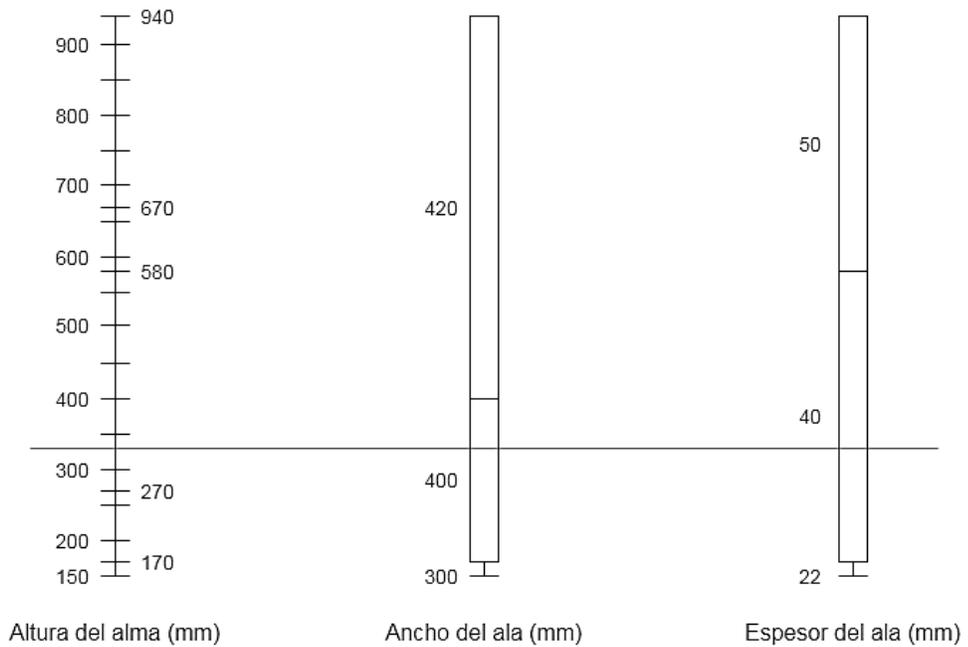


Figura 6.7: Ejemplo de uso de ábacos de cálculo (Parte 2)

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

Se logró estudiar la tecnología propuesta en detalle, definiendo sus componentes, geometría, dimensiones, y aspectos normativos y de tránsito. Todo lo anterior utilizando las nociones nacionales e internacionales que se aplican a los proyectos de puentes en Chile.

Se desarrolló una planilla de cálculo que incluye los requerimientos y verificaciones necesarios para el diseño y la correcta obtención de resultados. Esta planilla permite el ingreso de las dimensiones de las vigas de acero, los recubrimientos en la losa de hormigón respecto al acero estructural y las propiedades referentes a los conectores de corte diseñados para la correcta acción compuesta entre el hormigón armado y las vigas de acero, entre otras variables. En tamaño de caracteres y espaciamiento estándar, la planilla de cálculo resultó de una longitud de 40 páginas.

La planilla de cálculo fue utilizada para el diseño de las siete losas correspondientes a las siete luces en estudio, permitiendo las iteraciones y chequeos de cada una de ellas tantas veces como fuera necesario.

La modelación y el cálculo demuestran la capacidad de reducir la altura estructural del sistema propuesto, siendo eficiente en este sentido para luces comprendidas entre 20 y 35 m, y aceptable para luces entre 15 y 40 m. En luces menores a 15 m, la reducción de altura estructural respecto a otras tecnologías en uso resulta no ser suficiente para justificar su uso.

Se obtuvieron, a excepción de para la luz de 10 m, relaciones entre altura estructural y luz promedio de $1/34$, comparables a las logradas por la tecnología japonesa River Bridge que da el paso al interés por estudiar una tecnología consistente en losas de hormigón con vigas de acero totalmente embebidas en su sección.

Al comparar las cantidades de material del sistema propuesto y las tecnologías actualmente en uso en nuestro país resulta que, en la mayoría de los casos, las estructuras obtenidas utilizan un porcentaje de hormigón y acero que supera ampliamente a las demás. Sin embargo, la mayor cantidad de material que utiliza el sistema propuesto tendría validez si los volúmenes de movimiento de tierras ahorrados al reducir la altura estructural de los puentes a diseñar, ya sea por menores excavaciones o menores elevaciones de rasante, y el ahorro en mantención para evitar la corrosión de las vigas a lo largo de la vida útil de la estructura, compensaran su costo en el proyecto.

En relación a los aspectos constructivos que supondría el método propuesto, que influyen en su aplicabilidad técnica, se puede concluir que las fases y tiempos de

construcción son muy similares a los de todo puente de vigas de acero con losa de hormigón armado, siendo el estudiado comparable con todos los sistemas actualmente en uso. Un punto clave, sin embargo, es la necesidad de diseñar un mecanismo que permita que las vigas de acero soporten el peso del hormigón mientras este aún no fragua. Esto pone una dificultad técnica a esta fase constructiva que podría solucionarse mediante moldajes colgados a través de vigas auxiliares.

Las diferencias entre espesores de acero, para ser soldados, también puede suponer una dificultad técnica para el sistema. Esto está sujeto a un estudio en mayor profundidad que escapa de los alcances de este trabajo.

Por otra parte, se lograron plantear las ventajas y oportunidades que supondría la introducción de una tecnología que reduzca las alturas estructurales, tanto en lo técnico en los ya mencionados ahorros de movimientos de tierra, como en lo estético. Esto último puede tomar preponderancia en el futuro, al prestarse más atención a aspectos del paisaje a la hora de generar y evaluar proyectos.

A modo de cierre, se puede argumentar que, debido a la gran cantidad de proyectos de infraestructura necesarios en el país, la tecnología propuesta, sujeta a la solución de las dificultades técnicas planteadas y asociada a las adecuadas condiciones de terreno y/o necesidades particulares, puede instalarse como una alternativa.

Se concluye que el trabajo investigativo permitió el estudio de la normativa referente al diseño estructural de puentes para nuestro país, la aplicación de cálculos vistos en los cursos de los últimos semestres de la carrera de Ingeniería Civil, e implicó un despliegue de recursos propios de un trabajo de título, tanto en lo académico como en lo humano.

BIBLIOGRAFÍA

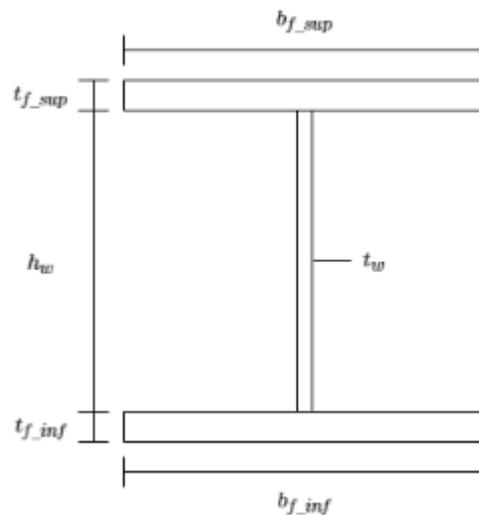
1. Santa María, D. V. (1901), *“Puentes Chilenos”*.
2. Brüning, W. (2016), *“Infraestructura Vial en Chile”*.
3. Dirección de Vialidad, Coordinación de Concesiones, Dirección General de Obras Públicas (2009), *“Puentes para Chile 2009”*.
4. Ministerio de Obras Públicas (2010), *“Chile 2020: Obras Públicas Para el Desarrollo”*.
5. Dirección de Vialidad – Ministerio de Obras Públicas (2018), *“Manual de Carreteras Volumen 2”*.
6. Dirección de Vialidad – Ministerio de Obras Públicas (2018), *“Manual de Carreteras Volumen 3”*.
7. American Association of State Highway and Transportation Officials (2012), *“AASHTO LRFD Bridge Design Specifications”*, 6ª edición.
8. Nedev, G., Khan, U. (2011), *“Guidelines for conceptual design of short-span bridges”*, Master of Science Thesis in the Master’s Programme Structural Engineering and Building Performance Design, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology.
9. Ochoa Espinoza, C. (2008), *“Diseño de superestructuras de puentes de hormigón armado. Comparación entre diseño según norma AASHTO Standard y norma AASHTO LRFD”*, Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles, Universidad Austral de Chile.
10. Gallardo Bahamonde, M. (2009), *“Estudio de la factibilidad técnica y económica de puentes carreteros, en base vigas híbridas de acero HPS-70W”*, Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles, Universidad Austral de Chile.
11. Pavani Bañados, E. (2009), *“Comparación técnica económica de puente de losa versus puente de vigas”*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

ANEXO A: DISEÑO DE LOSAS Y VERIFICACIONES

A.1. L = 10 m

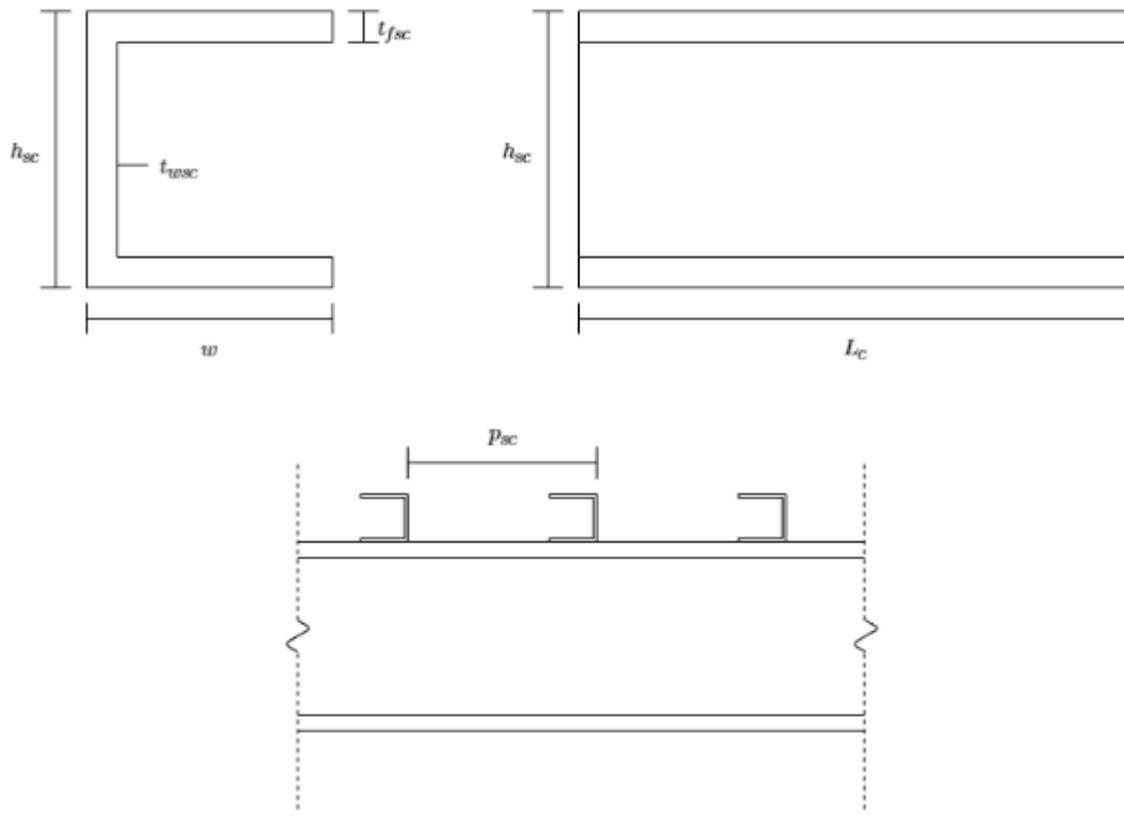
1. DIMENSIONES

1.1. VIGAS DE ACERO



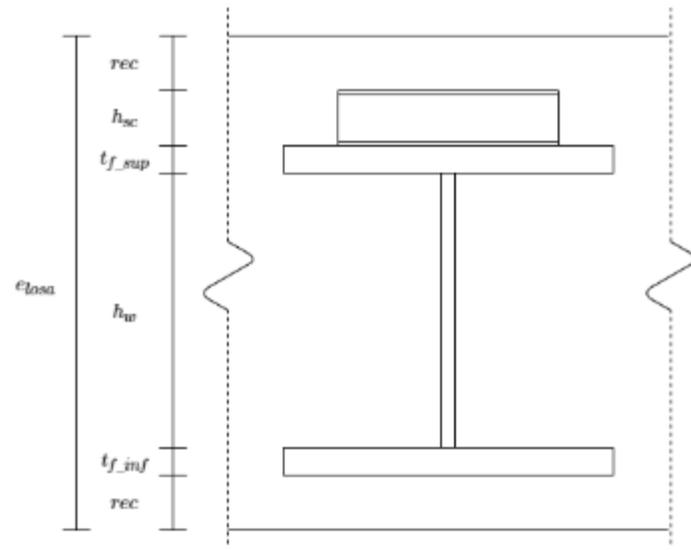
Altura del alma:	$h_w = 150 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_w = 16 \text{ mm}$
Ancho del ala superior:	$b_{f_sup} = 300 \text{ mm}$
Espesor del ala superior:	$t_{f_sup} = 22 \text{ mm}$
Ancho del ala inferior:	$b_{f_inf} = 300 \text{ mm}$
Espesor del ala inferior:	$t_{f_inf} = 22 \text{ mm}$
Área de la sección de acero:	$A_s = 15600 \text{ mm}^2$
Centro de gravedad:	$y_{CG_s} = 97 \text{ mm}$
Momento de inercia:	$I_s = (1.024 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$
Radio de giro:	$r_{y_s} = 79.683 \text{ mm}$
Constante torsional:	$J = (2.334 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$
Módulo elástico de sección:	$S_{x_s} = (1.056 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$
Módulo plástico de sección:	$Z_{x_s} = (1.225 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$

1.2. CONECTORES DE CORTE



Altura:	$h_{sc} := 80 \text{ mm}$
Largo del ala:	$w := 40 \text{ mm}$
Largo del perfil:	$L_c := 200 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_{wsc} := 4 \text{ mm}$
Espesor del ala:	$t_{fsc} := 4 \text{ mm}$
Número de conectores de corte:	$n_{sc} := 23$
Separación longitudinal:	$p_{sc} := 130 \text{ mm}$

1.3. LOSA DE HORMIGÓN



Recubrimiento de refuerzo:

$$rec_s := 50 \text{ mm}$$

Recubrimiento de conector de corte:

$$rec_{sc} := 70 \text{ mm}$$

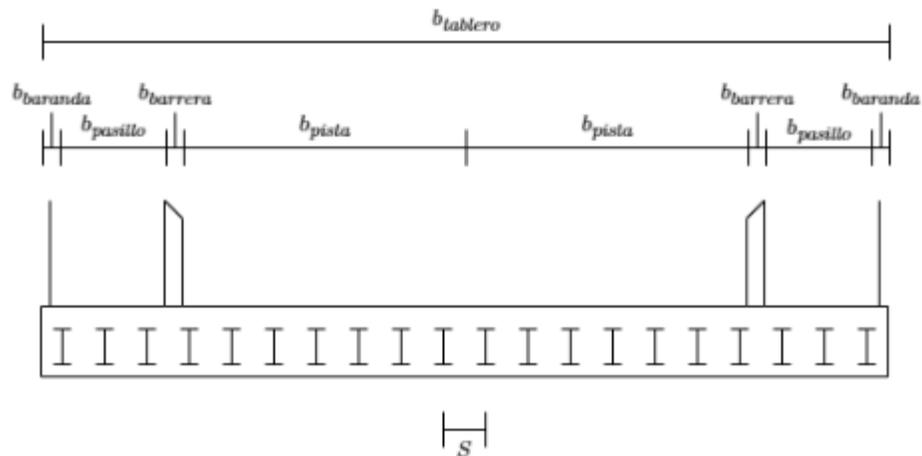
Recubrimiento:

$$rec := \max(rec_s, rec_{sc}) = 70 \text{ mm}$$

Espesor:

$$e_{losa} := 2 \text{ rec} + h_{sc} + h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} = 41.4 \text{ cm}$$

1.4. TABLERO Y LUZ



Ancho de baranda:

$$b_{baranda} := 15 \text{ cm}$$

Ancho de pasillo:

$$b_{pasillo} := 150 \text{ cm}$$

Ancho de pista:

$$b_{pista} := 400 \text{ cm}$$

Ancho de barrera:

$$b_{barrera} := 36.5 \text{ cm}$$

Área de barrera:

$$A_{barrera} := 2550 \text{ cm}^2$$

Espesor de pavimento:

$$e_{pav} := 5 \text{ cm}$$

Ancho de tablero:

$$b_{tablero} := 2 (b_{baranda} + b_{pasillo} + b_{barrera} + b_{pista})$$

$$b_{tablero} = 12.03 \text{ m}$$

Número de vigas:

$$N_b := 20$$

Separación de vigas:

$$S := 0.6 \text{ m}$$

Ancho de voladizo:

$$b_{voladizo} := \frac{b_{tablero} - (N_b - 1) S}{2} = 0.315 \text{ m}$$

Largo de vigas:

$$L := 10 \text{ m}$$

Largo no arriostrado:

$$L_b := L = 10 \text{ m}$$

2. MATERIALES

2.1. ACERO ESTRUCTURAL

Tensión de fluencia:	$F_y := 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_{s_viga} := 8.00 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$
Tensión de fluencia del alma:	$F_{yw} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia de las alas:	$F_{yf} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en compresión:	$F_{yc} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en tracción:	$F_{yt} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

2.2. HORMIGÓN

Resistencia específica a compresión:	$f'_c := 250 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_c := 15100 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}} = 238.8 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Módulo de rotura:	$f_r := 0.24 \text{ ksi} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\text{ksi}}} = 31.819 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_c := 2.5 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

2.3. ACERO DE REFUERZO

Tensión de fluencia:	$f_y := 4200 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de rotura:	$f_u := 6300 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_s := 7.85 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

3. DISEÑO DE LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO

3.1. CARGAS

3.1.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de losa: $PP_{losa} := \gamma_c \cdot e_{losa} = 1.035 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$

3.1.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento: $PP_{pav} := \gamma_c \cdot e_{pav} = 0.125 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$

Peso propio de baranda: $PP_{baranda} := 0.05 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$

Peso propio de barrera: $PP_{barrera} := \gamma_c \cdot A_{barrera} = 0.638 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$

3.1.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje: $CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$

Carga de rueda segundo y tercer eje: $CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$

Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_camión} := 4.27 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.1.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda: $CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.34 \text{ tonnef} = 5.67 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$

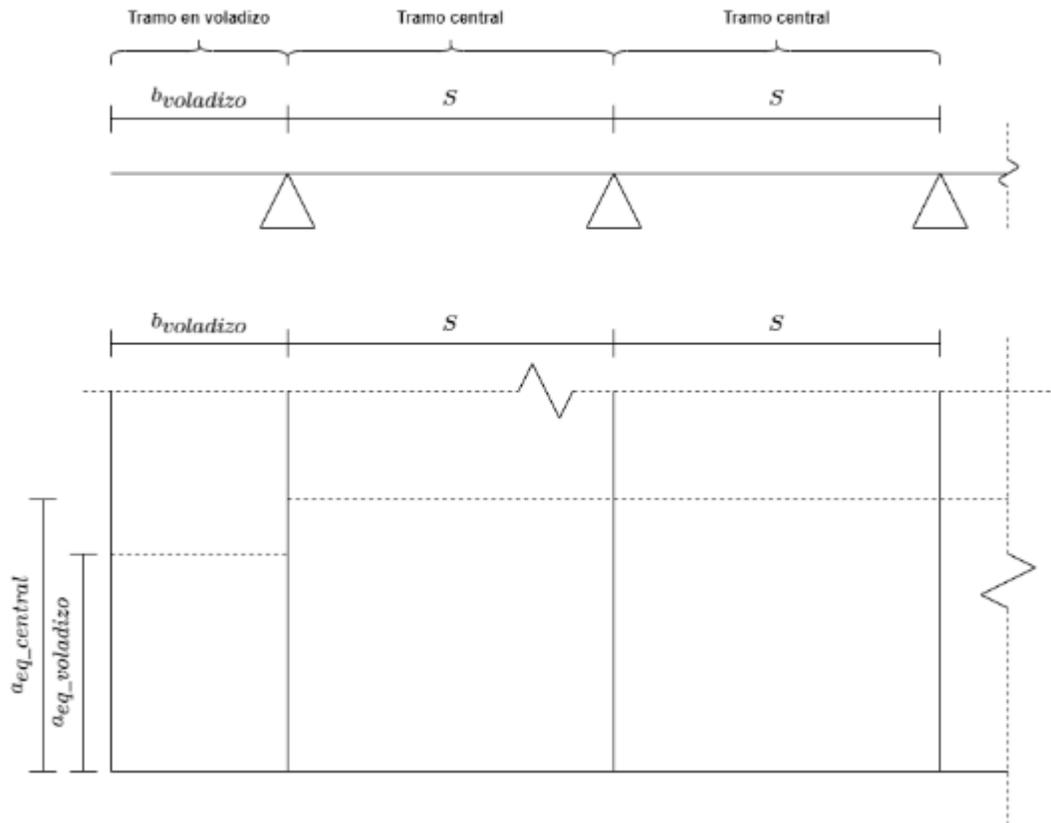
Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.2. ANCHO DE FRANJAS EQUIVALENTES

El ancho de las franjas equivalentes se considera en la dirección longitudinal del puente. Para los tramos centrales, el largo es la distancia entre vigas. Para los voladizos, el largo es el ancho de voladizo. Cada tramo de losa se estudia como una viga simplemente apoyada en las vigas de acero.



Ancho de franja equivalente en tramo central:

$$a_{eq_central} := 0.7 \text{ m} + 6.6 S = 4.66 \text{ m}$$

Distancia X para ancho de franja equivalente en voladizo:

$$X := b_{voladizo} - \frac{b_{baranda}}{2} = 0.24 \text{ m}$$

Ancho de franja equivalente en voladizo:

$$a_{eq_voladizo} := 1.2 \text{ m} + 10 X = 3.6 \text{ m}$$

3.3. DISEÑO DE TRAMOS CENTRALES

Reacción en apoyos por carga muerta:

$$R_{DC} := \frac{PP_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} \cdot a_{eq_central} = 2.901 \text{ tonnef}$$

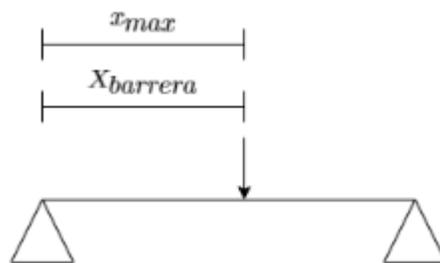
Reacción en apoyos por carga muerta superpuesta:

$$R_{DW} := \left(\frac{PP_{pav} \cdot b_{tablero} + 2 PP_{baranda} + 2 PP_{barrera}}{N_b} \right) \cdot a_{eq_central}$$

$$R_{DW} = 0.671 \text{ tonnef}$$

3.3.1. CASO 1: TRAMO CON BARRERA

Se considera el tramo en el que se ubica la barrera de contención.
El momento máximo se da en el punto central de la barrera.



Distancia de barrera a apoyo más cercano al extremo:

$$X_{barrera} := b_{baranda} + b_{pasillo} + \frac{b_{barrera}}{2} - b_{voladizo} - 2 S = 0.318 \text{ m}$$

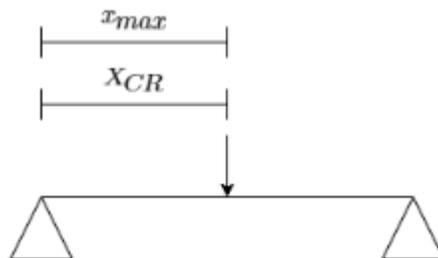
Momento en caso tramo con barrera:

$$M_{caso1} := (R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{barrera} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{barrera}^2$$

$$M_{caso1} = 0.862 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

3.3.2. CASO 2: TRAMO CON CAMIÓN Ó TÁNDEM

Se considera el tramo con camión de diseño o tándem de diseño.
Se consideran las ruedas más pesadas posibles dentro del ancho efectivo.
El momento máximo se da bajo las ruedas, cuando éstas se ubican en el centro del tramo.



Distancia de carga de rueda a apoyo más desfavorable:	$X_{CR} := \frac{S}{2} = 0.3 \text{ m}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por camión de diseño:	$R_{camión} := \frac{2 CR_{camión\ 2\ 3} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 8.71 \text{ tonnef}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por tándem de diseño:	$R_{tándem} := \frac{2 CR_{tándem} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 5.67 \text{ tonnef}$
Reacción de carga viva más desfavorable:	$R_{LL} := \max(R_{camión}, R_{tándem}) = 8.71 \text{ tonnef}$
Carga de rueda más desfavorable:	$CR_{LL} := \max(2 CR_{camión\ 2\ 3}, 2 CR_{tándem})$ $CR_{LL} = 17.42 \text{ tonnef}$
Momento máximo en caso tramo sin barrera:	$M_{caso2} := (R_{LL} + R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{CR} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{CR}^2$ $M_{caso2} = 3.441 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

3.3.3. ACERO DE REFUERZO

3.3.3.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo en la franja equivalente:	$M_u := \max(M_{caso1}, M_{caso2}) = 3.441 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$
Factor de resistencia para hormigón armado:	$\phi_c := 0.9$
Refuerzo principal requerido:	$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$ $A_{p_req} = 2.505 \text{ cm}^2$
Refuerzo mínimo:	$A_{p_min} := 0.00099 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 4.099 \text{ cm}^2$
Refuerzo dispuesto:	$\phi 10 @ 25 + \phi 10 @ 25$
Refuerzo dispuesto:	$A_p = 6.283 \text{ cm}^2$

3.3.3.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución:
$$Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$$

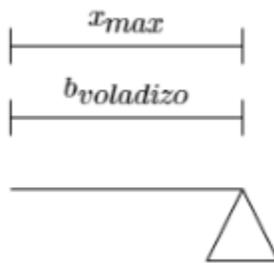
Refuerzo requerido:
$$A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 4.21 \text{ cm}^2$$

Refuerzo dispuesto:
$$\phi 10@25 + \phi 10@25$$

Refuerzo dispuesto:
$$A_{sec} = 6.283 \text{ cm}^2$$

3.4. DISEÑO DE VOLADIZOS

Se considera el tramo en voladizo.
El momento máximo se da en el apoyo.



Momento máximo en voladizo:
$$M_{voladizo} := -(PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_voladizo} \cdot 0.5 \cdot b_{voladizo}^2$$

$$M_{voladizo} = -0.207 \text{ tonnef} \cdot m$$

3.4.1. ACERO DE REFUERZO

3.4.1.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo total en la franja equivalente:
$$M_u := -M_{voladizo} = 0.207 \text{ tonnef} \cdot m$$

Factor de resistencia para hormigón armado:
$$\phi_c := 0.9$$

Refuerzo principal requerido:
$$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$$

$$A_{p_req} = 0.151 \text{ cm}^2$$

Refuerzo mínimo: $A_{p_min} := 0.00099 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 4.099 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 10@25 + \phi 10@25$

Refuerzo dispuesto: $A_p = 6.283 \text{ cm}^2$

3.4.1.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución: $Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$

Refuerzo requerido: $A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 4.21 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 10@25 + \phi 10@25$

Refuerzo dispuesto: $A_{sec} = 6.283 \text{ cm}^2$

4. DISEÑO DE LAS VIGAS COMPUESTAS

4.1. PROPIEDADES

Ancho efectivo colaborante de la losa para viga interior:

$$b_s := S = 0.6 \text{ m}$$

Espesor de la losa de hormigón:

$$t_s := e_{losa} = 41.4 \text{ cm}$$

Razón entre módulos de elasticidad:

$$n := \frac{E_s}{E_c} = 8.796$$

4.2. CARGAS

4.2.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de viga de acero:

$$PP_{viga} := \gamma_s \cdot viga \cdot A_s = 0.125 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de losa para cada viga:

$$PP_{losa} := \frac{\gamma_c \cdot e_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 0.623 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento para cada viga

$$PP_{pav} := \frac{\gamma_c \cdot e_{pav} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 0.075 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de baranda para cada viga:

$$PP_{baranda} := \frac{2 PP_{baranda}}{N_b} = 0.005 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de barrera para cada viga:

$$PP_{barrera} := \frac{2 PP_{barrera}}{N_b} = 0.064 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje:
Carga de rueda segundo y tercer eje:

$$CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$$

$$CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre ruedas:

$$a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre dos primeros ejes:

$$a_{lo_camión_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal mínima entre dos últimos ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_min} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal
máxima entre dos últimos
ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_max} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia transversal a
barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda:

$$CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.4 \text{ tonnef} = 5.7 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre
ruedas:

$$a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
ruedas:

$$a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$$

Distancia transversal a
barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.5. CARGA DE FAJA

Carga de faja:

$$q_{faja} := 0.952 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.6. COEFICIENTE DE IMPACTO DINÁMICO (IM)

Coeficiente de impacto
dinámico para estado límite
de fatiga:

$$IM_{fatiga} := 15\%$$

Coeficiente de impacto
dinámico para el resto de
cálculos:

$$IM := 33\%$$

4.2.7. CARGA DE FATIGA

Carga de rueda primer eje:

$$CR_{fatiga_1} := CR_{camión_1} = 2.18 \text{ tonnef}$$

Carga de rueda segundo y
tercer eje:

$$CR_{fatiga_2_3} := CR_{camión_2_3} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre
ruedas:

$$a_{tr_fatiga} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
dos primeros ejes

$$a_{lo_fatiga_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
dos últimos ejes:

$$a_{lo_fatiga_2_3} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia a barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

Tránsito medio diario anual:

$$ADTT := 3000$$

Factor p para dos fajas de
tránsito:

$$p := 0.85$$

Frecuencia de carga de fatiga:

$$ADTT_{SL} := p \cdot ADTT = 2550$$

4.3. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN

Se considera que la sección transversal se deforma y rota como un cuerpo rígido.

Factor de presencia múltiple para 1 vía cargada:

$$m_1 := 1.20$$

Factor de presencia múltiple para 2 vías cargadas:

$$m_2 := 1.00$$

1 vía cargada:

$$N_{L,1} := 1$$

2 vías cargadas:

$$N_{L,2} := 2$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 1:

$$e_1 := b_{pista} - d - 0.5 a_{tr_camión} = 2.485 \text{ m}$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 2:

$$e_2 := e_1 = 2.485 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y la viga exterior:

$$X_{ext} := 0.5 b_{tablero} - b_{voladizo} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las primeras vigas:

$$X_1 := X_{ext} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las segundas vigas:

$$X_2 := X_{ext} - S = 5.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las terceras vigas:

$$X_3 := X_2 - S = 4.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las cuartas vigas:

$$X_4 := X_3 - S = 3.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las quintas vigas:

$$X_5 := X_4 - S = 3.3 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las sextas vigas:

$$X_6 := X_5 - S = 2.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las séptimas vigas:

$$X_7 := X_6 - S = 2.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las octavas vigas:

$$X_8 := X_7 - S = 1.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las novenas vigas:

$$X_9 := X_8 - S = 0.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las décimas vigas:

$$X_{10} := X_9 - S = 0.3 \text{ m}$$

4.3.1. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA MOMENTO

Factor de distribución para momento para 1 vía cargada:

$$g_{M_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para momento para 2 vías cargadas:

$$g_{M_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.3.2. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA CORTE

Factor de distribución para corte para 1 vía cargada:

$$g_{V_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para corte para 2 vías cargadas:

$$g_{V_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.4. DISEÑO A FLEXIÓN

Factor de resistencia a flexión:

$$\phi_f := 1.0$$

4.4.1. CONSTRUCCIÓN

4.4.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Área de la sección:

$$A_s := A_s = 15600 \text{ mm}^2$$

Distancia entre los centroides de las alas:

$$h := h_w + 0.5 t_{f_inf} + 0.5 t_{f_sup} = 172 \text{ mm}$$

Momento de inercia:

$$I_s := I_s = (1.024 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Constante torsional:

$$J := J = (2.334 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

Módulo elástico de la sección para el ala en compresión:

$$S_{xc} := S_{x_s} = (1.056 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Módulo elástico de la sección para el ala en tracción:

$$S_{xt} := S_{xc} \cdot \frac{y_{CG_s}}{(h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} - y_{CG_s})} = (1.056 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Módulo plástico de la sección para el ala en compresión:

$$Z_{xc} := Z_{x_s} = (1.225 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Radio de giro:

$$r_y := r_{y_s} = 79.683 \text{ mm}$$

Radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional:

$$r_t := \sqrt{\frac{I_s \cdot h}{2 S_{xc}}} = 91.335 \text{ mm}$$

Tensión en el ala en compresión en el punto de fluencia:

$$F_{yr} := \min \left(0.7 F_{yc}, F_{yt} \cdot \frac{S_{xt}}{S_{xc}}, F_{yw} \right)$$

$$F_{yr} := \max (F_{yr}, 0.5 F_{yc}) = 2460.5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Longitud límite para resistencia por fluencia:

$$L_p := 1.76 r_y \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 3.428 \text{ m}$$

Longitud límite para pandeo torsional inelástico:

$$L_r := 1.95 r_t \cdot \frac{E_s}{F_{yr}} \cdot \sqrt{\frac{J}{S_{xc} \cdot h} + \sqrt{\left(\frac{J}{S_{xc} \cdot h}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{F_{yr}}{E_s}\right)^2}}$$

$$L_r = 24.544 \text{ m}$$

4.4.1.2. RESISTENCIA A FLEXIÓN

Combinación de carga: Resistencia I: 1.25 DC

Momento en viga por cargas en construcción: $M(x) := 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{L}{2} \cdot x - 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{x^2}{2}$

Momento máximo en viga por cargas en construcción: $M_{max} := M\left(\frac{L}{2}\right) = 11.677 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en primer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_A := M\left(\frac{L}{4}\right) = 8.758 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en segundo cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_B := M\left(\frac{L}{2}\right) = 11.677 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en tercer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_C := M\left(\frac{L}{4}\right) = 8.758 \text{ tonnef} \cdot m$

Factor de modificación por pandeo lateral torsional: $C_b := \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} = 1.136$

Momento plástico: $R_{pc} M_{yc} := F_{yc} \cdot Z_{xc} = 43.066 \text{ tonnef} \cdot m$

Tensión crítica: $F_{cr} := \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E_s}{\left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + 0.0078 \frac{J}{S_{xc} \cdot h} \cdot \left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2}$

$$F_{cr} = 2915.636 \frac{kgf}{cm^2}$$

Resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$M_{nc} := \begin{cases} \text{if } L_b \leq L_p \\ \quad \parallel R_{pc} M_{yc} \\ \text{else if } L_b \leq L_r \\ \quad \parallel C_b \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{F_{yr} \cdot S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}}\right) \cdot \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right) \cdot R_{pc} M_{yc} \\ \text{else} \\ \quad \parallel F_{cr} \cdot S_{xc} \end{cases}$$

$$M_{nc} := \min(M_{nc}, R_{pc} M_{yc}) = 42.893 \text{ tonnef} \cdot m$$

Esfuerzo de resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$F_{nc} := \frac{M_{nc}}{S_{xc}} = 4063.366 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Momento último:

$$M_u := M_{max} = 11.677 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo en el ala en compresión:

$$f_{bu} := \frac{M_u}{S_{xc}} = 1106.23 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Chequeo de requerimientos por flexión en etapas críticas de construcción:

Primer chequeo: $f_{bu} = 1106.23 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{yc} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f_{bu} = 1106.23 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{nc} = 4063.366 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

4.4.1.3. DEFORMACIÓN POR CARGAS MUERTAS

Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW

Flecha por carga muerta DC: $flecha_{DC} := \frac{5 (PP_{losa} + PP_{viga}) L^4}{384 E_s \cdot I_s} = 45.256 \text{ mm}$

Flecha por carga muerta superpuesta DW: $flecha_{DW} := \frac{5 (PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^4}{384 E_s \cdot I_s}$

$$flecha_{DW} = 8.716 \text{ mm}$$

Contraflecha total a dar a vigas de acero:

$$contraflecha := flecha_{DC} + flecha_{DW} = 53.972 \text{ mm}$$

4.4.2. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

4.4.2.1. DEFORMACIONES ELÁSTICAS

4.4.2.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO

Se debe considerar la rigidez del sistema completo.

Ancho transformado de hormigón:
$$b_{c_tr} := \frac{b_{\text{tablero}}}{n} = 1.368 \text{ m}$$

Centro de gravedad:
$$y_{CG_tr_s} := \frac{N_b \cdot A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr} \cdot 0.5 t_s}{N_b \cdot A_s + t_s \cdot b_{c_tr}} = 22.121 \text{ cm}$$

Inercia del sistema completo:
$$I_{\text{sis}} = (I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_tr_s})^2) \cdot N_b + \frac{b_{c_tr} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_tr_s})^2$$

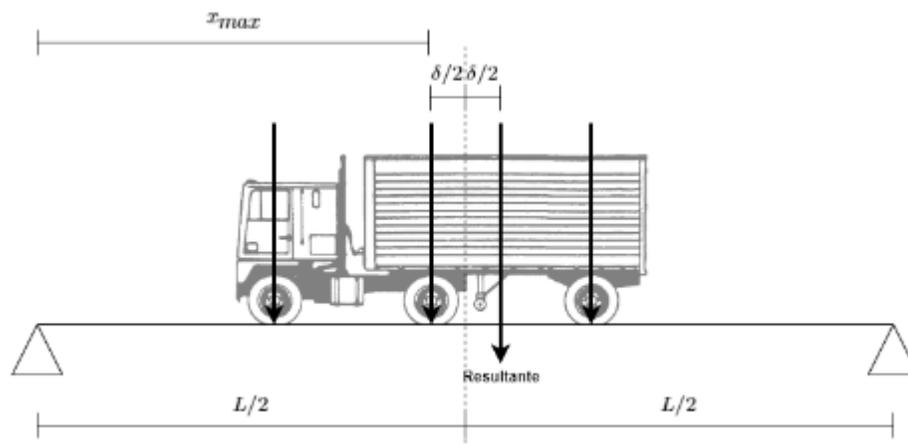
$$I_{\text{sis}} = (1.046 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.1.2. CÁLCULO DE DEFORMACIONES

Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW + 1.0 IM LL

Carga muerta es contrarrestada por la contraflecha durante etapas de construcción.
Se deben cargar todas las vías de diseño.

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
La flecha máxima se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{camión} = \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_{camión_1,2}} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_{camión_2,3_{min}}}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_{camión_1,2}} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_{camión_2,3_{min}}} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 22.36 \text{ tonnef}$$

Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

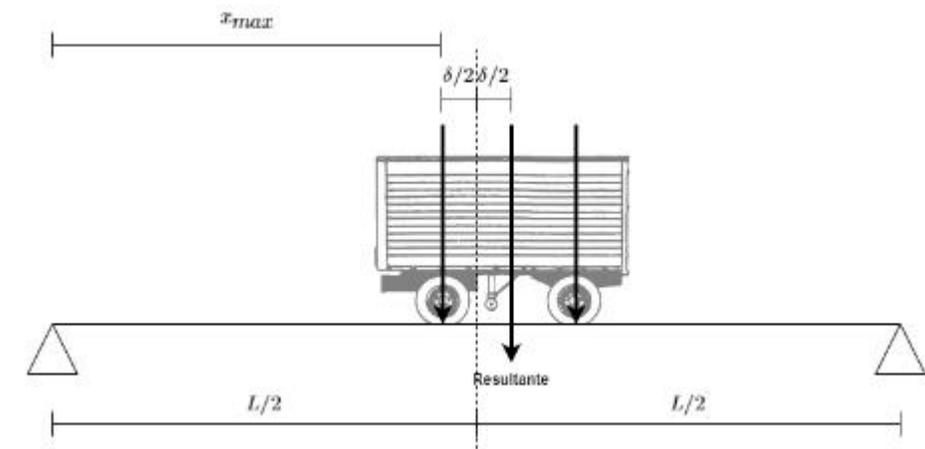
$$M_{camión}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_{camión_1,2}} \\ \quad \left\| R_{camión} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \\ \quad \left\| R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_{camión_1,2}} \right) \right) \right\| \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_{camión_1,2}} \right) \right) - 2 CR_{camión_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \right) \right) \right\| \end{cases}$$

Flecha máxima por camión de diseño:

$$flecha_{camión} := - \left(\int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)} \left(\int_0^x \frac{M_{camión}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \cdot \int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)} \frac{M_{camión}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) = 2.337 \text{ mm}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

La flecha máxima se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tándem} := \frac{a_{lo_tándem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tándem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \frac{L + \delta_{tándem} - a_{lo_tándem}}{L}$$

$$R_{tándem} = 14.237 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tándem}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \\ \quad \left\| R_{tándem} \cdot x \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{tándem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right) \right\| \end{cases}$$

Flecha máxima por tándem de diseño:

$$flecha_{tándem} := - \left(\int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \left(\int_0^x \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \cdot \int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) = 2.237 \text{ mm}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Flecha por carga de faja:

$$flecha_{faja}(x) := - \left(\int_0^x \left(\frac{q_{faja} \cdot L \cdot s^2}{4} - \frac{q_{faja} \cdot s^3}{6} \right) ds - x \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{M_{faja}(s)}{E_s \cdot I_{sist}} ds \right)$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja, cargando ambas vías:

Flecha máxima por camión de diseño y carga de faja:

$$flecha_{camión_faja} := 2 \cdot flecha_{camión} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)$$

$$flecha_{camión_faja} = 5.776 \text{ mm}$$

Flecha máxima por tándem de diseño y carga de faja:

$$flecha_{tándem_faja} := 2 \cdot flecha_{tándem} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right)$$

$$flecha_{tándem_faja} = 5.597 \text{ mm}$$

Flecha máxima por carga viva:

$$flecha_{IM_LL} := \max(flecha_{camión_faja}, flecha_{tándem_faja})$$

$$flecha_{IM_LL} = 5.776 \text{ mm}$$

Deformación máxima por combinación de carga Servicio I: $\Delta_{max} := flecha_{IM_LL} = 5.776 \text{ mm}$

Chequeo de requerimientos por deformaciones elásticas:

Chequeo: $\Delta_{max} = 5.776 \text{ mm} \leq \frac{L}{800} = 12.5 \text{ mm}$

OK.

4.4.2.2. DEFORMACIONES PERMANENTES

4.4.2.2.1. SECCIÓN RESISTENTE 1: SECCIÓN DE ACERO

Centro de gravedad: $y_{CG_s} = 9.7 \text{ cm}$

Inercia de la sección de acero: $I_s = (1.024 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$

4.4.2.2.2. SECCIÓN RESISTENTE 2: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_cp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 22.123 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_cp_s})^2 + \frac{b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_cp_s})^2$

$$I_{tr_cp_s} = (5.218 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.3. SECCIÓN RESISTENTE 3: SECCIÓN COMPUESTA EN EL LARGO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{3 n} = 0.023 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_lp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 23.195 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta:

$$I_{tr_lp,s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG,s} + rec + h_{sc} - y_{CG,lp,s})^2 + \frac{b_{c,lp,s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c,lp,s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG,lp,s})^2$$

$$I_{tr_lp,s} = (2.462 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.4. SECCIÓN RESISTENTE 4: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO Y LARGO PLAZO TRANSFORMADA A HORMIGÓN

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Espesor del alma transformado:

$$t_{w_tr_c} := t_w \cdot n = 14.073 \text{ cm}$$

Ancho del ala superior transformado:

$$b_{f_sup_tr_c} := b_{f_sup} \cdot n = 263.872 \text{ cm}$$

Ancho del ala inferior transformado:

$$b_{f_inf_tr_c} := b_{f_inf} \cdot n = 263.872 \text{ cm}$$

Centro de gravedad:

$$y_{CG_tr_c} := \frac{A_s \cdot n \cdot (y_{CG,s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot S \cdot 0.5 t_s}{A_s \cdot n + t_s \cdot S} = 22.123 \text{ cm}$$

Momento de inercia:

$$I_{tr_c} = (4.579 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.5. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Servicio II:

$$1.0 \text{ DC} + 1.0 \text{ DW} + 1.3 \text{ IM LL}$$

Momento máximo por carga muerta DC:

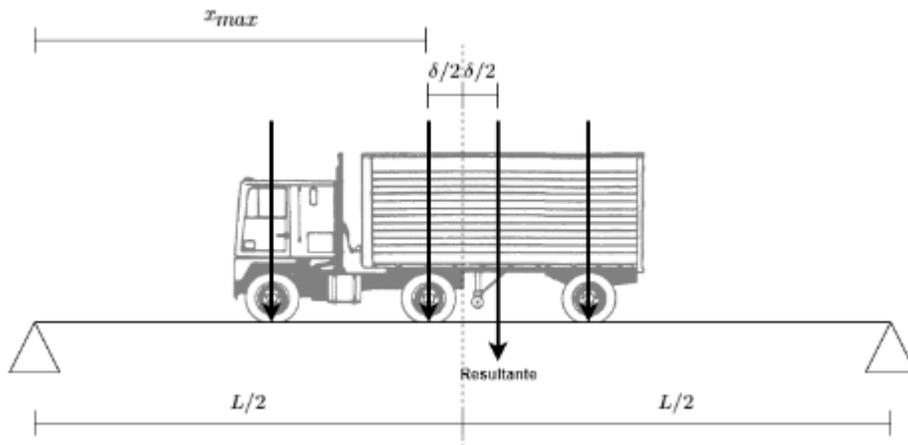
$$M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 9.342 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga muerta superpuesta DW:

$$M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$$

$$M_{DW} = 1.799 \text{ tonnef} \cdot m$$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{camión} = \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_camión_1,2} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_camión_2,3_min}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} = (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_camión_1,2} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_camión_2,3_min} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 22.36 \text{ tonnef}$$

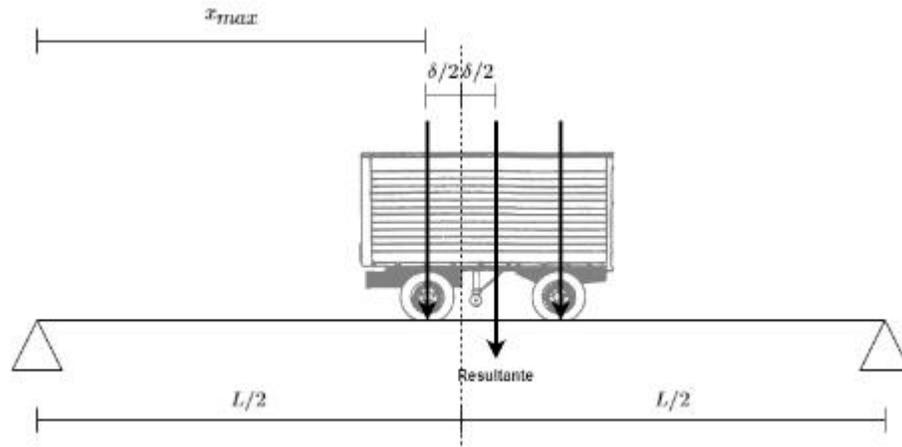
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{camión}(x) = \begin{cases} R_{camión} \cdot x & \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \\ R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) & \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \\ R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) - 2 CR_{camión_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \right) \right) & \text{else} \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño:

$$M_{max_camión} := M_{camión} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) = 71.132 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

**Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:
El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.**



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tandem} := \frac{a_{lo_tandem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tandem} := (1 + IM) \cdot 2 CR_{tandem} \cdot \frac{L + \delta_{tandem} - a_{lo_tandem}}{L}$$

$$R_{tandem} = 14.237 \text{ tonnef}$$

Momento entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tandem}(x) := \begin{cases} R_{tandem} \cdot x & \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tandem}}{2} \\ R_{tandem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{tandem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tandem}}{2} \right) \right) & \text{else} \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tandem} := M_{tandem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tandem}}{2} \right) = 66.843 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} = \max \left(M_{max_camion} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camion}}{2} \right), M_{max_tandem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tandem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 82.792 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 18.076 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo máximo en el hormigón en tracción:

$$f := \frac{M_{DW} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}}$$

$$f = 106.511 \frac{kgf}{cm^2} \leq 2 f_r = 63.637 \frac{kgf}{cm^2}$$

Si el esfuerzo máximo en el hormigón a tracción supera el límite, se considera que el esfuerzo por deformaciones permanentes debe ser calculado utilizando sólo la sección de acero.

Esfuerzo máximo en el ala en compresión de la viga de acero:

$$f_{fc} := \frac{M_{DC} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{fc} = 3281.553 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en el ala en tracción de la viga de acero:

$$f_{ft} := \frac{M_{DC} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{ft} = 3281.553 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en la viga de acero:

$$f_f := \max(f_{fc}, f_{ft}) = 3281.553 \frac{kgf}{cm^2}$$

Chequeo de requerimientos por deformaciones permanentes:

Primer chequeo: $f_f = 3281.553 \frac{kgf}{cm^2} \leq 0.95 \cdot F_{yf} = 3339.25 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f = 106.511 \frac{kgf}{cm^2} \leq 4 f_r = 127.274 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

4.4.3. ESTADO LÍMITE DE FATIGA

4.4.3.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 150 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.4.3.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \begin{cases} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \parallel 1.0 \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \parallel \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \end{cases} = 1$$

Resistencia a corte por fluencia:

$$V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 48.929 \text{ tonnef}$$

Corte crítico:

$$V_{cr} := C \cdot V_p = 48.929 \text{ tonnef}$$

4.4.3.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Corte máximo por carga muerta DC:

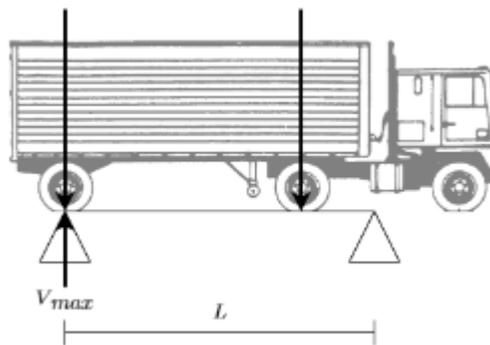
$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 3.737 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 0.72 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1.2} + a_{lo_fatiga_2.3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2.3} - a_{lo_fatiga_1.2}) \right) + \frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 21.736 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V.1} \cdot V_{fatiga}, g_{V.2} \cdot V_{fatiga}) = 4.746 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 11.575 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de fatiga:

$$\text{Chequeo: } V_u = 11.575 \text{ tonnef} \quad \leq \quad V_{cr} = 48.929 \text{ tonnef}$$

OK.

4.4.4. ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

4.4.4.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo sólo en compresión.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 150 \text{ mm}$

Centro de gravedad: $y_{CG_tr_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_s}}$

$y_{CG_tr_s} = 22.123 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} := I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_w - y_{CG_tr_s})^2 + \frac{b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s}^3}{12} + b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s} \cdot (0.5 y_{CG_tr_s})^2$

$I_{tr_cp_s} = (3.59 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$

Profundidad de la sección compuesta: $D_t := t_s = 41.4 \text{ cm}$

4.4.4.2. MOMENTO PLÁSTICO

Eje neutro plástico desde el borde superior de la losa:

$$c := \begin{cases} \text{if } 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc}) \geq F_y \cdot A_s \\ \left| \frac{F_y \cdot A_s}{0.85 f'_c \cdot b_s} \right. \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup}) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \geq F_y \cdot (h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \left| \frac{F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} + 2 rec + 2 h_{sc}) + h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf})}{2 F_y \cdot b_{f_sup} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \right. \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + h_w \cdot t_w) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \geq F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \left| \frac{F_y \cdot (t_w \cdot (h_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup})}{2 F_y \cdot t_w + 0.85 f'_c \cdot b_s} \right. \\ \text{else} \\ \left| \frac{F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot (t_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup} + 2 h_w) - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} - h_w \cdot t_w)}{2 F_y \cdot b_{f_inf} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \right. \end{cases}$$

$c = 16.597 \text{ cm}$

Área de hormigón a compresión: $A_{c_c} := b_s \cdot c = 995.799 \text{ cm}^2$

Área de acero a compresión:

$$A_{s,c} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel 0 \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \\ \text{else} \\ \quad \parallel A_s \end{cases}$$

$$A_{s,c} = 47.899 \text{ cm}^2$$

Área de acero a tracción:

$$A_{s,t} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel A_s \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel A_s - b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)) \\ \text{else} \\ \quad \parallel 0 \end{cases}$$

$$A_{s,t} = 108.101 \text{ cm}^2$$

Centro del área del hormigón en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{c,c}} := \frac{c}{2} = 8.298 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s,c}} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel \text{"No aplica"} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \cdot (t_{f,sup} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \cdot (t_{f,sup} + h_w + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + y_{CG_{c,c}} \end{cases}$$

$$y_{CG_{s,c}} = 15.798 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en tracción desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s,t}} = \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ \quad rec + h_{sc} + y_{CG_{s,c}} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ \quad c + \frac{b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) + h_w \cdot t_w \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + 0.5 h_w) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + h_w + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - b_{f_sup} \cdot (c - rec - h_{sc})} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ \quad c + \frac{t_w \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \cdot 0.5 \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}))} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ \quad c + \frac{b_{f_inf} \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w)}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot h_w + b_{f_inf} \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup} - h_w))} \\ \text{else} \\ \quad \text{"No aplica" } \end{cases}$$

$$y_{CG_{s,t}} = 28.644 \text{ cm}$$

Distancia desde el borde superior de la losa al eje neutro plástico:

$$D_p := c = 16.597 \text{ cm}$$

Profundidad del alma de la viga de acero a compresión:

$$D_{cp} := \max(c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}, 0 \text{ cm}) = 0 \text{ cm}$$

Momento plástico:

$$M_p = \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,t} \cdot (y_{CG_{s,t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,c} \cdot (c - y_{CG_{s,c}}) + F_y \cdot A_{s,t} \cdot (y_{CG_{s,t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,c} \cdot (c - y_{CG_{s,c}}) + F_y \cdot A_{s,t} \cdot (y_{CG_{s,t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,c} \cdot (c - y_{CG_{s,c}}) + F_y \cdot A_{s,t} \cdot (y_{CG_{s,t}} - c) \right\| \\ \text{else} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,c} \cdot (c - y_{CG_{s,c}}) \right\| \end{cases}$$

$$M_p = 64.682 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

4.4.4.3. COMPACIDAD DE LA SECCIÓN

Chequeo de requerimientos de compacidad de la sección:

Primer chequeo: $F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq 4921 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $\frac{D}{t_w} = 9.375 \leq 150$

OK.

Tercer chequeo: $\frac{2 D_{cp}}{t_w} = 0 \quad \leq \quad 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 91.904$
OK.

La sección califica como: **COMPACTA**

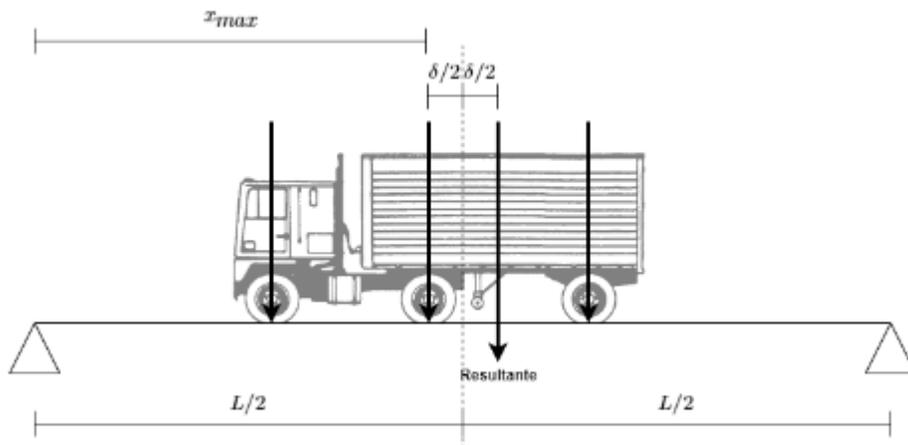
4.4.4.4. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Resistencia I: **1.25 DC + 1.50 DW + 1.75 IM LL**

Momento máximo por carga muerta DC: $M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 9.342 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento máximo por carga muerta superpuesta DW: $M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$
 $M_{DW} = 1.799 \text{ tonnef} \cdot m$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante: $\delta_{camión} := \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{lo_{camión_1,2}} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{lo_{camión_2,3_{min}}}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{lo_{camión_1,2}} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{lo_{camión_2,3_{min}}} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 22.36 \text{ tonnef}$$

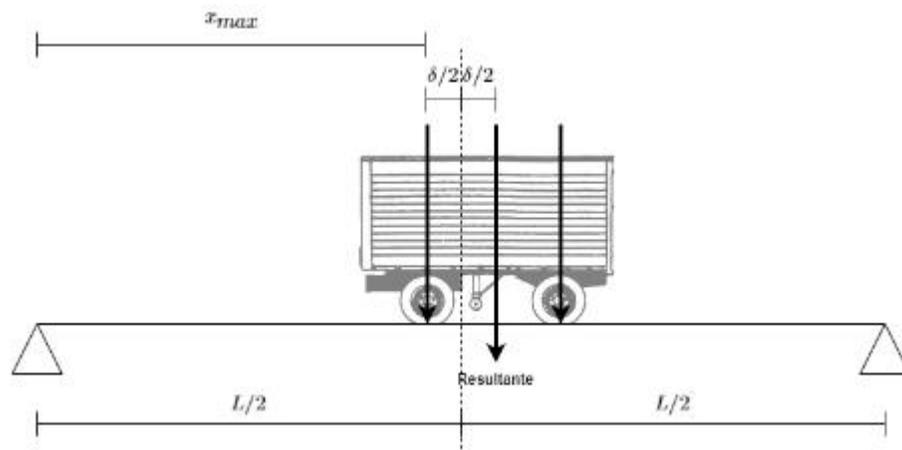
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{camión}}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{camión_1}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \right) \right) \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{\text{camión_1}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \right) \right) - 2 CR_{\text{camión_2,3}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño: $M_{\text{max_camión}} := M_{\text{camión}} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) = 71.132 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{\text{tándem}} := \frac{a_{\text{lo_tándem}}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{\text{tándem}} := (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \frac{L + \delta_{\text{tándem}} - a_{\text{lo_tándem}}}{L}$$

$$R_{\text{tándem}} = 14.237 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{tándem}}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tándem} := M_{tándem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) = 66.843 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} = \max \left(M_{max_camión} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right), M_{max_tándem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 82.792 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 18.076 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento último:

$$M_u := 1.25 \cdot M_{DC} + 1.50 M_{DW} + 1.75 \cdot M_{LL}$$

$$M_u = 46.01 \text{ tonnef} \cdot m$$

Resistencia nominal a flexión:

$$M_n := \left\| \begin{array}{l} \text{if } D_p \leq 0.1 D_t \\ \left\| M_p \right\| \\ \text{else} \\ \left\| M_p \cdot \left(1.07 - 0.7 \frac{D_p}{D_t} \right) \right\| \end{array} \right\| = 51.059 \text{ tonnef} \cdot m$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de resistencia:

$$\text{Chequeo: } M_u = 46.01 \text{ tonnef} \cdot m \quad \leq \quad \phi_f \cdot M_n = 51.059 \text{ tonnef} \cdot m$$

OK.

4.4.4.5. DUCTILIDAD

Chequeo de requerimientos de ductilidad:

$$\text{Chequeo: } D_p = 16.597 \text{ cm} \quad \leq \quad 0.42 D_t = 17.388 \text{ cm}$$

OK.

4.5. DISEÑO A CORTE

Factor de resistencia a corte: $\phi_v := 1.0$

4.5.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 150 \text{ mm}$

Coeficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.5.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| 1.0 \right. \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \right. \end{array} \right\| = 1$$

Resistencia a corte por fluencia: $V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 48.929 \text{ tonnef}$

Resistencia nominal al corte: $V_n := C \cdot V_p = 48.929 \text{ tonnef}$

4.5.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

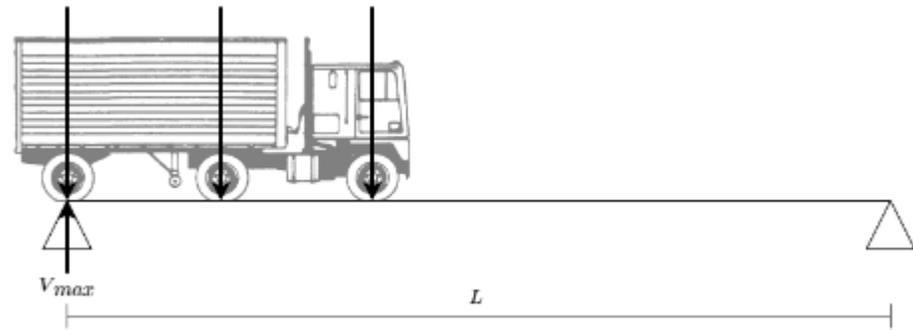
Combinación de carga: Resistencia I: $1.25 \text{ DC} + 1.50 \text{ DW} + 1.75 \text{ IM LL}$

Corte máximo por carga muerta DC: $V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 3.737 \text{ tonnef}$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW: $V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 0.72 \text{ tonnef}$

Posición de camión de diseño que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje del camión.



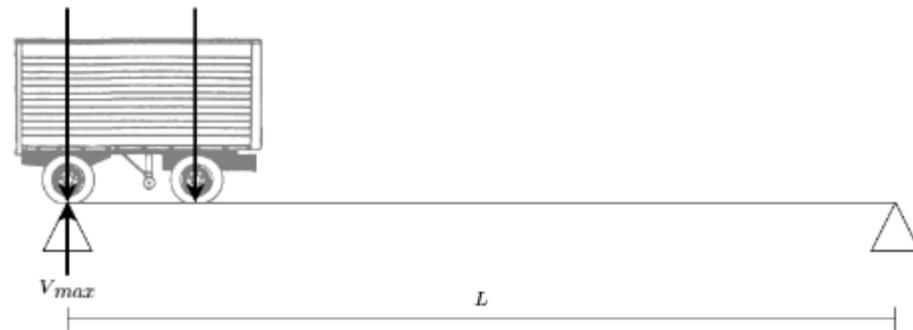
Corte máximo por camión de diseño:

$$V_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_camión_2.3_min} - a_{lo_camión_1.2}) + \frac{2 CR_{camión_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_camión_2.3_min}) \right)$$

$$V_{camión} = 37.291 \text{ tonnef}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el segundo eje del tándem.



Corte máximo por tándem de diseño:

$$V_{tándem} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{tándem}}{L} \cdot (2L - a_{lo_tándem}) \right)$$

$$V_{tándem} = 28.474 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de faja:

$$V_{faja} := \frac{q_{faja} \cdot L}{2} = 4.76 \text{ tonnef}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Corte máximo por carga viva LL:

$$V_{LL} := \max(V_{camión} + V_{faja}, V_{tándem} + V_{faja})$$

$$V_{LL} = 42.051 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga viva distribuido:

$$V_{LL} := \max(g_{V_1} \cdot V_{LL}, g_{V_2} \cdot V_{LL}) = 9.181 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := 1.25 V_{DC} + 1.50 V_{DW} + 1.75 V_{LL}$$

$$V_u = 21.817 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos de resistencia al corte:

Chequeo: $V_u = 21.817 \text{ tonnef} \leq \phi_v \cdot V_n = 48.929 \text{ tonnef}$

OK.

5. CONECTORES DE CORTE

Factor de resistencia de conectores de corte:

$$\phi_{sc} := 0.85$$

Resistencia a la fatiga de un conector de corte:

$$Z_r := 0.375 \text{ tonnef} \cdot \frac{w}{cm} = 1.5 \text{ tonnef}$$

Fuerza de corte nominal:

$$P := \min(0.85 f_c \cdot b_s \cdot t_s, F_{yw} \cdot D \cdot t_w + F_{yt} \cdot b_{f.inj} \cdot t_{f.inj} + F_{yc} \cdot b_{f.smp} \cdot t_{f.smp})$$

$$P = 527.85 \text{ tonnef}$$

Resistencia nominal al corte de un conector de corte:

$$Q_n := 0.3 \cdot (t_{f.sc} + 0.5 t_{w.sc}) \cdot L_c \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c}$$

$$Q_n = 27.813 \text{ tonnef}$$

Resistencia al corte de un conector de corte:

$$Q_r := \phi_{sc} \cdot Q_n = 23.641 \text{ tonnef}$$

5.1. NÚMERO DE CONECTORES DE CORTE

El número de conectores de corte requerido corresponde a los necesarios entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

Chequeo de requerimientos de número de conectores de corte:

Chequeo:
$$n_{sc_req} := \frac{P}{Q_r} = 22.328 \quad \leq \quad n_{sc} = 23$$

OK.

5.2. SEPARACIÓN LONGITUDINAL

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Se debe cumplir con la separación longitudinal máxima normativa, correspondiente a 600 mm.

También se debe cumplir con el requerimiento de separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga.

Además, se verifica la separación longitudinal máxima tal que se ubique el número de conectores de corte requerido entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

Corte máximo por carga muerta DC:

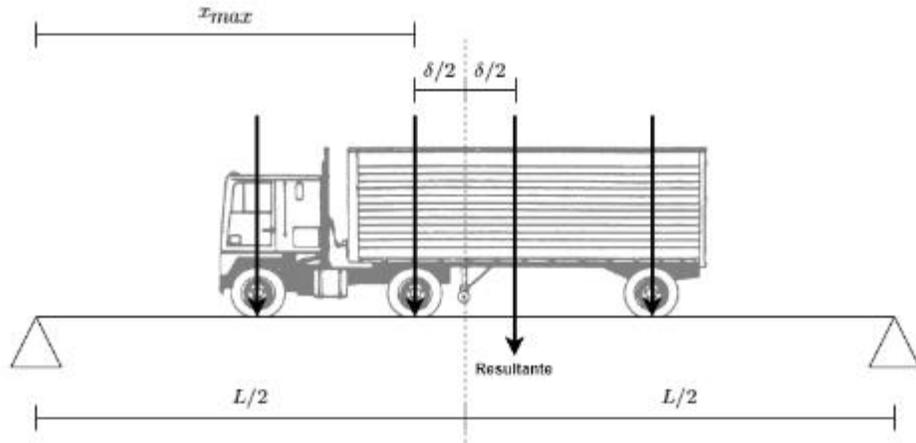
$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 3.737 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 0.72 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el segundo eje de la carga de fatiga.



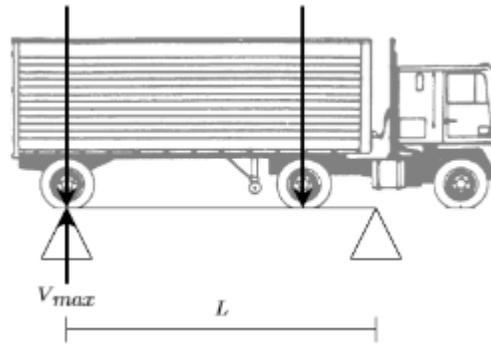
Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{fatiga} := \frac{-2 CR_{fatiga_1} \cdot a_{lo_fatiga_1_2} + 2 CR_{fatiga_2_3} \cdot a_{lo_fatiga_2_3}}{2 CR_{fatiga_1} + 4 CR_{fatiga_2_3}}$$

$$\delta_{fatiga} = 3.591 \text{ m}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1_2} + a_{lo_fatiga_2_3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2_3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2_3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2_3} - a_{lo_fatiga_1_2}) + \frac{2 CR_{fatiga_2_3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2_3}) \right) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 21.736 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V_1} \cdot V_{fatiga}, g_{V_2} \cdot V_{fatiga}) = 4.746 \text{ tonnef}$$

Corte por combinación de fatiga:

$$V_f := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 11.575 \text{ tonnef}$$

Primer momento del área de hormigón a compresión en torno al eje neutro de la sección compuesta en el corto plazo:

$$Q := \frac{b_s}{n} \cdot y_{CG_cp_s} \cdot \frac{y_{CG_cp_s}}{2} = (1.669 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Inercia de la sección compuesta en el corto plazo:

$$I_{tr_cp_s} = (3.59 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Resistencia longitudinal a corte por fatiga por unidad de largo:

$$V_{fat} := \frac{V_f \cdot Q}{I_{tr_cp_s}} = 0.054 \frac{\text{tonnef}}{\text{mm}}$$

Separación longitudinal máxima normativa:

$$p_{sc_norm} := 600 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga:

$$p_{sc_fatiga} := \frac{n_{sc} \cdot Z_r}{V_{fat}} = 640.915 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por número requerido:

$$p_{sc_num} := \frac{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{fatiga}}{2} \right)}{n_{sc}} = 139.321 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima:

$$p_{max} := \min(p_{sc_norm}, p_{sc_fatiga}, p_{sc_num}) = 139.321 \text{ mm}$$

Chequeo de requerimientos de separación longitudinal:

Chequeo:

$$p_{sc} = 130 \text{ mm}$$

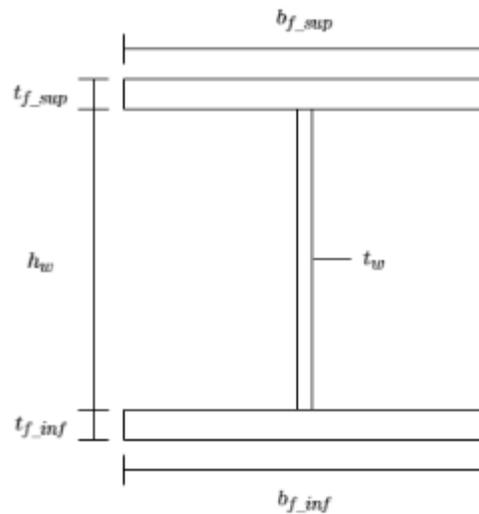
$$\leq p_{max} = 139.321 \text{ mm}$$

OK.

A.2. L = 15 m

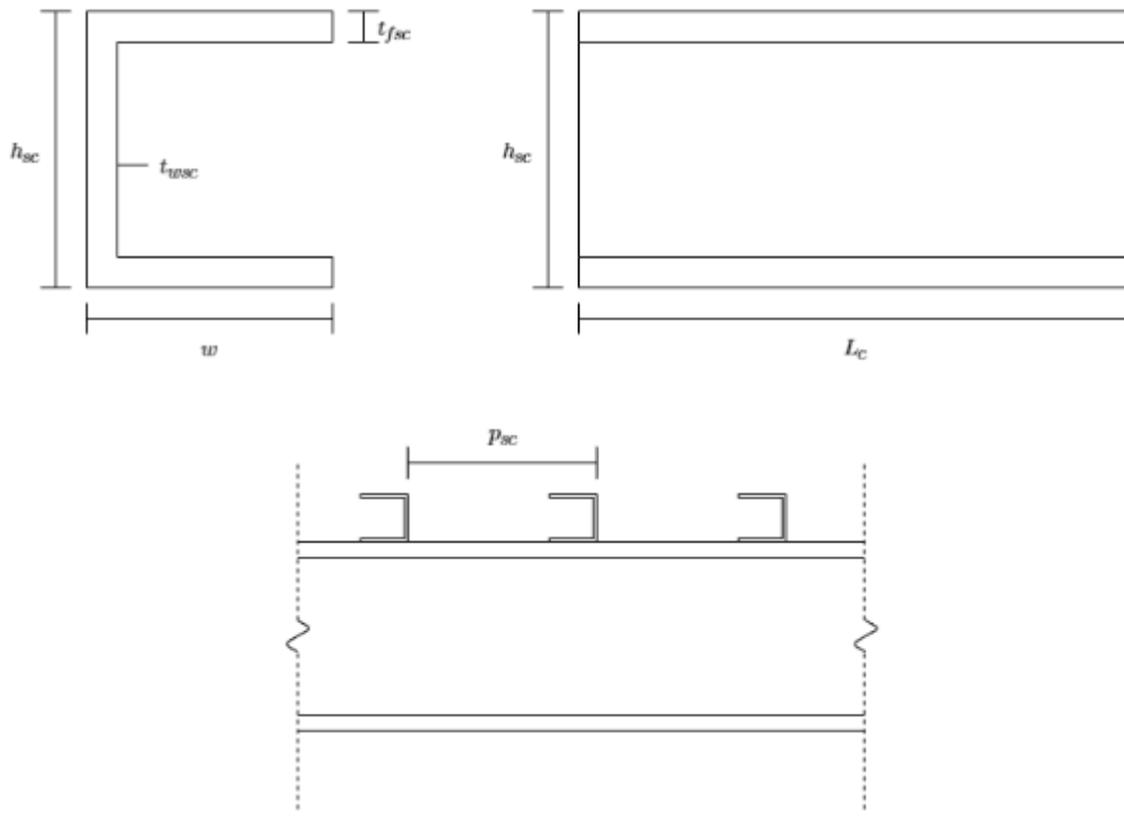
1. DIMENSIONES

1.1. VIGAS DE ACERO



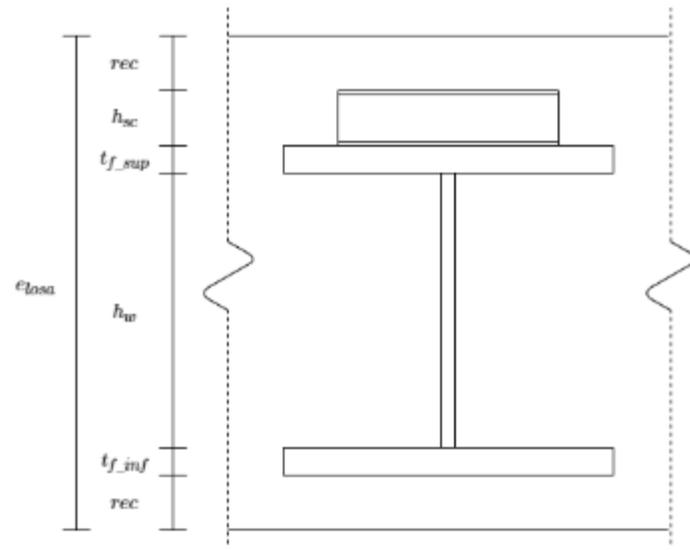
Altura del alma:	$h_w = 170 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_w = 16 \text{ mm}$
Ancho del ala superior:	$b_{f_sup} = 400 \text{ mm}$
Espesor del ala superior:	$t_{f_sup} = 40 \text{ mm}$
Ancho del ala inferior:	$b_{f_inf} = 400 \text{ mm}$
Espesor del ala inferior:	$t_{f_inf} = 40 \text{ mm}$
Área de la sección de acero:	$A_s = 34720 \text{ mm}^2$
Centro de gravedad:	$y_{CG_s} = 125 \text{ mm}$
Momento de inercia:	$I_s = (3.615 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$
Radio de giro:	$r_{y_s} = 110.862 \text{ mm}$
Constante torsional:	$J = (1.73 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$
Módulo elástico de sección:	$S_{x_s} = (2.892 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$
Módulo plástico de sección:	$Z_{x_s} = (3.476 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$

1.2. CONECTORES DE CORTE



Altura:	$h_{sc} := 80 \text{ mm}$
Largo del ala:	$w := 40 \text{ mm}$
Largo del perfil:	$L_c := 300 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_{wsc} := 4 \text{ mm}$
Espesor del ala:	$t_{fsc} := 4 \text{ mm}$
Número de conectores de corte:	$n_{sc} := 17$
Separación longitudinal:	$p_{sc} := 330 \text{ mm}$

1.3. LOSA DE HORMIGÓN



Recubrimiento de refuerzo:

$$rec_s := 50 \text{ mm}$$

Recubrimiento de conector de corte:

$$rec_{sc} := 70 \text{ mm}$$

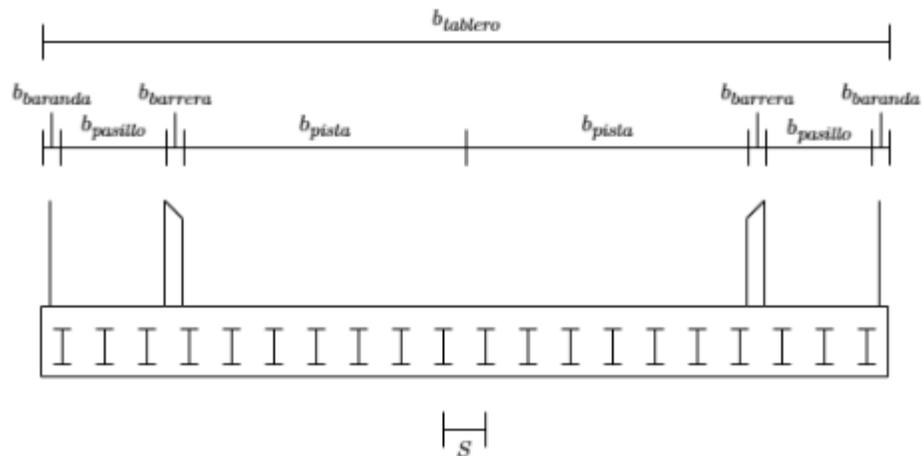
Recubrimiento:

$$rec := \max(rec_s, rec_{sc}) = 70 \text{ mm}$$

Esesor:

$$e_{losa} := 2 \text{ rec} + h_{sc} + h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} = 47 \text{ cm}$$

1.4. TABLERO Y LUZ



Ancho de baranda:

$$b_{baranda} := 15 \text{ cm}$$

Ancho de pasillo:

$$b_{pasillo} := 150 \text{ cm}$$

Ancho de pista:

$$b_{pista} := 400 \text{ cm}$$

Ancho de barrera:

$$b_{barrera} := 36.5 \text{ cm}$$

Área de barrera:

$$A_{barrera} := 2550 \text{ cm}^2$$

Espesor de pavimento:

$$e_{pav} := 5 \text{ cm}$$

Ancho de tablero:

$$b_{tablero} := 2 (b_{baranda} + b_{pasillo} + b_{barrera} + b_{pista})$$

$$b_{tablero} = 12.03 \text{ m}$$

Número de vigas:

$$N_b := 20$$

Separación de vigas:

$$S := 0.6 \text{ m}$$

Ancho de voladizo:

$$b_{voladizo} := \frac{b_{tablero} - (N_b - 1) S}{2} = 0.315 \text{ m}$$

Largo de vigas:

$$L := 15 \text{ m}$$

Largo no arriostrado:

$$L_b := L = 15 \text{ m}$$

2. MATERIALES

2.1. ACERO ESTRUCTURAL

Tensión de fluencia:	$F_y := 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_{s_viga} := 8.00 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$
Tensión de fluencia del alma:	$F_{yw} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia de las alas:	$F_{yf} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en compresión:	$F_{yc} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en tracción:	$F_{yt} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

2.2. HORMIGÓN

Resistencia específica a compresión:	$f'_c := 250 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_c := 15100 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}} = 238.8 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Módulo de rotura:	$f_r := 0.24 \text{ ksi} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\text{ksi}}} = 31.819 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_c := 2.5 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

2.3. ACERO DE REFUERZO

Tensión de fluencia:	$f_y := 4200 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de rotura:	$f_u := 6300 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_s := 7.85 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

3. DISEÑO DE LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO

3.1. CARGAS

3.1.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de losa: $PP_{losa} := \gamma_c \cdot e_{losa} = 1.175 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$

3.1.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento: $PP_{pav} := \gamma_c \cdot e_{pav} = 0.125 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$

Peso propio de baranda: $PP_{baranda} := 0.05 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$

Peso propio de barrera: $PP_{barrera} := \gamma_c \cdot A_{barrera} = 0.638 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$

3.1.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje: $CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$

Carga de rueda segundo y tercer eje: $CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$

Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_camión} := 4.27 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.1.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda: $CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.34 \text{ tonnef} = 5.67 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$

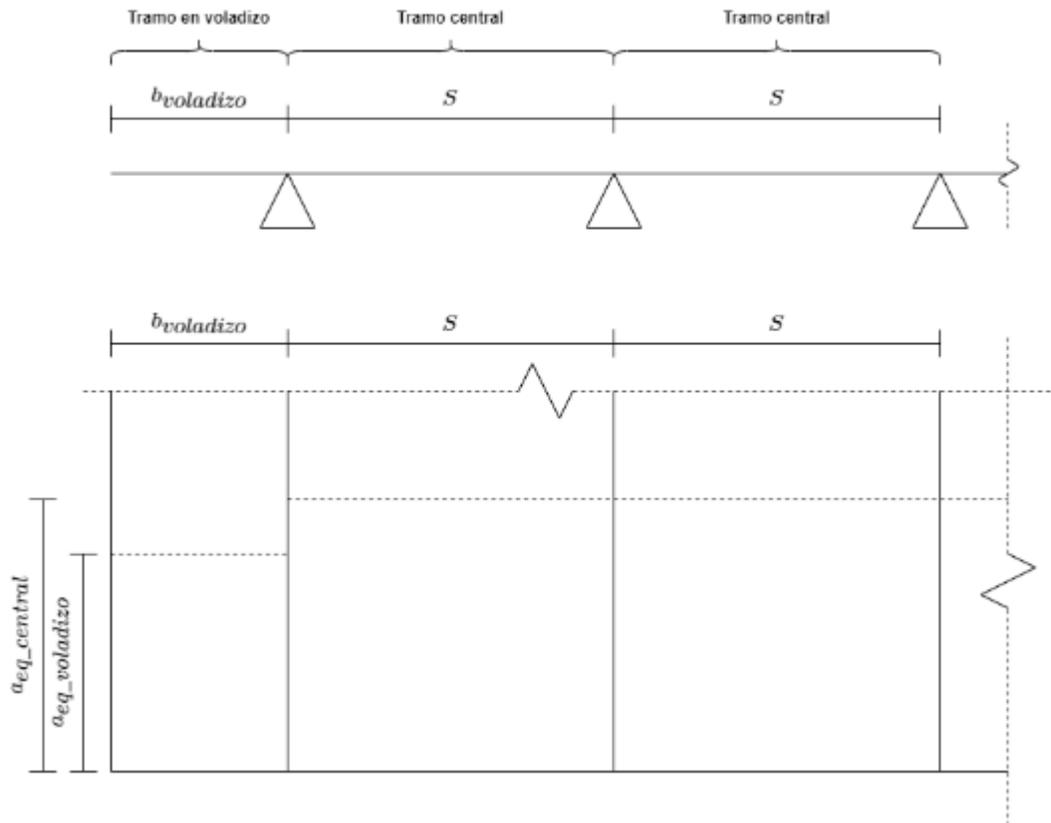
Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.2. ANCHO DE FRANJAS EQUIVALENTES

El ancho de las franjas equivalentes se considera en la dirección longitudinal del puente. Para los tramos centrales, el largo es la distancia entre vigas. Para los voladizos, el largo es el ancho de voladizo. Cada tramo de losa se estudia como una viga simplemente apoyada en las vigas de acero.



Ancho de franja equivalente en tramo central:

$$a_{eq_central} := 0.7 \text{ m} + 6.6 S = 4.66 \text{ m}$$

Distancia X para ancho de franja equivalente en voladizo:

$$X := b_{voladizo} - \frac{b_{baranda}}{2} = 0.24 \text{ m}$$

Ancho de franja equivalente en voladizo:

$$a_{eq_voladizo} := 1.2 \text{ m} + 10 X = 3.6 \text{ m}$$

3.3. DISEÑO DE TRAMOS CENTRALES

Reacción en apoyos por carga muerta:

$$R_{DC} := \frac{PP_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} \cdot a_{eq_central} = 3.294 \text{ tonnef}$$

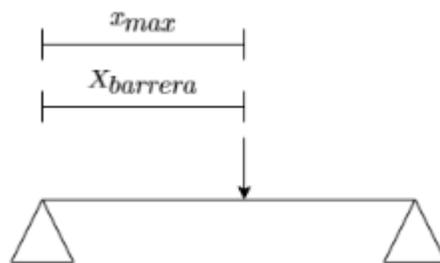
Reacción en apoyos por carga muerta superpuesta:

$$R_{DW} := \left(\frac{PP_{pav} \cdot b_{tablero} + 2 PP_{baranda} + 2 PP_{barrera}}{N_b} \right) \cdot a_{eq_central}$$

$$R_{DW} = 0.671 \text{ tonnef}$$

3.3.1. CASO 1: TRAMO CON BARRERA

Se considera el tramo en el que se ubica la barrera de contención.
El momento máximo se da en el punto central de la barrera.



Distancia de barrera a apoyo más cercano al extremo:

$$X_{barrera} := b_{baranda} + b_{pasillo} + \frac{b_{barrera}}{2} - b_{voladizo} - 2 S = 0.318 \text{ m}$$

Momento en caso tramo con barrera:

$$M_{caso1} := (R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{barrera} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{barrera}^2$$

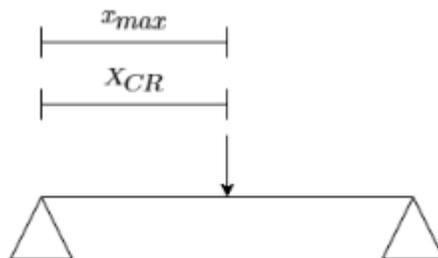
$$M_{caso1} = 0.953 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

3.3.2. CASO 2: TRAMO CON CAMIÓN Ó TÁNDEM

Se considera el tramo con camión de diseño o tándem de diseño.

Se consideran las ruedas más pesadas posibles dentro del ancho efectivo.

El momento máximo se da bajo las ruedas, cuando éstas se ubican en el centro del tramo.



Distancia de carga de rueda a apoyo más desfavorable:	$X_{CR} := \frac{S}{2} = 0.3 \text{ m}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por camión de diseño:	$R_{camión} := \frac{2 CR_{camión\ 2\ 3} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 8.71 \text{ tonnef}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por tándem de diseño:	$R_{tándem} := \frac{2 CR_{tándem} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 5.67 \text{ tonnef}$
Reacción de carga viva más desfavorable:	$R_{LL} := \max(R_{camión}, R_{tándem}) = 8.71 \text{ tonnef}$
Carga de rueda más desfavorable:	$CR_{LL} := \max(2 CR_{camión\ 2\ 3}, 2 CR_{tándem})$ $CR_{LL} = 17.42 \text{ tonnef}$
Momento máximo en caso tramo sin barrera:	$M_{caso2} := (R_{LL} + R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{CR} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{CR}^2$ $M_{caso2} = 3.53 \text{ tonnef} \cdot m$

3.3.3. ACERO DE REFUERZO

3.3.3.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo en la franja equivalente:	$M_u := \max(M_{caso1}, M_{caso2}) = 3.53 \text{ tonnef} \cdot m$
Factor de resistencia para hormigón armado:	$\phi_c := 0.9$
Refuerzo principal requerido:	$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$ $A_{p_req} = 2.226 \text{ cm}^2$
Refuerzo mínimo:	$A_{p_min} := 0.00093 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 4.371 \text{ cm}^2$
Refuerzo dispuesto:	$\phi 10 @ 25 + \phi 10 @ 25$
Refuerzo dispuesto:	$A_p = 6.283 \text{ cm}^2$

3.3.3.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución:
$$Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$$

Refuerzo requerido:
$$A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 4.21 \text{ cm}^2$$

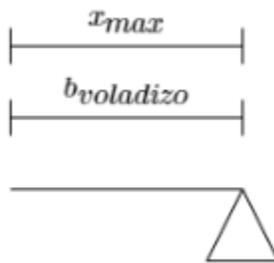
Refuerzo dispuesto:
$$\phi 10@25 + \phi 10@25$$

Refuerzo dispuesto:
$$A_{sec} = 6.283 \text{ cm}^2$$

3.4. DISEÑO DE VOLADIZOS

Se considera el tramo en voladizo.

El momento máximo se da en el apoyo.



Momento máximo en voladizo:
$$M_{voladizo} := -(PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_voladizo} \cdot 0.5 \cdot b_{voladizo}^2$$

$$M_{voladizo} = -0.232 \text{ tonnef} \cdot m$$

3.4.1. ACERO DE REFUERZO

3.4.1.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo total en la franja equivalente:
$$M_u := -M_{voladizo} = 0.232 \text{ tonnef} \cdot m$$

Factor de resistencia para hormigón armado:
$$\phi_c := 0.9$$

Refuerzo principal requerido:
$$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$$

$$A_{p_req} = 0.146 \text{ cm}^2$$

Refuerzo mínimo: $A_{p_min} := 0.00093 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 4.371 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 10@25 + \phi 10@25$

Refuerzo dispuesto: $A_p = 6.283 \text{ cm}^2$

3.4.1.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución: $Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$

Refuerzo requerido: $A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 4.21 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 10@25 + \phi 10@25$

Refuerzo dispuesto: $A_{sec} = 6.283 \text{ cm}^2$

4. DISEÑO DE LAS VIGAS COMPUESTAS

4.1. PROPIEDADES

Ancho efectivo colaborante de la losa para viga interior:

$$b_s := S = 0.6 \text{ m}$$

Espesor de la losa de hormigón:

$$t_s := e_{losa} = 47 \text{ cm}$$

Razón entre módulos de elasticidad:

$$n := \frac{E_s}{E_c} = 8.796$$

4.2. CARGAS

4.2.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de viga de acero:

$$PP_{viga} := \gamma_s \cdot viga \cdot A_s = 0.278 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de losa para cada viga:

$$PP_{losa} := \frac{\gamma_c \cdot e_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 0.707 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento para cada viga

$$PP_{pav} := \frac{\gamma_c \cdot e_{pav} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 0.075 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de baranda para cada viga:

$$PP_{baranda} := \frac{2 PP_{baranda}}{N_b} = 0.005 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de barrera para cada viga:

$$PP_{barrera} := \frac{2 PP_{barrera}}{N_b} = 0.064 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje:
Carga de rueda segundo y tercer eje:

$$CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$$

$$CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre ruedas:

$$a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre dos primeros ejes:

$$a_{lo_camión_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal mínima entre dos últimos ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_min} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal máxima entre dos últimos ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_max} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia transversal a barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda:

$$CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.4 \text{ tonnef} = 5.7 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre ruedas:

$$a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre ruedas:

$$a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$$

Distancia transversal a barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.5. CARGA DE FAJA

Carga de faja:

$$q_{faja} := 0.952 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.6. COEFICIENTE DE IMPACTO DINÁMICO (IM)

Coeficiente de impacto dinámico para estado límite de fatiga:

$$IM_{fatiga} := 15\%$$

Coeficiente de impacto dinámico para el resto de cálculos:

$$IM := 33\%$$

4.2.7. CARGA DE FATIGA

Carga de rueda primer eje:

$$CR_{fatiga_1} := CR_{camión_1} = 2.18 \text{ tonnef}$$

Carga de rueda segundo y tercer eje:

$$CR_{fatiga_2_3} := CR_{camión_2_3} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre ruedas:

$$a_{tr_fatiga} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre dos primeros ejes

$$a_{lo_fatiga_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre dos últimos ejes:

$$a_{lo_fatiga_2_3} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia a barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

Tránsito medio diario anual:

$$ADTT := 3000$$

Factor p para dos fajas de tránsito:

$$p := 0.85$$

Frecuencia de carga de fatiga:

$$ADTT_{SL} := p \cdot ADTT = 2550$$

4.3. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN

Se considera que la sección transversal se deforma y rota como un cuerpo rígido.

Factor de presencia múltiple para 1 vía cargada:

$$m_1 := 1.20$$

Factor de presencia múltiple para 2 vías cargadas:

$$m_2 := 1.00$$

1 vía cargada:

$$N_{L,1} := 1$$

2 vías cargadas:

$$N_{L,2} := 2$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 1:

$$e_1 := b_{pista} - d - 0.5 a_{tr_camión} = 2.485 \text{ m}$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 2:

$$e_2 := e_1 = 2.485 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y la viga exterior:

$$X_{ext} := 0.5 b_{tablero} - b_{voladizo} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las primeras vigas:

$$X_1 := X_{ext} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las segundas vigas:

$$X_2 := X_{ext} - S = 5.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las terceras vigas:

$$X_3 := X_2 - S = 4.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las cuartas vigas:

$$X_4 := X_3 - S = 3.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las quintas vigas:

$$X_5 := X_4 - S = 3.3 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las sextas vigas:

$$X_6 := X_5 - S = 2.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las séptimas vigas:

$$X_7 := X_6 - S = 2.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las octavas vigas:

$$X_8 := X_7 - S = 1.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las novenas vigas:

$$X_9 := X_8 - S = 0.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las décimas vigas:

$$X_{10} := X_9 - S = 0.3 \text{ m}$$

4.3.1. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA MOMENTO

Factor de distribución para momento para 1 vía cargada:

$$g_{M_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para momento para 2 vías cargadas:

$$g_{M_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.3.2. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA CORTE

Factor de distribución para corte para 1 vía cargada:

$$g_{V_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para corte para 2 vías cargadas:

$$g_{V_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.4. DISEÑO A FLEXIÓN

Factor de resistencia a flexión:

$$\phi_f := 1.0$$

4.4.1. CONSTRUCCIÓN

4.4.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Área de la sección:

$$A_s := A_s = 34720 \text{ mm}^2$$

Distancia entre los centroides de las alas:

$$h := h_w + 0.5 t_{f_inf} + 0.5 t_{f_sup} = 210 \text{ mm}$$

Momento de inercia:

$$I_s := I_s = (3.615 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Constante torsional:

$$J := J = (1.73 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

Módulo elástico de la sección para el ala en compresión:

$$S_{xc} := S_{x_s} = (2.892 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Módulo elástico de la sección para el ala en tracción:

$$S_{xt} := S_{xc} \cdot \frac{y_{CG_s}}{(h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} - y_{CG_s})} = (2.892 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Módulo plástico de la sección para el ala en compresión:

$$Z_{xc} := Z_{x_s} = (3.476 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Radio de giro:

$$r_y := r_{y_s} = 110.862 \text{ mm}$$

Radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional:

$$r_t := \sqrt{\frac{I_s \cdot h}{2 S_{xc}}} = 114.564 \text{ mm}$$

Tensión en el ala en compresión en el punto de fluencia:

$$F_{yr} := \min \left(0.7 F_{yc}, F_{yt} \cdot \frac{S_{xt}}{S_{xc}}, F_{yw} \right)$$

$$F_{yr} := \max (F_{yr}, 0.5 F_{yc}) = 2460.5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Longitud límite para resistencia por fluencia:

$$L_p := 1.76 r_y \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 4.769 \text{ m}$$

Longitud límite para pandeo torsional inelástico:

$$L_r := 1.95 r_t \cdot \frac{E_s}{F_{yr}} \cdot \sqrt{\frac{J}{S_{xc} \cdot h} + \sqrt{\left(\frac{J}{S_{xc} \cdot h}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{F_{yr}}{E_s}\right)^2}}$$

$$L_r = 45.574 \text{ m}$$

4.4.1.2. RESISTENCIA A FLEXIÓN

Combinación de carga: Resistencia I: 1.25 DC

Momento en viga por cargas en construcción: $M(x) := 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{L}{2} \cdot x - 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{x^2}{2}$

Momento máximo en viga por cargas en construcción: $M_{max} := M\left(\frac{L}{2}\right) = 34.612 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en primer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_A := M\left(\frac{L}{4}\right) = 25.959 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en segundo cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_B := M\left(\frac{L}{2}\right) = 34.612 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en tercer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_C := M\left(\frac{L}{4}\right) = 25.959 \text{ tonnef} \cdot m$

Factor de modificación por pandeo lateral torsional: $C_b := \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} = 1.136$

Momento plástico: $R_{pc} M_{yc} := F_{yc} \cdot Z_{xc} = 122.167 \text{ tonnef} \cdot m$

Tensión crítica: $F_{cr} := \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E_s}{\left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + 0.0078 \frac{J}{S_{xc} \cdot h} \cdot \left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2}$

$$F_{cr} = 3012.827 \frac{kgf}{cm^2}$$

Resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$M_{nc} := \begin{cases} \text{if } L_b \leq L_p \\ \quad \parallel R_{pc} M_{yc} \\ \text{else if } L_b \leq L_r \\ \quad \parallel C_b \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{F_{yr} \cdot S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}}\right) \cdot \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right) \cdot R_{pc} M_{yc} \\ \text{else} \\ \quad \parallel F_{cr} \cdot S_{xc} \end{cases}$$

$$M_{nc} := \min(M_{nc}, R_{pc} M_{yc}) = 122.167 \text{ tonnef} \cdot m$$

Esfuerzo de resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$F_{nc} := \frac{M_{nc}}{S_{xc}} = 4224.507 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Momento último:

$$M_u := M_{max} = 34.612 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo en el ala en compresión:

$$f_{bu} := \frac{M_u}{S_{xc}} = 1196.876 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Chequeo de requerimientos por flexión en etapas críticas de construcción:

Primer chequeo: $f_{bu} = 1196.876 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{yc} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f_{bu} = 1196.876 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{nc} = 4224.507 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

4.4.1.3. DEFORMACIÓN POR CARGAS MUERTAS

Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW

Flecha por carga muerta DC: $flecha_{DC} := \frac{5 (PP_{losa} + PP_{viga}) L^4}{384 E_s \cdot I_s} = 85.491 \text{ mm}$

Flecha por carga muerta superpuesta DW: $flecha_{DW} := \frac{5 (PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^4}{384 E_s \cdot I_s}$

$$flecha_{DW} = 12.499 \text{ mm}$$

Contraflecha total a dar a vigas de acero:

$$contraflecha := flecha_{DC} + flecha_{DW} = 97.99 \text{ mm}$$

4.4.2. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

4.4.2.1. DEFORMACIONES ELÁSTICAS

4.4.2.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO

Se debe considerar la rigidez del sistema completo.

Ancho transformado de hormigón:
$$b_{c_tr} := \frac{b_{\text{tablero}}}{n} = 1.368 \text{ m}$$

Centro de gravedad:
$$y_{CG_tr_s} := \frac{N_b \cdot A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr} \cdot 0.5 t_s}{N_b \cdot A_s + t_s \cdot b_{c_tr}} = 25.577 \text{ cm}$$

Inercia del sistema completo:
$$I_{\text{sist}} = (I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_tr_s})^2) \cdot N_b + \frac{b_{c_tr} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_tr_s})^2$$

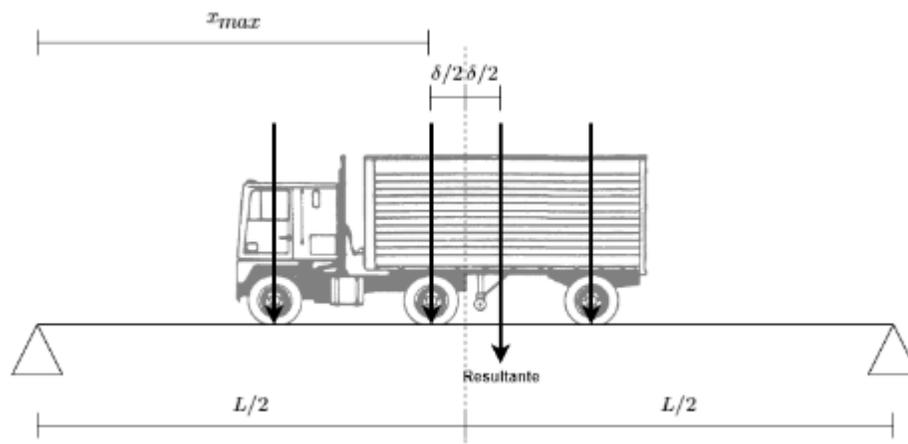
$$I_{\text{sist}} = (1.96 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.1.2. CÁLCULO DE DEFORMACIONES

Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW + 1.0 IM LL

Carga muerta es contrarrestada por la contraflecha durante etapas de construcción.
Se deben cargar todas las vías de diseño.

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
La flecha máxima se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{camión} = \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_{camión_1,2}} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_{camión_2,3_{min}}}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_{camión_1,2}} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_{camión_2,3_{min}}} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 23.596 \text{ tonnef}$$

Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

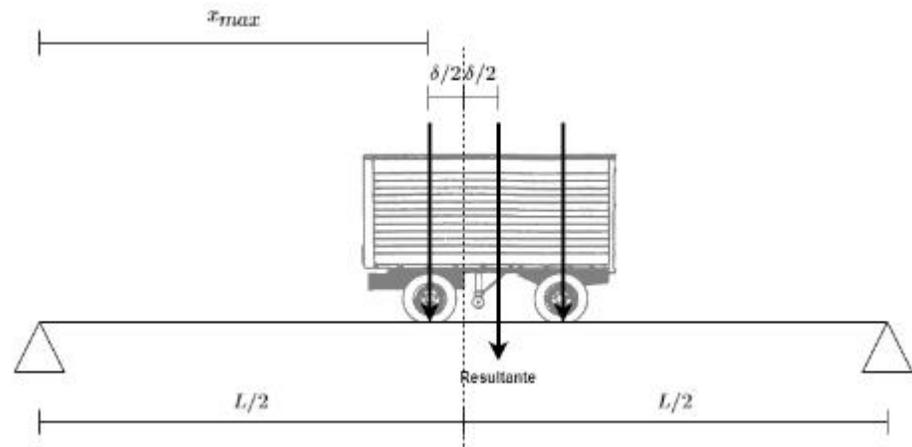
$$M_{camión}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_{camión_1,2}} \\ \quad \left\| R_{camión} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \\ \quad \left\| R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_{camión_1,2}} \right) \right) \right\| \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_{camión_1,2}} \right) \right) - 2 CR_{camión_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \right) \right) \right\| \end{cases}$$

Flecha máxima por camión de diseño:

$$flecha_{camión} := - \left(\int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)} \left(\int_0^x \frac{M_{camión}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \cdot \int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)} \frac{M_{camión}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) = 5.29 \text{ mm}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

La flecha máxima se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tándem} := \frac{a_{lo_tándem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tándem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \frac{L + \delta_{tándem} - a_{lo_tándem}}{L}$$

$$R_{tándem} = 14.545 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tándem}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \\ \quad \left| \begin{array}{l} R_{tándem} \cdot x \\ \text{else} \\ R_{tándem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right) \end{array} \right. \end{cases}$$

Flecha máxima por tándem de diseño:

$$flecha_{tándem} := - \left(\int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \left(\int_0^x \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \cdot \int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) = 4.388 \text{ mm}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Flecha por carga de faja:

$$flecha_{faja}(x) := - \left(\int_0^x \left(\int_0^s \frac{q_{faja} \cdot L \cdot s^2 - q_{faja} \cdot s^3}{4 \cdot E_s \cdot I_{sist}} ds \right) dx - x \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{M_{faja}(s)}{E_s \cdot I_{sist}} ds \right)$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja, cargando ambas vías:

Flecha máxima por camión de diseño y carga de faja:

$$flecha_{camión_faja} := 2 \cdot flecha_{camión} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)$$

$$flecha_{camión_faja} = 13.597 \text{ mm}$$

Flecha máxima por tándem de diseño y carga de faja:

$$flecha_{tándem_faja} := 2 \cdot flecha_{tándem} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right)$$

$$flecha_{tándem_faja} = 11.82 \text{ mm}$$

Flecha máxima por carga viva:

$$flecha_{IM_LL} := \max(flecha_{camión_faja}, flecha_{tándem_faja})$$

$$flecha_{IM_LL} = 13.597 \text{ mm}$$

Deformación máxima por combinación de carga Servicio I:

$$\Delta_{max} := flecha_{IM_LL} = 13.597 \text{ mm}$$

Chequeo de requerimientos por deformaciones elásticas:

Chequeo: $\Delta_{max} = 13.597 \text{ mm} \leq \frac{L}{800} = 18.75 \text{ mm}$

OK.

4.4.2.2. DEFORMACIONES PERMANENTES

4.4.2.2.1. SECCIÓN RESISTENTE 1: SECCIÓN DE ACERO

Centro de gravedad: $y_{CG_s} = 12.5 \text{ cm}$

Inercia de la sección de acero: $I_s = (3.615 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$

4.4.2.2.2. SECCIÓN RESISTENTE 2: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_cp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 25.58 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_cp_s})^2 + \frac{b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_cp_s})^2$

$$I_{tr_cp_s} = (9.783 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.3. SECCIÓN RESISTENTE 3: SECCIÓN COMPUESTA EN EL LARGO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{3 n} = 0.023 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_lp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 26.559 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta:

$$I_{tr_lp,s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG,s} + rec + h_{sc} - y_{CG,lp,s})^2 + \frac{b_{c,tr,lp,s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c,tr,lp,s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG,lp,s})^2$$

$$I_{tr_lp,s} = (5.713 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.4. SECCIÓN RESISTENTE 4: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO Y LARGO PLAZO TRANSFORMADA A HORMIGÓN

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Espesor del alma transformado:

$$t_{w_tr_c} := t_w \cdot n = 14.073 \text{ cm}$$

Ancho del ala superior transformado:

$$b_{f_sup_tr_c} := b_{f_sup} \cdot n = 351.83 \text{ cm}$$

Ancho del ala inferior transformado:

$$b_{f_inf_tr_c} := b_{f_inf} \cdot n = 351.83 \text{ cm}$$

Centro de gravedad:

$$y_{CG_tr_c} := \frac{A_s \cdot n \cdot (y_{CG,s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot S \cdot 0.5 t_s}{A_s \cdot n + t_s \cdot S} = 25.58 \text{ cm}$$

Momento de inercia:

$$I_{tr_c} = (8.626 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.5. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Servicio II:

$$1.0 \text{ DC} + 1.0 \text{ DW} + 1.3 \text{ IM LL}$$

Momento máximo por carga muerta DC:

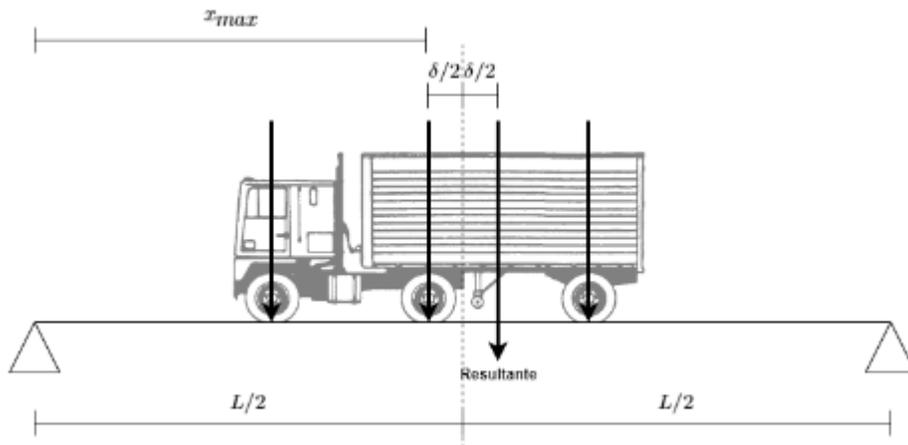
$$M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 27.69 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga muerta superpuesta DW:

$$M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$$

$$M_{DW} = 4.048 \text{ tonnef} \cdot m$$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
 Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
 El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{camión} = \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_camión_1,2} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_camión_2,3_min}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} = (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_camión_1,2} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_camión_2,3_min} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 23.596 \text{ tonnef}$$

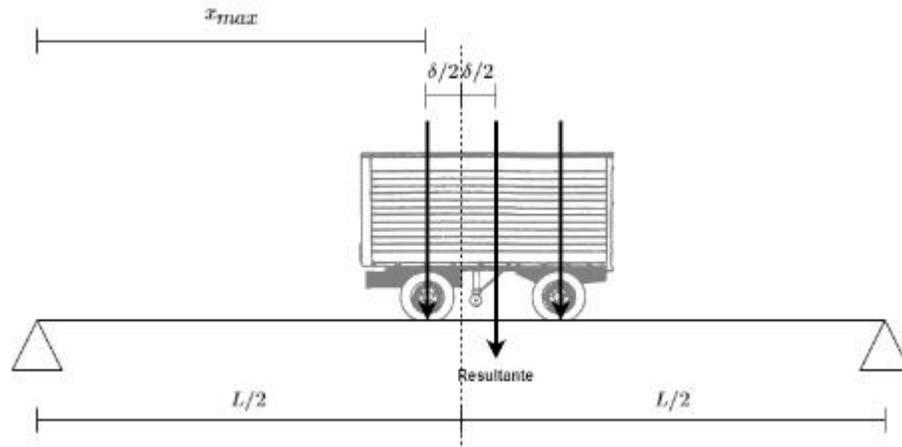
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{camión}(x) = \begin{cases} R_{camión} \cdot x & \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \\ R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) & \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \\ R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) - 2 CR_{camión_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \right) \right) & \text{else} \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño:

$$M_{max_camión} := M_{camión} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) = 135.423 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

**Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:
El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.**



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tandem} := \frac{a_{lo_tandem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tandem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tandem} \cdot \frac{L + \delta_{tandem} - a_{lo_tandem}}{L}$$

$$R_{tandem} = 14.545 \text{ tonnef}$$

Momento entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tandem}(x) := \begin{cases} R_{tandem} \cdot x & \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tandem}}{2} \\ R_{tandem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tandem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tandem}}{2} \right) \right) & \text{else} \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tandem} := M_{tandem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tandem}}{2} \right) = 104.654 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} := \max \left(M_{max_camion} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camion}}{2} \right), M_{max_tandem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tandem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 161.957 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 35.361 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo máximo en el hormigón en tracción:

$$f := \frac{M_{DW} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}}$$

$$f = 124.211 \frac{kgf}{cm^2} \leq 2 f_r = 63.637 \frac{kgf}{cm^2}$$

Si el esfuerzo máximo en el hormigón a tracción supera el límite, se considera que el esfuerzo por deformaciones permanentes debe ser calculado utilizando sólo la sección de acero.

Esfuerzo máximo en el ala en compresión de la viga de acero:

$$f_{fc} := \frac{M_{DC} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{fc} = 2687.077 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en el ala en tracción de la viga de acero:

$$f_{ft} := \frac{M_{DC} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{ft} = 2687.077 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en la viga de acero:

$$f_f := \max(f_{fc}, f_{ft}) = 2687.077 \frac{kgf}{cm^2}$$

Chequeo de requerimientos por deformaciones permanentes:

Primer chequeo: $f_f = 2687.077 \frac{kgf}{cm^2} \leq 0.95 \cdot F_{yf} = 3339.25 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f = 124.211 \frac{kgf}{cm^2} \leq 4 f_r = 127.274 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

4.4.3. ESTADO LÍMITE DE FATIGA

4.4.3.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 170 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.4.3.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| 1.0 \right. \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \right. \end{array} \right\| = 1$$

Resistencia a corte por fluencia:

$$V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 55.453 \text{ tonnef}$$

Corte crítico:

$$V_{cr} := C \cdot V_p = 55.453 \text{ tonnef}$$

4.4.3.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Corte máximo por carga muerta DC:

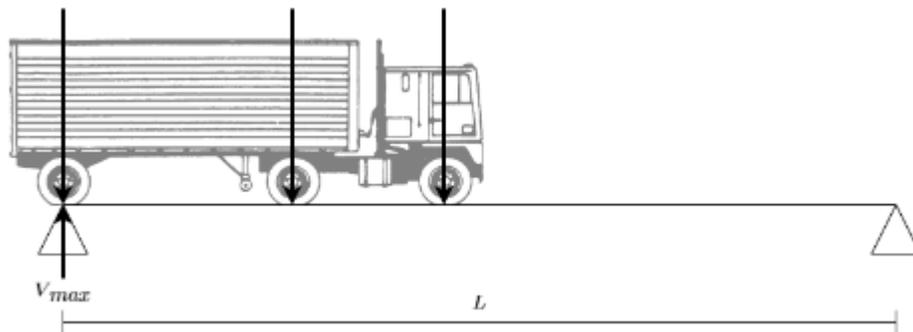
$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 7.384 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 1.08 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1.2} + a_{lo_fatiga_2.3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2.3} - a_{lo_fatiga_1.2}) \right) + \frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 28.374 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V.1} \cdot V_{fatiga}, g_{V.2} \cdot V_{fatiga}) = 6.195 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 17.756 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de fatiga:

$$\text{Chequeo: } V_u = 17.756 \text{ tonnef} \quad \leq \quad V_{cr} = 55.453 \text{ tonnef}$$

OK.

4.4.4. ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

4.4.4.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo sólo en compresión.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 170 \text{ mm}$

Centro de gravedad: $y_{CG_tr_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_s}}$

$y_{CG_tr_s} = 25.58 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} := I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_tr_s})^2 + \frac{b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s}^3}{12} + b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s} \cdot (0.5 y_{CG_tr_s})^2$

$I_{tr_cp_s} = (7.549 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$

Profundidad de la sección compuesta: $D_t := t_s = 47 \text{ cm}$

4.4.4.2. MOMENTO PLÁSTICO

Eje neutro plástico desde el borde superior de la losa:

$$c := \begin{cases} \text{if } 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc}) \geq F_y \cdot A_s \\ \quad \frac{F_y \cdot A_s}{0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup}) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \geq F_y \cdot (h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \quad \frac{F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} + 2 rec + 2 h_{sc}) + h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf})}{2 F_y \cdot b_{f_sup} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + h_w \cdot t_w) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \geq F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \quad \frac{F_y \cdot (t_w \cdot (h_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup})}{2 F_y \cdot t_w + 0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else} \\ \quad \frac{F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot (t_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup} + 2 h_w) - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} - h_w \cdot t_w)}{2 F_y \cdot b_{f_inf} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \end{cases}$$

$c = 18.501 \text{ cm}$

Área de hormigón a compresión: $A_{c_e} := b_s \cdot c = 1110.068 \text{ cm}^2$

Área de acero a compresión:

$$A_{s,c} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel 0 \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \\ \text{else} \\ \quad \parallel A_s \end{cases}$$

$$A_{s,c} = 140.045 \text{ cm}^2$$

Área de acero a tracción:

$$A_{s,t} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel A_s \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel A_s - b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)) \\ \text{else} \\ \quad \parallel 0 \end{cases}$$

$$A_{s,t} = 207.155 \text{ cm}^2$$

Centro del área del hormigón en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{c,c}} := \frac{c}{2} = 9.251 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s,c}} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel \text{"No aplica"} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \cdot (t_{f,sup} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \cdot (t_{f,sup} + h_w + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + y_{CG_{c,c}} \end{cases}$$

$$y_{CG_{s,c}} = 16.751 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en tracción desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s,t}} := \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ \quad rec + h_{sc} + y_{CG_{s,c}} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ \quad c + \frac{b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) + h_w \cdot t_w \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + 0.5 h_w) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + h_w + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - b_{f_sup} \cdot (c - rec - h_{sc})} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ \quad c + \frac{t_w \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \cdot 0.5 \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}))} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ \quad c + \frac{b_{f_inf} \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w)}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot h_w + b_{f_inf} \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup} - h_w))} \\ \text{else} \\ \quad \text{"No aplica" } \end{cases}$$

$$y_{CG_{s,t}} = 34.767 \text{ cm}$$

Distancia desde el borde superior de la losa al eje neutro plástico:

$$D_p := c = 18.501 \text{ cm}$$

Profundidad del alma de la viga de acero a compresión:

$$D_{cp} := \max(c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}, 0 \text{ cm}) = 0 \text{ cm}$$

Momento plástico:

$$M_p := \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,t} \cdot (y_{CG_{s,t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,c} \cdot (c - y_{CG_{s,c}}) + F_y \cdot A_{s,t} \cdot (y_{CG_{s,t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,c} \cdot (c - y_{CG_{s,c}}) + F_y \cdot A_{s,t} \cdot (y_{CG_{s,t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,c} \cdot (c - y_{CG_{s,c}}) + F_y \cdot A_{s,t} \cdot (y_{CG_{s,t}} - c) \right\| \\ \text{else} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,c} \cdot (c - y_{CG_{s,c}}) \right\| \end{cases}$$

$$M_p = 148.879 \text{ tonnef} \cdot m$$

4.4.4.3. COMPACIDAD DE LA SECCIÓN

Chequeo de requerimientos de compacidad de la sección:

Primer chequeo: $F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq 4921 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $\frac{D}{t_w} = 10.625 \leq 150$

OK.

Tercer chequeo: $\frac{2 D_{cp}}{t_w} = 0 \quad \leq \quad 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 91.904$
OK.

La sección califica como: **COMPACTA**

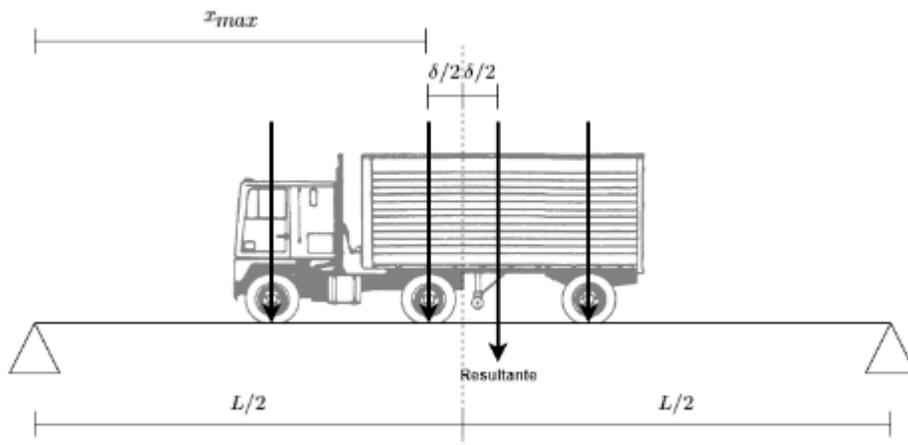
4.4.4.4. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Resistencia I: **1.25 DC + 1.50 DW + 1.75 IM LL**

Momento máximo por carga muerta DC: $M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 27.69 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento máximo por carga muerta superpuesta DW: $M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$
 $M_{DW} = 4.048 \text{ tonnef} \cdot m$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante: $\delta_{camión} := \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_{camión_1,2}} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_{camión_2,3_{min}}}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_{camión_1,2}} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_{camión_2,3_{min}}} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 23.596 \text{ tonnef}$$

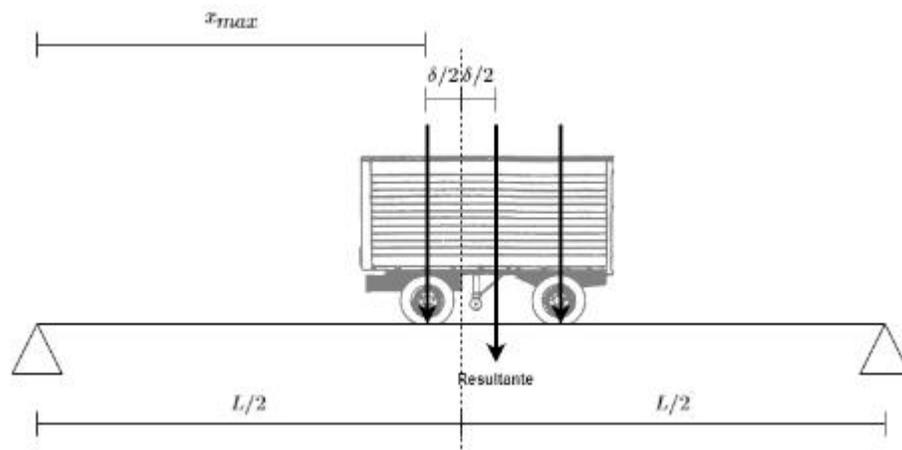
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{camión}}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión}_{1,2}} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{camión}_{1,2}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión}_{1,2}} \right) \right) \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{\text{camión}_{1,2}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión}_{1,2}} \right) \right) - 2 CR_{\text{camión}_{2,3}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño: $M_{\text{max_camión}} := M_{\text{camión}} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) = 135.423 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{\text{tándem}} := \frac{a_{\text{lo_tándem}}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{\text{tándem}} := (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \frac{L + \delta_{\text{tándem}} - a_{\text{lo_tándem}}}{L}$$

$$R_{\text{tándem}} = 14.545 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{tándem}}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tándem} := M_{tándem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) = 104.654 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} = \max \left(M_{max_camión} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right), M_{max_tándem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 161.957 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 35.361 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento último:

$$M_u := 1.25 \cdot M_{DC} + 1.50 M_{DW} + 1.75 \cdot M_{LL}$$

$$M_u = 102.566 \text{ tonnef} \cdot m$$

Resistencia nominal a flexión:

$$M_n := \left\| \begin{array}{l} \text{if } D_p \leq 0.1 D_t \\ \left\| M_p \right\| \\ \text{else} \\ \left\| M_p \cdot \left(1.07 - 0.7 \frac{D_p}{D_t} \right) \right\| \end{array} \right\| = 118.277 \text{ tonnef} \cdot m$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de resistencia:

Chequeo: $M_u = 102.566 \text{ tonnef} \cdot m \leq \phi_f \cdot M_n = 118.277 \text{ tonnef} \cdot m$

OK.

4.4.4.5. DUCTILIDAD

Chequeo de requerimientos de ductilidad:

Chequeo: $D_p = 18.501 \text{ cm} \leq 0.42 D_t = 19.74 \text{ cm}$

OK.

4.5. DISEÑO A CORTE

Factor de resistencia a corte: $\phi_v := 1.0$

4.5.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 170 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.5.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| 1.0 \right. \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \right. \end{array} \right\| = 1$$

Resistencia a corte por fluencia: $V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 55.453 \text{ tonnef}$

Resistencia nominal al corte: $V_n := C \cdot V_p = 55.453 \text{ tonnef}$

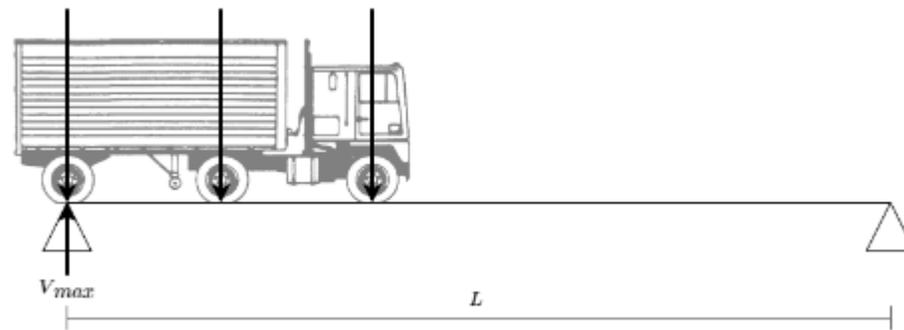
4.5.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Resistencia I: $1.25 \text{ DC} + 1.50 \text{ DW} + 1.75 \text{ IM LL}$

Corte máximo por carga muerta DC: $V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 7.384 \text{ tonnef}$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW: $V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 1.08 \text{ tonnef}$

Posición de camión de diseño que produce el mayor corte:
 El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje del camión.

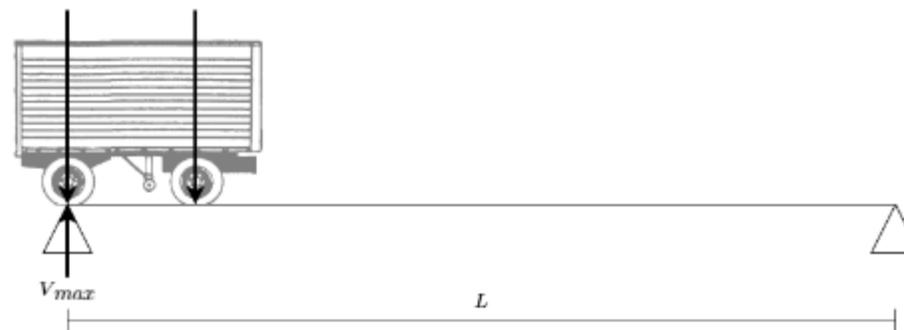


Corte máximo por camión de diseño:

$$V_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_camión_2.3_min} - a_{lo_camión_1.2}) + \frac{2 CR_{camión_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_camión_2.3_min}) \right)$$

$$V_{camión} = 42.239 \text{ tonnef}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor corte:
 El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el segundo eje del tándem.



Corte máximo por tándem de diseño:

$$V_{tándem} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{tándem}}{L} \cdot (2L - a_{lo_tándem}) \right)$$

$$V_{tándem} = 29.091 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de faja:

$$V_{faja} := \frac{q_{faja} \cdot L}{2} = 7.14 \text{ tonnef}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Corte máximo por carga viva LL:

$$V_{LL} := \max(V_{camión} + V_{faja}, V_{tándem} + V_{faja})$$

$$V_{LL} = 49.379 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga viva distribuido:

$$V_{LL} := \max(g_{V_1} \cdot V_{LL}, g_{V_2} \cdot V_{LL}) = 10.781 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := 1.25 V_{DC} + 1.50 V_{DW} + 1.75 V_{LL}$$

$$V_u = 29.716 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos de resistencia al corte:

Chequeo: $V_u = 29.716 \text{ tonnef} \leq \phi_v \cdot V_n = 55.453 \text{ tonnef}$

OK.

5. CONECTORES DE CORTE

Factor de resistencia de conectores de corte:

$$\phi_{sc} := 0.85$$

Resistencia a la fatiga de un conector de corte:

$$Z_r := 0.375 \text{ tonnef} \cdot \frac{w}{cm} = 1.5 \text{ tonnef}$$

Fuerza de corte nominal:

$$P := \min(0.85 f_c \cdot b_s \cdot t_s, F_{yw} \cdot D \cdot t_w + F_{yt} \cdot b_{f.inj} \cdot t_{f.inj} + F_{yc} \cdot b_{f.smp} \cdot t_{f.smp})$$

$$P = 599.25 \text{ tonnef}$$

Resistencia nominal al corte de un conector de corte:

$$Q_n := 0.3 \cdot (t_{f.sc} + 0.5 t_{w.sc}) \cdot L_c \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c}$$

$$Q_n = 41.719 \text{ tonnef}$$

Resistencia al corte de un conector de corte:

$$Q_r := \phi_{sc} \cdot Q_n = 35.461 \text{ tonnef}$$

5.1. NÚMERO DE CONECTORES DE CORTE

El número de conectores de corte requerido corresponde a los necesarios entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

Chequeo de requerimientos de número de conectores de corte:

Chequeo:
$$n_{sc_req} := \frac{P}{Q_r} = 16.899 \quad \leq \quad n_{sc} = 17$$

OK.

5.2. SEPARACIÓN LONGITUDINAL

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Se debe cumplir con la separación longitudinal máxima normativa, correspondiente a 600 mm.

También se debe cumplir con el requerimiento de separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga.

Además, se verifica la separación longitudinal máxima tal que se ubique el número de conectores de corte requerido entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

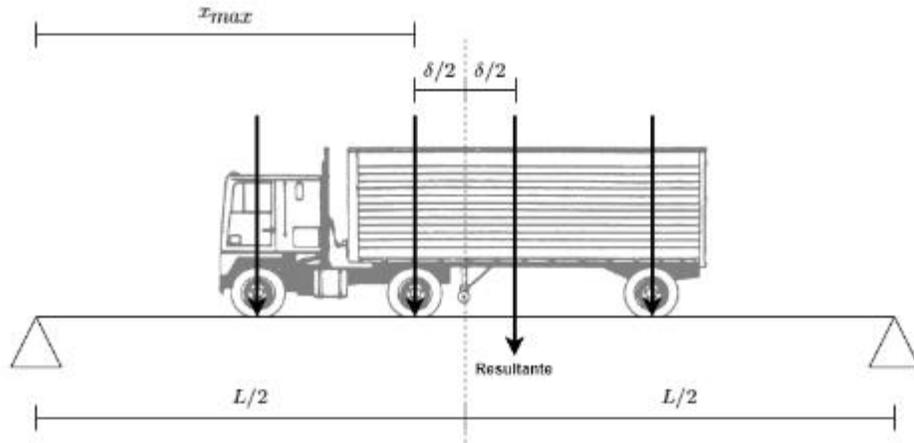
Corte máximo por carga muerta DC:

$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 7.384 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 1.08 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor momento:
El momento máximo se da bajo el segundo eje de la carga de fatiga.

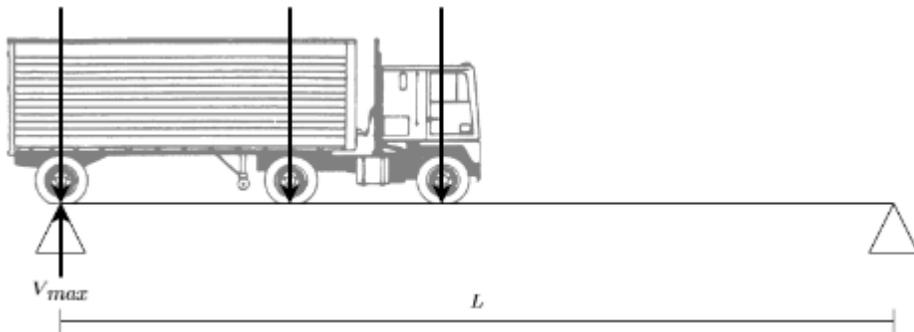


Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{fatiga} := \frac{-2 CR_{fatiga_1} \cdot a_{lo_fatiga_1_2} + 2 CR_{fatiga_2_3} \cdot a_{lo_fatiga_2_3}}{2 CR_{fatiga_1} + 4 CR_{fatiga_2_3}}$$

$$\delta_{fatiga} = 3.591 \text{ m}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:
El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1,2} + a_{lo_fatiga_2,3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2,3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2,3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2,3} - a_{lo_fatiga_1,2}) + \frac{2 CR_{fatiga_2,3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2,3}) \right) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 28.374 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V,1} \cdot V_{fatiga}, g_{V,2} \cdot V_{fatiga}) = 6.195 \text{ tonnef}$$

Corte por combinación de fatiga:

$$V_f := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 17.756 \text{ tonnef}$$

Primer momento del área de hormigón a compresión en torno al eje neutro de la sección compuesta en el corto plazo:

$$Q := \frac{b_s}{n} \cdot y_{CG_cp_s} \cdot \frac{y_{CG_cp_s}}{2} = (2.232 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Inercia de la sección compuesta en el corto plazo:

$$I_{tr_cp_s} = (7.549 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Resistencia longitudinal a corte por fatiga por unidad de largo:

$$V_{fat} := \frac{V_f \cdot Q}{I_{tr_cp_s}} = 0.052 \frac{\text{tonnef}}{\text{mm}}$$

Separación longitudinal máxima normativa:

$$p_{sc_norm} := 600 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga:

$$p_{sc_fatiga} := \frac{n_{sc} \cdot Z_r}{V_{fat}} = 485.766 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por número requerido:

$$p_{sc_num} := \frac{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{fatiga}}{2} \right)}{n_{sc}} = 335.552 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima:

$$p_{max} := \min(p_{sc_norm}, p_{sc_fatiga}, p_{sc_num}) = 335.552 \text{ mm}$$

Chequeo de requerimientos de separación longitudinal:

Chequeo:

$$p_{sc} = 330 \text{ mm}$$

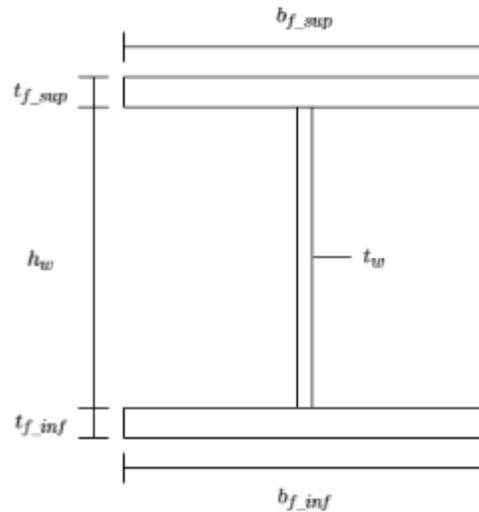
$$\leq p_{max} = 335.552 \text{ mm}$$

OK.

A.3. L = 20 m

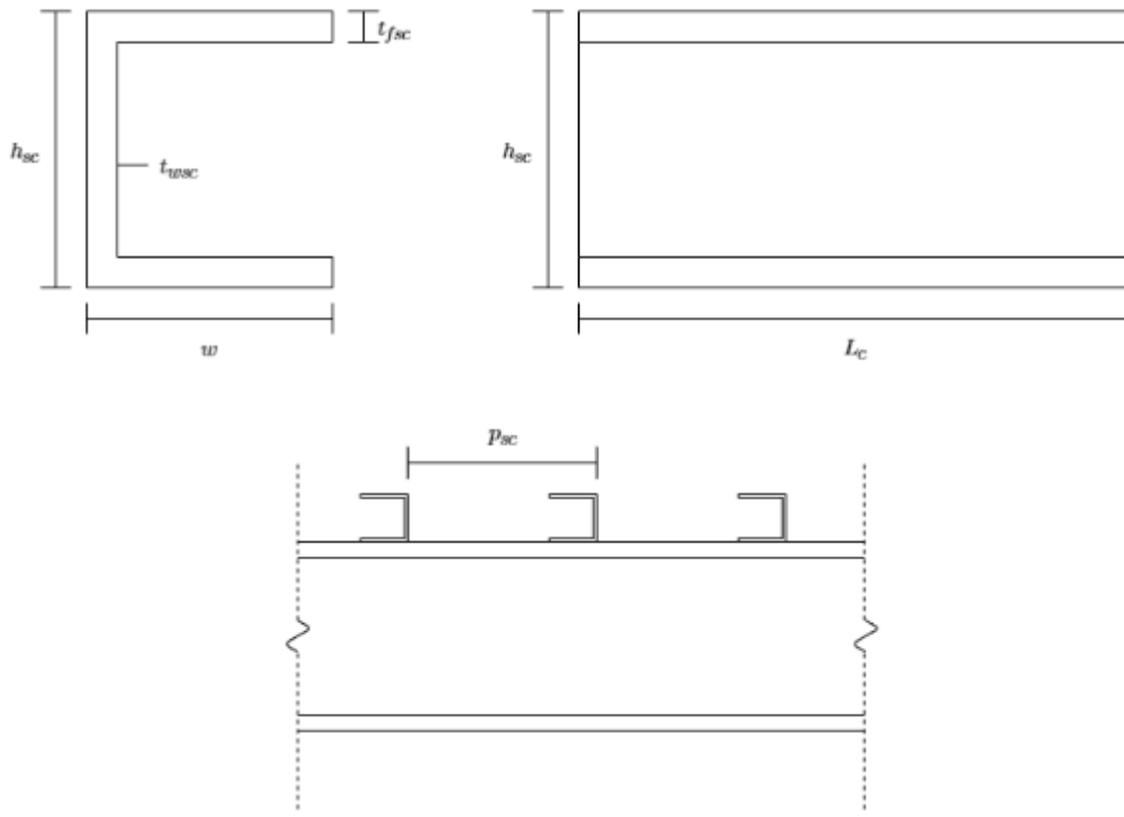
1. DIMENSIONES

1.1. VIGAS DE ACERO



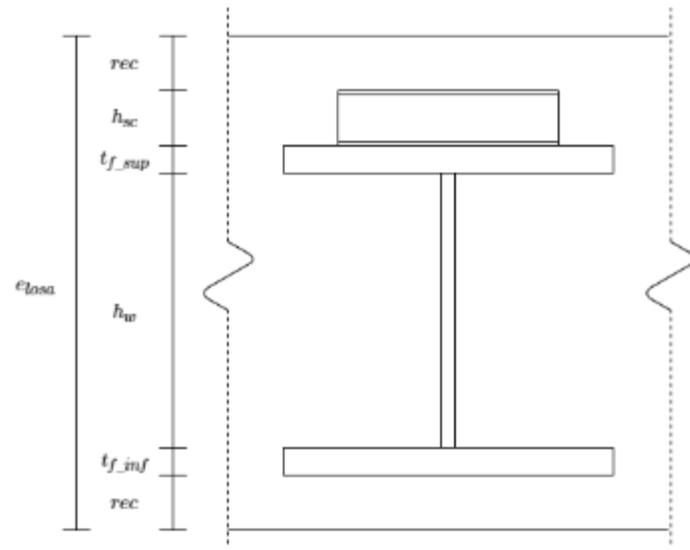
Altura del alma:	$h_w = 270 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_w = 16 \text{ mm}$
Ancho del ala superior:	$b_{f_sup} = 400 \text{ mm}$
Espesor del ala superior:	$t_{f_sup} = 40 \text{ mm}$
Ancho del ala inferior:	$b_{f_inf} = 400 \text{ mm}$
Espesor del ala inferior:	$t_{f_inf} = 40 \text{ mm}$
Área de la sección de acero:	$A_s = 36320 \text{ mm}^2$
Centro de gravedad:	$y_{CG_s} = 175 \text{ mm}$
Momento de inercia:	$I_s = (7.972 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$
Radio de giro:	$r_{y_s} = 108.397 \text{ mm}$
Constante torsional:	$J = (1.744 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$
Módulo elástico de sección:	$S_{x_s} = (4.555 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$
Módulo plástico de sección:	$Z_{x_s} = (5.252 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$

1.2. CONECTORES DE CORTE



Altura:	$h_{sc} := 80 \text{ mm}$
Largo del ala:	$w := 40 \text{ mm}$
Largo del perfil:	$L_c := 300 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_{wsc} := 4 \text{ mm}$
Espesor del ala:	$t_{fsc} := 4 \text{ mm}$
Número de conectores de corte:	$n_{sc} := 21$
Separación longitudinal:	$p_{sc} := 390 \text{ mm}$

1.3. LOSA DE HORMIGÓN



Recubrimiento de refuerzo:

$$rec_s := 50 \text{ mm}$$

Recubrimiento de conector de corte:

$$rec_{sc} := 70 \text{ mm}$$

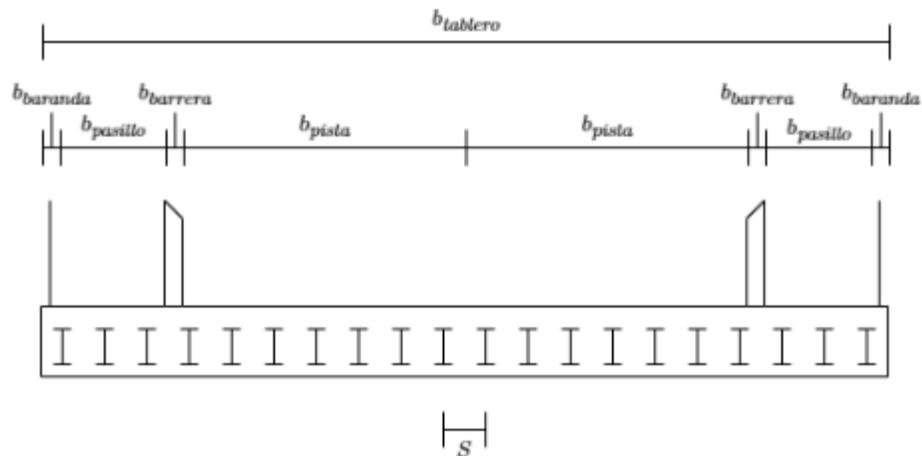
Recubrimiento:

$$rec := \max(rec_s, rec_{sc}) = 70 \text{ mm}$$

Espesor:

$$e_{losa} := 2 \text{ rec} + h_{sc} + h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} = 57 \text{ cm}$$

1.4. TABLERO Y LUZ



Ancho de baranda:

$$b_{baranda} := 15 \text{ cm}$$

Ancho de pasillo:

$$b_{pasillo} := 150 \text{ cm}$$

Ancho de pista:

$$b_{pista} := 400 \text{ cm}$$

Ancho de barrera:

$$b_{barrera} := 36.5 \text{ cm}$$

Área de barrera:

$$A_{barrera} := 2550 \text{ cm}^2$$

Espesor de pavimento:

$$e_{pav} := 5 \text{ cm}$$

Ancho de tablero:

$$b_{tablero} := 2 (b_{baranda} + b_{pasillo} + b_{barrera} + b_{pista})$$

$$b_{tablero} = 12.03 \text{ m}$$

Número de vigas:

$$N_b := 20$$

Separación de vigas:

$$S := 0.6 \text{ m}$$

Ancho de voladizo:

$$b_{voladizo} := \frac{b_{tablero} - (N_b - 1) S}{2} = 0.315 \text{ m}$$

Largo de vigas:

$$L := 20 \text{ m}$$

Largo no arriostrado:

$$L_b := L = 20 \text{ m}$$

2. MATERIALES

2.1. ACERO ESTRUCTURAL

Tensión de fluencia:	$F_y := 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_{s_viga} := 8.00 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$
Tensión de fluencia del alma:	$F_{yw} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia de las alas:	$F_{yf} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en compresión:	$F_{yc} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en tracción:	$F_{yt} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

2.2. HORMIGÓN

Resistencia específica a compresión:	$f'_c := 250 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_c := 15100 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}} = 238.8 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Módulo de rotura:	$f_r := 0.24 \text{ ksi} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\text{ksi}}} = 31.819 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_c := 2.5 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

2.3. ACERO DE REFUERZO

Tensión de fluencia:	$f_y := 4200 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de rotura:	$f_u := 6300 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_s := 7.85 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

3. DISEÑO DE LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO

3.1. CARGAS

3.1.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de losa: $PP_{losa} := \gamma_c \cdot e_{losa} = 1.425 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$

3.1.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento: $PP_{pav} := \gamma_c \cdot e_{pav} = 0.125 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$

Peso propio de baranda: $PP_{baranda} := 0.05 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$

Peso propio de barrera: $PP_{barrera} := \gamma_c \cdot A_{barrera} = 0.638 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$

3.1.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje: $CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$

Carga de rueda segundo y tercer eje: $CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$

Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_camión} := 4.27 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.1.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda: $CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.34 \text{ tonnef} = 5.67 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$

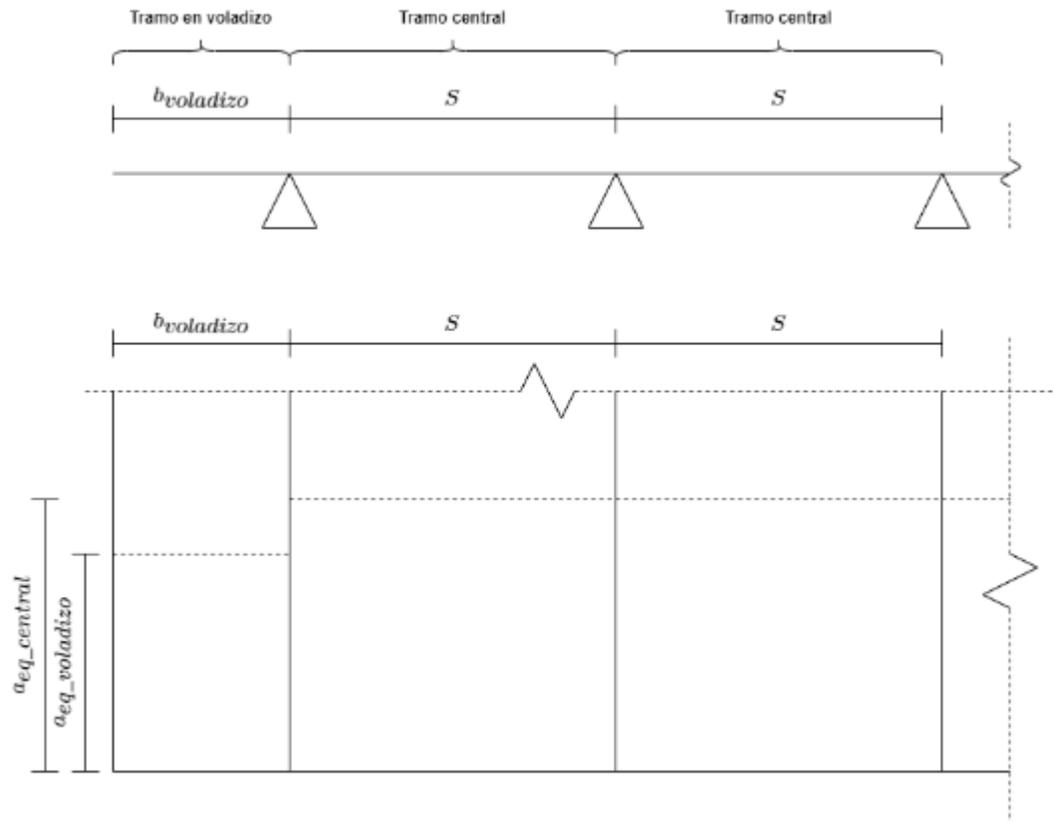
Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.2. ANCHO DE FRANJAS EQUIVALENTES

El ancho de las franjas equivalentes se considera en la dirección longitudinal del puente. Para los tramos centrales, el largo es la distancia entre vigas. Para los voladizos, el largo es el ancho de voladizo. Cada tramo de losa se estudia como una viga simplemente apoyada en las vigas de acero.



Ancho de franja equivalente en tramo central:

$$a_{eq_central} := 0.7 \text{ m} + 6.6 S = 4.66 \text{ m}$$

Distancia X para ancho de franja equivalente en voladizo:

$$X := b_{voladizo} - \frac{b_{baranda}}{2} = 0.24 \text{ m}$$

Ancho de franja equivalente en voladizo:

$$a_{eq_voladizo} := 1.2 \text{ m} + 10 X = 3.6 \text{ m}$$

3.3. DISEÑO DE TRAMOS CENTRALES

Reacción en apoyos por carga muerta:

$$R_{DC} := \frac{PP_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} \cdot a_{eq_central} = 3.994 \text{ tonnef}$$

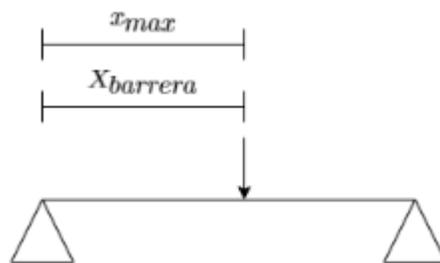
Reacción en apoyos por carga muerta superpuesta:

$$R_{DW} := \left(\frac{PP_{pav} \cdot b_{tablero} + 2 PP_{baranda} + 2 PP_{barrera}}{N_b} \right) \cdot a_{eq_central}$$

$$R_{DW} = 0.671 \text{ tonnef}$$

3.3.1. CASO 1: TRAMO CON BARRERA

Se considera el tramo en el que se ubica la barrera de contención.
El momento máximo se da en el punto central de la barrera.



Distancia de barrera a apoyo más cercano al extremo:

$$X_{barrera} := b_{baranda} + b_{pasillo} + \frac{b_{barrera}}{2} - b_{voladizo} - 2 S = 0.318 \text{ m}$$

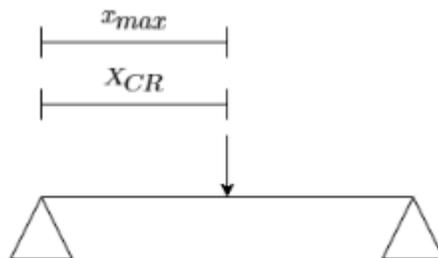
Momento en caso tramo con barrera:

$$M_{caso1} := (R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{barrera} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{barrera}^2$$

$$M_{caso1} = 1.117 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

3.3.2. CASO 2: TRAMO CON CAMIÓN Ó TÁNDEM

Se considera el tramo con camión de diseño o tándem de diseño.
Se consideran las ruedas más pesadas posibles dentro del ancho efectivo.
El momento máximo se da bajo las ruedas, cuando éstas se ubican en el centro del tramo.



Distancia de carga de rueda a apoyo más desfavorable:	$X_{CR} := \frac{S}{2} = 0.3 \text{ m}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por camión de diseño:	$R_{camión} := \frac{2 CR_{camión\ 2\ 3} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 8.71 \text{ tonnef}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por tándem de diseño:	$R_{tándem} := \frac{2 CR_{tándem} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 5.67 \text{ tonnef}$
Reacción de carga viva más desfavorable:	$R_{LL} := \max(R_{camión}, R_{tándem}) = 8.71 \text{ tonnef}$
Carga de rueda más desfavorable:	$CR_{LL} := \max(2 CR_{camión\ 2\ 3}, 2 CR_{tándem})$ $CR_{LL} = 17.42 \text{ tonnef}$
Momento máximo en caso tramo sin barrera:	$M_{caso2} := (R_{LL} + R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{CR} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{CR}^2$ $M_{caso2} = 3.687 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

3.3.3. ACERO DE REFUERZO

3.3.3.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo en la franja equivalente:	$M_u := \max(M_{caso1}, M_{caso2}) = 3.687 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$
Factor de resistencia para hormigón armado:	$\phi_c := 0.9$
Refuerzo principal requerido:	$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$ $A_{p_req} = 1.877 \text{ cm}^2$
Refuerzo mínimo:	$A_{p_min} := 0.0009 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 5.13 \text{ cm}^2$
Refuerzo dispuesto:	$\phi 10 @ 25 + \phi 10 @ 25$
Refuerzo dispuesto:	$A_p = 6.283 \text{ cm}^2$

3.3.3.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución:
$$Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$$

Refuerzo requerido:
$$A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 4.21 \text{ cm}^2$$

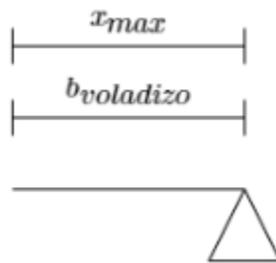
Refuerzo dispuesto:
$$\phi 10@25 + \phi 10@25$$

Refuerzo dispuesto:
$$A_{sec} = 6.283 \text{ cm}^2$$

3.4. DISEÑO DE VOLADIZOS

Se considera el tramo en voladizo.

El momento máximo se da en el apoyo.



Momento máximo en voladizo:
$$M_{voladizo} := -(PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_voladizo} \cdot 0.5 \cdot b_{voladizo}^2$$

$$M_{voladizo} = -0.277 \text{ tonnef} \cdot m$$

3.4.1. ACERO DE REFUERZO

3.4.1.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo total en la franja equivalente:
$$M_u := -M_{voladizo} = 0.277 \text{ tonnef} \cdot m$$

Factor de resistencia para hormigón armado:
$$\phi_c := 0.9$$

Refuerzo principal requerido:
$$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$$

$$A_{p_req} = 0.141 \text{ cm}^2$$

Refuerzo mínimo: $A_{p_min} := 0.0009 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 5.13 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 10@25 + \phi 10@25$

Refuerzo dispuesto: $A_p = 6.283 \text{ cm}^2$

3.4.1.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución: $Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$

Refuerzo requerido: $A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 4.21 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 10@25 + \phi 10@25$

Refuerzo dispuesto: $A_{sec} = 6.283 \text{ cm}^2$

4. DISEÑO DE LAS VIGAS COMPUESTAS

4.1. PROPIEDADES

Ancho efectivo colaborante de la losa para viga interior:

$$b_s := S = 0.6 \text{ m}$$

Espesor de la losa de hormigón:

$$t_s := e_{losa} = 57 \text{ cm}$$

Razón entre módulos de elasticidad:

$$n := \frac{E_s}{E_c} = 8.796$$

4.2. CARGAS

4.2.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de viga de acero:

$$PP_{viga} := \gamma_s \cdot viga \cdot A_s = 0.291 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de losa para cada viga:

$$PP_{losa} := \frac{\gamma_c \cdot e_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 0.857 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento para cada viga

$$PP_{pav} := \frac{\gamma_c \cdot e_{pav} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 0.075 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de baranda para cada viga:

$$PP_{baranda} := \frac{2 PP_{baranda}}{N_b} = 0.005 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de barrera para cada viga:

$$PP_{barrera} := \frac{2 PP_{barrera}}{N_b} = 0.064 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje:
Carga de rueda segundo y tercer eje:

$$CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$$

$$CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre ruedas:

$$a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre dos primeros ejes:

$$a_{lo_camión_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal mínima entre dos últimos ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_min} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal máxima entre dos últimos ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_max} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia transversal a barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda:

$$CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.4 \text{ tonnef} = 5.7 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre ruedas:

$$a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre ruedas:

$$a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$$

Distancia transversal a barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.5. CARGA DE FAJA

Carga de faja:

$$q_{faja} := 0.952 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.6. COEFICIENTE DE IMPACTO DINÁMICO (IM)

Coeficiente de impacto dinámico para estado límite de fatiga:

$$IM_{fatiga} := 15\%$$

Coeficiente de impacto dinámico para el resto de cálculos:

$$IM := 33\%$$

4.2.7. CARGA DE FATIGA

Carga de rueda primer eje:

$$CR_{fatiga_1} := CR_{camión_1} = 2.18 \text{ tonnef}$$

Carga de rueda segundo y tercer eje:

$$CR_{fatiga_2_3} := CR_{camión_2_3} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre ruedas:

$$a_{tr_fatiga} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre dos primeros ejes

$$a_{lo_fatiga_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre dos últimos ejes:

$$a_{lo_fatiga_2_3} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia a barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

Tránsito medio diario anual:

$$ADTT := 3000$$

Factor p para dos fajas de tránsito:

$$p := 0.85$$

Frecuencia de carga de fatiga:

$$ADTT_{SL} := p \cdot ADTT = 2550$$

4.3. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN

Se considera que la sección transversal se deforma y rota como un cuerpo rígido.

Factor de presencia múltiple para 1 vía cargada:

$$m_1 := 1.20$$

Factor de presencia múltiple para 2 vías cargadas:

$$m_2 := 1.00$$

1 vía cargada:

$$N_{L,1} := 1$$

2 vías cargadas:

$$N_{L,2} := 2$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 1:

$$e_1 := b_{pista} - d - 0.5 a_{tr_camión} = 2.485 \text{ m}$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 2:

$$e_2 := e_1 = 2.485 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y la viga exterior:

$$X_{ext} := 0.5 b_{tablero} - b_{voladizo} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las primeras vigas:

$$X_1 := X_{ext} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las segundas vigas:

$$X_2 := X_{ext} - S = 5.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las terceras vigas:

$$X_3 := X_2 - S = 4.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las cuartas vigas:

$$X_4 := X_3 - S = 3.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las quintas vigas:

$$X_5 := X_4 - S = 3.3 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las sextas vigas:

$$X_6 := X_5 - S = 2.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las séptimas vigas:

$$X_7 := X_6 - S = 2.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las octavas vigas:

$$X_8 := X_7 - S = 1.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las novenas vigas:

$$X_9 := X_8 - S = 0.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las décimas vigas:

$$X_{10} := X_9 - S = 0.3 \text{ m}$$

4.3.1. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA MOMENTO

Factor de distribución para momento para 1 vía cargada:

$$g_{M_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para momento para 2 vías cargadas:

$$g_{M_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.3.2. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA CORTE

Factor de distribución para corte para 1 vía cargada:

$$g_{V_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para corte para 2 vías cargadas:

$$g_{V_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.4. DISEÑO A FLEXIÓN

Factor de resistencia a flexión:

$$\phi_f := 1.0$$

4.4.1. CONSTRUCCIÓN

4.4.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Área de la sección:

$$A_s := A_s = 36320 \text{ mm}^2$$

Distancia entre los centroides de las alas:

$$h := h_w + 0.5 t_{f_inf} + 0.5 t_{f_sup} = 310 \text{ mm}$$

Momento de inercia:

$$I_s := I_s = (7.972 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Constante torsional:

$$J := J = (1.744 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

Módulo elástico de la sección para el ala en compresión:

$$S_{xc} := S_{x_s} = (4.555 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Módulo elástico de la sección para el ala en tracción:

$$S_{xt} := S_{xc} \cdot \frac{y_{CG_s}}{(h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} - y_{CG_s})} = (4.555 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Módulo plástico de la sección para el ala en compresión:

$$Z_{xc} := Z_{x_s} = (5.252 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Radio de giro:

$$r_y := r_{y_s} = 108.397 \text{ mm}$$

Radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional:

$$r_t := \sqrt{\frac{I_s \cdot h}{2 S_{xc}}} = 164.697 \text{ mm}$$

Tensión en el ala en compresión en el punto de fluencia:

$$F_{yr} := \min \left(0.7 F_{yc}, F_{yt} \cdot \frac{S_{xt}}{S_{xc}}, F_{yw} \right)$$

$$F_{yr} := \max (F_{yr}, 0.5 F_{yc}) = 2460.5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Longitud límite para resistencia por fluencia:

$$L_p := 1.76 r_y \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 4.663 \text{ m}$$

Longitud límite para pandeo torsional inelástico:

$$L_r := 1.95 r_t \cdot \frac{E_s}{F_{yr}} \cdot \sqrt{\frac{J}{S_{xc} \cdot h} + \sqrt{\left(\frac{J}{S_{xc} \cdot h}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{F_{yr}}{E_s}\right)^2}}$$

$$L_r = 43.395 \text{ m}$$

4.4.1.2. RESISTENCIA A FLEXIÓN

Combinación de carga: Resistencia I: 1.25 DC

Momento en viga por cargas en construcción: $M(x) := 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{L}{2} \cdot x - 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{x^2}{2}$

Momento máximo en viga por cargas en construcción: $M_{max} := M\left(\frac{L}{2}\right) = 71.731 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en primer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_A := M\left(\frac{L}{4}\right) = 53.798 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en segundo cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_B := M\left(\frac{L}{2}\right) = 71.731 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en tercer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_C := M\left(\frac{L}{4}\right) = 53.798 \text{ tonnef} \cdot m$

Factor de modificación por pandeo lateral torsional: $C_b := \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} = 1.136$

Momento plástico: $R_{pc} M_{yc} := F_{yc} \cdot Z_{xc} = 184.594 \text{ tonnef} \cdot m$

Tensión crítica: $F_{cr} := \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E_s}{\left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + 0.0078 \frac{J}{S_{xc} \cdot h} \cdot \left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2}$

$$F_{cr} = 2484.664 \frac{kgf}{cm^2}$$

Resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$M_{nc} := \begin{cases} \text{if } L_b \leq L_p \\ \quad \parallel R_{pc} M_{yc} \\ \text{else if } L_b \leq L_r \\ \quad \parallel C_b \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{F_{yr} \cdot S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}}\right) \cdot \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right) \cdot R_{pc} M_{yc} \\ \text{else} \\ \quad \parallel F_{cr} \cdot S_{xc} \end{cases}$$

$$M_{nc} := \min(M_{nc}, R_{pc} M_{yc}) = 177.138 \text{ tonnef} \cdot m$$

Esfuerzo de resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$F_{nc} := \frac{M_{nc}}{S_{xc}} = 3888.608 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Momento último:

$$M_u := M_{max} = 71.731 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo en el ala en compresión:

$$f_{bu} := \frac{M_u}{S_{xc}} = 1574.674 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Chequeo de requerimientos por flexión en etapas críticas de construcción:

Primer chequeo: $f_{bu} = 1574.674 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{yc} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f_{bu} = 1574.674 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{nc} = 3888.608 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

4.4.1.3. DEFORMACIÓN POR CARGAS MUERTAS

Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW

Flecha por carga muerta DC: $flecha_{DC} := \frac{5 (PP_{losa} + PP_{viga}) L^4}{384 E_s \cdot I_s} = 142.828 \text{ mm}$

Flecha por carga muerta superpuesta DW: $flecha_{DW} := \frac{5 (PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^4}{384 E_s \cdot I_s}$

$$flecha_{DW} = 17.913 \text{ mm}$$

Contraflecha total a dar a vigas de acero:

$$contraflecha := flecha_{DC} + flecha_{DW} = 160.74 \text{ mm}$$

4.4.2. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

4.4.2.1. DEFORMACIONES ELÁSTICAS

4.4.2.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO

Se debe considerar la rigidez del sistema completo.

Ancho transformado de hormigón:
$$b_{c_tr} := \frac{b_{\text{tablero}}}{n} = 1.368 \text{ m}$$

Centro de gravedad:
$$y_{CG_tr_s} := \frac{N_b \cdot A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr} \cdot 0.5 t_s}{N_b \cdot A_s + t_s \cdot b_{c_tr}} = 30.429 \text{ cm}$$

Inercia del sistema completo:
$$I_{\text{sist}} = (I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_tr_s})^2) \cdot N_b + \frac{b_{c_tr} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_tr_s})^2$$

$$I_{\text{sist}} = (3.765 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.1.2. CÁLCULO DE DEFORMACIONES

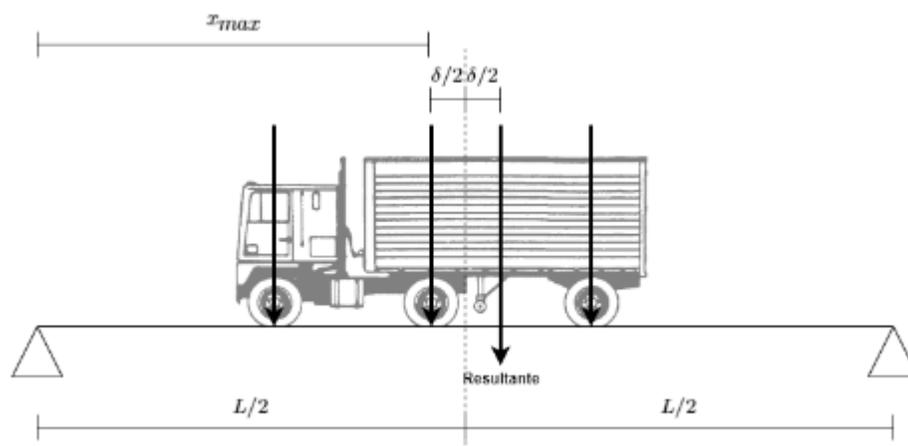
Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW + 1.0 IM LL

Carga muerta es contrarrestada por la contraflecha durante etapas de construcción.
Se deben cargar todas las vías de diseño.

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:

Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.

La flecha máxima se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{camión} = \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_camión_1,2} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_camión_2,3_min}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_camión_1,2} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_camión_2,3_min} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 24.214 \text{ tonnef}$$

Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

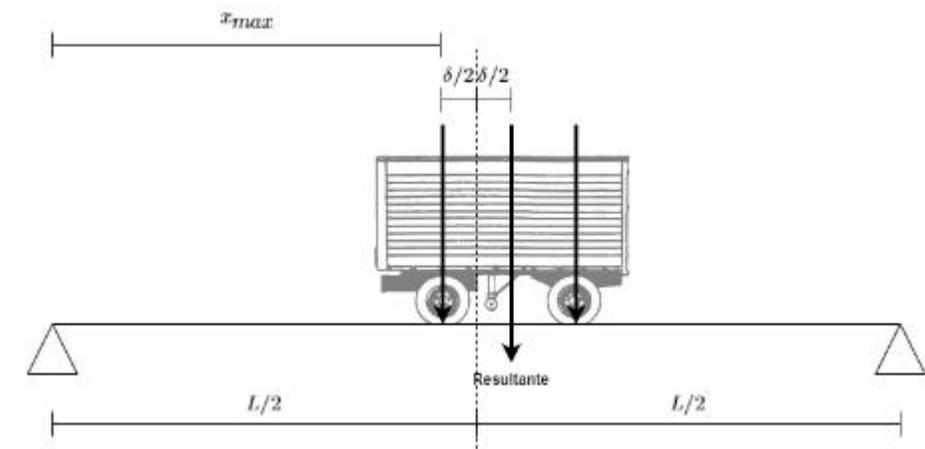
$$M_{camión}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \\ \quad \left\| R_{camión} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \\ \quad \left\| R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) \right\| \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) - 2 CR_{camión_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \right) \right) \right\| \end{cases}$$

Flecha máxima por camión de diseño:

$$flecha_{camión} := - \left(\int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)} \left(\int_0^x \frac{M_{camión}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \cdot \int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)} \frac{M_{camión}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) = 7.653 \text{ mm}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

La flecha máxima se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tándem} := \frac{a_{lo_tándem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tándem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \frac{L + \delta_{tándem} - a_{lo_tándem}}{L}$$

$$R_{tándem} = 14.7 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tándem}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \\ \quad \left| \begin{array}{l} R_{tándem} \cdot x \\ \text{else} \\ R_{tándem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right) \end{array} \right. \end{cases}$$

Flecha máxima por tándem de diseño:

$$flecha_{tándem} := - \left(\int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \left(\int_0^x \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \cdot \int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) = 5.647 \text{ mm}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Flecha por carga de faja:

$$flecha_{faja}(x) := - \left(\int_0^x \left(\frac{q_{faja} \cdot L \cdot s^2}{4} - \frac{q_{faja} \cdot s^3}{6} \right) ds - x \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{M_{faja}(s)}{E_s \cdot I_{sist}} ds \right)$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja, cargando ambas vías:

Flecha máxima por camión de diseño y carga de faja:

$$flecha_{camión_faja} := 2 \cdot flecha_{camión} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)$$

$$flecha_{camión_faja} = 20.293 \text{ mm}$$

Flecha máxima por tándem de diseño y carga de faja:

$$flecha_{tándem_faja} := 2 \cdot flecha_{tándem} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right)$$

$$flecha_{tándem_faja} = 16.305 \text{ mm}$$

Flecha máxima por carga viva:

$$flecha_{IM_LL} := \max(flecha_{camión_faja}, flecha_{tándem_faja})$$

$$flecha_{IM_LL} = 20.293 \text{ mm}$$

Deformación máxima por combinación de carga Servicio I: $\Delta_{max} := flecha_{IM_LL} = 20.293 \text{ mm}$

Chequeo de requerimientos por deformaciones elásticas:

Chequeo: $\Delta_{max} = 20.293 \text{ mm} \leq \frac{L}{800} = 25 \text{ mm}$

OK.

4.4.2.2. DEFORMACIONES PERMANENTES

4.4.2.2.1. SECCIÓN RESISTENTE 1: SECCIÓN DE ACERO

Centro de gravedad: $y_{CG_s} = 17.5 \text{ cm}$

Inercia de la sección de acero: $I_s = (7.972 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$

4.4.2.2.2. SECCIÓN RESISTENTE 2: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_cp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 30.432 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_cp_s})^2 + \frac{b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_cp_s})^2$

$$I_{tr_cp_s} = (1.88 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.3. SECCIÓN RESISTENTE 3: SECCIÓN COMPUESTA EN EL LARGO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{3 n} = 0.023 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_lp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 31.448 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta:

$$I_{tr_lp,s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG,s} + rec + h_{sc} - y_{CG,lp,s})^2 + \frac{b_{c,lp,s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c,lp,s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG,lp,s})^2$$

$$I_{tr_lp,s} = (1.163 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.4. SECCIÓN RESISTENTE 4: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO Y LARGO PLAZO TRANSFORMADA A HORMIGÓN

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Espesor del alma transformado:

$$t_{w_tr_c} := t_w \cdot n = 14.073 \text{ cm}$$

Ancho del ala superior transformado:

$$b_{f_sup_tr_c} := b_{f_sup} \cdot n = 351.83 \text{ cm}$$

Ancho del ala inferior transformado:

$$b_{f_inf_tr_c} := b_{f_inf} \cdot n = 351.83 \text{ cm}$$

Centro de gravedad:

$$y_{CG_tr_c} := \frac{A_s \cdot n \cdot (y_{CG,s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot S \cdot 0.5 t_s}{A_s \cdot n + t_s \cdot S} = 30.432 \text{ cm}$$

Momento de inercia:

$$I_{tr_c} = (1.655 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.5. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Servicio II:

$$1.0 \text{ DC} + 1.0 \text{ DW} + 1.3 \text{ IM LL}$$

Momento máximo por carga muerta DC:

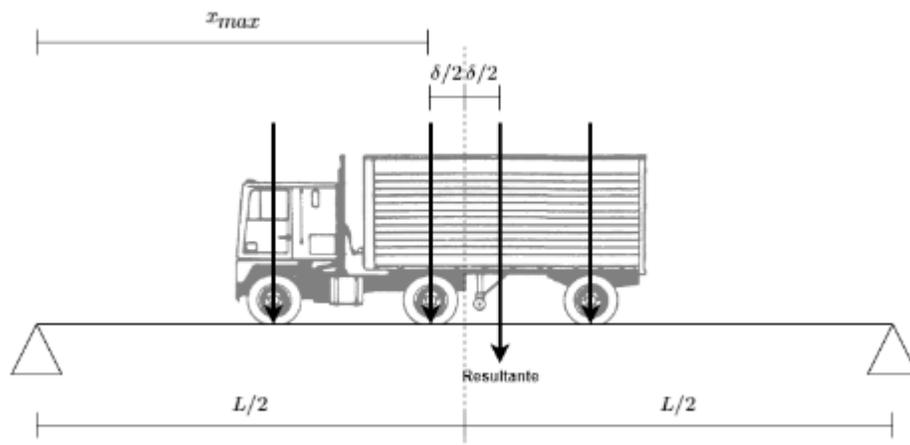
$$M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 57.385 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga muerta superpuesta DW:

$$M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$$

$$M_{DW} = 7.197 \text{ tonnef} \cdot m$$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{camión} = \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_camión_1,2} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_camión_2,3_min}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} = (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_camión_1,2} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_camión_2,3_min} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 24.214 \text{ tonnef}$$

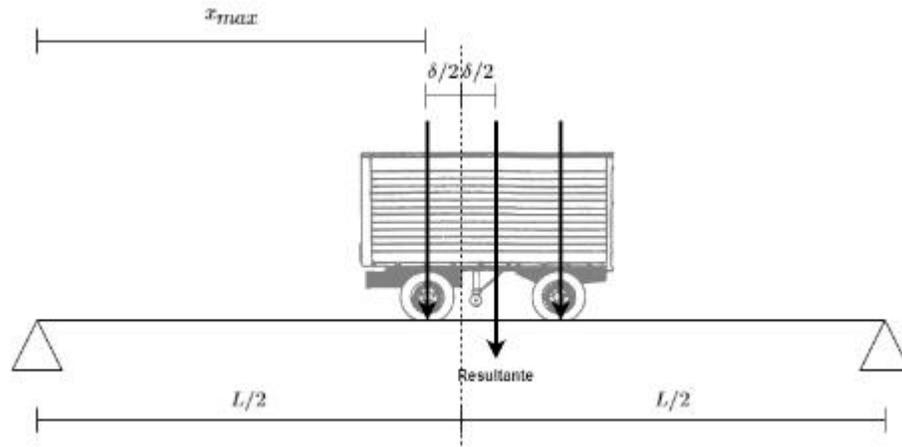
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{camión}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) \\ \text{else} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) - 2 CR_{camión_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \right) \right) \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño:

$$M_{max_camión} := M_{camión} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) = 200.154 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

**Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:
El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.**



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tándem} := \frac{a_{lo_tándem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tándem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \frac{L + \delta_{tándem} - a_{lo_tándem}}{L}$$

$$R_{tándem} = 14.7 \text{ tonnef}$$

Momento entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tándem}(x) := \begin{cases} R_{tándem} \cdot x & \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \\ R_{tándem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right) & \text{else} \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tándem} := M_{tándem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) = 142.512 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} := \max \left(M_{max_camión} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right), M_{max_tándem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 247.513 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 54.04 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo máximo en el hormigón en tracción:

$$f := \frac{M_{DW} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}}$$

$$f = 124.313 \frac{kgf}{cm^2} \leq 2 f_r = 63.637 \frac{kgf}{cm^2}$$

Si el esfuerzo máximo en el hormigón a tracción supera el límite, se considera que el esfuerzo por deformaciones permanentes debe ser calculado utilizando sólo la sección de acero.

Esfuerzo máximo en el ala en compresión de la viga de acero:

$$f_{fc} := \frac{M_{DC} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{fc} = 2959.94 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en el ala en tracción de la viga de acero:

$$f_{ft} := \frac{M_{DC} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{ft} = 2959.94 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en la viga de acero:

$$f_f := \max(f_{fc}, f_{ft}) = 2959.94 \frac{kgf}{cm^2}$$

Chequeo de requerimientos por deformaciones permanentes:

Primer chequeo: $f_f = 2959.94 \frac{kgf}{cm^2} \leq 0.95 \cdot F_{yf} = 3339.25 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f = 124.313 \frac{kgf}{cm^2} \leq 4 f_r = 127.274 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

4.4.3. ESTADO LÍMITE DE FATIGA

4.4.3.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 270 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.4.3.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| 1.0 \right. \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \right. \end{array} \right\| = 1$$

Resistencia a corte por fluencia:

$$V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 88.072 \text{ tonnef}$$

Corte crítico:

$$V_{cr} := C \cdot V_p = 88.072 \text{ tonnef}$$

4.4.3.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Corte máximo por carga muerta DC:

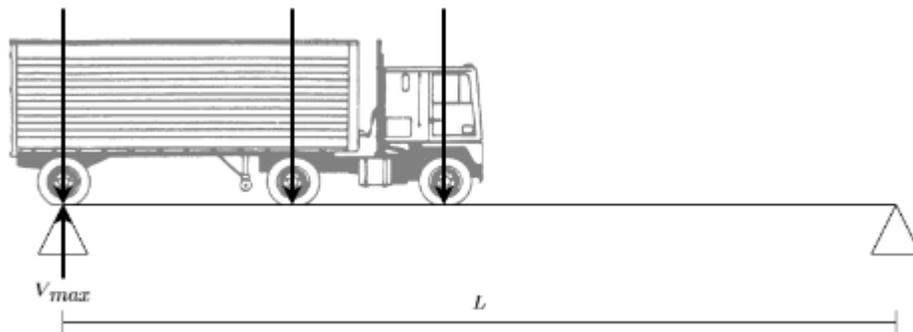
$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 11.477 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 1.439 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1.2} + a_{lo_fatiga_2.3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2.3} - a_{lo_fatiga_1.2}) \right) + \frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 32.551 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V.1} \cdot V_{fatiga}, g_{V.2} \cdot V_{fatiga}) = 7.107 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 23.577 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de fatiga:

$$\text{Chequeo: } V_u = 23.577 \text{ tonnef} \quad \leq \quad V_{cr} = 88.072 \text{ tonnef}$$

OK.

4.4.4. ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

4.4.4.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo sólo en compresión.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 270 \text{ mm}$

Centro de gravedad: $y_{CG_tr_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_s}}$

$y_{CG_tr_s} = 30.432 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} := I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_w - y_{CG_tr_s})^2 + \frac{b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s}^3}{12} + b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s} \cdot (0.5 y_{CG_tr_s})^2$

$I_{tr_cp_s} = (1.454 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$

Profundidad de la sección compuesta: $D_t := t_s = 57 \text{ cm}$

4.4.4.2. MOMENTO PLÁSTICO

Eje neutro plástico desde el borde superior de la losa:

$$c := \begin{cases} \text{if } 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc}) \geq F_y \cdot A_s \\ \left| \frac{F_y \cdot A_s}{0.85 f'_c \cdot b_s} \right. \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup}) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \geq F_y \cdot (h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \left| \frac{F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} + 2 rec + 2 h_{sc}) + h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf})}{2 F_y \cdot b_{f_sup} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \right. \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + h_w \cdot t_w) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \geq F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \left| \frac{F_y \cdot (t_w \cdot (h_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup})}{2 F_y \cdot t_w + 0.85 f'_c \cdot b_s} \right. \\ \text{else} \\ \left| \frac{F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot (t_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup} + 2 h_w) - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} - h_w \cdot t_w)}{2 F_y \cdot b_{f_inf} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \right. \end{cases}$$

$c = 18.692 \text{ cm}$

Área de hormigón a compresión: $A_{c_c} := b_s \cdot c = 1121.547 \text{ cm}^2$

Área de acero a compresión:

$$A_{s,c} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel 0 \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \\ \text{else} \\ \quad \parallel A_s \end{cases}$$

$$A_{s,c} = 147.698 \text{ cm}^2$$

Área de acero a tracción:

$$A_{s,t} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel A_s \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel A_s - b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)) \\ \text{else} \\ \quad \parallel 0 \end{cases}$$

$$A_{s,t} = 215.502 \text{ cm}^2$$

Centro del área del hormigón en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{c,c}} := \frac{c}{2} = 9.346 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s,c}} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel \text{"No aplica"} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \cdot (t_{f,sup} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \cdot (t_{f,sup} + h_w + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + y_{CG_{c,c}} \end{cases}$$

$$y_{CG_{s_c}} = 16.846 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en tracción desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s_t}} := \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ \quad rec + h_{sc} + y_{CG_{s_c}} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ \quad c + \frac{b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) + h_w \cdot t_w \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + 0.5 h_w) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + h_w + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - b_{f_sup} \cdot (c - rec - h_{sc})} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ \quad c + \frac{t_w \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \cdot 0.5 \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}))} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ \quad c + \frac{b_{f_inf} \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w)}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot h_w + b_{f_inf} \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup} - h_w))} \\ \text{else} \\ \quad \text{"No aplica"} \end{cases}$$

$$y_{CG_{s_t}} = 43.229 \text{ cm}$$

Distancia desde el borde superior de la losa al eje neutro plástico:

$$D_p := c = 18.692 \text{ cm}$$

Profundidad del alma de la viga de acero a compresión:

$$D_{cp} := \max(c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}, 0 \text{ cm}) = 0 \text{ cm}$$

Momento plástico:

$$M_p := \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right\| \\ \text{else} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) \right\| \end{cases}$$

$$M_p = 217.718 \text{ tonnef} \cdot m$$

4.4.4.3. COMPACIDAD DE LA SECCIÓN

Chequeo de requerimientos de compacidad de la sección:

$$\text{Primer chequeo: } F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq 4921 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

OK.

$$\text{Segundo chequeo: } \frac{D}{t_w} = 16.875 \leq 150$$

OK.

Tercer chequeo: $\frac{2 D_{cp}}{t_w} = 0 \quad \leq \quad 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 91.904$
OK.

La sección califica como: **COMPACTA**

4.4.4.4. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Resistencia I: **1.25 DC + 1.50 DW + 1.75 IM LL**

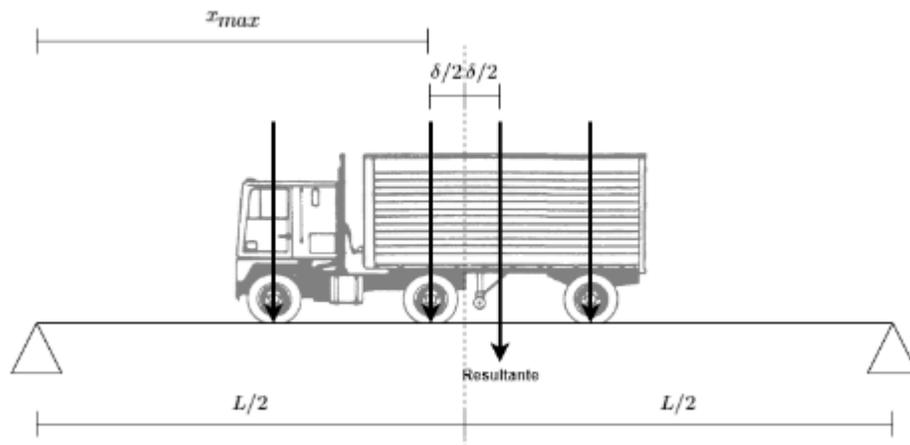
Momento máximo por carga muerta DC: $M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 57.385 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento máximo por carga muerta superpuesta DW: $M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$
 $M_{DW} = 7.197 \text{ tonnef} \cdot m$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:

Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.

El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante: $\delta_{camión} := \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_{camión_1,2}} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_{camión_2,3_{min}}}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$

$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$

Reacción en apoyo izquierdo:

$R_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_{camión_1,2}} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_{camión_2,3_{min}}} + \delta_{camión}) \right)$

$R_{camión} = 24.214 \text{ tonnef}$

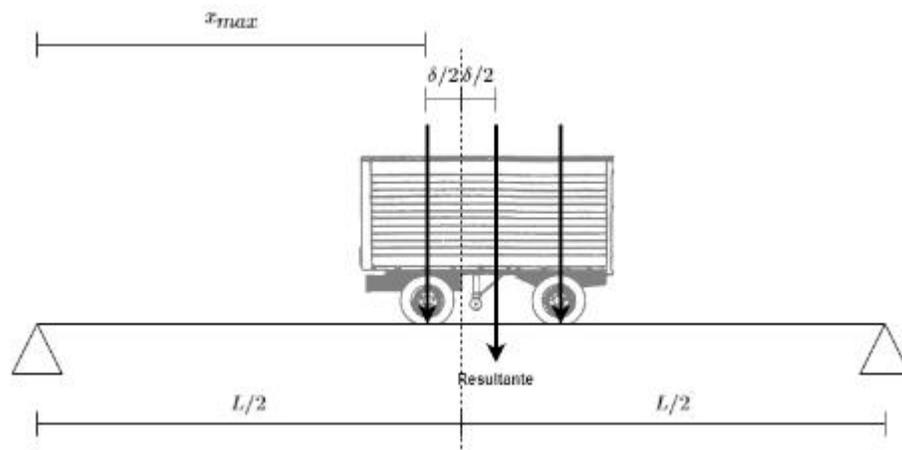
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{camión}}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{camión_1}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \right) \right) \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{\text{camión_1}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \right) \right) - 2 CR_{\text{camión_2,3}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño: $M_{\text{max_camión}} := M_{\text{camión}} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) = 200.154 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{\text{tándem}} := \frac{a_{\text{lo_tándem}}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{\text{tándem}} := (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \frac{L + \delta_{\text{tándem}} - a_{\text{lo_tándem}}}{L}$$

$$R_{\text{tándem}} = 14.7 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{tándem}}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tándem} := M_{tándem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) = 142.512 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} = \max \left(M_{max_camión} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right), M_{max_tándem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 247.513 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 54.04 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento último:

$$M_u := 1.25 \cdot M_{DC} + 1.50 M_{DW} + 1.75 \cdot M_{LL}$$

$$M_u = 177.097 \text{ tonnef} \cdot m$$

Resistencia nominal a flexión:

$$M_n := \left\| \begin{array}{l} \text{if } D_p \leq 0.1 D_t \\ \left\| M_p \right\| \\ \text{else} \\ \left\| M_p \cdot \left(1.07 - 0.7 \frac{D_p}{D_t} \right) \right\| \end{array} \right\| = 182.98 \text{ tonnef} \cdot m$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de resistencia:

$$\text{Chequeo: } M_u = 177.097 \text{ tonnef} \cdot m \leq \phi_f \cdot M_n = 182.98 \text{ tonnef} \cdot m$$

OK.

4.4.4.5. DUCTILIDAD

Chequeo de requerimientos de ductilidad:

$$\text{Chequeo: } D_p = 18.692 \text{ cm} \leq 0.42 D_t = 23.94 \text{ cm}$$

OK.

4.5. DISEÑO A CORTE

Factor de resistencia a corte: $\phi_v := 1.0$

4.5.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 270 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.5.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| 1.0 \right. \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \right. \end{array} \right\| = 1$$

Resistencia a corte por fluencia: $V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 88.072 \text{ tonnef}$

Resistencia nominal al corte: $V_n := C \cdot V_p = 88.072 \text{ tonnef}$

4.5.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

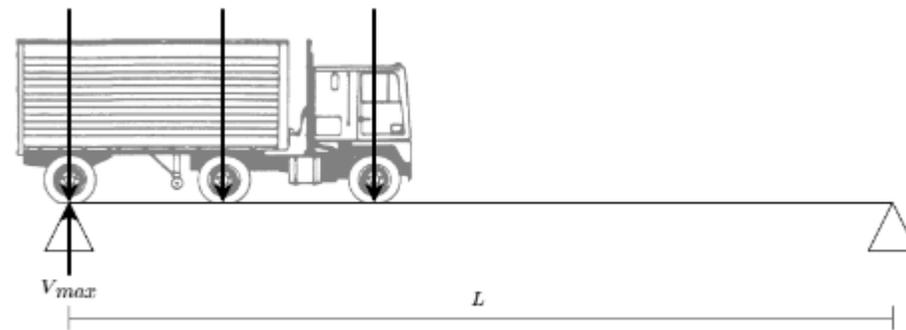
Combinación de carga: Resistencia I: $1.25 \text{ DC} + 1.50 \text{ DW} + 1.75 \text{ IM LL}$

Corte máximo por carga muerta DC: $V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 11.477 \text{ tonnef}$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW: $V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 1.439 \text{ tonnef}$

Posición de camión de diseño que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje del camión.



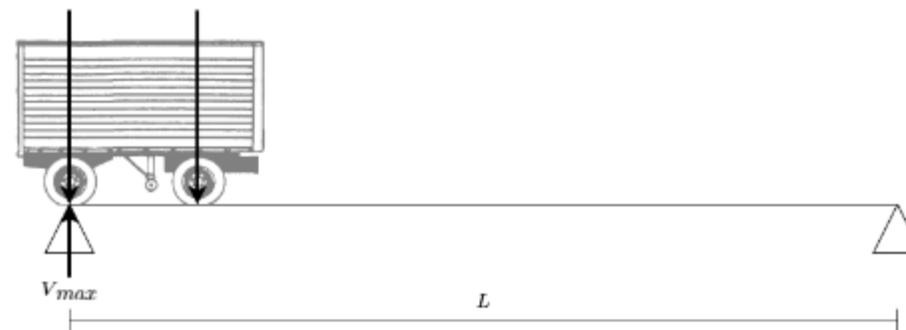
Corte máximo por camión de diseño:

$$V_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión.1}}{L} \cdot (L - a_{lo_camión.2.3_min} - a_{lo_camión.1.2}) + \frac{2 CR_{camión.2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_camión.2.3_min}) \right)$$

$$V_{camión} = 44.713 \text{ tonnef}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el segundo eje del tándem.



Corte máximo por tándem de diseño:

$$V_{tándem} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{tándem}}{L} \cdot (2L - a_{lo_tándem}) \right)$$

$$V_{tándem} = 29.399 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de faja:

$$V_{faja} := \frac{q_{faja} \cdot L}{2} = 9.52 \text{ tonnef}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Corte máximo por carga viva LL:

$$V_{LL} := \max(V_{camión} + V_{faja}, V_{tándem} + V_{faja})$$

$$V_{LL} = 54.233 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga viva distribuido:

$$V_{LL} := \max(g_{V_1} \cdot V_{LL}, g_{V_2} \cdot V_{LL}) = 11.841 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := 1.25 V_{DC} + 1.50 V_{DW} + 1.75 V_{LL}$$

$$V_u = 37.227 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos de resistencia al corte:

Chequeo: $V_u = 37.227 \text{ tonnef} \leq \phi_v \cdot V_n = 88.072 \text{ tonnef}$

OK.

5. CONECTORES DE CORTE

Factor de resistencia de conectores de corte:

$$\phi_{sc} := 0.85$$

Resistencia a la fatiga de un conector de corte:

$$Z_r := 0.375 \text{ tonnef} \cdot \frac{w}{cm} = 1.5 \text{ tonnef}$$

Fuerza de corte nominal:

$$P := \min(0.85 f'_c \cdot b_s \cdot t_s, F_{yw} \cdot D \cdot t_w + F_{yt} \cdot b_{f.inj} \cdot t_{f.inj} + F_{yc} \cdot b_{f.smp} \cdot t_{f.smp})$$

$$P = 726.75 \text{ tonnef}$$

Resistencia nominal al corte de un conector de corte:

$$Q_n := 0.3 \cdot (t_{f.sc} + 0.5 t_{w.sc}) \cdot L_c \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c}$$

$$Q_n = 41.719 \text{ tonnef}$$

Resistencia al corte de un conector de corte:

$$Q_r := \phi_{sc} \cdot Q_n = 35.461 \text{ tonnef}$$

5.1. NÚMERO DE CONECTORES DE CORTE

El número de conectores de corte requerido corresponde a los necesarios entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

Chequeo de requerimientos de número de conectores de corte:

Chequeo:
$$n_{sc_req} := \frac{P}{Q_r} = 20.494 \quad \leq \quad n_{sc} = 21$$

OK.

5.2. SEPARACIÓN LONGITUDINAL

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Se debe cumplir con la separación longitudinal máxima normativa, correspondiente a 600 mm.

También se debe cumplir con el requerimiento de separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga.

Además, se verifica la separación longitudinal máxima tal que se ubique el número de conectores de corte requerido entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

Corte máximo por carga muerta DC:

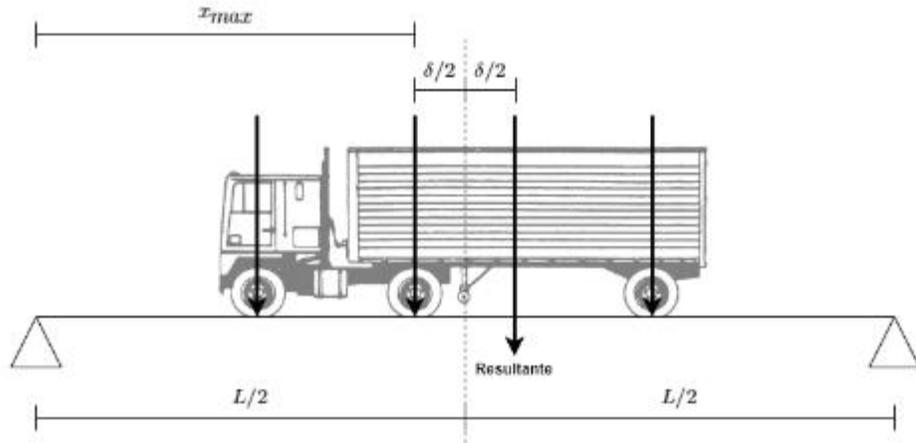
$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 11.477 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 1.439 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el segundo eje de la carga de fatiga.



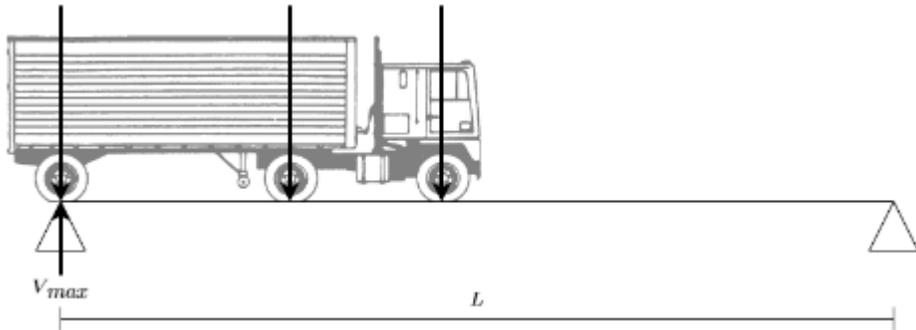
Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{fatiga} := \frac{-2 CR_{fatiga_1} \cdot a_{lo_fatiga_1_2} + 2 CR_{fatiga_2_3} \cdot a_{lo_fatiga_2_3}}{2 CR_{fatiga_1} + 4 CR_{fatiga_2_3}}$$

$$\delta_{fatiga} = 3.591 \text{ m}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1,2} + a_{lo_fatiga_2,3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2,3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2,3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2,3} - a_{lo_fatiga_1,2}) + \frac{2 CR_{fatiga_2,3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2,3}) \right) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 32.551 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V,1} \cdot V_{fatiga}, g_{V,2} \cdot V_{fatiga}) = 7.107 \text{ tonnef}$$

Corte por combinación de fatiga:

$$V_f := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 23.577 \text{ tonnef}$$

Primer momento del área de hormigón a compresión en torno al eje neutro de la sección compuesta en el corto plazo:

$$Q := \frac{b_s}{n} \cdot y_{CG_cp_s} \cdot \frac{y_{CG_cp_s}}{2} = (3.159 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Inercia de la sección compuesta en el corto plazo:

$$I_{tr_cp_s} = (1.454 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Resistencia longitudinal a corte por fatiga por unidad de largo:

$$V_{fat} := \frac{V_f \cdot Q}{I_{tr_cp_s}} = 0.051 \frac{\text{tonnef}}{\text{mm}}$$

Separación longitudinal máxima normativa:

$$p_{sc_norm} := 600 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga:

$$p_{sc_fatiga} := \frac{n_{sc} \cdot Z_r}{V_{fat}} = 614.824 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por número requerido:

$$p_{sc_num} := \frac{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{fatiga}}{2} \right)}{n_{sc}} = 390.685 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima:

$$p_{max} := \min(p_{sc_norm}, p_{sc_fatiga}, p_{sc_num}) = 390.685 \text{ mm}$$

Chequeo de requerimientos de separación longitudinal:

Chequeo:

$$p_{sc} = 390 \text{ mm}$$

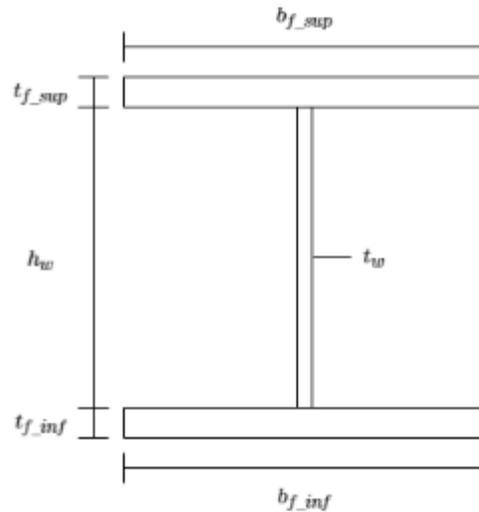
$$\leq p_{max} = 390.685 \text{ mm}$$

OK.

A.4. L = 25 m

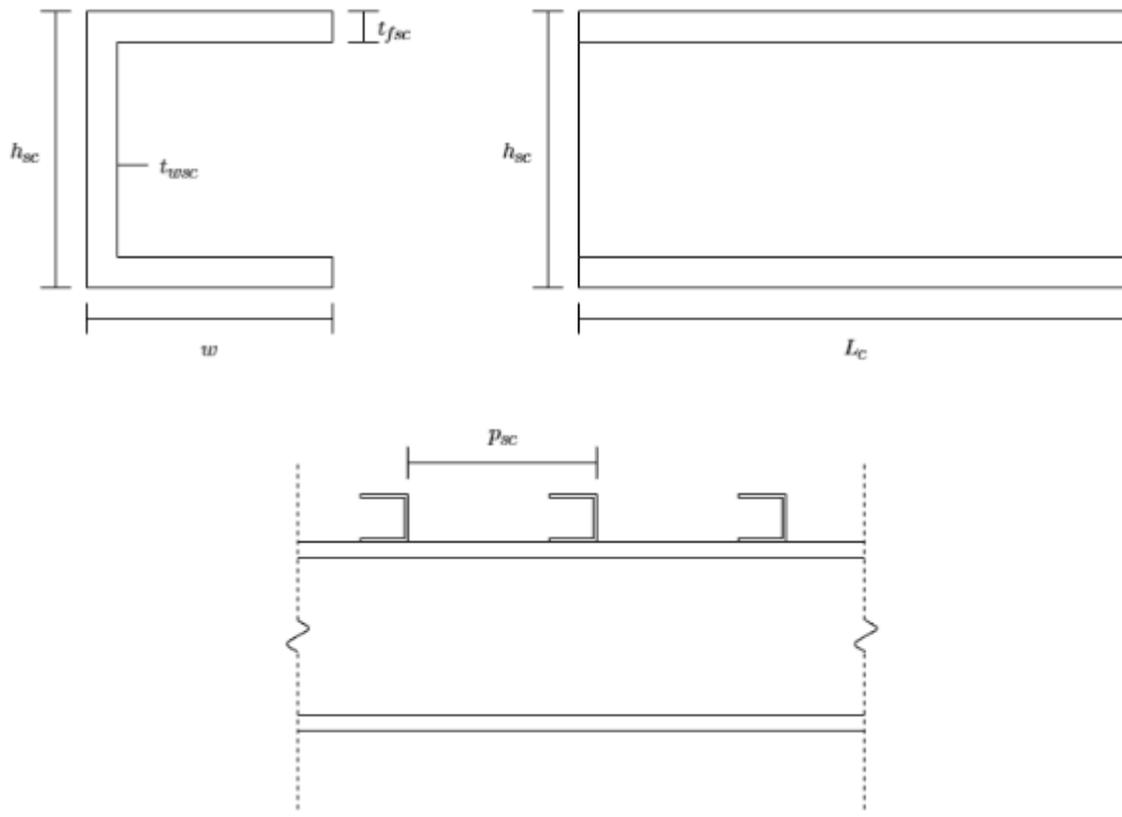
1. DIMENSIONES

1.1. VIGAS DE ACERO



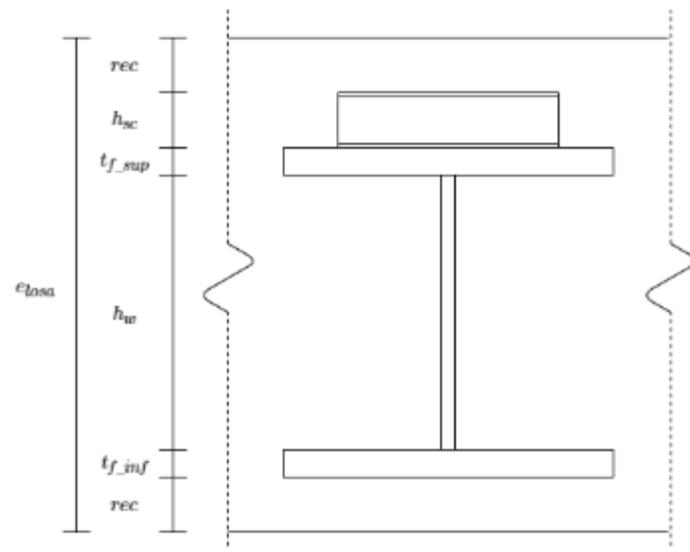
Altura del alma:	$h_w = 400 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_w = 16 \text{ mm}$
Ancho del ala superior:	$b_{f_sup} = 420 \text{ mm}$
Espesor del ala superior:	$t_{f_sup} = 40 \text{ mm}$
Ancho del ala inferior:	$b_{f_inf} = 420 \text{ mm}$
Espesor del ala inferior:	$t_{f_inf} = 40 \text{ mm}$
Área de la sección de acero:	$A_s = 40000 \text{ mm}^2$
Centro de gravedad:	$y_{CG_s} = 240 \text{ mm}$
Momento de inercia:	$I_s = (1.714 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$
Radio de giro:	$r_{y_s} = 111.137 \text{ mm}$
Constante torsional:	$J = (1.847 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$
Módulo elástico de sección:	$S_{x_s} = (7.141 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$
Módulo plástico de sección:	$Z_{x_s} = (8.032 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$

1.2. CONECTORES DE CORTE



Altura:	$h_{sc} := 80 \text{ mm}$
Largo del ala:	$w := 40 \text{ mm}$
Largo del perfil:	$L_c := 300 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_{wsc} := 4 \text{ mm}$
Espesor del ala:	$t_{fsc} := 4 \text{ mm}$
Número de conectores de corte:	$n_{sc} := 26$
Separación longitudinal:	$p_{sc} := 410 \text{ mm}$

1.3. LOSA DE HORMIGÓN



Recubrimiento de refuerzo:

$$rec_s := 50 \text{ mm}$$

Recubrimiento de conector de corte:

$$rec_{sc} := 70 \text{ mm}$$

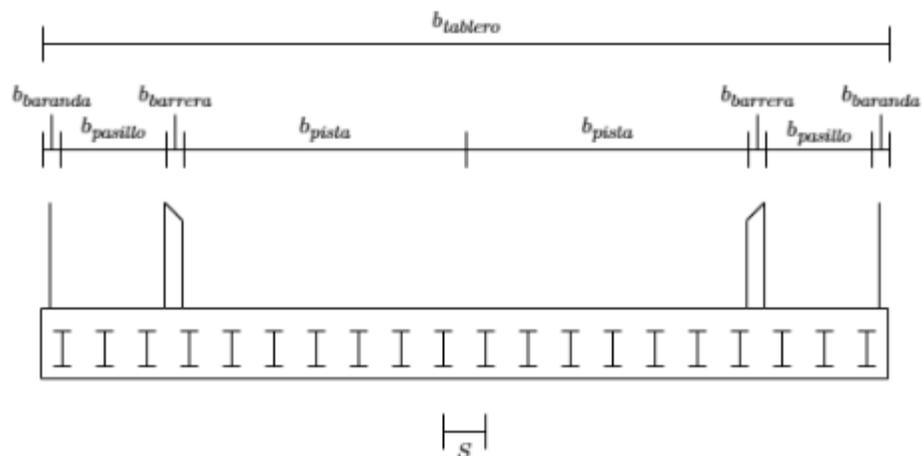
Recubrimiento:

$$rec := \max(rec_s, rec_{sc}) = 70 \text{ mm}$$

Esesor:

$$e_{losa} := 2 \text{ rec} + h_{sc} + h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} = 70 \text{ cm}$$

1.4. TABLERO Y LUZ



Ancho de baranda:

$$b_{baranda} := 15 \text{ cm}$$

Ancho de pasillo:

$$b_{pasillo} := 150 \text{ cm}$$

Ancho de pista:

$$b_{pista} := 400 \text{ cm}$$

Ancho de barrera:

$$b_{barrera} := 36.5 \text{ cm}$$

Área de barrera:

$$A_{barrera} := 2550 \text{ cm}^2$$

Espesor de pavimento:

$$e_{pav} := 5 \text{ cm}$$

Ancho de tablero:

$$b_{tablero} := 2 (b_{baranda} + b_{pasillo} + b_{barrera} + b_{pista})$$

$$b_{tablero} = 12.03 \text{ m}$$

Número de vigas:

$$N_b := 20$$

Separación de vigas:

$$S := 0.6 \text{ m}$$

Ancho de voladizo:

$$b_{voladizo} := \frac{b_{tablero} - (N_b - 1) S}{2} = 0.315 \text{ m}$$

Largo de vigas:

$$L := 25 \text{ m}$$

Largo no arriostrado:

$$L_b := L = 25 \text{ m}$$

2. MATERIALES

2.1. ACERO ESTRUCTURAL

Tensión de fluencia:	$F_y := 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_{s_viga} := 8.00 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$
Tensión de fluencia del alma:	$F_{yw} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia de las alas:	$F_{yf} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en compresión:	$F_{yc} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en tracción:	$F_{yt} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

2.2. HORMIGÓN

Resistencia específica a compresión:	$f'_c := 250 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_c := 15100 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}} = 238.8 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Módulo de rotura:	$f_r := 0.24 \text{ ksi} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\text{ksi}}} = 31.819 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_c := 2.5 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

2.3. ACERO DE REFUERZO

Tensión de fluencia:	$f_y := 4200 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de rotura:	$f_u := 6300 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_s := 7.85 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

3. DISEÑO DE LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO

3.1. CARGAS

3.1.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de losa: $PP_{losa} := \gamma_c \cdot e_{losa} = 1.75 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$

3.1.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento: $PP_{pav} := \gamma_c \cdot e_{pav} = 0.125 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$

Peso propio de baranda: $PP_{baranda} := 0.05 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$

Peso propio de barrera: $PP_{barrera} := \gamma_c \cdot A_{barrera} = 0.638 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$

3.1.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje: $CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$

Carga de rueda segundo y tercer eje: $CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$

Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_camión} := 4.27 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.1.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda: $CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.34 \text{ tonnef} = 5.67 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$

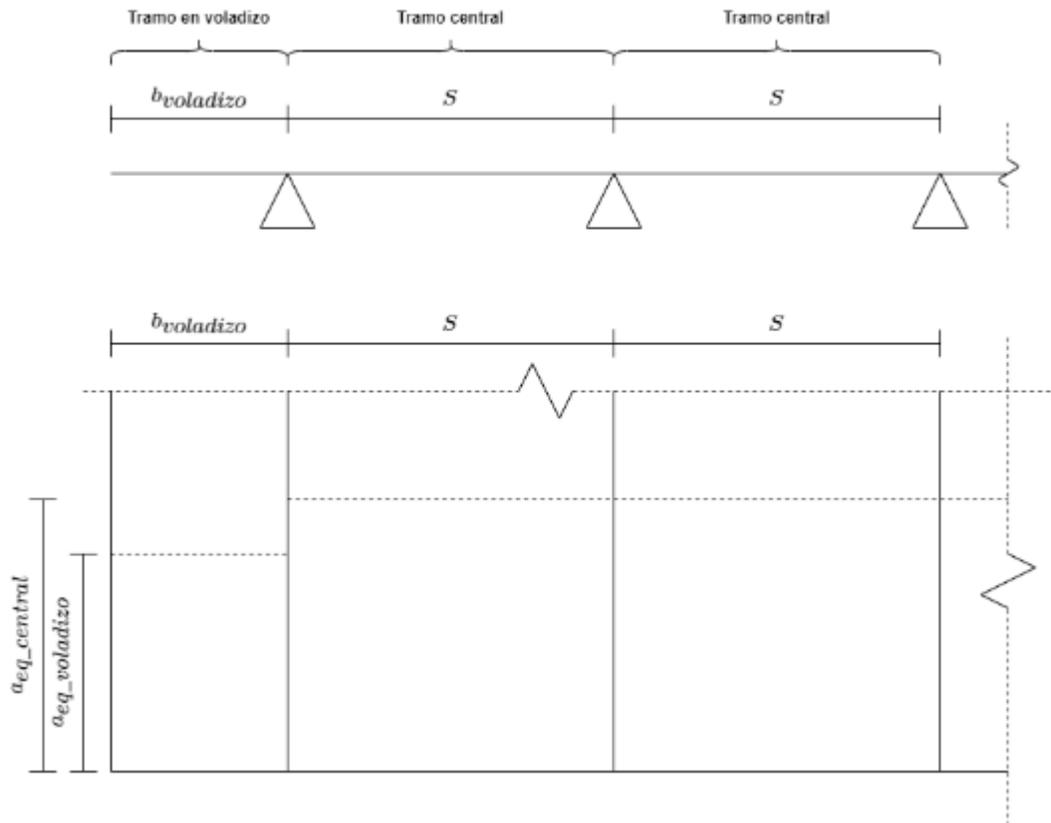
Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.2. ANCHO DE FRANJAS EQUIVALENTES

El ancho de las franjas equivalentes se considera en la dirección longitudinal del puente. Para los tramos centrales, el largo es la distancia entre vigas. Para los voladizos, el largo es el ancho de voladizo. Cada tramo de losa se estudia como una viga simplemente apoyada en las vigas de acero.



Ancho de franja equivalente en tramo central:

$$a_{eq_central} := 0.7 \text{ m} + 6.6 S = 4.66 \text{ m}$$

Distancia X para ancho de franja equivalente en voladizo:

$$X := b_{voladizo} - \frac{b_{baranda}}{2} = 0.24 \text{ m}$$

Ancho de franja equivalente en voladizo:

$$a_{eq_voladizo} := 1.2 \text{ m} + 10 X = 3.6 \text{ m}$$

3.3. DISEÑO DE TRAMOS CENTRALES

Reacción en apoyos por carga muerta:

$$R_{DC} := \frac{PP_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} \cdot a_{eq_central} = 4.905 \text{ tonnef}$$

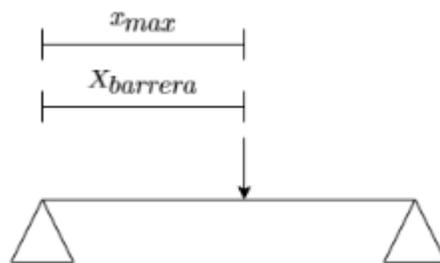
Reacción en apoyos por carga muerta superpuesta:

$$R_{DW} := \left(\frac{PP_{pav} \cdot b_{tablero} + 2 PP_{baranda} + 2 PP_{barrera}}{N_b} \right) \cdot a_{eq_central}$$

$$R_{DW} = 0.671 \text{ tonnef}$$

3.3.1. CASO 1: TRAMO CON BARRERA

Se considera el tramo en el que se ubica la barrera de contención.
El momento máximo se da en el punto central de la barrera.



Distancia de barrera a apoyo más cercano al extremo:

$$X_{barrera} := b_{baranda} + b_{pasillo} + \frac{b_{barrera}}{2} - b_{voladizo} - 2 S = 0.318 \text{ m}$$

Momento en caso tramo con barrera:

$$M_{caso1} := (R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{barrera} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{barrera}^2$$

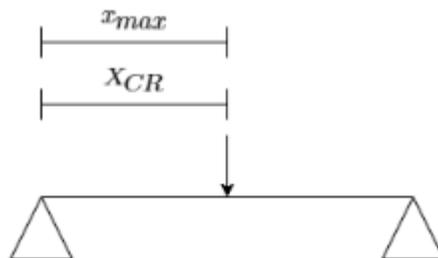
$$M_{caso1} = 1.33 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

3.3.2. CASO 2: TRAMO CON CAMIÓN Ó TÁNDEM

Se considera el tramo con camión de diseño o tándem de diseño.

Se consideran las ruedas más pesadas posibles dentro del ancho efectivo.

El momento máximo se da bajo las ruedas, cuando éstas se ubican en el centro del tramo.



Distancia de carga de rueda a apoyo más desfavorable:	$X_{CR} := \frac{S}{2} = 0.3 \text{ m}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por camión de diseño:	$R_{camión} := \frac{2 CR_{camión\ 2\ 3} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 8.71 \text{ tonnef}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por tándem de diseño:	$R_{tándem} := \frac{2 CR_{tándem} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 5.67 \text{ tonnef}$
Reacción de carga viva más desfavorable:	$R_{LL} := \max(R_{camión}, R_{tándem}) = 8.71 \text{ tonnef}$
Carga de rueda más desfavorable:	$CR_{LL} := \max(2 CR_{camión\ 2\ 3}, 2 CR_{tándem})$ $CR_{LL} = 17.42 \text{ tonnef}$
Momento máximo en caso tramo sin barrera:	$M_{caso2} := (R_{LL} + R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{CR} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{CR}^2$ $M_{caso2} = 3.893 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

3.3.3. ACERO DE REFUERZO

3.3.3.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo en la franja equivalente:	$M_u := \max(M_{caso1}, M_{caso2}) = 3.893 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$
Factor de resistencia para hormigón armado:	$\phi_c := 0.9$
Refuerzo principal requerido:	$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$ $A_{p_req} = 1.585 \text{ cm}^2$
Refuerzo mínimo:	$A_{p_min} := 0.0009 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 6.3 \text{ cm}^2$
Refuerzo dispuesto:	$\phi 10 @ 20 + \phi 10 @ 25$
Refuerzo dispuesto:	$A_p = 7.069 \text{ cm}^2$

3.3.3.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución:
$$Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$$

Refuerzo requerido:
$$A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 4.736 \text{ cm}^2$$

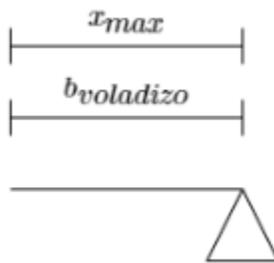
Refuerzo dispuesto:
$$\phi 10@25 + \phi 10@25$$

Refuerzo dispuesto:
$$A_{sec} = 6.283 \text{ cm}^2$$

3.4. DISEÑO DE VOLADIZOS

Se considera el tramo en voladizo.

El momento máximo se da en el apoyo.



Momento máximo en voladizo:
$$M_{voladizo} := -(PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_voladizo} \cdot 0.5 \cdot b_{voladizo}^2$$

$$M_{voladizo} = -0.335 \text{ tonnef} \cdot m$$

3.4.1. ACERO DE REFUERZO

3.4.1.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo total en la franja equivalente:
$$M_u := -M_{voladizo} = 0.335 \text{ tonnef} \cdot m$$

Factor de resistencia para hormigón armado:
$$\phi_c := 0.9$$

Refuerzo principal requerido:
$$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$$

$$A_{p_req} = 0.136 \text{ cm}^2$$

Refuerzo mínimo: $A_{p_min} := 0.0009 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 6.3 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 10@20 + \phi 10@25$

Refuerzo dispuesto: $A_p = 7.069 \text{ cm}^2$

3.4.1.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución: $Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$

Refuerzo requerido: $A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 4.736 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 10@25 + \phi 10@25$

Refuerzo dispuesto: $A_{sec} = 6.283 \text{ cm}^2$

4. DISEÑO DE LAS VIGAS COMPUESTAS

4.1. PROPIEDADES

Ancho efectivo colaborante de la losa para viga interior:

$$b_s := S = 0.6 \text{ m}$$

Espesor de la losa de hormigón:

$$t_s := e_{losa} = 70 \text{ cm}$$

Razón entre módulos de elasticidad:

$$n := \frac{E_s}{E_c} = 8.796$$

4.2. CARGAS

4.2.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de viga de acero:

$$PP_{viga} := \gamma_s \cdot viga \cdot A_s = 0.32 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de losa para cada viga:

$$PP_{losa} := \frac{\gamma_c \cdot e_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 1.053 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento para cada viga

$$PP_{pav} := \frac{\gamma_c \cdot e_{pav} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 0.075 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de baranda para cada viga:

$$PP_{baranda} := \frac{2 PP_{baranda}}{N_b} = 0.005 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de barrera para cada viga:

$$PP_{barrera} := \frac{2 PP_{barrera}}{N_b} = 0.064 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje:
Carga de rueda segundo y tercer eje:

$$CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$$

$$CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre ruedas:

$$a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre dos primeros ejes:

$$a_{lo_camión_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal mínima entre dos últimos ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_min} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal
máxima entre dos últimos
ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_max} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia transversal a
barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda:

$$CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.4 \text{ tonnef} = 5.7 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre
ruedas:

$$a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
ruedas:

$$a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$$

Distancia transversal a
barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.5. CARGA DE FAJA

Carga de faja:

$$q_{faja} := 0.952 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.6. COEFICIENTE DE IMPACTO DINÁMICO (IM)

Coeficiente de impacto
dinámico para estado límite
de fatiga:

$$IM_{fatiga} := 15\%$$

Coeficiente de impacto
dinámico para el resto de
cálculos:

$$IM := 33\%$$

4.2.7. CARGA DE FATIGA

Carga de rueda primer eje:

$$CR_{fatiga_1} := CR_{camión_1} = 2.18 \text{ tonnef}$$

Carga de rueda segundo y
tercer eje:

$$CR_{fatiga_2_3} := CR_{camión_2_3} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre
ruedas:

$$a_{tr_fatiga} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
dos primeros ejes

$$a_{lo_fatiga_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
dos últimos ejes:

$$a_{lo_fatiga_2_3} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia a barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

Tránsito medio diario anual:

$$ADTT := 3000$$

Factor p para dos fajas de
tránsito:

$$p := 0.85$$

Frecuencia de carga de fatiga:

$$ADTT_{SL} := p \cdot ADTT = 2550$$

4.3. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN

Se considera que la sección transversal se deforma y rota como un cuerpo rígido.

Factor de presencia múltiple para 1 vía cargada:

$$m_1 := 1.20$$

Factor de presencia múltiple para 2 vías cargadas:

$$m_2 := 1.00$$

1 vía cargada:

$$N_{L,1} := 1$$

2 vías cargadas:

$$N_{L,2} := 2$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 1:

$$e_1 := b_{pista} - d - 0.5 a_{tr_camión} = 2.485 \text{ m}$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 2:

$$e_2 := e_1 = 2.485 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y la viga exterior:

$$X_{ext} := 0.5 b_{tablero} - b_{voladizo} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las primeras vigas:

$$X_1 := X_{ext} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las segundas vigas:

$$X_2 := X_{ext} - S = 5.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las terceras vigas:

$$X_3 := X_2 - S = 4.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las cuartas vigas:

$$X_4 := X_3 - S = 3.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las quintas vigas:

$$X_5 := X_4 - S = 3.3 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las sextas vigas:

$$X_6 := X_5 - S = 2.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las séptimas vigas:

$$X_7 := X_6 - S = 2.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las octavas vigas:

$$X_8 := X_7 - S = 1.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las novenas vigas:

$$X_9 := X_8 - S = 0.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las décimas vigas:

$$X_{10} := X_9 - S = 0.3 \text{ m}$$

4.3.1. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA MOMENTO

Factor de distribución para momento para 1 vía cargada:

$$g_{M_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para momento para 2 vías cargadas:

$$g_{M_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.3.2. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA CORTE

Factor de distribución para corte para 1 vía cargada:

$$g_{V_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para corte para 2 vías cargadas:

$$g_{V_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.4. DISEÑO A FLEXIÓN

Factor de resistencia a flexión:

$$\phi_f := 1.0$$

4.4.1. CONSTRUCCIÓN

4.4.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Área de la sección:

$$A_s := A_s = 40000 \text{ mm}^2$$

Distancia entre los centroides de las alas:

$$h := h_w + 0.5 t_{f_inf} + 0.5 t_{f_sup} = 440 \text{ mm}$$

Momento de inercia:

$$I_s := I_s = (1.714 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Constante torsional:

$$J := J = (1.847 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

Módulo elástico de la sección para el ala en compresión:

$$S_{xc} := S_{x_s} = (7.141 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Módulo elástico de la sección para el ala en tracción:

$$S_{xt} := S_{xc} \cdot \frac{y_{CG_s}}{(h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} - y_{CG_s})} = (7.141 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Módulo plástico de la sección para el ala en compresión:

$$Z_{xc} := Z_{x_s} = (8.032 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Radio de giro:

$$r_y := r_{y_s} = 111.137 \text{ mm}$$

Radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional:

$$r_t := \sqrt{\frac{I_s \cdot h}{2 S_{xc}}} = 229.783 \text{ mm}$$

Tensión en el ala en compresión en el punto de fluencia:

$$F_{yr} := \min \left(0.7 F_{yc}, F_{yt} \cdot \frac{S_{xt}}{S_{xc}}, F_{yw} \right)$$

$$F_{yr} := \max (F_{yr}, 0.5 F_{yc}) = 2460.5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Longitud límite para resistencia por fluencia:

$$L_p := 1.76 r_y \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 4.781 \text{ m}$$

Longitud límite para pandeo torsional inelástico:

$$L_r := 1.95 r_t \cdot \frac{E_s}{F_{yr}} \cdot \sqrt{\frac{J}{S_{xc} \cdot h} + \sqrt{\left(\frac{J}{S_{xc} \cdot h}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{F_{yr}}{E_s}\right)^2}}$$

$$L_r = 42.751 \text{ m}$$

4.4.1.2. RESISTENCIA A FLEXIÓN

Combinación de carga: Resistencia I: 1.25 DC

Momento en viga por cargas en construcción: $M(x) := 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{L}{2} \cdot x - 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{x^2}{2}$

Momento máximo en viga por cargas en construcción: $M_{max} := M\left(\frac{L}{2}\right) = 134.045 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en primer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_A := M\left(\frac{L}{4}\right) = 100.534 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en segundo cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_B := M\left(\frac{L}{2}\right) = 134.045 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en tercer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_C := M\left(\frac{L}{4}\right) = 100.534 \text{ tonnef} \cdot m$

Factor de modificación por pandeo lateral torsional: $C_b := \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} = 1.136$

Momento plástico: $R_{pc} M_{yc} := F_{yc} \cdot Z_{xc} = 282.325 \text{ tonnef} \cdot m$

Tensión crítica: $F_{cr} := \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E_s}{\left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + 0.0078 \frac{J}{S_{xc} \cdot h} \cdot \left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2}$

$$F_{cr} = 2471.283 \frac{kgf}{cm^2}$$

Resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$M_{nc} := \begin{cases} \text{if } L_b \leq L_p \\ \quad \parallel R_{pc} M_{yc} \\ \text{else if } L_b \leq L_r \\ \quad \parallel C_b \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{F_{yr} \cdot S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}}\right) \cdot \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right) \cdot R_{pc} M_{yc} \\ \text{else} \\ \quad \parallel F_{cr} \cdot S_{xc} \end{cases}$$

$$M_{nc} := \min(M_{nc}, R_{pc} M_{yc}) = 256.305 \text{ tonnef} \cdot m$$

Esfuerzo de resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$F_{nc} := \frac{M_{nc}}{S_{xc}} = 3589.262 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Momento último:

$$M_u := M_{max} = 134.045 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo en el ala en compresión:

$$f_{bu} := \frac{M_u}{S_{xc}} = 1877.153 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Chequeo de requerimientos por flexión en etapas críticas de construcción:

Primer chequeo: $f_{bu} = 1877.153 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{yc} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f_{bu} = 1877.153 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{nc} = 3589.262 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

4.4.1.3. DEFORMACIÓN POR CARGAS MUERTAS

Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW

Flecha por carga muerta DC: $flecha_{DC} := \frac{5 (PP_{losa} + PP_{viga}) L^4}{384 E_s \cdot I_s} = 193.985 \text{ mm}$

Flecha por carga muerta superpuesta DW: $flecha_{DW} := \frac{5 (PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^4}{384 E_s \cdot I_s}$

$$flecha_{DW} = 20.342 \text{ mm}$$

Contraflecha total a dar a vigas de acero:

$$contraflecha := flecha_{DC} + flecha_{DW} = 214.327 \text{ mm}$$

4.4.2. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

4.4.2.1. DEFORMACIONES ELÁSTICAS

4.4.2.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO

Se debe considerar la rigidez del sistema completo.

Ancho transformado de hormigón:
$$b_{c_tr} := \frac{b_{\text{tablero}}}{n} = 1.368 \text{ m}$$

Centro de gravedad:
$$y_{CG_tr_s} := \frac{N_b \cdot A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr} \cdot 0.5 t_s}{N_b \cdot A_s + t_s \cdot b_{c_tr}} = 36.821 \text{ cm}$$

Inercia del sistema completo:
$$I_{\text{sist}} = (I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_tr_s})^2) \cdot N_b + \frac{b_{c_tr} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_tr_s})^2$$

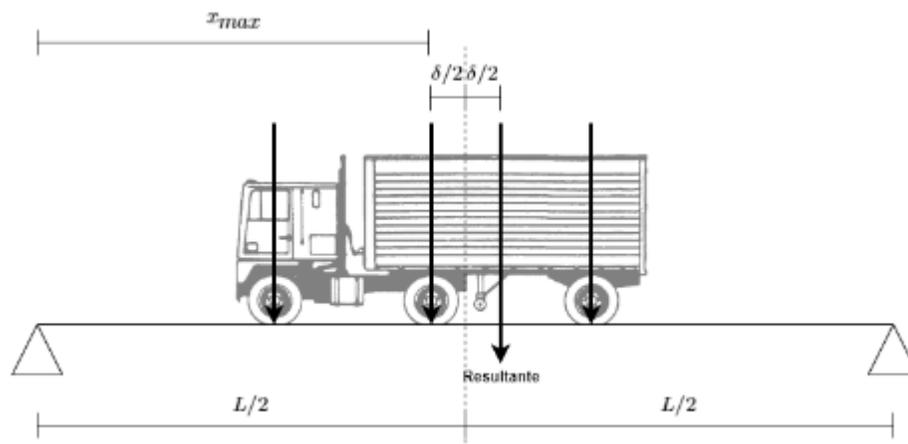
$$I_{\text{sist}} = (7.407 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.1.2. CÁLCULO DE DEFORMACIONES

Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW + 1.0 IM LL

Carga muerta es contrarrestada por la contraflecha durante etapas de construcción.
Se deben cargar todas las vías de diseño.

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
La flecha máxima se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{camión} = \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_{camión_1,2}} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_{camión_2,3_{min}}}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_{camión_1,2}} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_{camión_2,3_{min}}} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 24.585 \text{ tonnef}$$

Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

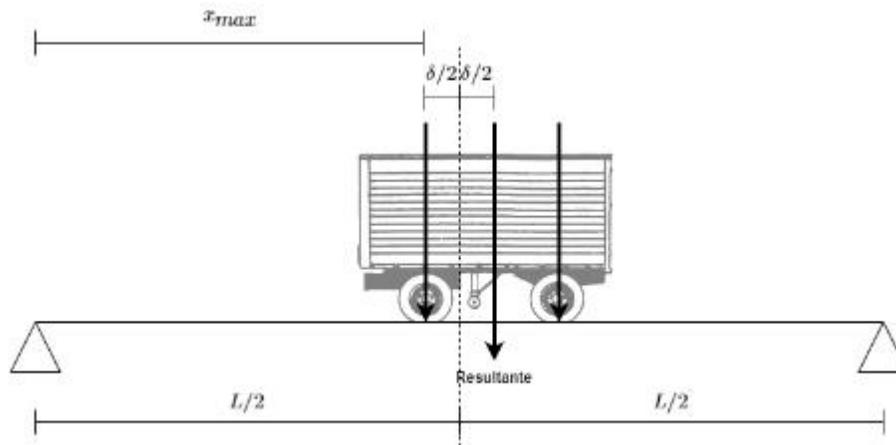
$$M_{camión}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_{camión_1,2}} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_{camión_1,2}} \right) \right) \\ \text{else} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_{camión_1,2}} \right) \right) - 2 CR_{camión_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \right) \right) \end{cases}$$

Flecha máxima por camión de diseño:

$$flecha_{camión} := - \left(\int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)} \left(\int_0^x \frac{M_{camión}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \cdot \int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)} \frac{M_{camión}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) = 8.28 \text{ mm}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

La flecha máxima se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tándem} := \frac{a_{lo_tándem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tándem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \frac{L + \delta_{tándem} - a_{lo_tándem}}{L}$$

$$R_{tándem} = 14.792 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tándem}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \\ \quad \left| R_{tándem} \cdot x \right. \\ \text{else} \\ \quad \left| R_{tándem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right) \right| \end{cases}$$

Flecha máxima por tándem de diseño:

$$flecha_{tándem} := - \left(\int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \left(\int_0^x \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \cdot \int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) = 5.749 \text{ mm}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Flecha por carga de faja:

$$flecha_{faja}(x) := - \left(\int_0^x \left(\frac{q_{faja} \cdot L \cdot s^2}{4} - \frac{q_{faja} \cdot s^3}{6} \right) ds - x \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{M_{faja}(s)}{E_s \cdot I_{sist}} ds \right)$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja, cargando ambas vías:

Flecha máxima por camión de diseño y carga de faja:

$$flecha_{camión_faja} := 2 \cdot flecha_{camión} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)$$

$$flecha_{camión_faja} = 22.762 \text{ mm}$$

Flecha máxima por tándem de diseño y carga de faja:

$$flecha_{tándem_faja} := 2 \cdot flecha_{tándem} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right)$$

$$flecha_{tándem_faja} = 17.72 \text{ mm}$$

Flecha máxima por carga viva:

$$flecha_{IM_LL} := \max(flecha_{camión_faja}, flecha_{tándem_faja})$$

$$flecha_{IM_LL} = 22.762 \text{ mm}$$

Deformación máxima por combinación de carga Servicio I:

$$\Delta_{max} := flecha_{IM_LL} = 22.762 \text{ mm}$$

Chequeo de requerimientos por deformaciones elásticas:

Chequeo: $\Delta_{max} = 22.762 \text{ mm} \leq \frac{L}{800} = 31.25 \text{ mm}$

OK.

4.4.2.2. DEFORMACIONES PERMANENTES

4.4.2.2.1. SECCIÓN RESISTENTE 1: SECCIÓN DE ACERO

Centro de gravedad: $y_{CG_s} = 24 \text{ cm}$

Inercia de la sección de acero: $I_s = (1.714 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$

4.4.2.2.2. SECCIÓN RESISTENTE 2: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_cp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 36.823 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_cp_s})^2 + \frac{b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_cp_s})^2$

$$I_{tr_cp_s} = (3.698 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.3. SECCIÓN RESISTENTE 3: SECCIÓN COMPUESTA EN EL LARGO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{3 n} = 0.023 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_lp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 37.861 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta:

$$I_{tr_lp,s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG,s} + rec + h_{sc} - y_{CG,lp,s})^2 + \frac{b_{c,tr,lp,s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c,tr,lp,s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG,lp,s})^2$$

$$I_{tr_lp,s} = (2.382 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.4. SECCIÓN RESISTENTE 4: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO Y LARGO PLAZO TRANSFORMADA A HORMIGÓN

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Espesor del alma transformado:

$$t_{w_tr_c} := t_w \cdot n = 14.073 \text{ cm}$$

Ancho del ala superior transformado:

$$b_{f_sup_tr_c} := b_{f_sup} \cdot n = 369.421 \text{ cm}$$

Ancho del ala inferior transformado:

$$b_{f_inf_tr_c} := b_{f_inf} \cdot n = 369.421 \text{ cm}$$

Centro de gravedad:

$$y_{CG_tr_c} := \frac{A_s \cdot n \cdot (y_{CG,s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot S \cdot 0.5 t_s}{A_s \cdot n + t_s \cdot S} = 36.823 \text{ cm}$$

Momento de inercia:

$$I_{tr_c} = (3.254 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.5. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Servicio II:

$$1.0 \text{ DC} + 1.0 \text{ DW} + 1.3 \text{ IM LL}$$

Momento máximo por carga muerta DC:

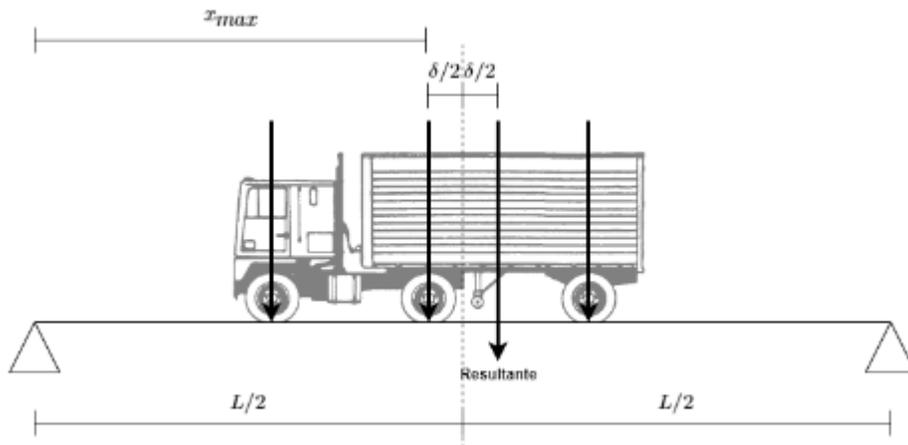
$$M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 107.236 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga muerta superpuesta DW:

$$M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$$

$$M_{DW} = 11.245 \text{ tonnef} \cdot m$$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
 Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
 El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{camión} = \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_camión_1,2} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_camión_2,3_min}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} = (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_camión_1,2} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_camión_2,3_min} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 24.585 \text{ tonnef}$$

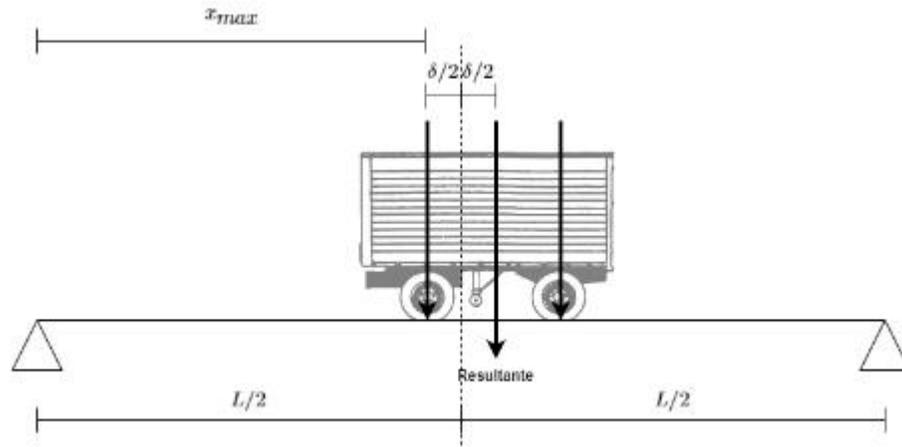
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{camión}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) \\ \text{else} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) - 2 CR_{camión_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \right) \right) \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño:

$$M_{max_camión} := M_{camión} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) = 265.06 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

**Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:
El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.**



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tándem} := \frac{a_{lo_tándem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tándem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \frac{L + \delta_{tándem} - a_{lo_tándem}}{L}$$

$$R_{tándem} = 14.792 \text{ tonnef}$$

Momento entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tándem}(x) := \begin{cases} R_{tándem} \cdot x & \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \\ R_{tándem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right) & \text{else} \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tándem} := M_{tándem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) = 180.389 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} = \max \left(M_{max_camión} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right), M_{max_tándem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 339.194 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 74.057 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo máximo en el hormigón en tracción:

$$f := \frac{M_{DW} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}}$$

$$f = 109.615 \frac{kgf}{cm^2} \leq 2 f_r = 63.637 \frac{kgf}{cm^2}$$

Si el esfuerzo máximo en el hormigón a tracción supera el límite, se considera que el esfuerzo por deformaciones permanentes debe ser calculado utilizando sólo la sección de acero.

Esfuerzo máximo en el ala en compresión de la viga de acero:

$$f_{fc} := \frac{M_{DC} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{fc} = 3007.412 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en el ala en tracción de la viga de acero:

$$f_{ft} := \frac{M_{DC} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{ft} = 3007.412 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en la viga de acero:

$$f_f := \max(f_{fc}, f_{ft}) = 3007.412 \frac{kgf}{cm^2}$$

Chequeo de requerimientos por deformaciones permanentes:

Primer chequeo: $f_f = 3007.412 \frac{kgf}{cm^2} \leq 0.95 \cdot F_{yf} = 3339.25 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f = 109.615 \frac{kgf}{cm^2} \leq 4 f_r = 127.274 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

4.4.3. ESTADO LÍMITE DE FATIGA

4.4.3.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 400 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.4.3.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \begin{cases} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \parallel 1.0 \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \parallel \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \end{cases} = 1$$

Resistencia a corte por fluencia:

$$V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 130.477 \text{ tonnef}$$

Corte crítico:

$$V_{cr} := C \cdot V_p = 130.477 \text{ tonnef}$$

4.4.3.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Corte máximo por carga muerta DC:

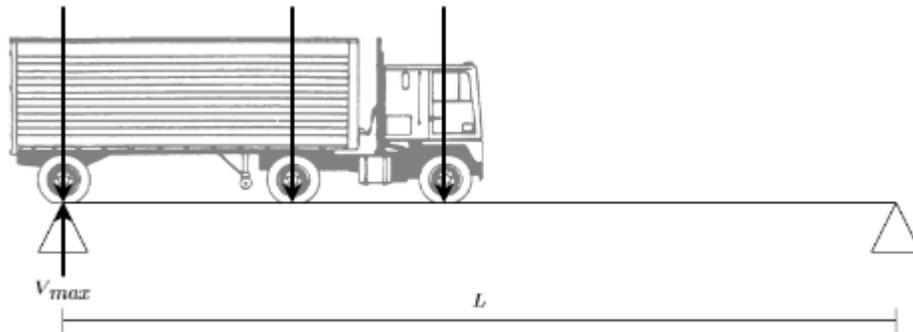
$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 17.158 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 1.799 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1.2} + a_{lo_fatiga_2.3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2.3} - a_{lo_fatiga_1.2}) \right) + \frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 35.056 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V.1} \cdot V_{fatiga}, g_{V.2} \cdot V_{fatiga}) = 7.654 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 30.438 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de fatiga:

$$\text{Chequeo: } V_u = 30.438 \text{ tonnef} \quad \leq \quad V_{cr} = 130.477 \text{ tonnef}$$

OK.

4.4.4. ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

4.4.4.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo sólo en compresión.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 400 \text{ mm}$

Centro de gravedad: $y_{CG_tr_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_s}}$

$y_{CG_tr_s} = 36.823 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} := I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_w - y_{CG_tr_s})^2 + \frac{b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s}^3}{12} + b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s} \cdot (0.5 y_{CG_tr_s})^2$

$I_{tr_cp_s} = (2.868 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$

Profundidad de la sección compuesta: $D_t := t_s = 70 \text{ cm}$

4.4.4.2. MOMENTO PLÁSTICO

Eje neutro plástico desde el borde superior de la losa:

$$c := \begin{cases} \text{if } 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc}) \geq F_y \cdot A_s \\ \quad \frac{F_y \cdot A_s}{0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup}) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \geq F_y \cdot (h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \quad \frac{F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} + 2 rec + 2 h_{sc}) + h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf})}{2 F_y \cdot b_{f_sup} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + h_w \cdot t_w) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \geq F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \quad \frac{F_y \cdot (t_w \cdot (h_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup})}{2 F_y \cdot t_w + 0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else} \\ \quad \frac{F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot (t_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup} + 2 h_w) - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} - h_w \cdot t_w)}{2 F_y \cdot b_{f_inf} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \end{cases}$$

$c = 18.944 \text{ cm}$

Área de hormigón a compresión: $A_{c_c} := b_s \cdot c = 1136.632 \text{ cm}^2$

Área de acero a compresión:

$$A_{s,c} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel 0 \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \\ \text{else} \\ \quad \parallel A_s \end{cases}$$

$$A_{s,c} = 165.642 \text{ cm}^2$$

Área de acero a tracción:

$$A_{s,t} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel A_s \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel A_s - b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)) \\ \text{else} \\ \quad \parallel 0 \end{cases}$$

$$A_{s,t} = 234.358 \text{ cm}^2$$

Centro del área del hormigón en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{c,c}} := \frac{c}{2} = 9.472 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s,c}} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel \text{"No aplica"} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \cdot (t_{f,sup} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \cdot (t_{f,sup} + h_w + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + y_{CG_{s,t}} \end{cases}$$

$$y_{CG_{s_c}} = 16.972 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en tracción desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s_t}} = \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ rec + h_{sc} + y_{CG_{s_c}} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ c + \frac{b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) + h_w \cdot t_w \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + 0.5 h_w) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + h_w + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - b_{f_sup} \cdot (c - rec - h_{sc})} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ c + \frac{t_w \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \cdot 0.5 \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}))} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ c + \frac{b_{f_inf} \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w)}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot h_w + b_{f_inf} \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup} - h_w))} \\ \text{else} \\ \text{"No aplica"} \end{cases}$$

$$y_{CG_{s_t}} = 54.569 \text{ cm}$$

Distancia desde el borde superior de la losa al eje neutro plástico:

$$D_p := c = 18.944 \text{ cm}$$

Profundidad del alma de la viga de acero a compresión:

$$D_{cp} := \max(c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}, 0 \text{ cm}) = 0 \text{ cm}$$

Momento plástico:

$$M_p = \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right. \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right. \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right. \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right. \\ \text{else} \\ \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) \right. \end{cases}$$

$$M_p = 327.83 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

4.4.4.3. COMPACIDAD DE LA SECCIÓN

Chequeo de requerimientos de compacidad de la sección:

Primer chequeo: $F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq 4921 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $\frac{D}{t_w} = 25 \leq 150$

OK.

Tercer chequeo: $\frac{2 D_{cp}}{t_w} = 0 \quad \leq \quad 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 91.904$
OK.

La sección califica como: **COMPACTA**

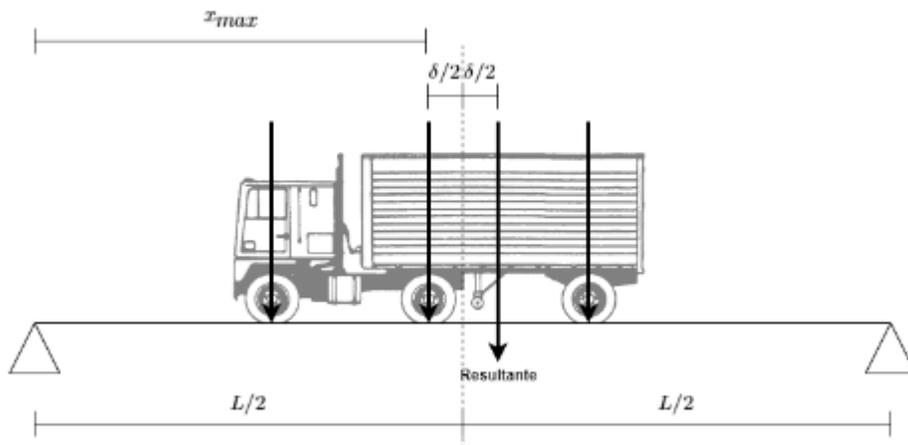
4.4.4.4. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Resistencia I: **1.25 DC + 1.50 DW + 1.75 IM LL**

Momento máximo por carga muerta DC: $M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 107.236 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento máximo por carga muerta superpuesta DW: $M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$
 $M_{DW} = 11.245 \text{ tonnef} \cdot m$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante: $\delta_{camión} := \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_camión_1,2} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_camión_2,3_mín}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo: $R_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_camión_1,2} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_camión_2,3_mín} + \delta_{camión}) \right)$

$$R_{camión} = 24.585 \text{ tonnef}$$

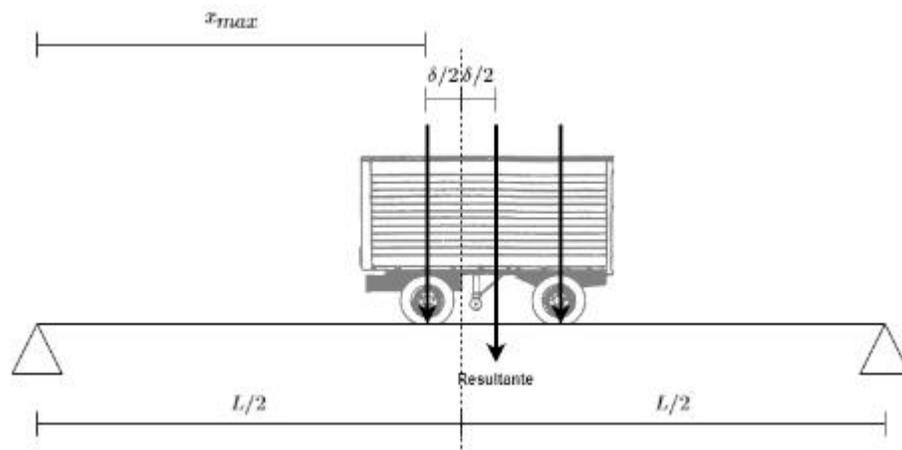
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{camión}}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{camión}_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \right) \right) \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{\text{camión}_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \right) \right) - 2 CR_{\text{camión}_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño: $M_{\text{max_camión}} := M_{\text{camión}} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) = 265.06 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{\text{tándem}} := \frac{a_{\text{lo_tándem}}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{\text{tándem}} := (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \frac{L + \delta_{\text{tándem}} - a_{\text{lo_tándem}}}{L}$$

$$R_{\text{tándem}} = 14.792 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{tándem}}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tándem} := M_{tándem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) = 180.389 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} = \max \left(M_{max_camión} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right), M_{max_tándem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 339.194 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 74.057 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento último:

$$M_u := 1.25 \cdot M_{DC} + 1.50 M_{DW} + 1.75 \cdot M_{LL}$$

$$M_u = 280.513 \text{ tonnef} \cdot m$$

Resistencia nominal a flexión:

$$M_n := \left\| \begin{array}{l} \text{if } D_p \leq 0.1 D_t \\ \left\| M_p \right\| \\ \text{else} \\ \left\| M_p \cdot \left(1.07 - 0.7 \frac{D_p}{D_t} \right) \right\| \end{array} \right\| = 288.674 \text{ tonnef} \cdot m$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de resistencia:

$$\text{Chequeo: } M_u = 280.513 \text{ tonnef} \cdot m \leq \phi_f \cdot M_n = 288.674 \text{ tonnef} \cdot m$$

OK.

4.4.4.5. DUCTILIDAD

Chequeo de requerimientos de ductilidad:

$$\text{Chequeo: } D_p = 18.944 \text{ cm} \leq 0.42 D_t = 29.4 \text{ cm}$$

OK.

4.5. DISEÑO A CORTE

Factor de resistencia a corte: $\phi_v := 1.0$

4.5.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 400 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.5.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \begin{cases} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \parallel 1.0 \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \parallel \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \end{cases} = 1$$

Resistencia a corte por fluencia: $V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 130.477 \text{ tonnef}$

Resistencia nominal al corte: $V_n := C \cdot V_p = 130.477 \text{ tonnef}$

4.5.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

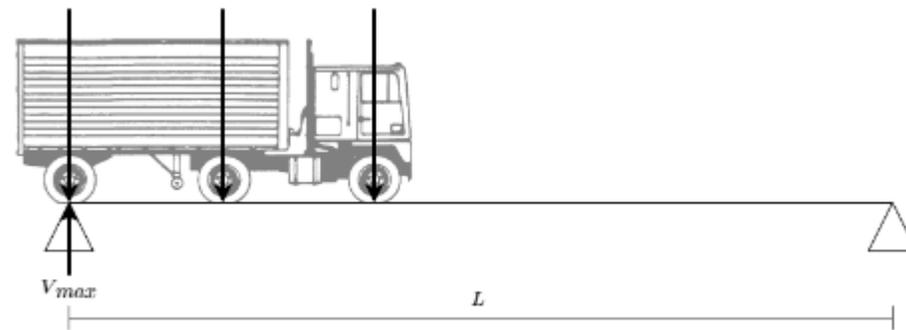
Combinación de carga: Resistencia I: $1.25 \text{ DC} + 1.50 \text{ DW} + 1.75 \text{ IM LL}$

Corte máximo por carga muerta DC: $V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 17.158 \text{ tonnef}$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW: $V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 1.799 \text{ tonnef}$

Posición de camión de diseño que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje del camión.



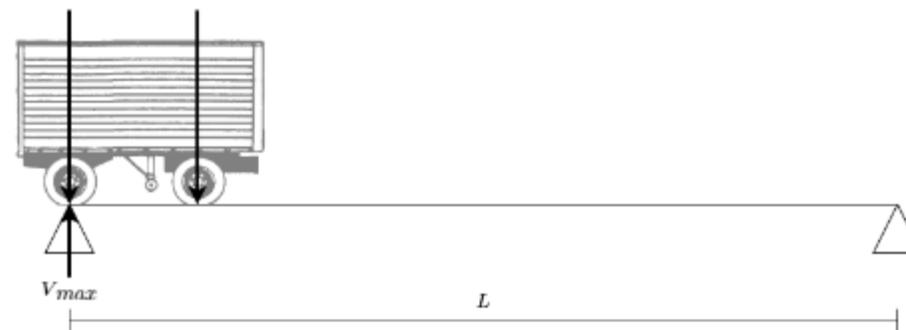
Corte máximo por camión de diseño:

$$V_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión.1}}{L} \cdot (L - a_{lo_camión.2.3_min} - a_{lo_camión.1.2}) + \frac{2 CR_{camión.2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_camión.2.3_min}) \right)$$

$$V_{camión} = 46.198 \text{ tonnef}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el segundo eje del tándem.



Corte máximo por tándem de diseño:

$$V_{tándem} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{tándem}}{L} \cdot (2L - a_{lo_tándem}) \right)$$

$$V_{tándem} = 29.584 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de faja:

$$V_{faja} := \frac{q_{faja} \cdot L}{2} = 11.9 \text{ tonnef}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Corte máximo por carga viva LL:

$$V_{LL} := \max(V_{camión} + V_{faja}, V_{tándem} + V_{faja})$$

$$V_{LL} = 58.098 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga viva distribuido:

$$V_{LL} := \max(g_{V_1} \cdot V_{LL}, g_{V_2} \cdot V_{LL}) = 12.685 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := 1.25 V_{DC} + 1.50 V_{DW} + 1.75 V_{LL}$$

$$V_u = 46.344 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos de resistencia al corte:

Chequeo: $V_u = 46.344 \text{ tonnef} \leq \phi_v \cdot V_n = 130.477 \text{ tonnef}$

OK.

5. CONECTORES DE CORTE

Factor de resistencia de conectores de corte:

$$\phi_{sc} := 0.85$$

Resistencia a la fatiga de un conector de corte:

$$Z_r := 0.375 \text{ tonnef} \cdot \frac{w}{cm} = 1.5 \text{ tonnef}$$

Fuerza de corte nominal:

$$P := \min(0.85 f'_c \cdot b_s \cdot t_s, F_{yw} \cdot D \cdot t_w + F_{yt} \cdot b_{f_{inf}} \cdot t_{f_{inf}} + F_{yc} \cdot b_{f_{sup}} \cdot t_{f_{sup}})$$

$$P = 892.5 \text{ tonnef}$$

Resistencia nominal al corte de un conector de corte:

$$Q_n := 0.3 \cdot (t_{f_{sc}} + 0.5 t_{wsc}) \cdot L_c \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c}$$

$$Q_n = 41.719 \text{ tonnef}$$

Resistencia al corte de un conector de corte:

$$Q_r := \phi_{sc} \cdot Q_n = 35.461 \text{ tonnef}$$

5.1. NÚMERO DE CONECTORES DE CORTE

El número de conectores de corte requerido corresponde a los necesarios entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

Chequeo de requerimientos de número de conectores de corte:

Chequeo:
$$n_{sc_req} := \frac{P}{Q_r} = 25.168 \quad \leq n_{sc} = 26$$

OK.

5.2. SEPARACIÓN LONGITUDINAL

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Se debe cumplir con la separación longitudinal máxima normativa, correspondiente a 600 mm.

También se debe cumplir con el requerimiento de separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga.

Además, se verifica la separación longitudinal máxima tal que se ubique el número de conectores de corte requerido entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

Corte máximo por carga muerta DC:

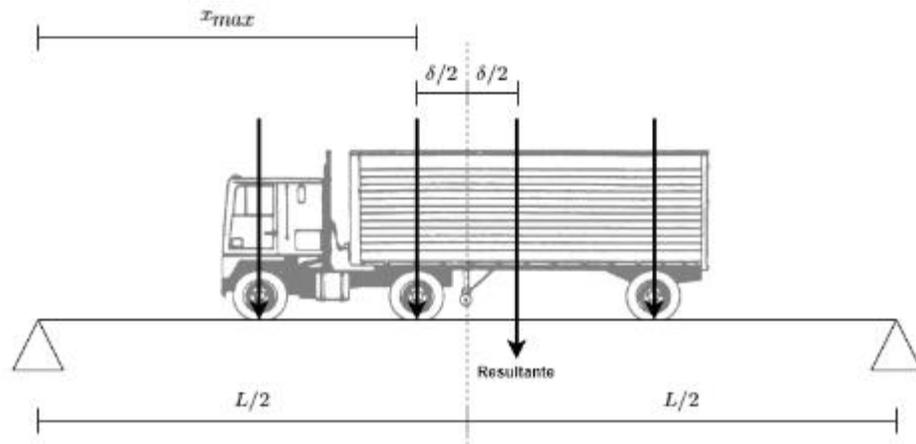
$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 17.158 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 1.799 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el segundo eje de la carga de fatiga.



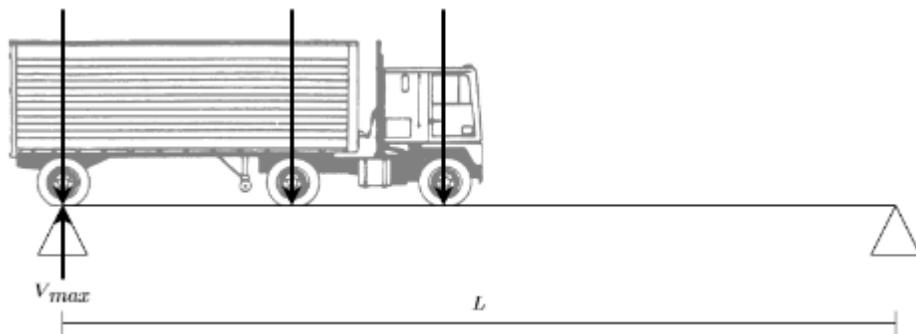
Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{fatiga} := \frac{-2 CR_{fatiga_1} \cdot a_{lo_fatiga_1_2} + 2 CR_{fatiga_2_3} \cdot a_{lo_fatiga_2_3}}{2 CR_{fatiga_1} + 4 CR_{fatiga_2_3}}$$

$$\delta_{fatiga} = 3.591 \text{ m}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1_2} + a_{lo_fatiga_2_3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2_3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2_3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2_3} - a_{lo_fatiga_1_2}) + \frac{2 CR_{fatiga_2_3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2_3}) \right) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 35.056 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V_1} \cdot V_{fatiga}, g_{V_2} \cdot V_{fatiga}) = 7.654 \text{ tonnef}$$

Corte por combinación de fatiga:

$$V_f := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 30.438 \text{ tonnef}$$

Primer momento del área de hormigón a compresión en torno al eje neutro de la sección compuesta en el corto plazo:

$$Q := \frac{b_s}{n} \cdot y_{CG_cp_s} \cdot \frac{y_{CG_cp_s}}{2} = (4.625 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Inercia de la sección compuesta en el corto plazo:

$$I_{tr_cp_s} = (2.868 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Resistencia longitudinal a corte por fatiga por unidad de largo:

$$V_{fat} := \frac{V_f \cdot Q}{I_{tr_cp_s}} = 0.049 \frac{\text{tonnef}}{\text{mm}}$$

Separación longitudinal máxima normativa:

$$P_{sc_norm} := 600 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga:

$$P_{sc_fatiga} := \frac{n_{sc} \cdot Z_r}{V_{fat}} = 794.6 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por número requerido:

$$P_{sc_num} := \frac{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{fatiga}}{2} \right)}{n_{sc}} = 411.707 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima:

$$P_{max} := \min(P_{sc_norm}, P_{sc_fatiga}, P_{sc_num}) = 411.707 \text{ mm}$$

Chequeo de requerimientos de separación longitudinal:

Chequeo:

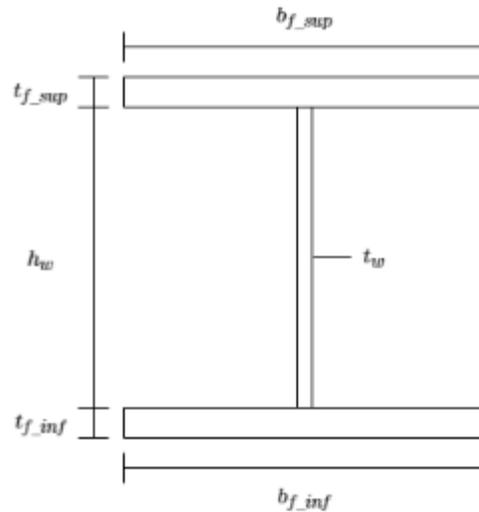
$$P_{sc} = 410 \text{ mm} \quad \leq \quad P_{max} = 411.707 \text{ mm}$$

OK.

A.5. L = 30 m

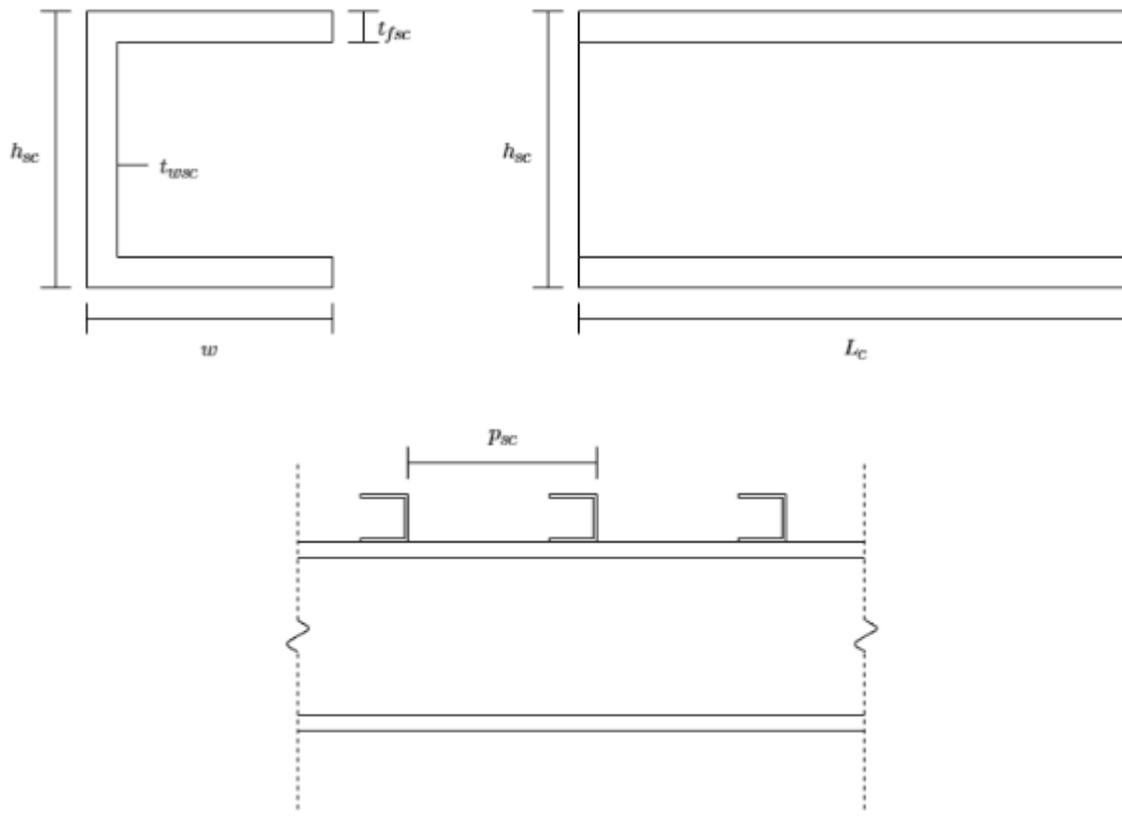
1. DIMENSIONES

1.1. VIGAS DE ACERO



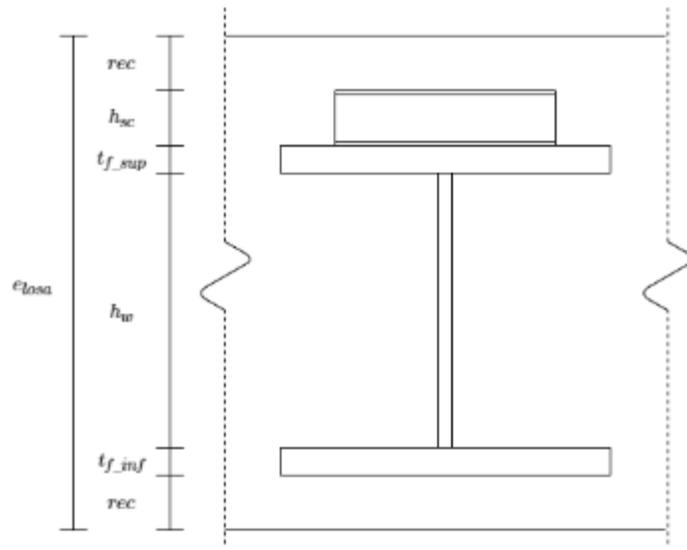
Altura del alma:	$h_w = 580 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_w = 16 \text{ mm}$
Ancho del ala superior:	$b_{f_sup} = 420 \text{ mm}$
Espesor del ala superior:	$t_{f_sup} = 40 \text{ mm}$
Ancho del ala inferior:	$b_{f_inf} = 420 \text{ mm}$
Espesor del ala inferior:	$t_{f_inf} = 40 \text{ mm}$
Área de la sección de acero:	$A_s = 42880 \text{ mm}^2$
Centro de gravedad:	$y_{CG_s} = 330 \text{ mm}$
Momento de inercia:	$I_s = (3.491 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$
Radio de giro:	$r_{y_s} = 107.347 \text{ mm}$
Constante torsional:	$J = (1.871 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$
Módulo elástico de sección:	$S_{x_s} = (1.058 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$
Módulo plástico de sección:	$Z_{x_s} = (1.176 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$

1.2. CONECTORES DE CORTE



Altura:	$h_{sc} := 80 \text{ mm}$
Largo del ala:	$w := 40 \text{ mm}$
Largo del perfil:	$L_c := 300 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_{wsc} := 4 \text{ mm}$
Espesor del ala:	$t_{fsc} := 4 \text{ mm}$
Número de conectores de corte:	$n_{sc} := 32$
Separación longitudinal:	$p_{sc} := 410 \text{ mm}$

1.3. LOSA DE HORMIGÓN



Recubrimiento de refuerzo:

$$rec_s := 50 \text{ mm}$$

Recubrimiento de conector de corte:

$$rec_{sc} := 70 \text{ mm}$$

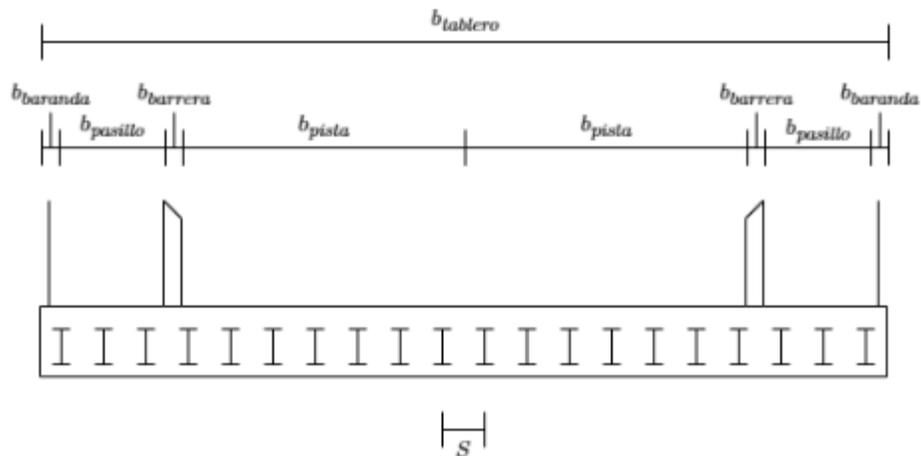
Recubrimiento:

$$rec := \max(rec_s, rec_{sc}) = 70 \text{ mm}$$

Esesor:

$$e_{losa} := 2 \text{ rec} + h_{sc} + h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} = 88 \text{ cm}$$

1.4. TABLERO Y LUZ



Ancho de baranda:

$$b_{baranda} := 15 \text{ cm}$$

Ancho de pasillo:

$$b_{pasillo} := 150 \text{ cm}$$

Ancho de pista:

$$b_{pista} := 400 \text{ cm}$$

Ancho de barrera:

$$b_{barrera} := 36.5 \text{ cm}$$

Área de barrera:

$$A_{barrera} := 2550 \text{ cm}^2$$

Espesor de pavimento:

$$e_{pav} := 5 \text{ cm}$$

Ancho de tablero:

$$b_{tablero} := 2 (b_{baranda} + b_{pasillo} + b_{barrera} + b_{pista})$$

$$b_{tablero} = 12.03 \text{ m}$$

Número de vigas:

$$N_b := 20$$

Separación de vigas:

$$S := 0.6 \text{ m}$$

Ancho de voladizo:

$$b_{voladizo} := \frac{b_{tablero} - (N_b - 1) S}{2} = 0.315 \text{ m}$$

Largo de vigas:

$$L := 30 \text{ m}$$

Largo no arriostrado:

$$L_b := L = 30 \text{ m}$$

2. MATERIALES

2.1. ACERO ESTRUCTURAL

Tensión de fluencia:	$F_y := 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_{s_viga} := 8.00 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$
Tensión de fluencia del alma:	$F_{yw} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia de las alas:	$F_{yf} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en compresión:	$F_{yc} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en tracción:	$F_{yt} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

2.2. HORMIGÓN

Resistencia específica a compresión:	$f'_c := 250 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_c := 15100 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}} = 238.8 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Módulo de rotura:	$f_r := 0.24 \text{ ksi} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\text{ksi}}} = 31.819 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_c := 2.5 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

2.3. ACERO DE REFUERZO

Tensión de fluencia:	$f_y := 4200 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de rotura:	$f_u := 6300 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_s := 7.85 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

3. DISEÑO DE LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO

3.1. CARGAS

3.1.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de losa: $PP_{losa} := \gamma_c \cdot e_{losa} = 2.2 \frac{\text{tonnef}}{m^2}$

3.1.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento: $PP_{pav} := \gamma_c \cdot e_{pav} = 0.125 \frac{\text{tonnef}}{m^2}$

Peso propio de baranda: $PP_{baranda} := 0.05 \frac{\text{tonnef}}{m}$

Peso propio de barrera: $PP_{barrera} := \gamma_c \cdot A_{barrera} = 0.638 \frac{\text{tonnef}}{m}$

3.1.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje: $CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$

Carga de rueda segundo y tercer eje: $CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$

Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_camión} := 4.27 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.1.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda: $CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.34 \text{ tonnef} = 5.67 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$

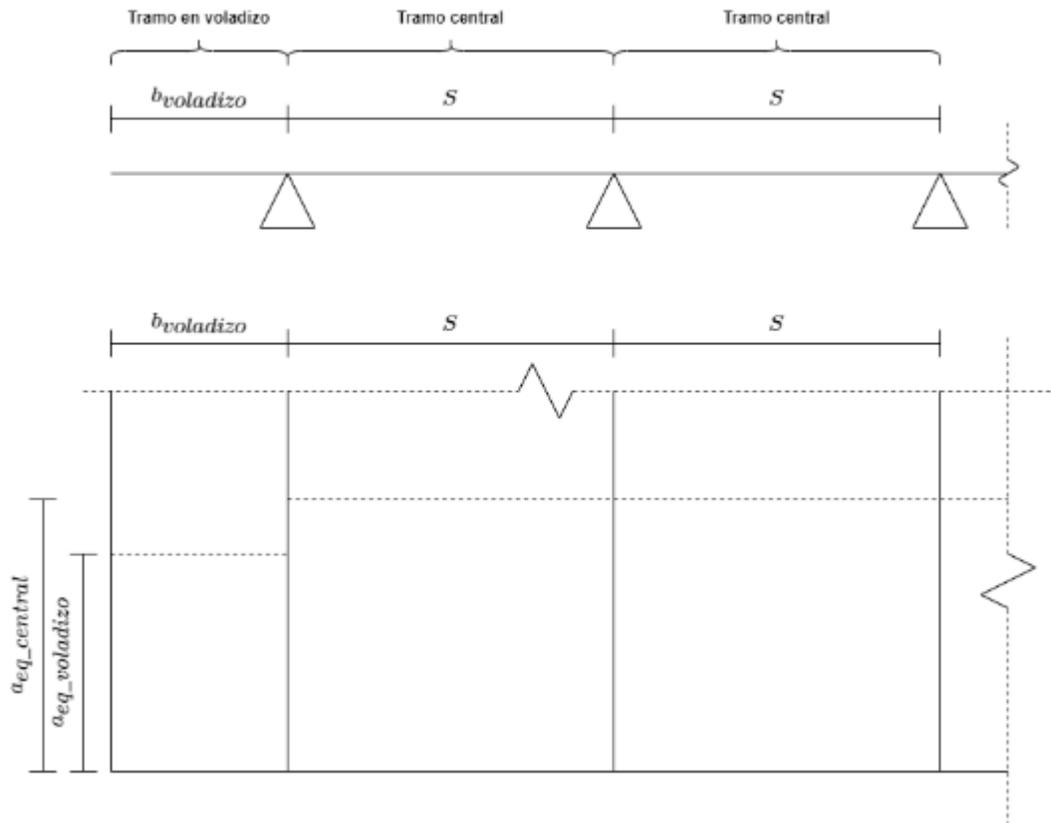
Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.2. ANCHO DE FRANJAS EQUIVALENTES

El ancho de las franjas equivalentes se considera en la dirección longitudinal del puente. Para los tramos centrales, el largo es la distancia entre vigas. Para los voladizos, el largo es el ancho de voladizo. Cada tramo de losa se estudia como una viga simplemente apoyada en las vigas de acero.



Ancho de franja equivalente en tramo central:

$$a_{eq_central} := 0.7 \text{ m} + 6.6 S = 4.66 \text{ m}$$

Distancia X para ancho de franja equivalente en voladizo:

$$X := b_{voladizo} - \frac{b_{baranda}}{2} = 0.24 \text{ m}$$

Ancho de franja equivalente en voladizo:

$$a_{eq_voladizo} := 1.2 \text{ m} + 10 X = 3.6 \text{ m}$$

3.3. DISEÑO DE TRAMOS CENTRALES

Reacción en apoyos por carga muerta:

$$R_{DC} := \frac{PP_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} \cdot a_{eq_central} = 6.167 \text{ tonnef}$$

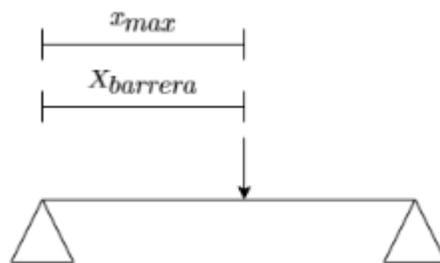
Reacción en apoyos por carga muerta superpuesta:

$$R_{DW} := \left(\frac{PP_{pav} \cdot b_{tablero} + 2 PP_{baranda} + 2 PP_{barrera}}{N_b} \right) \cdot a_{eq_central}$$

$$R_{DW} = 0.671 \text{ tonnef}$$

3.3.1. CASO 1: TRAMO CON BARRERA

Se considera el tramo en el que se ubica la barrera de contención.
El momento máximo se da en el punto central de la barrera.



Distancia de barrera a apoyo más cercano al extremo:

$$X_{barrera} := b_{baranda} + b_{pasillo} + \frac{b_{barrera}}{2} - b_{voladizo} - 2 S = 0.318 \text{ m}$$

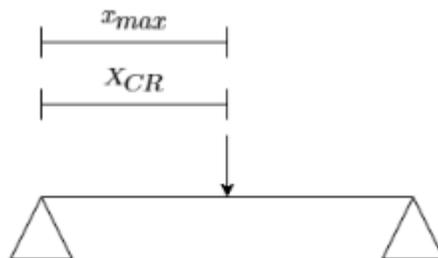
Momento en caso tramo con barrera:

$$M_{caso1} := (R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{barrera} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{barrera}^2$$

$$M_{caso1} = 1.625 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

3.3.2. CASO 2: TRAMO CON CAMIÓN Ó TÁNDEM

Se considera el tramo con camión de diseño o tándem de diseño.
Se consideran las ruedas más pesadas posibles dentro del ancho efectivo.
El momento máximo se da bajo las ruedas, cuando éstas se ubican en el centro del tramo.



Distancia de carga de rueda a apoyo más desfavorable:	$X_{CR} := \frac{S}{2} = 0.3 \text{ m}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por camión de diseño:	$R_{camión} := \frac{2 CR_{camión\ 2\ 3} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 8.71 \text{ tonnef}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por tándem de diseño:	$R_{tándem} := \frac{2 CR_{tándem} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 5.67 \text{ tonnef}$
Reacción de carga viva más desfavorable:	$R_{LL} := \max(R_{camión}, R_{tándem}) = 8.71 \text{ tonnef}$
Carga de rueda más desfavorable:	$CR_{LL} := \max(2 CR_{camión\ 2\ 3}, 2 CR_{tándem})$ $CR_{LL} = 17.42 \text{ tonnef}$
Momento máximo en caso tramo sin barrera:	$M_{caso2} := (R_{LL} + R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{CR} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{CR}^2$ $M_{caso2} = 4.177 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

3.3.3. ACERO DE REFUERZO

3.3.3.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo en la franja equivalente:	$M_u := \max(M_{caso1}, M_{caso2}) = 4.177 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$
Factor de resistencia para hormigón armado:	$\phi_c := 0.9$
Refuerzo principal requerido:	$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$ $A_{p_req} = 1.332 \text{ cm}^2$
Refuerzo mínimo:	$A_{p_min} := 0.0009 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 7.92 \text{ cm}^2$
Refuerzo dispuesto:	$\phi 10 @ 20 + \phi 12 @ 25$
Refuerzo dispuesto:	$A_p = 8.451 \text{ cm}^2$

3.3.3.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución:
$$Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$$

Refuerzo requerido:
$$A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 5.662 \text{ cm}^2$$

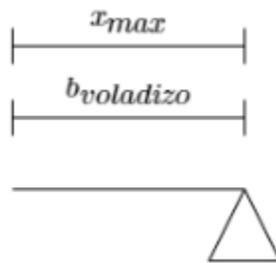
Refuerzo dispuesto:
$$\phi 10@25 + \phi 10@25$$

Refuerzo dispuesto:
$$A_{sec} = 6.283 \text{ cm}^2$$

3.4. DISEÑO DE VOLADIZOS

Se considera el tramo en voladizo.

El momento máximo se da en el apoyo.



Momento máximo en voladizo:
$$M_{voladizo} := -(PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_voladizo} \cdot 0.5 \cdot b_{voladizo}^2$$

$$M_{voladizo} = -0.415 \text{ tonnef} \cdot m$$

3.4.1. ACERO DE REFUERZO

3.4.1.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo total en la franja equivalente:
$$M_u := -M_{voladizo} = 0.415 \text{ tonnef} \cdot m$$

Factor de resistencia para hormigón armado:
$$\phi_c := 0.9$$

Refuerzo principal requerido:

$$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$$

$$A_{p_req} = 0.132 \text{ cm}^2$$

Refuerzo mínimo: $A_{p_min} := 0.0009 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 7.92 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 10@20 + \phi 12@25$

Refuerzo dispuesto: $A_p = 8.451 \text{ cm}^2$

3.4.1.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución: $Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$

Refuerzo requerido: $A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 5.662 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 10@25 + \phi 10@25$

Refuerzo dispuesto: $A_{sec} = 6.283 \text{ cm}^2$

4. DISEÑO DE LAS VIGAS COMPUESTAS

4.1. PROPIEDADES

Ancho efectivo colaborante de la losa para viga interior:

$$b_s := S = 0.6 \text{ m}$$

Espesor de la losa de hormigón:

$$t_s := e_{losa} = 88 \text{ cm}$$

Razón entre módulos de elasticidad:

$$n := \frac{E_s}{E_c} = 8.796$$

4.2. CARGAS

4.2.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de viga de acero:

$$PP_{viga} := \gamma_s \cdot viga \cdot A_s = 0.343 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de losa para cada viga:

$$PP_{losa} := \frac{\gamma_c \cdot e_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 1.323 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento para cada viga

$$PP_{pav} := \frac{\gamma_c \cdot e_{pav} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 0.075 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de baranda para cada viga:

$$PP_{baranda} := \frac{2 PP_{baranda}}{N_b} = 0.005 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de barrera para cada viga:

$$PP_{barrera} := \frac{2 PP_{barrera}}{N_b} = 0.064 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje:
Carga de rueda segundo y tercer eje:

$$CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$$

$$CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre ruedas:

$$a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre dos primeros ejes:

$$a_{lo_camión_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal mínima entre dos últimos ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_min} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal
máxima entre dos últimos
ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_max} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia transversal a
barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda:

$$CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.4 \text{ tonnef} = 5.7 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre
ruedas:

$$a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
ruedas:

$$a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$$

Distancia transversal a
barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.5. CARGA DE FAJA

Carga de faja:

$$q_{faja} := 0.952 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.6. COEFICIENTE DE IMPACTO DINÁMICO (IM)

Coeficiente de impacto
dinámico para estado límite
de fatiga:

$$IM_{fatiga} := 15\%$$

Coeficiente de impacto
dinámico para el resto de
cálculos:

$$IM := 33\%$$

4.2.7. CARGA DE FATIGA

Carga de rueda primer eje:

$$CR_{fatiga_1} := CR_{camión_1} = 2.18 \text{ tonnef}$$

Carga de rueda segundo y
tercer eje:

$$CR_{fatiga_2_3} := CR_{camión_2_3} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre
ruedas:

$$a_{tr_fatiga} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
dos primeros ejes

$$a_{lo_fatiga_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
dos últimos ejes:

$$a_{lo_fatiga_2_3} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia a barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

Tránsito medio diario anual:

$$ADTT := 3000$$

Factor p para dos fajas de
tránsito:

$$p := 0.85$$

Frecuencia de carga de fatiga:

$$ADTT_{SL} := p \cdot ADTT = 2550$$

4.3. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN

Se considera que la sección transversal se deforma y rota como un cuerpo rígido.

Factor de presencia múltiple para 1 vía cargada:

$$m_1 := 1.20$$

Factor de presencia múltiple para 2 vías cargadas:

$$m_2 := 1.00$$

1 vía cargada:

$$N_{L,1} := 1$$

2 vías cargadas:

$$N_{L,2} := 2$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 1:

$$e_1 := b_{pista} - d - 0.5 a_{tr_camión} = 2.485 \text{ m}$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 2:

$$e_2 := e_1 = 2.485 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y la viga exterior:

$$X_{ext} := 0.5 b_{tablero} - b_{voladizo} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las primeras vigas:

$$X_1 := X_{ext} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las segundas vigas:

$$X_2 := X_{ext} - S = 5.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las terceras vigas:

$$X_3 := X_2 - S = 4.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las cuartas vigas:

$$X_4 := X_3 - S = 3.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las quintas vigas:

$$X_5 := X_4 - S = 3.3 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las sextas vigas:

$$X_6 := X_5 - S = 2.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las séptimas vigas:

$$X_7 := X_6 - S = 2.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las octavas vigas:

$$X_8 := X_7 - S = 1.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las novenas vigas:

$$X_9 := X_8 - S = 0.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las décimas vigas:

$$X_{10} := X_9 - S = 0.3 \text{ m}$$

4.3.1. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA MOMENTO

Factor de distribución para momento para 1 vía cargada:

$$g_{M_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para momento para 2 vías cargadas:

$$g_{M_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.3.2. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA CORTE

Factor de distribución para corte para 1 vía cargada:

$$g_{V_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para corte para 2 vías cargadas:

$$g_{V_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.4. DISEÑO A FLEXIÓN

Factor de resistencia a flexión:

$$\phi_f := 1.0$$

4.4.1. CONSTRUCCIÓN

4.4.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Área de la sección:

$$A_s := A_s = 42880 \text{ mm}^2$$

Distancia entre los centroides de las alas:

$$h := h_w + 0.5 t_{f_inf} + 0.5 t_{f_sup} = 620 \text{ mm}$$

Momento de inercia:

$$I_s := I_s = (3.491 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Constante torsional:

$$J := J = (1.871 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

Módulo elástico de la sección para el ala en compresión:

$$S_{xc} := S_{x_s} = (1.058 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$$

Módulo elástico de la sección para el ala en tracción:

$$S_{xt} := S_{xc} \cdot \frac{y_{CG_s}}{(h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} - y_{CG_s})} = (1.058 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$$

Módulo plástico de la sección para el ala en compresión:

$$Z_{xc} := Z_{x_s} = (1.176 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$$

Radio de giro:

$$r_y := r_{y_s} = 107.347 \text{ mm}$$

Radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional:

$$r_t := \sqrt{\frac{I_s \cdot h}{2 S_{xc}}} = 319.844 \text{ mm}$$

Tensión en el ala en compresión en el punto de fluencia:

$$F_{yr} := \min\left(0.7 F_{yc}, F_{yt} \cdot \frac{S_{xt}}{S_{xc}}, F_{yw}\right)$$

$$F_{yr} := \max(F_{yr}, 0.5 F_{yc}) = 2460.5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Longitud límite para resistencia por fluencia:

$$L_p := 1.76 r_y \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 4.618 \text{ m}$$

Longitud límite para pandeo torsional inelástico:

$$L_r := 1.95 r_t \cdot \frac{E_s}{F_{yr}} \cdot \sqrt{\frac{J}{S_{xc} \cdot h} + \sqrt{\left(\frac{J}{S_{xc} \cdot h}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{F_{yr}}{E_s}\right)^2}}$$

$$L_r = 44.62 \text{ m}$$

4.4.1.2. RESISTENCIA A FLEXIÓN

Combinación de carga: Resistencia I: 1.25 DC

Momento en viga por cargas en construcción: $M(x) := 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{L}{2} \cdot x - 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{x^2}{2}$

Momento máximo en viga por cargas en construcción: $M_{max} := M\left(\frac{L}{2}\right) = 234.329 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en primer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_A := M\left(\frac{L}{4}\right) = 175.747 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en segundo cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_B := M\left(\frac{L}{2}\right) = 234.329 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en tercer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_C := M\left(\frac{L}{4}\right) = 175.747 \text{ tonnef} \cdot m$

Factor de modificación por pandeo lateral torsional: $C_b := \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} = 1.136$

Momento plástico: $R_{pc} M_{yc} := F_{yc} \cdot Z_{xc} = 413.42 \text{ tonnef} \cdot m$

Tensión crítica: $F_{cr} := \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E_s}{\left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + 0.0078 \frac{J}{S_{xc} \cdot h} \cdot \left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2}$

$$F_{cr} = 2927.455 \frac{kgf}{cm^2}$$

Resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$M_{nc} := \begin{cases} \text{if } L_b \leq L_p \\ \quad \parallel R_{pc} M_{yc} \\ \text{else if } L_b \leq L_r \\ \quad \parallel C_b \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{F_{yr} \cdot S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}}\right) \cdot \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right) \cdot R_{pc} M_{yc} \\ \text{else} \\ \quad \parallel F_{cr} \cdot S_{xc} \end{cases}$$

$$M_{nc} := \min(M_{nc}, R_{pc} M_{yc}) = 359.4 \text{ tonnef} \cdot m$$

Esfuerzo de resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$F_{nc} := \frac{M_{nc}}{S_{xc}} = 3397.028 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Momento último:

$$M_u := M_{max} = 234.329 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo en el ala en compresión:

$$f_{bu} := \frac{M_u}{S_{xc}} = 2214.863 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Chequeo de requerimientos por flexión en etapas críticas de construcción:

Primer chequeo: $f_{bu} = 2214.863 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{yc} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f_{bu} = 2214.863 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{nc} = 3397.028 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

4.4.1.3. DEFORMACIÓN POR CARGAS MUERTAS

Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW

Flecha por carga muerta DC: $flecha_{DC} := \frac{5 (PP_{losa} + PP_{viga}) L^4}{384 E_s \cdot I_s} = 239.704 \text{ mm}$

Flecha por carga muerta superpuesta DW: $flecha_{DW} := \frac{5 (PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^4}{384 E_s \cdot I_s}$

$$flecha_{DW} = 20.705 \text{ mm}$$

Contraflecha total a dar a vigas de acero:

$$contraflecha := flecha_{DC} + flecha_{DW} = 260.409 \text{ mm}$$

4.4.2. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

4.4.2.1. DEFORMACIONES ELÁSTICAS

4.4.2.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO

Se debe considerar la rigidez del sistema completo.

Ancho transformado de hormigón:
$$b_{c_tr} := \frac{b_{\text{tablero}}}{n} = 1.368 \text{ m}$$

Centro de gravedad:
$$y_{CG_tr_s} := \frac{N_b \cdot A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr} \cdot 0.5 t_s}{N_b \cdot A_s + t_s \cdot b_{c_tr}} = 45.664 \text{ cm}$$

Inercia del sistema completo:
$$I_{\text{sis}} = (I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_tr_s})^2) \cdot N_b + \frac{b_{c_tr} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_tr_s})^2$$

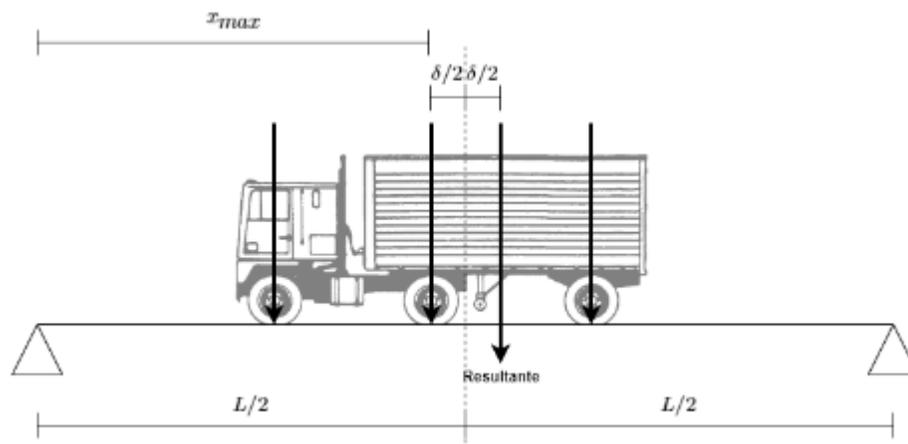
$$I_{\text{sis}} = (1.483 \cdot 10^{11}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.1.2. CÁLCULO DE DEFORMACIONES

Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW + 1.0 IM LL

Carga muerta es contrarrestada por la contraflecha durante etapas de construcción.
Se deben cargar todas las vías de diseño.

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
La flecha máxima se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{\text{camión}} = \frac{-2 CR_{\text{camión}_1} \cdot a_{\text{to}_\text{camión}_1,2} + 2 CR_{\text{camión}_2,3} \cdot a_{\text{to}_\text{camión}_2,3_{\text{min}}}}{2 CR_{\text{camión}_1} + 4 CR_{\text{camión}_2,3}}$$

$$\delta_{\text{camión}} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{\text{camión}} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{\text{camión}_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{\text{to}_\text{camión}_1,2} + \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) + \frac{2 CR_{\text{camión}_2,3}}{L} \cdot (L - a_{\text{to}_\text{camión}_2,3_{\text{min}}} + \delta_{\text{camión}}) \right)$$

$$R_{\text{camión}} = 24.832 \text{ tonnef}$$

Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

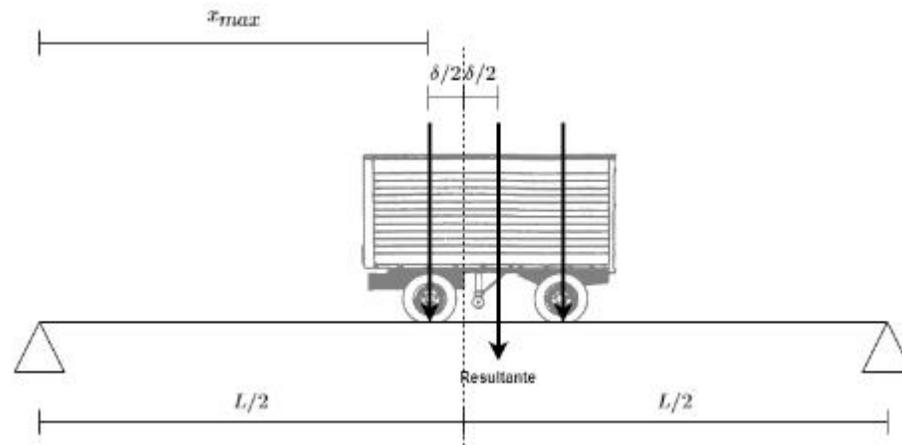
$$M_{\text{camión}}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{to}_\text{camión}_1,2} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{camión}_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{to}_\text{camión}_1,2} \right) \right) \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{\text{camión}_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{to}_\text{camión}_1,2} \right) \right) - 2 CR_{\text{camión}_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) \right) \right) \right. \end{cases}$$

Flecha máxima por camión de diseño:

$$flecha_{\text{camión}} := - \left(\int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right)} \left(\int_0^x \frac{M_{\text{camión}}(x)}{E_s \cdot I_{\text{sist}}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) \cdot \int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right)} \frac{M_{\text{camión}}(x)}{E_s \cdot I_{\text{sist}}} dx \right) = 7.535 \text{ mm}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

La flecha máxima se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tándem} := \frac{a_{lo_tándem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tándem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \frac{L + \delta_{tándem} - a_{lo_tándem}}{L}$$

$$R_{tándem} = 14.854 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tándem}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \\ \quad \left| \begin{array}{l} R_{tándem} \cdot x \\ \text{else} \\ R_{tándem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right) \end{array} \right. \end{cases}$$

Flecha máxima por tándem de diseño:

$$flecha_{tándem} := - \left(\int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \left(\int_0^x \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \cdot \int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) = 5.045 \text{ mm}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Flecha por carga de faja:

$$flecha_{faja}(x) := - \left(\int_0^x \left(\frac{q_{faja} \cdot L \cdot s^2}{4} - \frac{q_{faja} \cdot s^3}{6} \right) ds - x \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{M_{faja}(s)}{E_s \cdot I_{sist}} ds \right)$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja, cargando ambas vías:

Flecha máxima por camión de diseño y carga de faja:

$$flecha_{camión_faja} := 2 \cdot flecha_{camión} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)$$

$$flecha_{camión_faja} = 21.501 \text{ mm}$$

Flecha máxima por tándem de diseño y carga de faja:

$$flecha_{tándem_faja} := 2 \cdot flecha_{tándem} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right)$$

$$flecha_{tándem_faja} = 16.535 \text{ mm}$$

Flecha máxima por carga viva:

$$flecha_{IM_LL} := \max(flecha_{camión_faja}, flecha_{tándem_faja})$$

$$flecha_{IM_LL} = 21.501 \text{ mm}$$

Deformación máxima por combinación de carga Servicio I: $\Delta_{max} := flecha_{IM_LL} = 21.501 \text{ mm}$

Chequeo de requerimientos por deformaciones elásticas:

Chequeo: $\Delta_{max} = 21.501 \text{ mm} \leq \frac{L}{800} = 37.5 \text{ mm}$

OK.

4.4.2.2. DEFORMACIONES PERMANENTES

4.4.2.2.1. SECCIÓN RESISTENTE 1: SECCIÓN DE ACERO

Centro de gravedad: $y_{CG_s} = 33 \text{ cm}$

Inercia de la sección de acero: $I_s = (3.491 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$

4.4.2.2.2. SECCIÓN RESISTENTE 2: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_cp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 45.667 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_cp_s})^2 + \frac{b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_cp_s})^2$

$$I_{tr_cp_s} = (7.405 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.3. SECCIÓN RESISTENTE 3: SECCIÓN COMPUESTA EN EL LARGO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{3 n} = 0.023 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_lp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 46.727 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta:

$$I_{tr_lp_s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_lp_s})^2 + \frac{b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_lp_s})^2$$

$$I_{tr_lp_s} = (4.804 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.4. SECCIÓN RESISTENTE 4: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO Y LARGO PLAZO TRANSFORMADA A HORMIGÓN

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Espesor del alma transformado:

$$t_{w_tr_c} := t_w \cdot n = 14.073 \text{ cm}$$

Ancho del ala superior transformado:

$$b_{f_sup_tr_c} := b_{f_sup} \cdot n = 369.421 \text{ cm}$$

Ancho del ala inferior transformado:

$$b_{f_inf_tr_c} := b_{f_inf} \cdot n = 369.421 \text{ cm}$$

Centro de gravedad:

$$y_{CG_tr_c} := \frac{A_s \cdot n \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot S \cdot 0.5 t_s}{A_s \cdot n + t_s \cdot S} = 45.667 \text{ cm}$$

Momento de inercia:

$$I_{tr_c} = (6.513 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.5. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Servicio II:

$$1.0 \text{ DC} + 1.0 \text{ DW} + 1.3 \text{ IM LL}$$

Momento máximo por carga muerta DC:

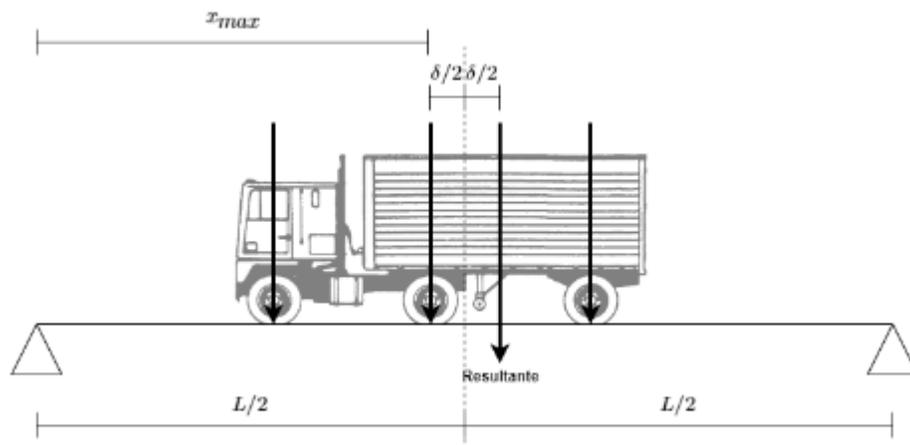
$$M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 187.463 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga muerta superpuesta DW:

$$M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$$

$$M_{DW} = 16.193 \text{ tonnef} \cdot m$$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{camión} = \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_camión_1,2} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_camión_2,3_min}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} = (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_camión_1,2} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_camión_2,3_min} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 24.832 \text{ tonnef}$$

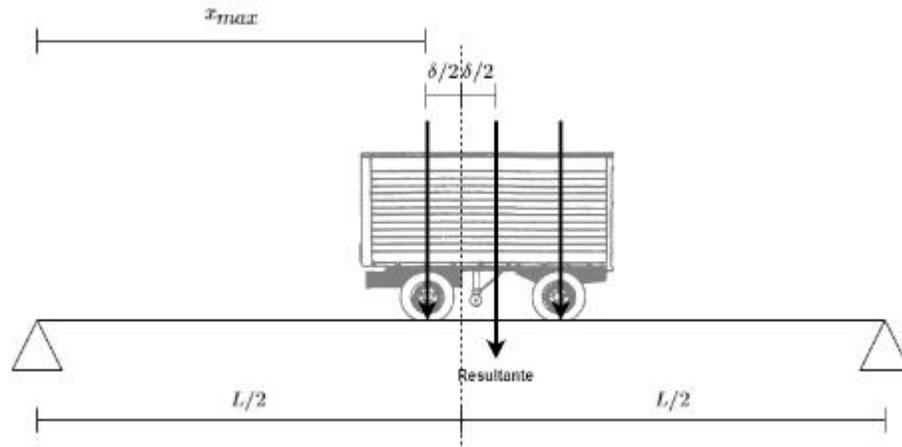
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{camión}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) \\ \text{else} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) - 2 CR_{camión_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \right) \right) \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño:

$$M_{max_camión} := M_{camión} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) = 330.054 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

**Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:
El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.**



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tándem} := \frac{a_{lo_tándem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tándem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \frac{L + \delta_{tándem} - a_{lo_tándem}}{L}$$

$$R_{tándem} = 14.854 \text{ tonnef}$$

Momento entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tándem}(x) := \begin{cases} R_{tándem} \cdot x & \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \\ R_{tándem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right) & \text{else} \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tándem} := M_{tándem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) = 218.275 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} := \max \left(M_{max_camión} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right), M_{max_tándem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 436.913 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 95.393 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo máximo en el hormigón en tracción:

$$f := \frac{M_{DW} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}}$$

$$f = 91.126 \frac{kgf}{cm^2} \quad \leq \quad 2 f_r = 63.637 \frac{kgf}{cm^2}$$

Si el esfuerzo máximo en el hormigón a tracción supera el límite, se considera que el esfuerzo por deformaciones permanentes debe ser calculado utilizando sólo la sección de acero.

Esfuerzo máximo en el ala en compresión de la viga de acero:

$$f_{fc} := \frac{M_{DC} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{fc} = 3097.084 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en el ala en tracción de la viga de acero:

$$f_{ft} := \frac{M_{DC} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{ft} = 3097.084 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en la viga de acero:

$$f_f := \max(f_{fc}, f_{ft}) = 3097.084 \frac{kgf}{cm^2}$$

Chequeo de requerimientos por deformaciones permanentes:

Primer chequeo: $f_f = 3097.084 \frac{kgf}{cm^2} \leq 0.95 \cdot F_{yf} = 3339.25 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f = 91.126 \frac{kgf}{cm^2} \leq 4 f_r = 127.274 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

4.4.3. ESTADO LÍMITE DE FATIGA

4.4.3.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 580 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.4.3.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| 1.0 \right. \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \right. \end{array} \right\| = 1$$

Resistencia a corte por fluencia:

$$V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 189.191 \text{ tonnef}$$

Corte crítico:

$$V_{cr} := C \cdot V_p = 189.191 \text{ tonnef}$$

4.4.3.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Corte máximo por carga muerta DC:

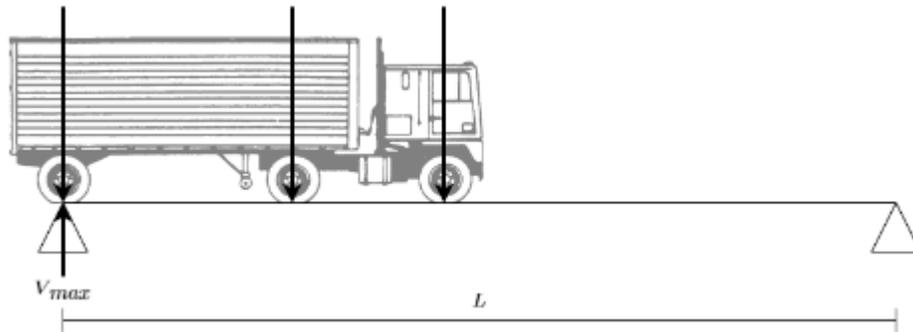
$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 24.995 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 2.159 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1.2} + a_{lo_fatiga_2.3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2.3} - a_{lo_fatiga_1.2}) \right) + \frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 36.727 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V.1} \cdot V_{fatiga}, g_{V.2} \cdot V_{fatiga}) = 8.019 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 39.182 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de fatiga:

$$\text{Chequeo: } V_u = 39.182 \text{ tonnef} \quad \leq \quad V_{cr} = 189.191 \text{ tonnef}$$

OK.

4.4.4. ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

4.4.4.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo sólo en compresión.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 580 \text{ mm}$

Centro de gravedad: $y_{CG_tr_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_s}}$

$y_{CG_tr_s} = 45.667 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} := I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_tr_s})^2 + \frac{b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s}^3}{12} + b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s} \cdot (0.5 y_{CG_tr_s})^2$

$I_{tr_cp_s} = (5.68 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$

Profundidad de la sección compuesta: $D_t := t_s = 88 \text{ cm}$

4.4.4.2. MOMENTO PLÁSTICO

Eje neutro plástico desde el borde superior de la losa:

$$c := \begin{cases} \text{if } 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc}) \geq F_y \cdot A_s \\ \quad \frac{F_y \cdot A_s}{0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup}) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \geq F_y \cdot (h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \quad \frac{F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} + 2 rec + 2 h_{sc}) + h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf})}{2 F_y \cdot b_{f_sup} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + h_w \cdot t_w) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \geq F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \quad \frac{F_y \cdot (t_w \cdot (h_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup})}{2 F_y \cdot t_w + 0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else} \\ \quad \frac{F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot (t_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup} + 2 h_w) - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} - h_w \cdot t_w)}{2 F_y \cdot b_{f_inf} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \end{cases}$$

$c = 22.498 \text{ cm}$

Área de hormigón a compresión: $A_{c_c} := b_s \cdot c = 1349.872 \text{ cm}^2$

Área de acero a compresión:

$$A_{s,c} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel 0 \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \\ \text{else} \\ \quad \parallel A_s \end{cases}$$

$$A_{s,c} = 173.597 \text{ cm}^2$$

Área de acero a tracción:

$$A_{s,t} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel A_s \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel A_s - b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)) \\ \text{else} \\ \quad \parallel 0 \end{cases}$$

$$A_{s,t} = 255.203 \text{ cm}^2$$

Centro del área del hormigón en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{c,c}} := \frac{c}{2} = 11.249 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s,c}} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel \text{"No aplica"} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \cdot (t_{f,sup} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \cdot (t_{f,sup} + h_w + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + y_{CG_{c,c}} \end{cases}$$

$$y_{CG_{s_c}} = 17.121 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en tracción desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s_t}} := \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ \quad rec + h_{sc} + y_{CG_{s_c}} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ \quad c + \frac{b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) + h_w \cdot t_w \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + 0.5 h_w) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + h_w + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - b_{f_sup} \cdot (c - rec - h_{sc})} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ \quad c + \frac{t_w \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \cdot 0.5 \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}))} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ \quad c + \frac{b_{f_inf} \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w)}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot h_w + b_{f_inf} \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup} - h_w))} \\ \text{else} \\ \quad \text{"No aplica"} \end{cases}$$

$$y_{CG_{s_t}} = 69.005 \text{ cm}$$

Distancia desde el borde superior de la losa al eje neutro plástico:

$$D_p := c = 22.498 \text{ cm}$$

Profundidad del alma de la viga de acero a compresión:

$$D_{cp} := \max(c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}, 0 \text{ cm}) = 3.498 \text{ cm}$$

Momento plástico:

$$M_p := \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right\| \\ \text{else} \\ \quad \left\| 0.85 f'_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) \right\| \end{cases}$$

$$M_p = 482.264 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

4.4.4.3. COMPACIDAD DE LA SECCIÓN

Chequeo de requerimientos de compacidad de la sección:

Primer chequeo: $F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq 4921 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $\frac{D}{t_w} = 36.25 \leq 150$

OK.

Tercer chequeo: $\frac{2 D_{cp}}{t_w} = 4.372 \quad \leq \quad 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 91.904$
 OK.

La sección califica como: **COMPACTA**

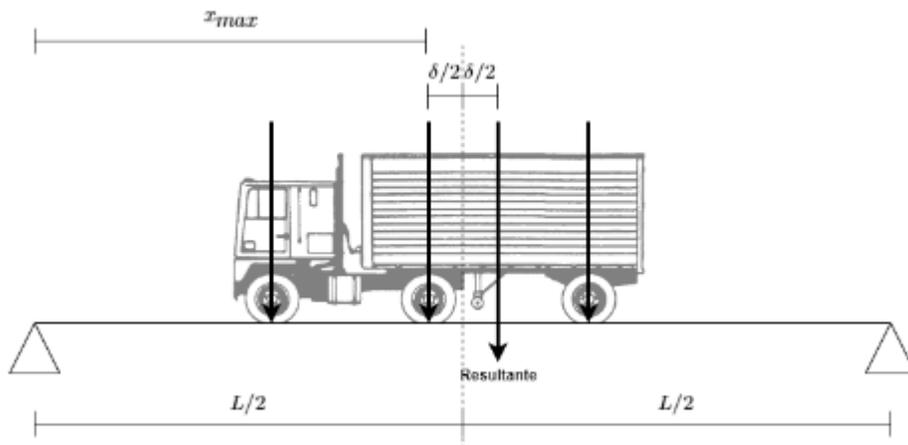
4.4.4.4. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Resistencia I: **1.25 DC + 1.50 DW + 1.75 IM LL**

Momento máximo por carga muerta DC: $M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 187.463 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento máximo por carga muerta superpuesta DW: $M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$
 $M_{DW} = 16.193 \text{ tonnef} \cdot m$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
 Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
 El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante: $\delta_{camión} := \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{lo_{camión_1,2}} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{lo_{camión_2,3_{min}}}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$

$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$

Reacción en apoyo izquierdo: $R_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{lo_{camión_1,2}} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{lo_{camión_2,3_{min}}} + \delta_{camión}) \right)$

$R_{camión} = 24.832 \text{ tonnef}$

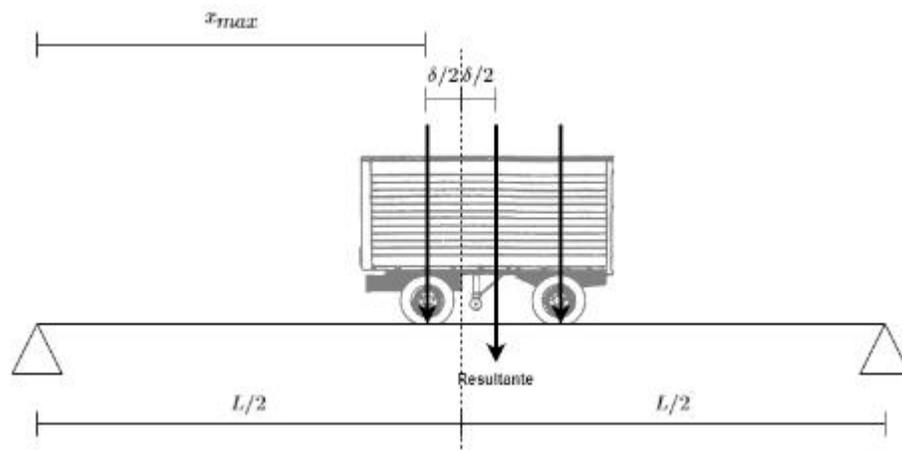
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{camión}}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{camión}_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \right) \right) \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{\text{camión}_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \right) \right) - 2 CR_{\text{camión}_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño: $M_{\text{max_camión}} := M_{\text{camión}} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) = 330.054 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{\text{tándem}} := \frac{a_{\text{lo_tándem}}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{\text{tándem}} := (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \frac{L + \delta_{\text{tándem}} - a_{\text{lo_tándem}}}{L}$$

$$R_{\text{tándem}} = 14.854 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{tándem}}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tándem} := M_{tándem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) = 218.275 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} = \max \left(M_{max_camión} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right), M_{max_tándem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 436.913 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 95.393 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento último:

$$M_u := 1.25 \cdot M_{DC} + 1.50 M_{DW} + 1.75 \cdot M_{LL}$$

$$M_u = 425.556 \text{ tonnef} \cdot m$$

Resistencia nominal a flexión:

$$M_n := \left\| \begin{array}{l} \text{if } D_p \leq 0.1 D_t \\ \left\| M_p \right\| \\ \text{else} \\ \left\| M_p \cdot \left(1.07 - 0.7 \frac{D_p}{D_t} \right) \right\| \end{array} \right\| = 429.716 \text{ tonnef} \cdot m$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de resistencia:

Chequeo: $M_u = 425.556 \text{ tonnef} \cdot m \leq \phi_f \cdot M_n = 429.716 \text{ tonnef} \cdot m$

OK.

4.4.4.5. DUCTILIDAD

Chequeo de requerimientos de ductilidad:

Chequeo: $D_p = 22.498 \text{ cm} \leq 0.42 D_t = 36.96 \text{ cm}$

OK.

4.5. DISEÑO A CORTE

Factor de resistencia a corte: $\phi_v := 1.0$

4.5.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 580 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.5.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| 1.0 \right. \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \right. \end{array} \right\| = 1$$

Resistencia a corte por fluencia: $V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 189.191 \text{ tonnef}$

Resistencia nominal al corte: $V_n := C \cdot V_p = 189.191 \text{ tonnef}$

4.5.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

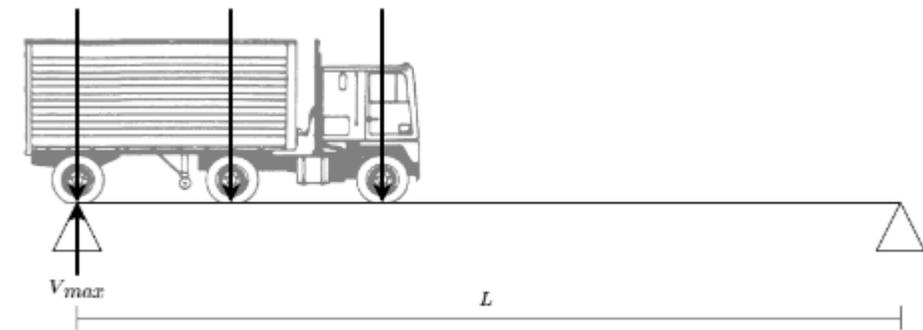
Combinación de carga: Resistencia I: $1.25 \text{ DC} + 1.50 \text{ DW} + 1.75 \text{ IM LL}$

Corte máximo por carga muerta DC: $V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 24.995 \text{ tonnef}$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW: $V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 2.159 \text{ tonnef}$

Posición de camión de diseño que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje del camión.



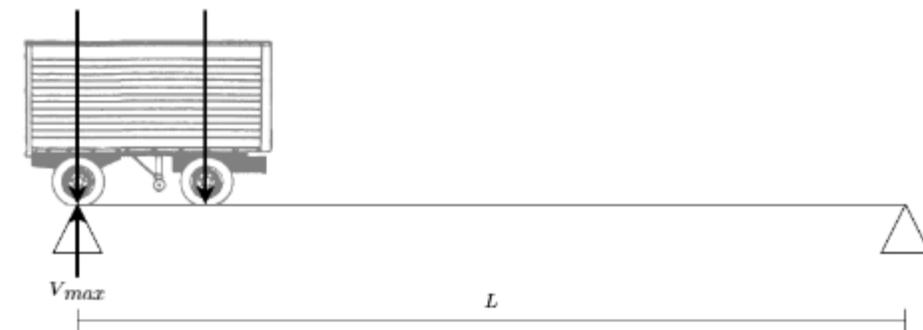
Corte máximo por camión de diseño:

$$V_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión.1}}{L} \cdot (L - a_{lo_camión.2.3_min} - a_{lo_camión.1.2}) + \frac{2 CR_{camión.2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_camión.2.3_min}) \right)$$

$$V_{camión} = 47.188 \text{ tonnef}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el segundo eje del tándem.



Corte máximo por tándem de diseño:

$$V_{tándem} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{tándem}}{L} \cdot (2L - a_{lo_tándem}) \right)$$

$$V_{tándem} = 29.707 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de faja:

$$V_{faja} := \frac{q_{faja} \cdot L}{2} = 14.28 \text{ tonnef}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Corte máximo por carga viva LL:

$$V_{LL} := \max(V_{camión} + V_{faja}, V_{tándem} + V_{faja})$$

$$V_{LL} = 61.468 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga viva distribuido:

$$V_{LL} := \max(g_{V_1} \cdot V_{LL}, g_{V_2} \cdot V_{LL}) = 13.42 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := 1.25 V_{DC} + 1.50 V_{DW} + 1.75 V_{LL}$$

$$V_u = 57.968 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos de resistencia al corte:

Chequeo: $V_u = 57.968 \text{ tonnef} \leq \phi_v \cdot V_n = 189.191 \text{ tonnef}$

OK.

5. CONECTORES DE CORTE

Factor de resistencia de conectores de corte:

$$\phi_{sc} := 0.85$$

Resistencia a la fatiga de un conector de corte:

$$Z_r := 0.375 \text{ tonnef} \cdot \frac{w}{cm} = 1.5 \text{ tonnef}$$

Fuerza de corte nominal:

$$P := \min(0.85 f_c \cdot b_s \cdot t_s, F_{yw} \cdot D \cdot t_w + F_{yt} \cdot b_{f.inj} \cdot t_{f.inj} + F_{yc} \cdot b_{f.smp} \cdot t_{f.smp})$$

$$P = 1122 \text{ tonnef}$$

Resistencia nominal al corte de un conector de corte:

$$Q_n := 0.3 \cdot (t_{f.sc} + 0.5 t_{w.sc}) \cdot L_c \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c}$$

$$Q_n = 41.719 \text{ tonnef}$$

Resistencia al corte de un conector de corte:

$$Q_r := \phi_{sc} \cdot Q_n = 35.461 \text{ tonnef}$$

5.1. NÚMERO DE CONECTORES DE CORTE

El número de conectores de corte requerido corresponde a los necesarios entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

Chequeo de requerimientos de número de conectores de corte:

Chequeo:
$$n_{sc_req} := \frac{P}{Q_r} = 31.64 \quad \leq \quad n_{sc} = 32$$

OK.

5.2. SEPARACIÓN LONGITUDINAL

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Se debe cumplir con la separación longitudinal máxima normativa, correspondiente a 600 mm.

También se debe cumplir con el requerimiento de separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga.

Además, se verifica la separación longitudinal máxima tal que se ubique el número de conectores de corte requerido entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

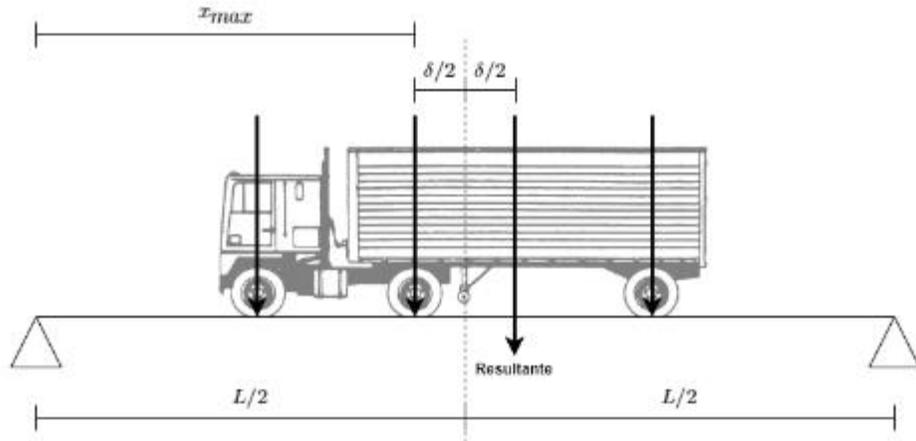
Corte máximo por carga muerta DC:

$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 24.995 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 2.159 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor momento:
El momento máximo se da bajo el segundo eje de la carga de fatiga.

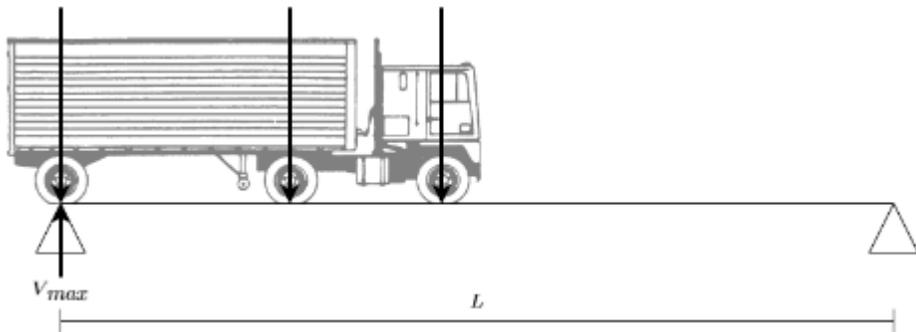


Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{fatiga} := \frac{-2 CR_{fatiga_1} \cdot a_{lo_fatiga_1_2} + 2 CR_{fatiga_2_3} \cdot a_{lo_fatiga_2_3}}{2 CR_{fatiga_1} + 4 CR_{fatiga_2_3}}$$

$$\delta_{fatiga} = 3.591 \text{ m}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:
El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1,2} + a_{lo_fatiga_2,3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2,3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2,3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2,3} - a_{lo_fatiga_1,2}) + \frac{2 CR_{fatiga_2,3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2,3}) \right) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 36.727 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V,1} \cdot V_{fatiga}, g_{V,2} \cdot V_{fatiga}) = 8.019 \text{ tonnef}$$

Corte por combinación de fatiga:

$$V_f := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 39.182 \text{ tonnef}$$

Primer momento del área de hormigón a compresión en torno al eje neutro de la sección compuesta en el corto plazo:

$$Q := \frac{b_s}{n} \cdot y_{CG_cp_s} \cdot \frac{y_{CG_cp_s}}{2} = (7.113 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Inercia de la sección compuesta en el corto plazo:

$$I_{tr_cp_s} = (5.68 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Resistencia longitudinal a corte por fatiga por unidad de largo:

$$V_{fat} := \frac{V_f \cdot Q}{I_{tr_cp_s}} = 0.049 \frac{\text{tonnef}}{\text{mm}}$$

Separación longitudinal máxima normativa:

$$p_{sc_norm} := 600 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga:

$$p_{sc_fatiga} := \frac{n_{sc} \cdot Z_r}{V_{fat}} = 978.286 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por número requerido:

$$p_{sc_num} := \frac{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{fatiga}}{2} \right)}{n_{sc}} = 412.637 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima:

$$p_{max} := \min(p_{sc_norm}, p_{sc_fatiga}, p_{sc_num}) = 412.637 \text{ mm}$$

Chequeo de requerimientos de separación longitudinal:

Chequeo:

$$p_{sc} = 410 \text{ mm}$$

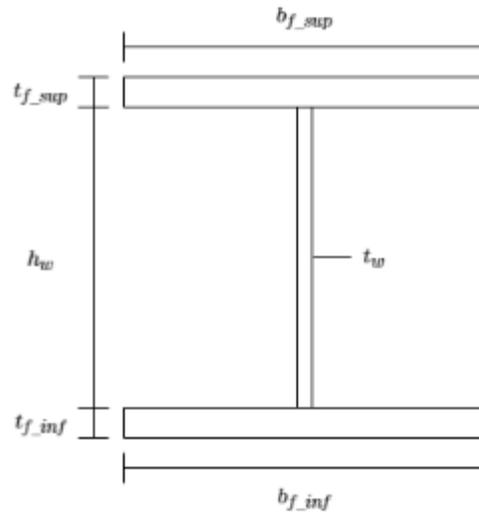
$$\leq p_{max} = 412.637 \text{ mm}$$

OK.

A.6. L = 35 m

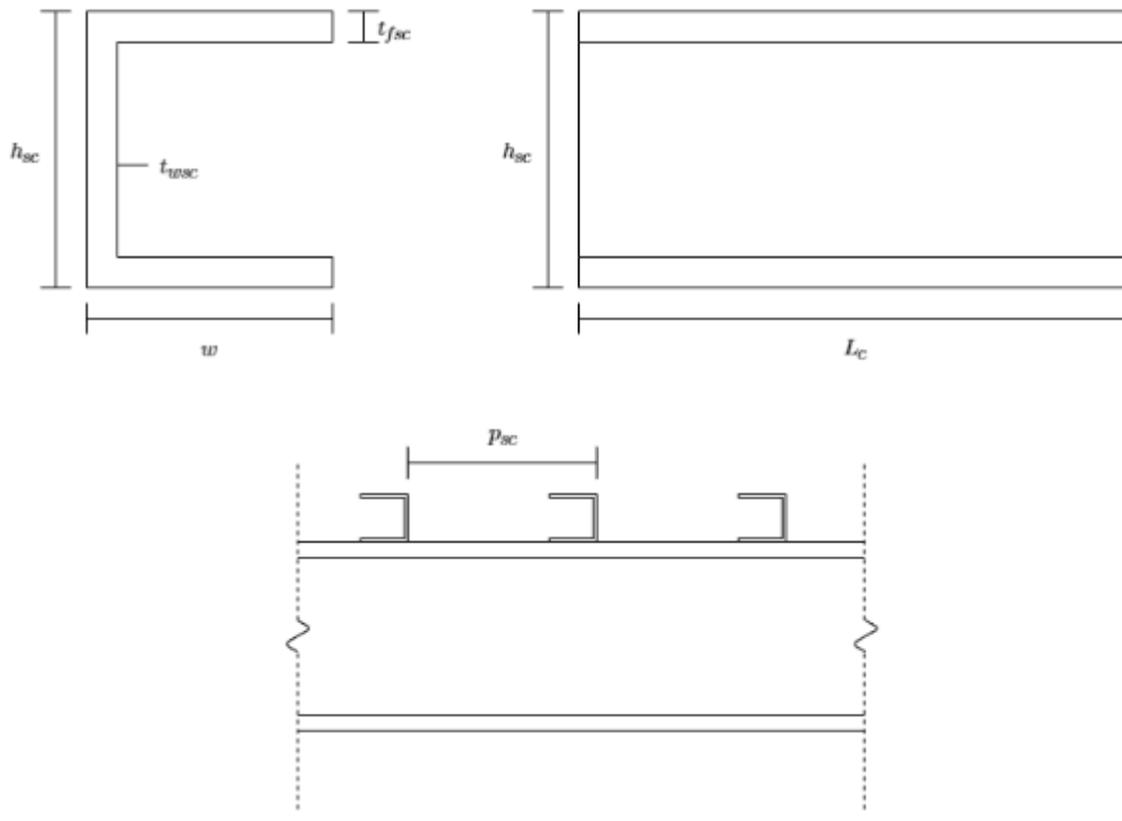
1. DIMENSIONES

1.1. VIGAS DE ACERO



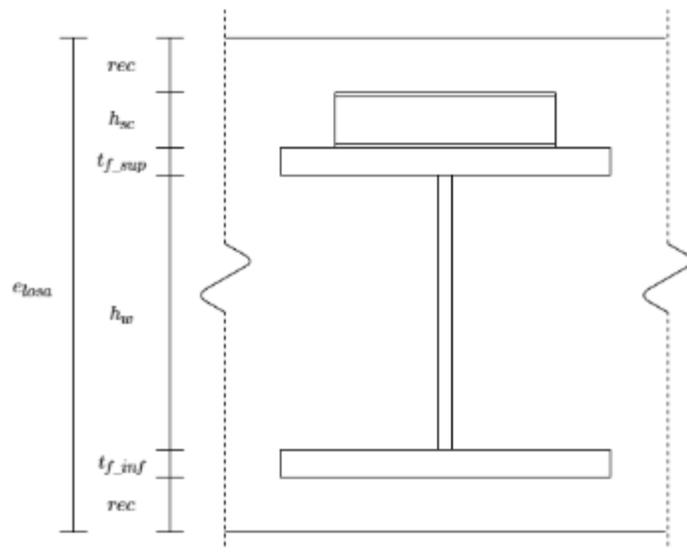
Altura del alma:	$h_w = 670 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_w = 16 \text{ mm}$
Ancho del ala superior:	$b_{f_sup} = 420 \text{ mm}$
Espesor del ala superior:	$t_{f_sup} = 50 \text{ mm}$
Ancho del ala inferior:	$b_{f_inf} = 420 \text{ mm}$
Espesor del ala inferior:	$t_{f_inf} = 50 \text{ mm}$
Área de la sección de acero:	$A_s = 52720 \text{ mm}^2$
Centro de gravedad:	$y_{CG_s} = 385 \text{ mm}$
Momento de inercia:	$I_s = (5.849 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$
Radio de giro:	$r_{y_s} = 108.237 \text{ mm}$
Constante torsional:	$J = (3.591 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$
Módulo elástico de sección:	$S_{x_s} = (1.519 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$
Módulo plástico de sección:	$Z_{x_s} = (1.692 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$

1.2. CONECTORES DE CORTE



Altura:	$h_{sc} := 80 \text{ mm}$
Largo del ala:	$w := 40 \text{ mm}$
Largo del perfil:	$L_c := 300 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_{wsc} := 4 \text{ mm}$
Espesor del ala:	$t_{fsc} := 4 \text{ mm}$
Número de conectores de corte:	$n_{sc} := 36$
Separación longitudinal:	$p_{sc} := 430 \text{ mm}$

1.3. LOSA DE HORMIGÓN



Recubrimiento de refuerzo:

$$rec_s := 50 \text{ mm}$$

Recubrimiento de conector de corte:

$$rec_{sc} := 70 \text{ mm}$$

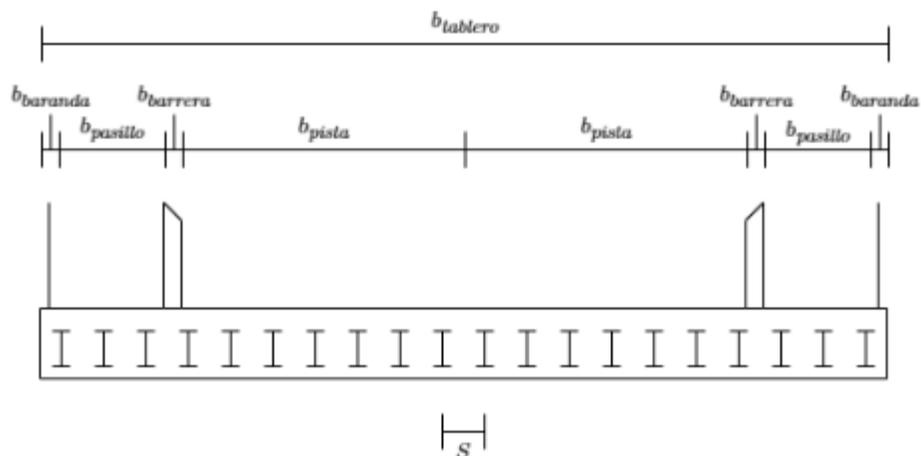
Recubrimiento:

$$rec := \max(rec_s, rec_{sc}) = 70 \text{ mm}$$

Esesor:

$$e_{losa} := 2 \text{ rec} + h_{sc} + h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} = 99 \text{ cm}$$

1.4. TABLERO Y LUZ



Ancho de baranda:

$$b_{baranda} := 15 \text{ cm}$$

Ancho de pasillo:

$$b_{pasillo} := 150 \text{ cm}$$

Ancho de pista:

$$b_{pista} := 400 \text{ cm}$$

Ancho de barrera:

$$b_{barrera} := 36.5 \text{ cm}$$

Área de barrera:

$$A_{barrera} := 2550 \text{ cm}^2$$

Espesor de pavimento:

$$e_{pav} := 5 \text{ cm}$$

Ancho de tablero:

$$b_{tablero} := 2 (b_{baranda} + b_{pasillo} + b_{barrera} + b_{pista})$$

$$b_{tablero} = 12.03 \text{ m}$$

Número de vigas:

$$N_b := 20$$

Separación de vigas:

$$S := 0.6 \text{ m}$$

Ancho de voladizo:

$$b_{voladizo} := \frac{b_{tablero} - (N_b - 1) S}{2} = 0.315 \text{ m}$$

Largo de vigas:

$$L := 35 \text{ m}$$

Largo no arriostrado:

$$L_b := L = 35 \text{ m}$$

2. MATERIALES

2.1. ACERO ESTRUCTURAL

Tensión de fluencia:	$F_y := 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_{s_viga} := 8.00 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$
Tensión de fluencia del alma:	$F_{yw} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia de las alas:	$F_{yf} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en compresión:	$F_{yc} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en tracción:	$F_{yt} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

2.2. HORMIGÓN

Resistencia específica a compresión:	$f'_c := 250 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_c := 15100 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}} = 238.8 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Módulo de rotura:	$f_r := 0.24 \text{ ksi} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\text{ksi}}} = 31.819 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_c := 2.5 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

2.3. ACERO DE REFUERZO

Tensión de fluencia:	$f_y := 4200 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de rotura:	$f_u := 6300 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_s := 7.85 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

3. DISEÑO DE LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO

3.1. CARGAS

3.1.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de losa: $PP_{losa} := \gamma_c \cdot e_{losa} = 2.475 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$

3.1.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento: $PP_{pav} := \gamma_c \cdot e_{pav} = 0.125 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$

Peso propio de baranda: $PP_{baranda} := 0.05 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$

Peso propio de barrera: $PP_{barrera} := \gamma_c \cdot A_{barrera} = 0.638 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$

3.1.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje: $CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$

Carga de rueda segundo y tercer eje: $CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$

Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_camión} := 4.27 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.1.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda: $CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.34 \text{ tonnef} = 5.67 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$

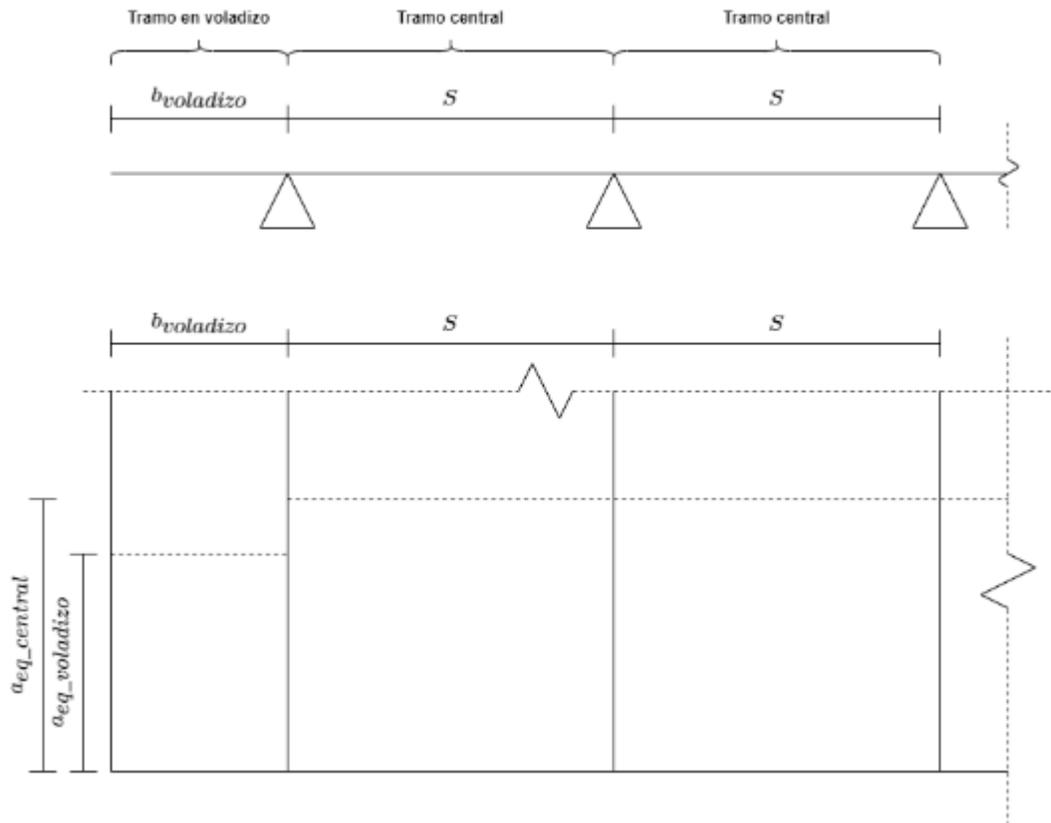
Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.2. ANCHO DE FRANJAS EQUIVALENTES

El ancho de las franjas equivalentes se considera en la dirección longitudinal del puente. Para los tramos centrales, el largo es la distancia entre vigas. Para los voladizos, el largo es el ancho de voladizo. Cada tramo de losa se estudia como una viga simplemente apoyada en las vigas de acero.



Ancho de franja equivalente en tramo central:

$$a_{eq_central} := 0.7 \text{ m} + 6.6 S = 4.66 \text{ m}$$

Distancia X para ancho de franja equivalente en voladizo:

$$X := b_{voladizo} - \frac{b_{baranda}}{2} = 0.24 \text{ m}$$

Ancho de franja equivalente en voladizo:

$$a_{eq_voladizo} := 1.2 \text{ m} + 10 X = 3.6 \text{ m}$$

3.3. DISEÑO DE TRAMOS CENTRALES

Reacción en apoyos por carga muerta:

$$R_{DC} := \frac{PP_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} \cdot a_{eq_central} = 6.937 \text{ tonnef}$$

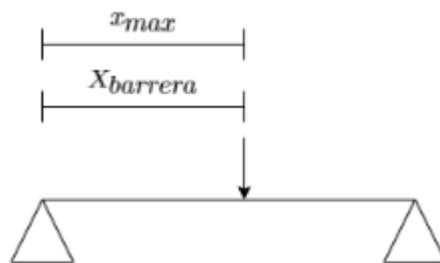
Reacción en apoyos por carga muerta superpuesta:

$$R_{DW} := \left(\frac{PP_{pav} \cdot b_{tablero} + 2 PP_{baranda} + 2 PP_{barrera}}{N_b} \right) \cdot a_{eq_central}$$

$$R_{DW} = 0.671 \text{ tonnef}$$

3.3.1. CASO 1: TRAMO CON BARRERA

Se considera el tramo en el que se ubica la barrera de contención.
El momento máximo se da en el punto central de la barrera.



Distancia de barrera a apoyo más cercano al extremo:

$$X_{barrera} := b_{baranda} + b_{pasillo} + \frac{b_{barrera}}{2} - b_{voladizo} - 2 S = 0.318 \text{ m}$$

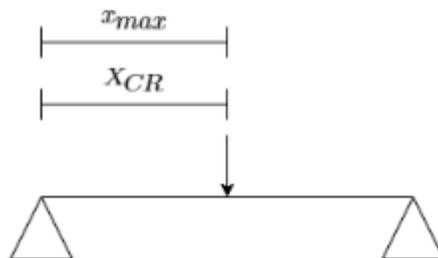
Momento en caso tramo con barrera:

$$M_{caso1} := (R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{barrera} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{barrera}^2$$

$$M_{caso1} = 1.805 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

3.3.2. CASO 2: TRAMO CON CAMIÓN Ó TÁNDEM

Se considera el tramo con camión de diseño o tándem de diseño.
Se consideran las ruedas más pesadas posibles dentro del ancho efectivo.
El momento máximo se da bajo las ruedas, cuando éstas se ubican en el centro del tramo.



Distancia de carga de rueda a apoyo más desfavorable:	$X_{CR} := \frac{S}{2} = 0.3 \text{ m}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por camión de diseño:	$R_{camión} := \frac{2 CR_{camión\ 2\ 3} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 8.71 \text{ tonnef}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por tándem de diseño:	$R_{tándem} := \frac{2 CR_{tándem} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 5.67 \text{ tonnef}$
Reacción de carga viva más desfavorable:	$R_{LL} := \max(R_{camión}, R_{tándem}) = 8.71 \text{ tonnef}$
Carga de rueda más desfavorable:	$CR_{LL} := \max(2 CR_{camión\ 2\ 3}, 2 CR_{tándem})$ $CR_{LL} = 17.42 \text{ tonnef}$
Momento máximo en caso tramo sin barrera:	$M_{caso2} := (R_{LL} + R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{CR} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{CR}^2$ $M_{caso2} = 4.35 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

3.3.3. ACERO DE REFUERZO

3.3.3.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo en la franja equivalente:	$M_u := \max(M_{caso1}, M_{caso2}) = 4.35 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$
Factor de resistencia para hormigón armado:	$\phi_c := 0.9$
Refuerzo principal requerido:	$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$ $A_{p_req} = 1.225 \text{ cm}^2$
Refuerzo mínimo:	$A_{p_min} := 0.0009 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 8.91 \text{ cm}^2$
Refuerzo dispuesto:	$\phi 12 @ 25 + \phi 12 @ 25$
Refuerzo dispuesto:	$A_p = 9.048 \text{ cm}^2$

3.3.3.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución:
$$Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$$

Refuerzo requerido:
$$A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 6.062 \text{ cm}^2$$

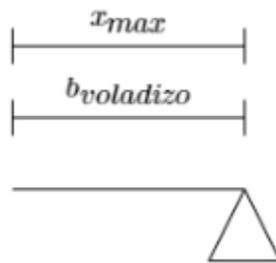
Refuerzo dispuesto:
$$\phi 10@25 + \phi 10@25$$

Refuerzo dispuesto:
$$A_{sec} = 6.283 \text{ cm}^2$$

3.4. DISEÑO DE VOLADIZOS

Se considera el tramo en voladizo.

El momento máximo se da en el apoyo.



Momento máximo en voladizo:
$$M_{voladizo} := -(PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_voladizo} \cdot 0.5 \cdot b_{voladizo}^2$$

$$M_{voladizo} = -0.464 \text{ tonnef} \cdot m$$

3.4.1. ACERO DE REFUERZO

3.4.1.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo total en la franja equivalente:
$$M_u := -M_{voladizo} = 0.464 \text{ tonnef} \cdot m$$

Factor de resistencia para hormigón armado:
$$\phi_c := 0.9$$

Refuerzo principal requerido:

$$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$$

$$A_{p_req} = 0.131 \text{ cm}^2$$

Refuerzo mínimo: $A_{p_min} := 0.0009 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 8.91 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 12@25 + \phi 12@25$

Refuerzo dispuesto: $A_p = 9.048 \text{ cm}^2$

3.4.1.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución: $Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$

Refuerzo requerido: $A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 6.062 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 10@25 + \phi 10@25$

Refuerzo dispuesto: $A_{sec} = 6.283 \text{ cm}^2$

4. DISEÑO DE LAS VIGAS COMPUESTAS

4.1. PROPIEDADES

Ancho efectivo colaborante de la losa para viga interior:

$$b_s := S = 0.6 \text{ m}$$

Espesor de la losa de hormigón:

$$t_s := e_{losa} = 99 \text{ cm}$$

Razón entre módulos de elasticidad:

$$n := \frac{E_s}{E_c} = 8.796$$

4.2. CARGAS

4.2.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de viga de acero:

$$PP_{viga} := \gamma_s \cdot viga \cdot A_s = 0.422 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de losa para cada viga:

$$PP_{losa} := \frac{\gamma_c \cdot e_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 1.489 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento para cada viga

$$PP_{pav} := \frac{\gamma_c \cdot e_{pav} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 0.075 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de baranda para cada viga:

$$PP_{baranda} := \frac{2 PP_{baranda}}{N_b} = 0.005 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de barrera para cada viga:

$$PP_{barrera} := \frac{2 PP_{barrera}}{N_b} = 0.064 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje:
Carga de rueda segundo y tercer eje:

$$CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$$

$$CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre ruedas:

$$a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre dos primeros ejes:

$$a_{lo_camión_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal mínima entre dos últimos ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_min} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal
máxima entre dos últimos
ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_max} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia transversal a
barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda:

$$CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.4 \text{ tonnef} = 5.7 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre
ruedas:

$$a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
ruedas:

$$a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$$

Distancia transversal a
barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.5. CARGA DE FAJA

Carga de faja:

$$q_{faja} := 0.952 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.6. COEFICIENTE DE IMPACTO DINÁMICO (IM)

Coeficiente de impacto
dinámico para estado límite
de fatiga:

$$IM_{fatiga} := 15\%$$

Coeficiente de impacto
dinámico para el resto de
cálculos:

$$IM := 33\%$$

4.2.7. CARGA DE FATIGA

Carga de rueda primer eje:

$$CR_{fatiga_1} := CR_{camión_1} = 2.18 \text{ tonnef}$$

Carga de rueda segundo y
tercer eje:

$$CR_{fatiga_2_3} := CR_{camión_2_3} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre
ruedas:

$$a_{tr_fatiga} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
dos primeros ejes

$$a_{lo_fatiga_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
dos últimos ejes:

$$a_{lo_fatiga_2_3} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia a barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

Tránsito medio diario anual:

$$ADTT := 3000$$

Factor p para dos fajas de
tránsito:

$$p := 0.85$$

Frecuencia de carga de fatiga:

$$ADTT_{SL} := p \cdot ADTT = 2550$$

4.3. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN

Se considera que la sección transversal se deforma y rota como un cuerpo rígido.

Factor de presencia múltiple para 1 vía cargada:

$$m_1 := 1.20$$

Factor de presencia múltiple para 2 vías cargadas:

$$m_2 := 1.00$$

1 vía cargada:

$$N_{L,1} := 1$$

2 vías cargadas:

$$N_{L,2} := 2$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 1:

$$e_1 := b_{pista} - d - 0.5 a_{tr_camión} = 2.485 \text{ m}$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 2:

$$e_2 := e_1 = 2.485 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y la viga exterior:

$$X_{ext} := 0.5 b_{tablero} - b_{voladizo} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las primeras vigas:

$$X_1 := X_{ext} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las segundas vigas:

$$X_2 := X_{ext} - S = 5.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las terceras vigas:

$$X_3 := X_2 - S = 4.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las cuartas vigas:

$$X_4 := X_3 - S = 3.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las quintas vigas:

$$X_5 := X_4 - S = 3.3 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las sextas vigas:

$$X_6 := X_5 - S = 2.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las séptimas vigas:

$$X_7 := X_6 - S = 2.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las octavas vigas:

$$X_8 := X_7 - S = 1.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las novenas vigas:

$$X_9 := X_8 - S = 0.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las décimas vigas:

$$X_{10} := X_9 - S = 0.3 \text{ m}$$

4.3.1. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA MOMENTO

Factor de distribución para momento para 1 vía cargada:

$$g_{M_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para momento para 2 vías cargadas:

$$g_{M_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.3.2. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA CORTE

Factor de distribución para corte para 1 vía cargada:

$$g_{V_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para corte para 2 vías cargadas:

$$g_{V_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.4. DISEÑO A FLEXIÓN

Factor de resistencia a flexión:

$$\phi_f := 1.0$$

4.4.1. CONSTRUCCIÓN

4.4.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Área de la sección:

$$A_s := A_s = 52720 \text{ mm}^2$$

Distancia entre los centroides de las alas:

$$h := h_w + 0.5 t_{f_inf} + 0.5 t_{f_sup} = 720 \text{ mm}$$

Momento de inercia:

$$I_s := I_s = (5.849 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Constante torsional:

$$J := J = (3.591 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

Módulo elástico de la sección para el ala en compresión:

$$S_{xc} := S_{x_s} = (1.519 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$$

Módulo elástico de la sección para el ala en tracción:

$$S_{xt} := S_{xc} \cdot \frac{y_{CG_s}}{(h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} - y_{CG_s})} = (1.519 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$$

Módulo plástico de la sección para el ala en compresión:

$$Z_{xc} := Z_{x_s} = (1.692 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$$

Radio de giro:

$$r_y := r_{y_s} = 108.237 \text{ mm}$$

Radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional:

$$r_t := \sqrt{\frac{I_s \cdot h}{2 S_{xc}}} = 372.29 \text{ mm}$$

Tensión en el ala en compresión en el punto de fluencia:

$$F_{yr} := \min\left(0.7 F_{yc}, F_{yt} \cdot \frac{S_{xt}}{S_{xc}}, F_{yw}\right)$$

$$F_{yr} := \max(F_{yr}, 0.5 F_{yc}) = 2460.5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Longitud límite para resistencia por fluencia:

$$L_p := 1.76 r_y \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 4.656 \text{ m}$$

Longitud límite para pandeo torsional inelástico:

$$L_r := 1.95 r_t \cdot \frac{E_s}{F_{yr}} \cdot \sqrt{\frac{J}{S_{xc} \cdot h} + \sqrt{\left(\frac{J}{S_{xc} \cdot h}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{F_{yr}}{E_s}\right)^2}}$$

$$L_r = 54.591 \text{ m}$$

4.4.1.2. RESISTENCIA A FLEXIÓN

Combinación de carga: Resistencia I: 1.25 DC

Momento en viga por cargas en construcción: $M(x) := 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{L}{2} \cdot x - 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{x^2}{2}$

Momento máximo en viga por cargas en construcción: $M_{max} := M\left(\frac{L}{2}\right) = 365.676 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en primer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_A := M\left(\frac{L}{4}\right) = 274.257 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en segundo cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_B := M\left(\frac{L}{2}\right) = 365.676 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en tercer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_C := M\left(\frac{L}{4}\right) = 274.257 \text{ tonnef} \cdot m$

Factor de modificación por pandeo lateral torsional: $C_b := \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} = 1.136$

Momento plástico: $R_{pc} M_{yc} := F_{yc} \cdot Z_{xc} = 594.583 \text{ tonnef} \cdot m$

Tensión crítica: $F_{cr} := \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E_s}{\left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + 0.0078 \frac{J}{S_{xc} \cdot h} \cdot \left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2}$

$$F_{cr} = 2951.033 \frac{kgf}{cm^2}$$

Resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$M_{nc} := \begin{cases} \text{if } L_b \leq L_p \\ \quad \parallel R_{pc} M_{yc} \\ \text{else if } L_b \leq L_r \\ \quad \parallel C_b \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{F_{yr} \cdot S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}}\right) \cdot \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right) \cdot R_{pc} M_{yc} \\ \text{else} \\ \quad \parallel F_{cr} \cdot S_{xc} \end{cases}$$

$$M_{nc} := \min(M_{nc}, R_{pc} M_{yc}) = 523.189 \text{ tonnef} \cdot m$$

Esfuerzo de resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$F_{nc} := \frac{M_{nc}}{S_{xc}} = 3444.037 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Momento último:

$$M_u := M_{max} = 365.676 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo en el ala en compresión:

$$f_{bu} := \frac{M_u}{S_{xc}} = 2407.167 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Chequeo de requerimientos por flexión en etapas críticas de construcción:

Primer chequeo: $f_{bu} = 2407.167 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{yc} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f_{bu} = 2407.167 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{nc} = 3444.037 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

4.4.1.3. DEFORMACIÓN POR CARGAS MUERTAS

Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW

Flecha por carga muerta DC: $flecha_{DC} := \frac{5 (PP_{losa} + PP_{viga}) L^4}{384 E_s \cdot I_s} = 303.935 \text{ mm}$

Flecha por carga muerta superpuesta DW: $flecha_{DW} := \frac{5 (PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^4}{384 E_s \cdot I_s}$

$$flecha_{DW} = 22.899 \text{ mm}$$

Contraflecha total a dar a vigas de acero:

$$contraflecha := flecha_{DC} + flecha_{DW} = 326.834 \text{ mm}$$

4.4.2. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

4.4.2.1. DEFORMACIONES ELÁSTICAS

4.4.2.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO

Se debe considerar la rigidez del sistema completo.

Ancho transformado de hormigón:
$$b_{c_tr} := \frac{b_{\text{tablero}}}{n} = 1.368 \text{ m}$$

Centro de gravedad:
$$y_{CG_tr_s} := \frac{N_b \cdot A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr} \cdot 0.5 t_s}{N_b \cdot A_s + t_s \cdot b_{c_tr}} = 51.251 \text{ cm}$$

Inercia del sistema completo:
$$I_{\text{sist}} = (I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_tr_s})^2) \cdot N_b + \frac{b_{c_tr} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_tr_s})^2$$

$$I_{\text{sist}} = (2.285 \cdot 10^{11}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.1.2. CÁLCULO DE DEFORMACIONES

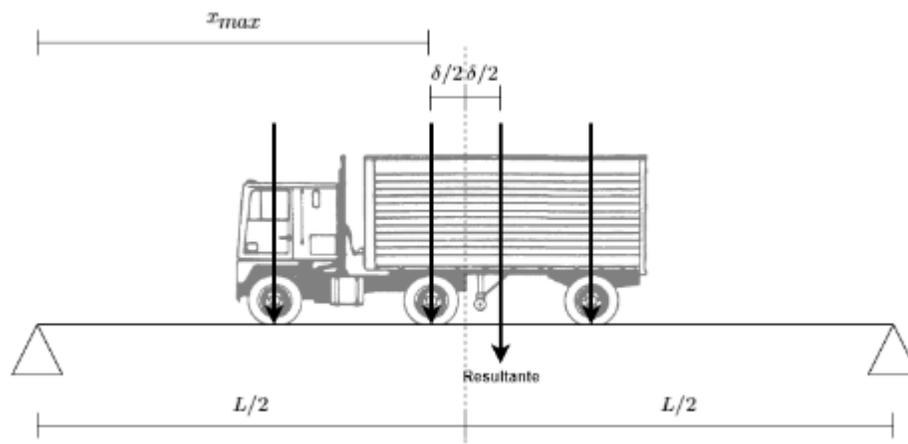
Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW + 1.0 IM LL

Carga muerta es contrarrestada por la contraflecha durante etapas de construcción.
Se deben cargar todas las vías de diseño.

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:

Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.

La flecha máxima se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{camión} = \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_camión_1,2} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_camión_2,3_min}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_camión_1,2} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_camión_2,3_min} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 25.008 \text{ tonnef}$$

Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

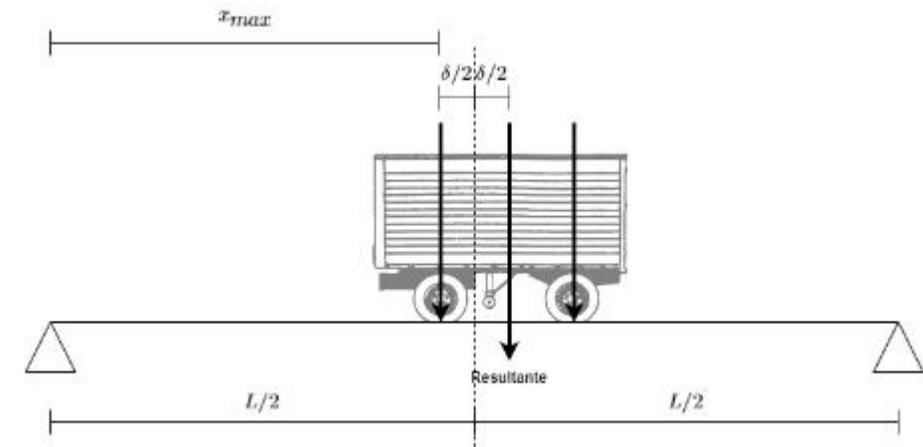
$$M_{camión}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \\ \quad \left\| R_{camión} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \\ \quad \left\| R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) \right\| \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) - 2 CR_{camión_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \right) \right) \right\| \end{cases}$$

Flecha máxima por camión de diseño:

$$flecha_{camión} := - \left(\int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)} \left(\int_0^x \frac{M_{camión}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \cdot \int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)} \frac{M_{camión}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) = 8.05 \text{ mm}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

La flecha máxima se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tándem} := \frac{a_{lo_tándem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tándem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \frac{L + \delta_{tándem} - a_{lo_tándem}}{L}$$

$$R_{tándem} = 14.898 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tándem}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \\ \quad \left| \begin{array}{l} R_{tándem} \cdot x \\ \text{else} \\ R_{tándem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right) \end{array} \right. \end{cases}$$

Flecha máxima por tándem de diseño:

$$flecha_{tándem} := - \left(\int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \left(\int_0^x \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \cdot \int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) = 5.261 \text{ mm}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Flecha por carga de faja:

$$flecha_{faja}(x) := - \left(\int_0^x \left(\frac{q_{faja} \cdot L \cdot s^2}{4} - \frac{q_{faja} \cdot s^3}{6} \right) ds - x \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{M_{faja}(s)}{E_s \cdot I_{sist}} ds \right)$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja, cargando ambas vías:

Flecha máxima por camión de diseño y carga de faja:

$$flecha_{camión_faja} := 2 \cdot flecha_{camión} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)$$

$$flecha_{camión_faja} = 23.838 \text{ mm}$$

Flecha máxima por tándem de diseño y carga de faja:

$$flecha_{tándem_faja} := 2 \cdot flecha_{tándem} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right)$$

$$flecha_{tándem_faja} = 18.272 \text{ mm}$$

Flecha máxima por carga viva:

$$flecha_{IM_LL} := \max(flecha_{camión_faja}, flecha_{tándem_faja})$$

$$flecha_{IM_LL} = 23.838 \text{ mm}$$

Deformación máxima por combinación de carga Servicio I: $\Delta_{max} := flecha_{IM_LL} = 23.838 \text{ mm}$

Chequeo de requerimientos por deformaciones elásticas:

Chequeo: $\Delta_{max} = 23.838 \text{ mm} \leq \frac{L}{800} = 43.75 \text{ mm}$

OK.

4.4.2.2. DEFORMACIONES PERMANENTES

4.4.2.2.1. SECCIÓN RESISTENTE 1: SECCIÓN DE ACERO

Centro de gravedad: $y_{CG_s} = 38.5 \text{ cm}$

Inercia de la sección de acero: $I_s = (5.849 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$

4.4.2.2.2. SECCIÓN RESISTENTE 2: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_cp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 51.254 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_cp_s})^2 + \frac{b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_cp_s})^2$

$$I_{tr_cp_s} = (1.141 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.3. SECCIÓN RESISTENTE 3: SECCIÓN COMPUESTA EN EL LARGO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{3 n} = 0.023 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_lp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 52.303 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta:

$$I_{tr_lp_s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_lp_s})^2 + \frac{b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_lp_s})^2$$

$$I_{tr_lp_s} = (7.712 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.4. SECCIÓN RESISTENTE 4: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO Y LARGO PLAZO TRANSFORMADA A HORMIGÓN

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Espesor del alma transformado:

$$t_{w_tr_c} := t_w \cdot n = 14.073 \text{ cm}$$

Ancho del ala superior transformado:

$$b_{f_sup_tr_c} := b_{f_sup} \cdot n = 369.421 \text{ cm}$$

Ancho del ala inferior transformado:

$$b_{f_inf_tr_c} := b_{f_inf} \cdot n = 369.421 \text{ cm}$$

Centro de gravedad:

$$y_{CG_tr_c} := \frac{A_s \cdot n \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot S \cdot 0.5 t_s}{A_s \cdot n + t_s \cdot S} = 51.254 \text{ cm}$$

Momento de inercia:

$$I_{tr_c} = (1.004 \cdot 10^{11}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.5. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Servicio II:

$$1.0 \text{ DC} + 1.0 \text{ DW} + 1.3 \text{ IM LL}$$

Momento máximo por carga muerta DC:

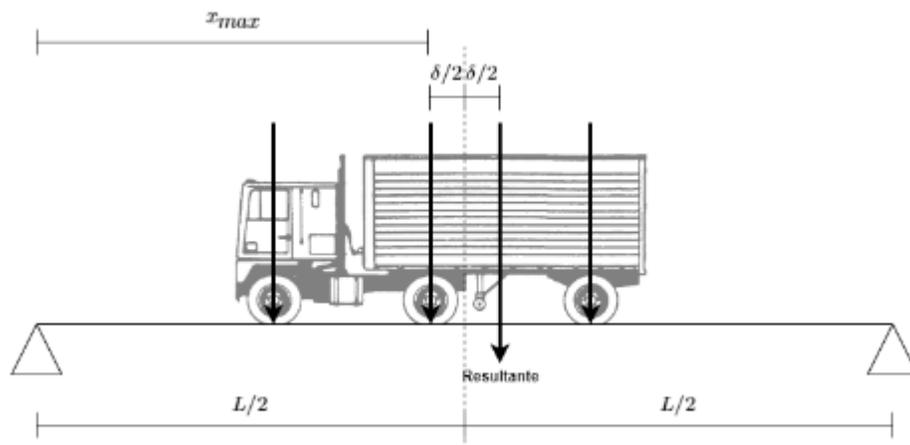
$$M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 292.541 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga muerta superpuesta DW:

$$M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$$

$$M_{DW} = 22.04 \text{ tonnef} \cdot m$$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
 Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
 El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{camión} = \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_camión_1,2} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_camión_2,3_min}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} = (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_camión_1,2} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_camión_2,3_min} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 25.008 \text{ tonnef}$$

Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

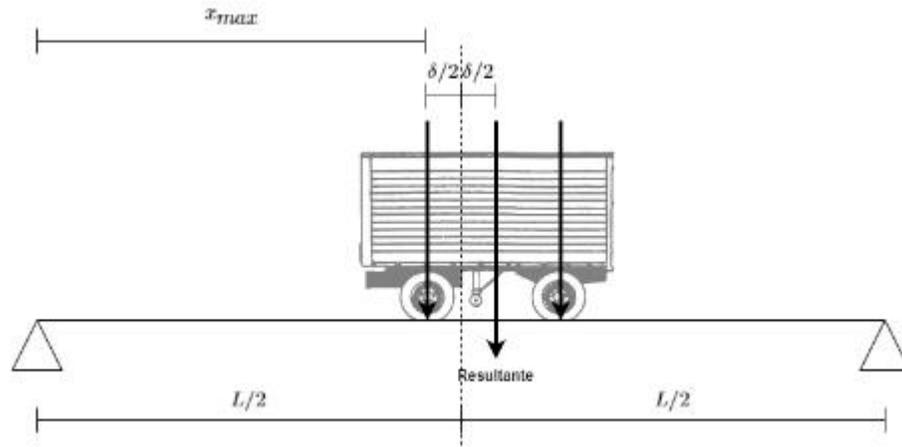
$$M_{camión}(x) = \begin{cases} R_{camión} \cdot x & \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \\ R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) & \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \\ R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) - 2 CR_{camión_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \right) \right) & \text{else} \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño:

$$M_{max_camión} := M_{camión} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) = 395.098 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tándem} := \frac{a_{lo_tándem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tándem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \frac{L + \delta_{tándem} - a_{lo_tándem}}{L}$$

$$R_{tándem} = 14.898 \text{ tonnef}$$

Momento entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tándem}(x) := \begin{cases} R_{tándem} \cdot x & \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \\ R_{tándem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right) & \text{else} \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tándem} := M_{tándem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) = 256.167 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} := \max \left(M_{max_camión} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right), M_{max_tándem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 540.632 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 118.038 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo máximo en el hormigón en tracción:

$$f := \frac{M_{DW} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}}$$

$$f = 83.426 \frac{kgf}{cm^2} \quad \leq \quad 2 f_r = 63.637 \frac{kgf}{cm^2}$$

Si el esfuerzo máximo en el hormigón a tracción supera el límite, se considera que el esfuerzo por deformaciones permanentes debe ser calculado utilizando sólo la sección de acero.

Esfuerzo máximo en el ala en compresión de la viga de acero:

$$f_{fc} := \frac{M_{DC} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{fc} = 3080.946 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en el ala en tracción de la viga de acero:

$$f_{ft} := \frac{M_{DC} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{ft} = 3080.946 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en la viga de acero:

$$f_f := \max(f_{fc}, f_{ft}) = 3080.946 \frac{kgf}{cm^2}$$

Chequeo de requerimientos por deformaciones permanentes:

Primer chequeo: $f_f = 3080.946 \frac{kgf}{cm^2} \leq 0.95 \cdot F_{yf} = 3339.25 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f = 83.426 \frac{kgf}{cm^2} \leq 4 f_r = 127.274 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

4.4.3. ESTADO LÍMITE DE FATIGA

4.4.3.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 670 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.4.3.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| 1.0 \right. \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \right. \end{array} \right\| = 1$$

Resistencia a corte por fluencia:

$$V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 218.549 \text{ tonnef}$$

Corte crítico:

$$V_{cr} := C \cdot V_p = 218.549 \text{ tonnef}$$

4.4.3.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Corte máximo por carga muerta DC:

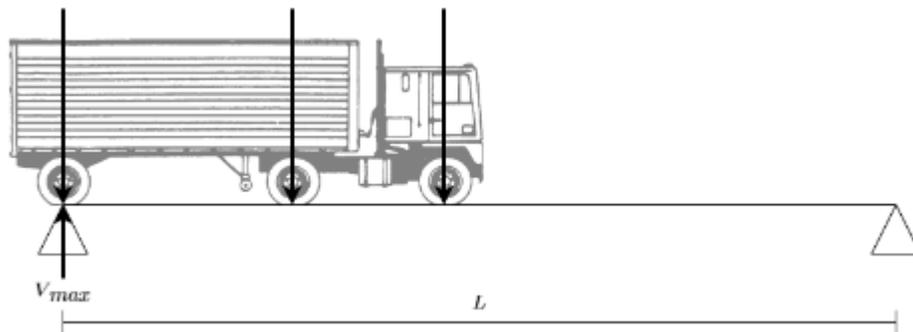
$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 33.433 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 2.519 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1.2} + a_{lo_fatiga_2.3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2.3} - a_{lo_fatiga_1.2}) \right) + \frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 37.92 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V.1} \cdot V_{fatiga}, g_{V.2} \cdot V_{fatiga}) = 8.279 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 48.371 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de fatiga:

$$\text{Chequeo: } V_u = 48.371 \text{ tonnef} \quad \leq \quad V_{cr} = 218.549 \text{ tonnef}$$

OK.

4.4.4. ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

4.4.4.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo sólo en compresión.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 670 \text{ mm}$

Centro de gravedad: $y_{CG_tr_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_s}}$

$y_{CG_tr_s} = 51.254 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} := I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_tr_s})^2 + \frac{b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s}^3}{12} + b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s} \cdot (0.5 y_{CG_tr_s})^2$

$I_{tr_cp_s} = (8.937 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$

Profundidad de la sección compuesta: $D_t := t_s = 99 \text{ cm}$

4.4.4.2. MOMENTO PLÁSTICO

Eje neutro plástico desde el borde superior de la losa:

$$c := \begin{cases} \text{if } 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc}) \geq F_y \cdot A_s \\ \quad \frac{F_y \cdot A_s}{0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup}) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \geq F_y \cdot (h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \quad \frac{F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} + 2 rec + 2 h_{sc}) + h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf})}{2 F_y \cdot b_{f_sup} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + h_w \cdot t_w) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \geq F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \quad \frac{F_y \cdot (t_w \cdot (h_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup})}{2 F_y \cdot t_w + 0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else} \\ \quad \frac{F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot (t_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup} + 2 h_w) - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} - h_w \cdot t_w)}{2 F_y \cdot b_{f_inf} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \end{cases}$$

$c = 25.076 \text{ cm}$

Área de hormigón a compresión: $A_{c_c} := b_s \cdot c = 1504.545 \text{ cm}^2$

Área de acero a compresión:

$$A_{s,c} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel 0 \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \\ \text{else} \\ \quad \parallel A_s \end{cases}$$

$$A_{s,c} = 218.121 \text{ cm}^2$$

Área de acero a tracción:

$$A_{s,t} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel A_s \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel A_s - b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)) \\ \text{else} \\ \quad \parallel 0 \end{cases}$$

$$A_{s,t} = 309.079 \text{ cm}^2$$

Centro del área del hormigón en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{c,c}} := \frac{c}{2} = 12.538 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s,c}} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel \text{"No aplica"} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \cdot (t_{f,sup} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \cdot (t_{f,sup} + h_w + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + y_{CG_{c,c}} \end{cases}$$

$$y_{CG_{s,c}} = 17.688 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en tracción desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s,t}} := \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ \quad rec + h_{sc} + y_{CG_{s,c}} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ \quad c + \frac{b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) + h_w \cdot t_w \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + 0.5 h_w) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + h_w + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - b_{f_sup} \cdot (c - rec - h_{sc})} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ \quad c + \frac{t_w \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \cdot 0.5 \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}))} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ \quad c + \frac{b_{f_inf} \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w)}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot h_w + b_{f_inf} \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup} - h_w))} \\ \text{else} \\ \quad \text{"No aplica"} \end{cases}$$

$$y_{CG_{s,t}} = 78.773 \text{ cm}$$

Distancia desde el borde superior de la losa al eje neutro plástico:

$$D_p := c = 25.076 \text{ cm}$$

Profundidad del alma de la viga de acero a compresión:

$$D_{cp} := \max(c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}, 0 \text{ cm}) = 5.076 \text{ cm}$$

Momento plástico:

$$M_p := \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ \quad \left\| 0.85 f_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,t} \cdot (y_{CG_{s,t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ \quad \left\| 0.85 f_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,c} \cdot (c - y_{CG_{s,c}}) + F_y \cdot A_{s,t} \cdot (y_{CG_{s,t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ \quad \left\| 0.85 f_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,c} \cdot (c - y_{CG_{s,c}}) + F_y \cdot A_{s,t} \cdot (y_{CG_{s,t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ \quad \left\| 0.85 f_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,c} \cdot (c - y_{CG_{s,c}}) + F_y \cdot A_{s,t} \cdot (y_{CG_{s,t}} - c) \right\| \\ \text{else} \\ \quad \left\| 0.85 f_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s,c} \cdot (c - y_{CG_{s,c}}) \right\| \end{cases}$$

$$M_p = 680.107 \text{ tonnef} \cdot m$$

4.4.4.3. COMPACIDAD DE LA SECCIÓN

Chequeo de requerimientos de compacidad de la sección:

Primer chequeo: $F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq 4921 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $\frac{D}{t_w} = 41.875 \leq 150$

OK.

Tercer chequeo: $\frac{2 D_{cp}}{t_w} = 6.345 \quad \leq \quad 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 91.904$
 OK.

La sección califica como: **COMPACTA**

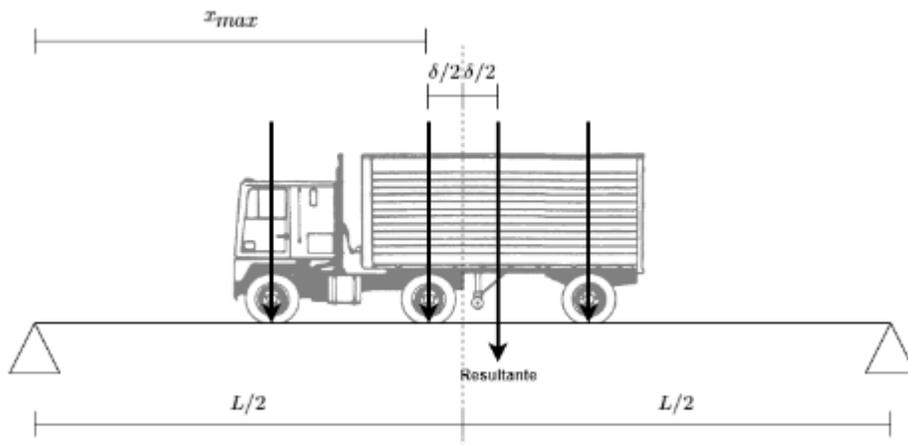
4.4.4.4. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Resistencia I: **1.25 DC + 1.50 DW + 1.75 IM LL**

Momento máximo por carga muerta DC: $M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 292.541 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento máximo por carga muerta superpuesta DW: $M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$
 $M_{DW} = 22.04 \text{ tonnef} \cdot m$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
 Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
 El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante: $\delta_{camión} := \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_{camión_1,2}} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_{camión_2,3_{min}}}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$

$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$

Reacción en apoyo izquierdo: $R_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_{camión_1,2}} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_{camión_2,3_{min}}} + \delta_{camión}) \right)$

$R_{camión} = 25.008 \text{ tonnef}$

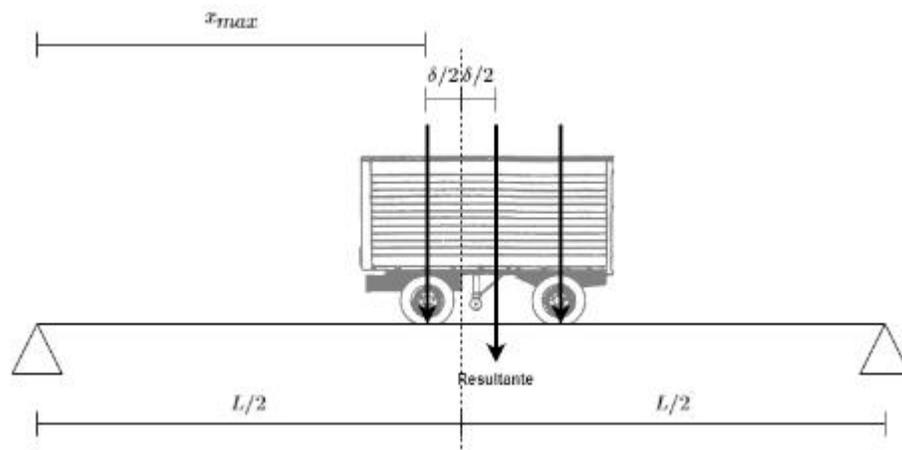
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{camión}}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión}_{1,2}} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{camión}_{1,2}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión}_{1,2}} \right) \right) \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{\text{camión}_{1,2}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión}_{1,2}} \right) \right) - 2 CR_{\text{camión}_{2,3}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño: $M_{\text{max_camión}} := M_{\text{camión}} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) = 395.098 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{\text{tándem}} := \frac{a_{\text{lo_tándem}}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{\text{tándem}} := (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \frac{L + \delta_{\text{tándem}} - a_{\text{lo_tándem}}}{L}$$

$$R_{\text{tándem}} = 14.898 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{tándem}}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tándem} := M_{tándem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) = 256.167 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} = \max \left(M_{max_camión} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right), M_{max_tándem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 540.632 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 118.038 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento último:

$$M_u := 1.25 \cdot M_{DC} + 1.50 M_{DW} + 1.75 \cdot M_{LL}$$

$$M_u = 605.304 \text{ tonnef} \cdot m$$

Resistencia nominal a flexión:

$$M_n := \left\| \begin{array}{l} \text{if } D_p \leq 0.1 D_t \\ \left\| M_p \right\| \\ \text{else} \\ \left\| M_p \cdot \left(1.07 - 0.7 \frac{D_p}{D_t} \right) \right\| \end{array} \right\| = 607.13 \text{ tonnef} \cdot m$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de resistencia:

$$\text{Chequeo: } M_u = 605.304 \text{ tonnef} \cdot m \leq \phi_f \cdot M_n = 607.13 \text{ tonnef} \cdot m$$

OK.

4.4.4.5. DUCTILIDAD

Chequeo de requerimientos de ductilidad:

$$\text{Chequeo: } D_p = 25.076 \text{ cm} \leq 0.42 D_t = 41.58 \text{ cm}$$

OK.

4.5. DISEÑO A CORTE

Factor de resistencia a corte: $\phi_v := 1.0$

4.5.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 670 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.5.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| 1.0 \right. \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \right. \end{array} \right\| = 1$$

Resistencia a corte por fluencia: $V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 218.549 \text{ tonnef}$

Resistencia nominal al corte: $V_n := C \cdot V_p = 218.549 \text{ tonnef}$

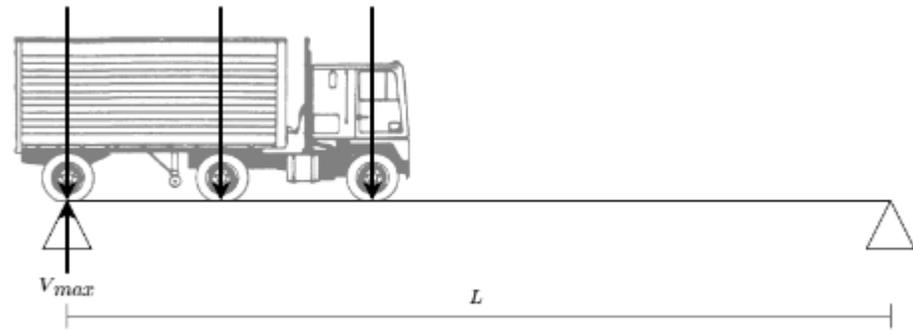
4.5.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Resistencia I: $1.25 \text{ DC} + 1.50 \text{ DW} + 1.75 \text{ IM LL}$

Corte máximo por carga muerta DC: $V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 33.433 \text{ tonnef}$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW: $V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 2.519 \text{ tonnef}$

Posición de camión de diseño que produce el mayor corte:
 El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje del camión.

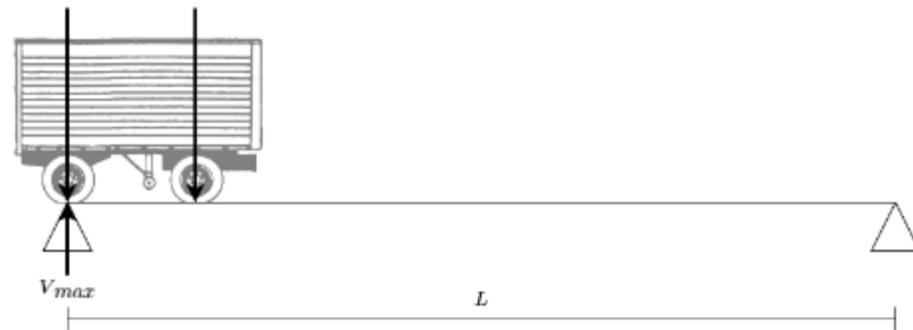


Corte máximo por camión de diseño:

$$V_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión.1}}{L} \cdot (L - a_{lo_camión.2.3_min} - a_{lo_camión.1.2}) + \frac{2 CR_{camión.2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_camión.2.3_min}) \right)$$

$$V_{camión} = 47.895 \text{ tonnef}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor corte:
 El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el segundo eje del tándem.



Corte máximo por tándem de diseño:

$$V_{tándem} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{tándem}}{L} \cdot (2L - a_{lo_tándem}) \right)$$

$$V_{tándem} = 29.795 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de faja:

$$V_{faja} := \frac{q_{faja} \cdot L}{2} = 16.66 \text{ tonnef}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Corte máximo por carga viva LL:

$$V_{LL} := \max(V_{camión} + V_{faja}, V_{tándem} + V_{faja})$$

$$V_{LL} = 64.555 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga viva distribuido:

$$V_{LL} := \max(g_{V_1} \cdot V_{LL}, g_{V_2} \cdot V_{LL}) = 14.094 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := 1.25 V_{DC} + 1.50 V_{DW} + 1.75 V_{LL}$$

$$V_u = 70.235 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos de resistencia al corte:

Chequeo: $V_u = 70.235 \text{ tonnef} \leq \phi_v \cdot V_n = 218.549 \text{ tonnef}$

OK.

5. CONECTORES DE CORTE

Factor de resistencia de conectores de corte:

$$\phi_{sc} := 0.85$$

Resistencia a la fatiga de un conector de corte:

$$Z_r := 0.375 \text{ tonnef} \cdot \frac{w}{cm} = 1.5 \text{ tonnef}$$

Fuerza de corte nominal:

$$P := \min(0.85 f_c \cdot b_s \cdot t_s, F_{yw} \cdot D \cdot t_w + F_{yt} \cdot b_{f_{inf}} \cdot t_{f_{inf}} + F_{yc} \cdot b_{f_{sup}} \cdot t_{f_{sup}})$$

$$P = 1262.25 \text{ tonnef}$$

Resistencia nominal al corte de un conector de corte:

$$Q_n := 0.3 \cdot (t_{f_{sc}} + 0.5 t_{wsc}) \cdot L_c \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c}$$

$$Q_n = 41.719 \text{ tonnef}$$

Resistencia al corte de un conector de corte:

$$Q_r := \phi_{sc} \cdot Q_n = 35.461 \text{ tonnef}$$

5.1. NÚMERO DE CONECTORES DE CORTE

El número de conectores de corte requerido corresponde a los necesarios entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

Chequeo de requerimientos de número de conectores de corte:

Chequeo:
$$n_{sc_req} := \frac{P}{Q_r} = 35.595 \quad \leq \quad n_{sc} = 36$$

OK.

5.2. SEPARACIÓN LONGITUDINAL

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Se debe cumplir con la separación longitudinal máxima normativa, correspondiente a 600 mm.

También se debe cumplir con el requerimiento de separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga.

Además, se verifica la separación longitudinal máxima tal que se ubique el número de conectores de corte requerido entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

Corte máximo por carga muerta DC:

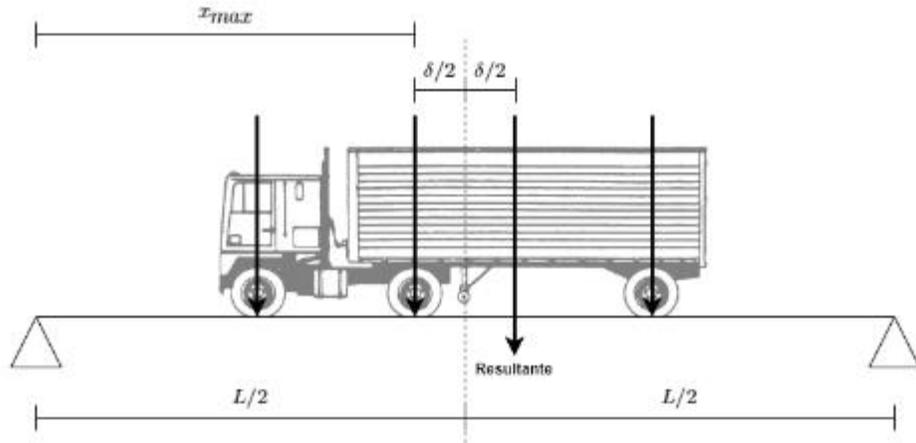
$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 33.433 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 2.519 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el segundo eje de la carga de fatiga.



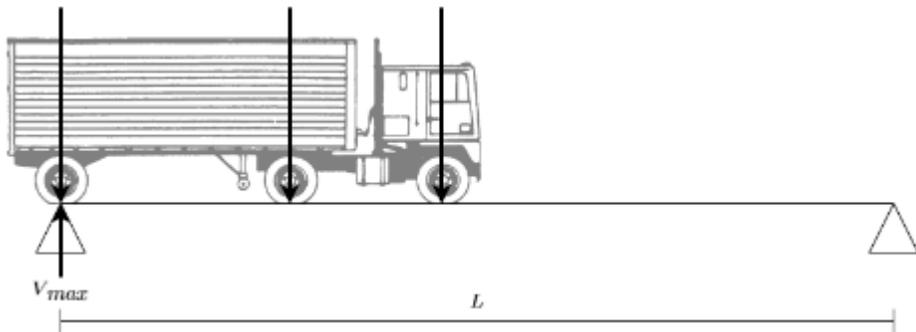
Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{fatiga} := \frac{-2 CR_{fatiga_1} \cdot a_{lo_fatiga_1_2} + 2 CR_{fatiga_2_3} \cdot a_{lo_fatiga_2_3}}{2 CR_{fatiga_1} + 4 CR_{fatiga_2_3}}$$

$$\delta_{fatiga} = 3.591 \text{ m}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1.2} + a_{lo_fatiga_2.3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2.3} - a_{lo_fatiga_1.2}) + \frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 37.92 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V.1} \cdot V_{fatiga}, g_{V.2} \cdot V_{fatiga}) = 8.279 \text{ tonnef}$$

Corte por combinación de fatiga:

$$V_f := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 48.371 \text{ tonnef}$$

Primer momento del área de hormigón a compresión en torno al eje neutro de la sección compuesta en el corto plazo:

$$Q := \frac{b_s}{n} \cdot y_{CG_cp_s} \cdot \frac{y_{CG_cp_s}}{2} = (8.96 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Inercia de la sección compuesta en el corto plazo:

$$I_{tr_cp_s} = (8.937 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Resistencia longitudinal a corte por fatiga por unidad de largo:

$$V_{fat} := \frac{V_f \cdot Q}{I_{tr_cp_s}} = 0.048 \frac{\text{tonnef}}{\text{mm}}$$

Separación longitudinal máxima normativa:

$$p_{sc_norm} := 600 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga:

$$p_{sc_fatiga} := \frac{n_{sc} \cdot Z_r}{V_{fat}} = 1113.489 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por número requerido:

$$p_{sc_num} := \frac{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{fatiga}}{2} \right)}{n_{sc}} = 436.233 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima:

$$p_{max} := \min(p_{sc_norm}, p_{sc_fatiga}, p_{sc_num}) = 436.233 \text{ mm}$$

Chequeo de requerimientos de separación longitudinal:

Chequeo:

$$p_{sc} = 430 \text{ mm}$$

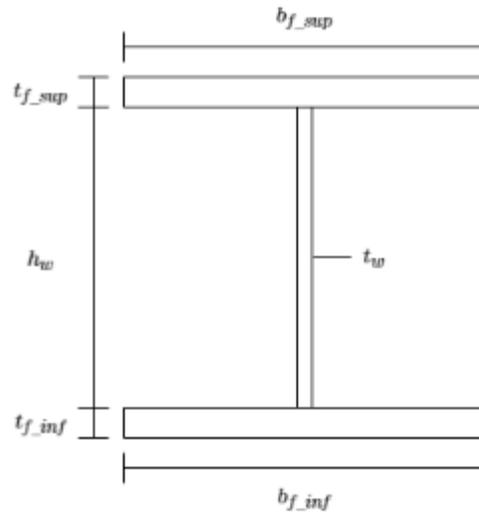
$$\leq p_{max} = 436.233 \text{ mm}$$

OK.

A.7. L = 40 m

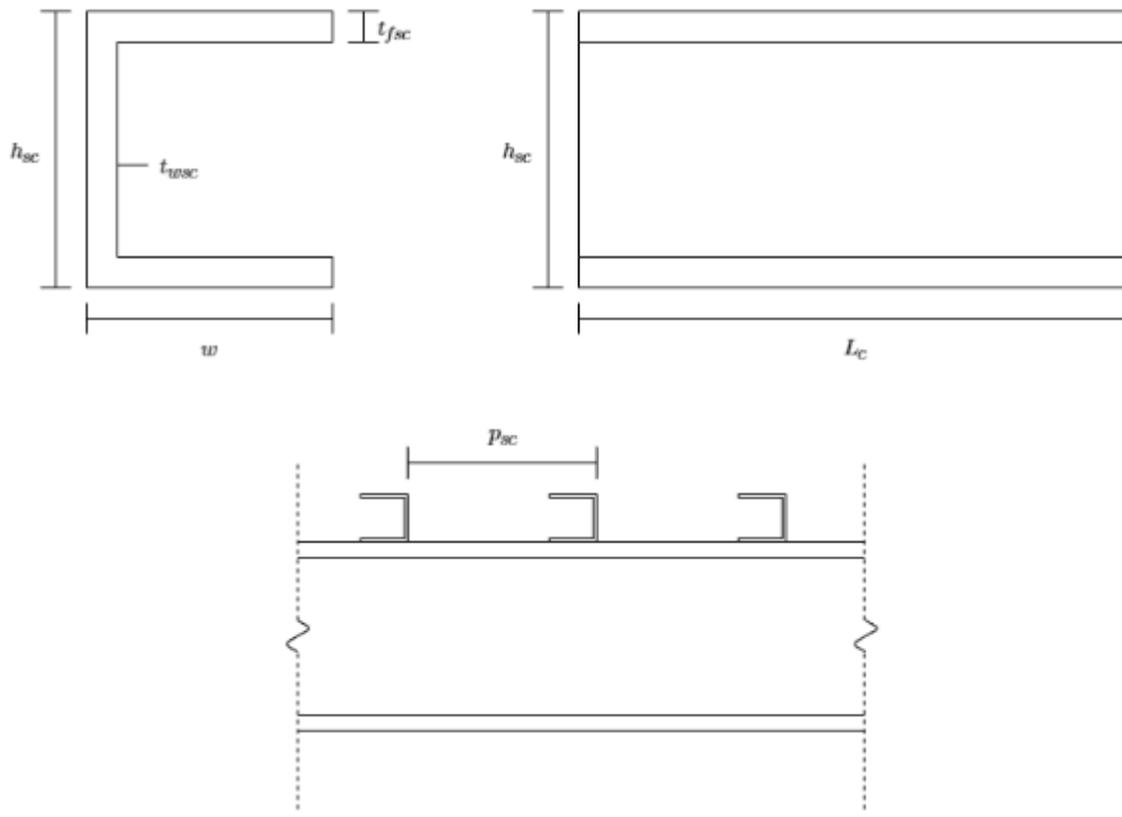
1. DIMENSIONES

1.1. VIGAS DE ACERO



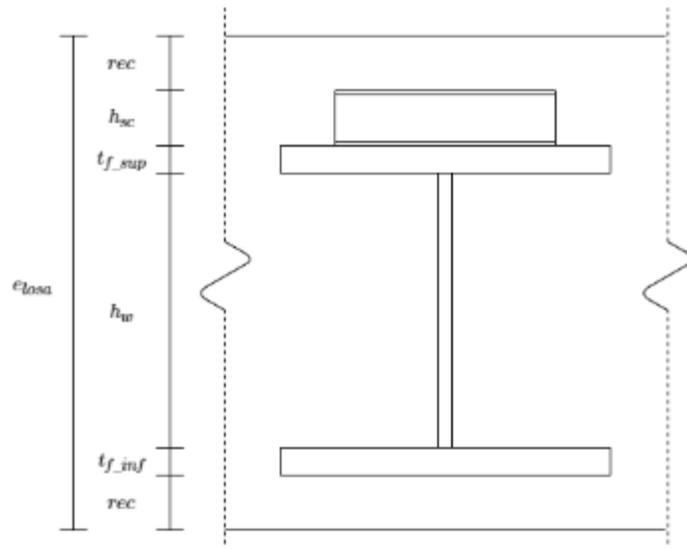
Altura del alma:	$h_w = 940 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_w = 16 \text{ mm}$
Ancho del ala superior:	$b_{f_sup} = 420 \text{ mm}$
Espesor del ala superior:	$t_{f_sup} = 50 \text{ mm}$
Ancho del ala inferior:	$b_{f_inf} = 420 \text{ mm}$
Espesor del ala inferior:	$t_{f_inf} = 50 \text{ mm}$
Área de la sección de acero:	$A_s = 57040 \text{ mm}^2$
Centro de gravedad:	$y_{CG_s} = 520 \text{ mm}$
Momento de inercia:	$I_s = (1.14 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$
Radio de giro:	$r_{y_s} = 104.065 \text{ mm}$
Constante torsional:	$J = (3.628 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$
Módulo elástico de sección:	$S_{x_s} = (2.193 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$
Módulo plástico de sección:	$Z_{x_s} = (2.432 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$

1.2. CONECTORES DE CORTE



Altura:	$h_{sc} := 80 \text{ mm}$
Largo del ala:	$w := 40 \text{ mm}$
Largo del perfil:	$L_c := 300 \text{ mm}$
Espesor del alma:	$t_{wsc} := 4 \text{ mm}$
Espesor del ala:	$t_{fsc} := 4 \text{ mm}$
Número de conectores de corte:	$n_{sc} := 46$
Separación longitudinal:	$p_{sc} := 390 \text{ mm}$

1.3. LOSA DE HORMIGÓN



Recubrimiento de refuerzo:

$$rec_s := 50 \text{ mm}$$

Recubrimiento de conector de corte:

$$rec_{sc} := 70 \text{ mm}$$

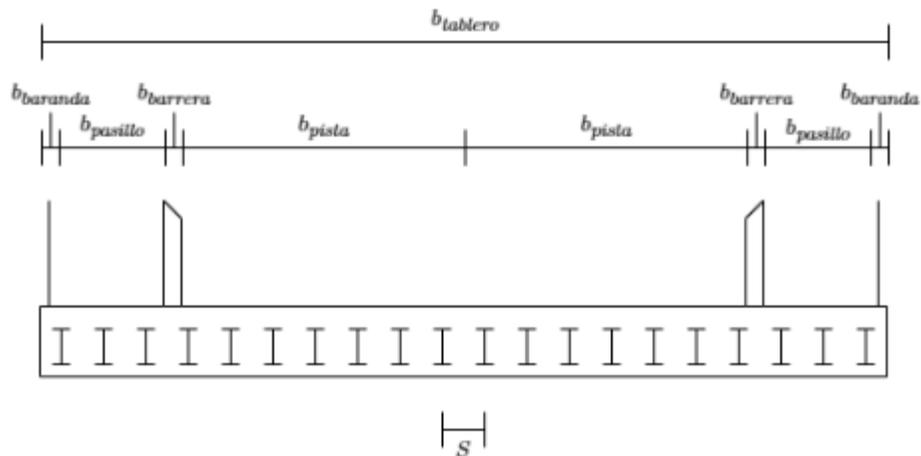
Recubrimiento:

$$rec := \max(rec_s, rec_{sc}) = 70 \text{ mm}$$

Esesor:

$$e_{losa} := 2 \text{ rec} + h_{sc} + h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} = 126 \text{ cm}$$

1.4. TABLERO Y LUZ



Ancho de baranda:

$$b_{baranda} := 15 \text{ cm}$$

Ancho de pasillo:

$$b_{pasillo} := 150 \text{ cm}$$

Ancho de pista:

$$b_{pista} := 400 \text{ cm}$$

Ancho de barrera:

$$b_{barrera} := 36.5 \text{ cm}$$

Área de barrera:

$$A_{barrera} := 2550 \text{ cm}^2$$

Espesor de pavimento:

$$e_{pav} := 5 \text{ cm}$$

Ancho de tablero:

$$b_{tablero} := 2 (b_{baranda} + b_{pasillo} + b_{barrera} + b_{pista})$$

$$b_{tablero} = 12.03 \text{ m}$$

Número de vigas:

$$N_b := 20$$

Separación de vigas:

$$S := 0.6 \text{ m}$$

Ancho de voladizo:

$$b_{voladizo} := \frac{b_{tablero} - (N_b - 1) S}{2} = 0.315 \text{ m}$$

Largo de vigas:

$$L := 40 \text{ m}$$

Largo no arriostrado:

$$L_b := L = 40 \text{ m}$$

2. MATERIALES

2.1. ACERO ESTRUCTURAL

Tensión de fluencia:	$F_y := 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_{s_viga} := 8.00 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$
Tensión de fluencia del alma:	$F_{yw} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia de las alas:	$F_{yf} := F_y = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en compresión:	$F_{yc} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de fluencia del ala en tracción:	$F_{yt} := F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

2.2. HORMIGÓN

Resistencia específica a compresión:	$f'_c := 250 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_c := 15100 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}} = 238.8 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Módulo de rotura:	$f_r := 0.24 \text{ ksi} \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{\text{ksi}}} = 31.819 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_c := 2.5 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

2.3. ACERO DE REFUERZO

Tensión de fluencia:	$f_y := 4200 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Tensión de rotura:	$f_u := 6300 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Módulo de elasticidad:	$E_s := 2100 \frac{\text{tonnef}}{\text{cm}^2}$
Peso específico:	$\gamma_s := 7.85 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^3}$

3. DISEÑO DE LA LOSA DE HORMIGÓN ARMADO

3.1. CARGAS

3.1.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de losa: $PP_{losa} := \gamma_c \cdot e_{losa} = 3.15 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$

3.1.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento: $PP_{pav} := \gamma_c \cdot e_{pav} = 0.125 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$

Peso propio de baranda: $PP_{baranda} := 0.05 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$

Peso propio de barrera: $PP_{barrera} := \gamma_c \cdot A_{barrera} = 0.638 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$

3.1.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje: $CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$

Carga de rueda segundo y tercer eje: $CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$

Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_camión} := 4.27 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.1.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda: $CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.34 \text{ tonnef} = 5.67 \text{ tonnef}$

Distancia transversal entre ruedas: $a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$

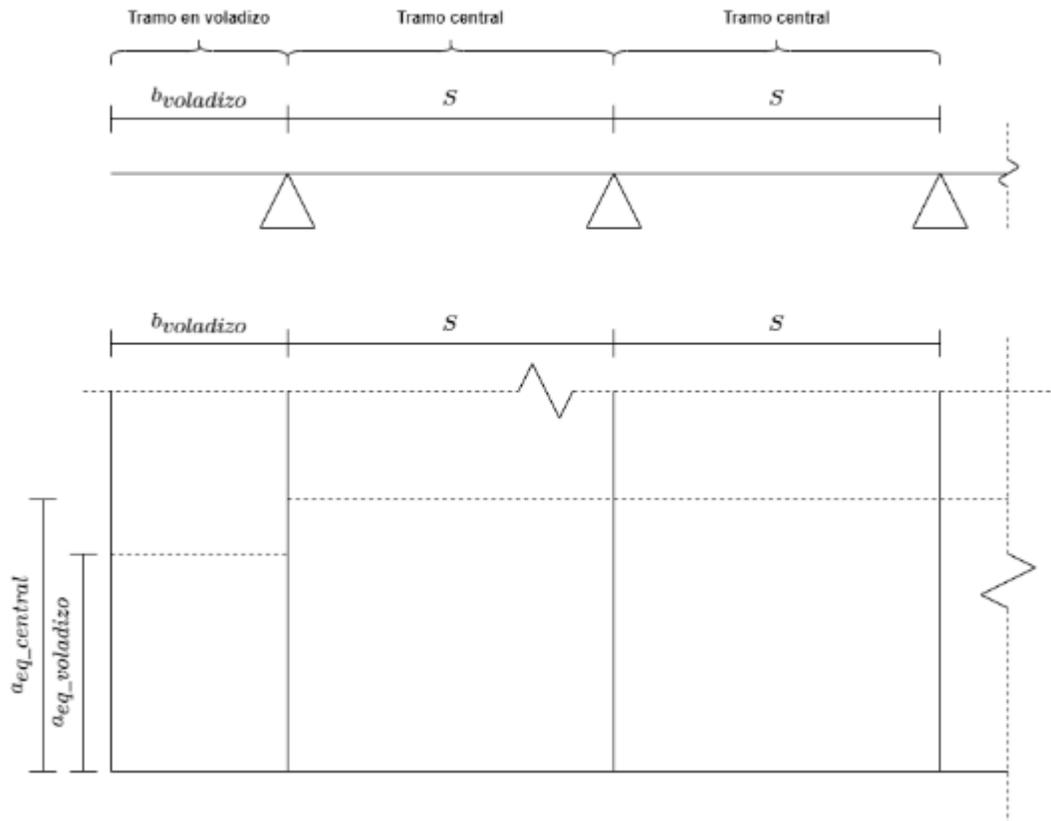
Distancia longitudinal entre ruedas: $a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de tramos centrales: $d_{centrales} := 0.6 \text{ m}$

Distancia a barrera para diseño de voladizos: $d_{voladizo} := 0.3 \text{ m}$

3.2. ANCHO DE FRANJAS EQUIVALENTES

El ancho de las franjas equivalentes se considera en la dirección longitudinal del puente. Para los tramos centrales, el largo es la distancia entre vigas. Para los voladizos, el largo es el ancho de voladizo. Cada tramo de losa se estudia como una viga simplemente apoyada en las vigas de acero.



Ancho de franja equivalente en tramo central:

$$a_{eq_central} := 0.7 \text{ m} + 6.6 S = 4.66 \text{ m}$$

Distancia X para ancho de franja equivalente en voladizo:

$$X := b_{voladizo} - \frac{b_{baranda}}{2} = 0.24 \text{ m}$$

Ancho de franja equivalente en voladizo:

$$a_{eq_voladizo} := 1.2 \text{ m} + 10 X = 3.6 \text{ m}$$

3.3. DISEÑO DE TRAMOS CENTRALES

Reacción en apoyos por carga muerta:

$$R_{DC} := \frac{PP_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} \cdot a_{eq_central} = 8.829 \text{ tonnef}$$

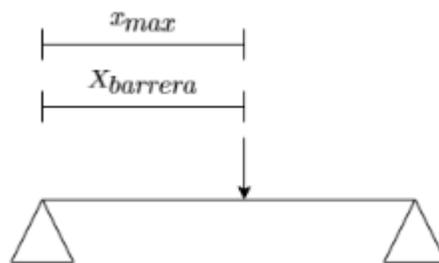
Reacción en apoyos por carga muerta superpuesta:

$$R_{DW} := \left(\frac{PP_{pav} \cdot b_{tablero} + 2 PP_{baranda} + 2 PP_{barrera}}{N_b} \right) \cdot a_{eq_central}$$

$$R_{DW} = 0.671 \text{ tonnef}$$

3.3.1. CASO 1: TRAMO CON BARRERA

Se considera el tramo en el que se ubica la barrera de contención.
El momento máximo se da en el punto central de la barrera.



Distancia de barrera a apoyo más cercano al extremo:

$$X_{barrera} := b_{baranda} + b_{pasillo} + \frac{b_{barrera}}{2} - b_{voladizo} - 2 S = 0.318 \text{ m}$$

Momento en caso tramo con barrera:

$$M_{caso1} := (R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{barrera} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{barrera}^2$$

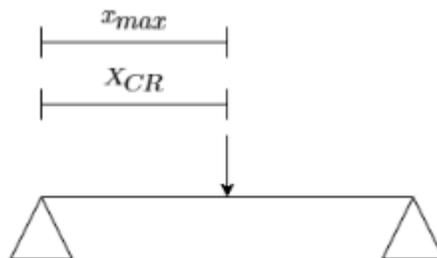
$$M_{caso1} = 2.247 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

3.3.2. CASO 2: TRAMO CON CAMIÓN Ó TÁNDEM

Se considera el tramo con camión de diseño o tándem de diseño.

Se consideran las ruedas más pesadas posibles dentro del ancho efectivo.

El momento máximo se da bajo las ruedas, cuando éstas se ubican en el centro del tramo.



Distancia de carga de rueda a apoyo más desfavorable:	$X_{CR} := \frac{S}{2} = 0.3 \text{ m}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por camión de diseño:	$R_{camión} := \frac{2 CR_{camión\ 2\ 3} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 8.71 \text{ tonnef}$
Reacción en apoyo más cercano al extremo por tándem de diseño:	$R_{tándem} := \frac{2 CR_{tándem} \cdot (S - X_{CR})}{S} = 5.67 \text{ tonnef}$
Reacción de carga viva más desfavorable:	$R_{LL} := \max(R_{camión}, R_{tándem}) = 8.71 \text{ tonnef}$
Carga de rueda más desfavorable:	$CR_{LL} := \max(2 CR_{camión\ 2\ 3}, 2 CR_{tándem})$ $CR_{LL} = 17.42 \text{ tonnef}$
Momento máximo en caso tramo sin barrera:	$M_{caso2} := (R_{LL} + R_{DC} + R_{DW}) \cdot X_{CR} - (PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_central} \cdot 0.5 \cdot X_{CR}^2$ $M_{caso2} = 4.776 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

3.3.3. ACERO DE REFUERZO

3.3.3.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo en la franja equivalente:	$M_u := \max(M_{caso1}, M_{caso2}) = 4.776 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$
Factor de resistencia para hormigón armado:	$\phi_c := 0.9$
Refuerzo principal requerido:	$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$ $A_{p_req} = 1.044 \text{ cm}^2$
Refuerzo mínimo:	$A_{p_min} := 0.0009 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 11.34 \text{ cm}^2$
Refuerzo dispuesto:	$\phi 18@25 + \phi 18@25$
Refuerzo dispuesto:	$A_p = 20.358 \text{ cm}^2$

3.3.3.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución:
$$Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$$

Refuerzo requerido:
$$A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 13.64 \text{ cm}^2$$

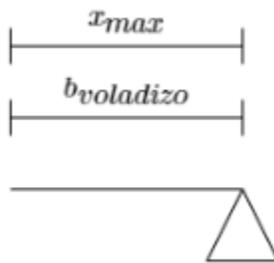
Refuerzo dispuesto:
$$\phi 18@25 + \phi 18@25$$

Refuerzo dispuesto:
$$A_{sec} = 20.358 \text{ cm}^2$$

3.4. DISEÑO DE VOLADIZOS

Se considera el tramo en voladizo.

El momento máximo se da en el apoyo.



Momento máximo en voladizo:
$$M_{voladizo} := -(PP_{losa} + PP_{pav}) \cdot a_{eq_voladizo} \cdot 0.5 \cdot b_{voladizo}^2$$

$$M_{voladizo} = -0.585 \text{ tonnef} \cdot m$$

3.4.1. ACERO DE REFUERZO

3.4.1.1. DIRECCIÓN PRINCIPAL

Momento máximo total en la franja equivalente:
$$M_u := -M_{voladizo} = 0.585 \text{ tonnef} \cdot m$$

Factor de resistencia para hormigón armado:
$$\phi_c := 0.9$$

Refuerzo principal requerido:

$$A_{p_req} := \frac{\phi_c \cdot f_y \cdot (e_{losa} - rec_s) - \sqrt{\phi_c^2 \cdot f_y^2 \cdot (e_{losa} - rec_s)^2 - \frac{4 \cdot \phi_c \cdot f_y^2 \cdot M_u}{1.7 \cdot f'_c \cdot a_{eq_central}}}}{2 \cdot \phi_c \cdot f_y^2}$$

$$A_{p_req} = 0.128 \text{ cm}^2$$

Refuerzo mínimo: $A_{p_min} := 0.0009 \cdot e_{losa} \cdot 1 \text{ m} = 11.34 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 18@25 + \phi 18@25$

Refuerzo dispuesto: $A_p = 20.358 \text{ cm}^2$

3.4.1.2. DIRECCIÓN SECUNDARIA

Porcentaje de refuerzo de distribución: $Porcentaje_{req} := \min \left(\frac{121}{\sqrt{\frac{S}{m}}} \%, 67\% \right) = 67\%$

Refuerzo requerido: $A_{sec_req} := Porcentaje_{req} \cdot A_p = 13.64 \text{ cm}^2$

Refuerzo dispuesto: $\phi 18@25 + \phi 18@25$

Refuerzo dispuesto: $A_{sec} = 20.358 \text{ cm}^2$

4. DISEÑO DE LAS VIGAS COMPUESTAS

4.1. PROPIEDADES

Ancho efectivo colaborante de la losa para viga interior:

$$b_s := S = 0.6 \text{ m}$$

Espesor de la losa de hormigón:

$$t_s := e_{losa} = 126 \text{ cm}$$

Razón entre módulos de elasticidad:

$$n := \frac{E_s}{E_c} = 8.796$$

4.2. CARGAS

4.2.1. CARGA MUERTA (DC)

Peso propio de viga de acero:

$$PP_{viga} := \gamma_s \cdot viga \cdot A_s = 0.456 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de losa para cada viga:

$$PP_{losa} := \frac{\gamma_c \cdot e_{losa} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 1.895 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.2. CARGA MUERTA SUPERPUESTA (DW)

Peso propio de pavimento para cada viga

$$PP_{pav} := \frac{\gamma_c \cdot e_{pav} \cdot b_{tablero}}{N_b} = 0.075 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de baranda para cada viga:

$$PP_{baranda} := \frac{2 PP_{baranda}}{N_b} = 0.005 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Peso propio de barrera para cada viga:

$$PP_{barrera} := \frac{2 PP_{barrera}}{N_b} = 0.064 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.3. CAMIÓN DE DISEÑO

Carga de rueda primer eje:
Carga de rueda segundo y tercer eje:

$$CR_{camión_1} := 0.5 \cdot 4.36 \text{ tonnef} = 2.18 \text{ tonnef}$$

$$CR_{camión_2_3} := 0.5 \cdot 17.42 \text{ tonnef} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre ruedas:

$$a_{tr_camión} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre dos primeros ejes:

$$a_{lo_camión_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal mínima entre dos últimos ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_min} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal
máxima entre dos últimos
ejes:

$$a_{lo_camión_2_3_max} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia transversal a
barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.4. TÁNDEM DE DISEÑO

Carga de rueda:

$$CR_{tándem} := 0.5 \cdot 11.4 \text{ tonnef} = 5.7 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre
ruedas:

$$a_{tr_tándem} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
ruedas:

$$a_{lo_tándem} := 1.22 \text{ m}$$

Distancia transversal a
barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

4.2.5. CARGA DE FAJA

Carga de faja:

$$q_{faja} := 0.952 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

4.2.6. COEFICIENTE DE IMPACTO DINÁMICO (IM)

Coeficiente de impacto
dinámico para estado límite
de fatiga:

$$IM_{fatiga} := 15\%$$

Coeficiente de impacto
dinámico para el resto de
cálculos:

$$IM := 33\%$$

4.2.7. CARGA DE FATIGA

Carga de rueda primer eje:

$$CR_{fatiga_1} := CR_{camión_1} = 2.18 \text{ tonnef}$$

Carga de rueda segundo y
tercer eje:

$$CR_{fatiga_2_3} := CR_{camión_2_3} = 8.71 \text{ tonnef}$$

Distancia transversal entre
ruedas:

$$a_{tr_fatiga} := 1.83 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
dos primeros ejes

$$a_{lo_fatiga_1_2} := 4.27 \text{ m}$$

Distancia longitudinal entre
dos últimos ejes:

$$a_{lo_fatiga_2_3} := 9.15 \text{ m}$$

Distancia a barrera:

$$d := 0.6 \text{ m}$$

Tránsito medio diario anual:

$$ADTT := 3000$$

Factor p para dos fajas de
tránsito:

$$p := 0.85$$

Frecuencia de carga de fatiga:

$$ADTT_{SL} := p \cdot ADTT = 2550$$

4.3. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN

Se considera que la sección transversal se deforma y rota como un cuerpo rígido.

Factor de presencia múltiple para 1 vía cargada:

$$m_1 := 1.20$$

Factor de presencia múltiple para 2 vías cargadas:

$$m_2 := 1.00$$

1 vía cargada:

$$N_{L,1} := 1$$

2 vías cargadas:

$$N_{L,2} := 2$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 1:

$$e_1 := b_{pista} - d - 0.5 a_{tr_camión} = 2.485 \text{ m}$$

Excentricidad de la carga viva de la vía cargada 2:

$$e_2 := e_1 = 2.485 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y la viga exterior:

$$X_{ext} := 0.5 b_{tablero} - b_{voladizo} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las primeras vigas:

$$X_1 := X_{ext} = 5.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las segundas vigas:

$$X_2 := X_{ext} - S = 5.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las terceras vigas:

$$X_3 := X_2 - S = 4.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las cuartas vigas:

$$X_4 := X_3 - S = 3.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las quintas vigas:

$$X_5 := X_4 - S = 3.3 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las sextas vigas:

$$X_6 := X_5 - S = 2.7 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las séptimas vigas:

$$X_7 := X_6 - S = 2.1 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las octavas vigas:

$$X_8 := X_7 - S = 1.5 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las novenas vigas:

$$X_9 := X_8 - S = 0.9 \text{ m}$$

Distancia entre el centro del tablero y las décimas vigas:

$$X_{10} := X_9 - S = 0.3 \text{ m}$$

4.3.1. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA MOMENTO

Factor de distribución para momento para 1 vía cargada:

$$g_{M_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para momento para 2 vías cargadas:

$$g_{M_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.3.2. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN PARA CORTE

Factor de distribución para corte para 1 vía cargada:

$$g_{V_1} := m_1 \cdot \left(\frac{N_{L1}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.131$$

Factor de distribución para corte para 2 vías cargadas:

$$g_{V_2} := m_2 \cdot \left(\frac{N_{L2}}{N_b} + \frac{X_{ext} \cdot (e_1 + e_2)}{2 (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + X_5^2 + X_6^2 + X_7^2 + X_8^2 + X_9^2 + X_{10}^2)} \right) = 0.218$$

4.4. DISEÑO A FLEXIÓN

Factor de resistencia a flexión: $\phi_f := 1.0$

4.4.1. CONSTRUCCIÓN

4.4.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Área de la sección: $A_s := A_s = 57040 \text{ mm}^2$
 Distancia entre los centroides de las alas: $h := h_w + 0.5 t_{f_inf} + 0.5 t_{f_sup} = 990 \text{ mm}$

Momento de inercia: $I_s := I_s = (1.14 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$

Constante torsional: $J := J = (3.628 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$

Módulo elástico de la sección para el ala en compresión: $S_{xc} := S_{x_s} = (2.193 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$

Módulo elástico de la sección para el ala en tracción: $S_{xt} := S_{xc} \cdot \frac{y_{CG_s}}{(h_w + t_{f_sup} + t_{f_inf} - y_{CG_s})} = (2.193 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$

Módulo plástico de la sección para el ala en compresión: $Z_{xc} := Z_{x_s} = (2.432 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$

Radio de giro: $r_y := r_{y_s} = 104.065 \text{ mm}$

Radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional: $r_t := \sqrt{\frac{I_s \cdot h}{2 S_{xc}}} = 507.346 \text{ mm}$

Tensión en el ala en compresión en el punto de fluencia: $F_{yr} := \min\left(0.7 F_{yc}, F_{yt} \cdot \frac{S_{xt}}{S_{xc}}, F_{yw}\right)$

$$F_{yr} := \max(F_{yr}, 0.5 F_{yc}) = 2460.5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Longitud límite para resistencia por fluencia: $L_p := 1.76 r_y \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 4.477 \text{ m}$

Longitud límite para pandeo torsional inelástico: $L_r := 1.95 r_t \cdot \frac{E_s}{F_{yr}} \cdot \sqrt{\frac{J}{S_{xc} \cdot h} + \sqrt{\left(\frac{J}{S_{xc} \cdot h}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{F_{yr}}{E_s}\right)^2}}$

$$L_r = 60.572 \text{ m}$$

4.4.1.2. RESISTENCIA A FLEXIÓN

Combinación de carga: Resistencia I: 1.25 DC

Momento en viga por cargas en construcción: $M(x) := 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{L}{2} \cdot x - 1.25 (PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot \frac{x^2}{2}$

Momento máximo en viga por cargas en construcción: $M_{max} := M\left(\frac{L}{2}\right) = 587.761 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en primer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_A := M\left(\frac{L}{4}\right) = 440.821 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en segundo cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_B := M\left(\frac{L}{2}\right) = 587.761 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento en tercer cuarto de la viga por cargas en construcción: $M_C := M\left(\frac{L}{4}\right) = 440.821 \text{ tonnef} \cdot m$

Factor de modificación por pandeo lateral torsional: $C_b := \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} = 1.136$

Momento plástico: $R_{pc} M_{yc} := F_{yc} \cdot Z_{xc} = 855.003 \text{ tonnef} \cdot m$

Tensión crítica: $F_{cr} := \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E_s}{\left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + 0.0078 \frac{J}{S_{xc} \cdot h} \cdot \left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2}$

$$F_{cr} = 3939.532 \frac{kgf}{cm^2}$$

Resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$M_{nc} := \begin{cases} \text{if } L_b \leq L_p \\ \quad \parallel R_{pc} M_{yc} \\ \text{else if } L_b \leq L_r \\ \quad \parallel C_b \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{F_{yr} \cdot S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}}\right) \cdot \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right) \cdot R_{pc} M_{yc} \\ \text{else} \\ \quad \parallel F_{cr} \cdot S_{xc} \end{cases}$$

$$M_{nc} := \min(M_{nc}, R_{pc} M_{yc}) = 744.589 \text{ tonnef} \cdot m$$

Esfuerzo de resistencia nominal a flexión en el ala en compresión:

$$F_{nc} := \frac{M_{nc}}{S_{xc}} = 3395.517 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Momento último:

$$M_u := M_{max} = 587.761 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo en el ala en compresión:

$$f_{bu} := \frac{M_u}{S_{xc}} = 2680.341 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Chequeo de requerimientos por flexión en etapas críticas de construcción:

Primer chequeo: $f_{bu} = 2680.341 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{yc} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f_{bu} = 2680.341 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq \phi_f \cdot F_{nc} = 3395.517 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

4.4.1.3. DEFORMACIÓN POR CARGAS MUERTAS

Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW

Flecha por carga muerta DC: $flecha_{DC} := \frac{5 (PP_{losa} + PP_{viga}) L^4}{384 E_s \cdot I_s} = 327.27 \text{ mm}$

Flecha por carga muerta superpuesta DW: $flecha_{DW} := \frac{5 (PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^4}{384 E_s \cdot I_s}$

$$flecha_{DW} = 20.036 \text{ mm}$$

Contraflecha total a dar a vigas de acero:

$$contraflecha := flecha_{DC} + flecha_{DW} = 347.306 \text{ mm}$$

4.4.2. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

4.4.2.1. DEFORMACIONES ELÁSTICAS

4.4.2.1.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO

Se debe considerar la rigidez del sistema completo.

Ancho transformado de hormigón:
$$b_{c_tr} := \frac{b_{\text{tablero}}}{n} = 1.368 \text{ m}$$

Centro de gravedad:
$$y_{CG_tr_s} := \frac{N_b \cdot A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr} \cdot 0.5 t_s}{N_b \cdot A_s + t_s \cdot b_{c_tr}} = 64.593 \text{ cm}$$

Inercia del sistema completo:
$$I_{\text{sis}} = (I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_tr_s})^2) \cdot N_b + \frac{b_{c_tr} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_tr_s})^2$$

$$I_{\text{sis}} = (4.571 \cdot 10^{11}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.1.2. CÁLCULO DE DEFORMACIONES

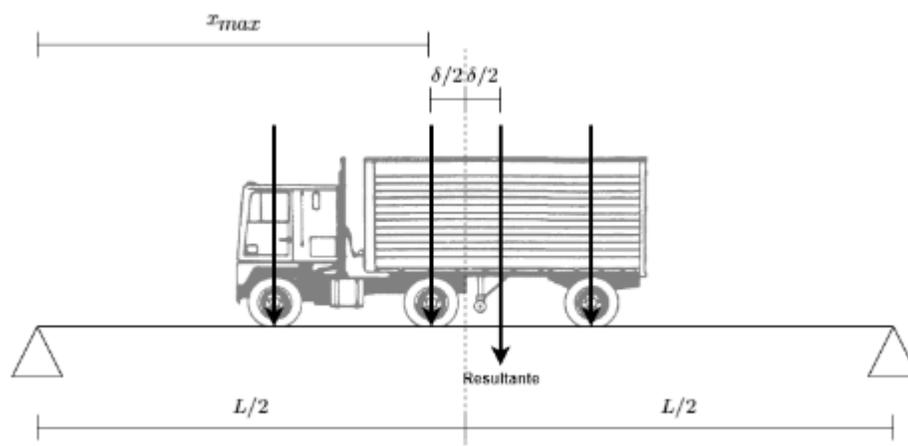
Combinación de carga: Servicio I: 1.0 DC + 1.0 DW + 1.0 IM LL

Carga muerta es contrarrestada por la contraflecha durante etapas de construcción.
Se deben cargar todas las vías de diseño.

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:

Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.

La flecha máxima se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{\text{camión}} = \frac{-2 CR_{\text{camión}_1} \cdot a_{\text{to}_\text{camión}_1,2} + 2 CR_{\text{camión}_2,3} \cdot a_{\text{to}_\text{camión}_2,3_{\text{min}}}}{2 CR_{\text{camión}_1} + 4 CR_{\text{camión}_2,3}}$$

$$\delta_{\text{camión}} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{\text{camión}} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{\text{camión}_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{\text{to}_\text{camión}_1,2} + \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) + \frac{2 CR_{\text{camión}_2,3}}{L} \cdot (L - a_{\text{to}_\text{camión}_2,3_{\text{min}}} + \delta_{\text{camión}}) \right)$$

$$R_{\text{camión}} = 25.141 \text{ tonnef}$$

Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

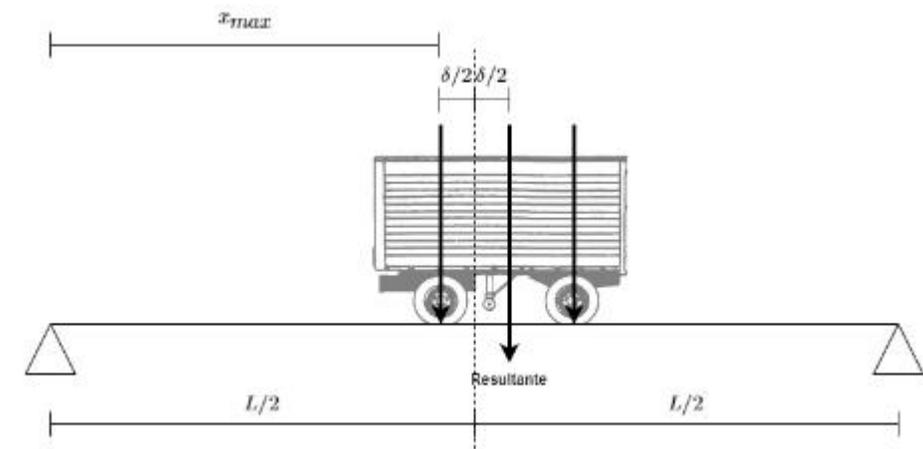
$$M_{\text{camión}}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{to}_\text{camión}_1,2} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{camión}_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{to}_\text{camión}_1,2} \right) \right) \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{\text{camión}_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{to}_\text{camión}_1,2} \right) \right) - 2 CR_{\text{camión}_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) \right) \right) \right. \end{cases}$$

Flecha máxima por camión de diseño:

$$flecha_{\text{camión}} := - \left(\int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right)} \left(\int_0^x \frac{M_{\text{camión}}(x)}{E_s \cdot I_{\text{sist}}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) \cdot \int_0^{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right)} \frac{M_{\text{camión}}(x)}{E_s \cdot I_{\text{sist}}} dx \right) = 6.167 \text{ mm}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

La flecha máxima se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tándem} := \frac{a_{lo_tándem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tándem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \frac{L + \delta_{tándem} - a_{lo_tándem}}{L}$$

$$R_{tándem} = 14.931 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tándem}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \\ \quad \left| \begin{array}{l} R_{tándem} \cdot x \\ \text{else} \\ R_{tándem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right) \end{array} \right. \end{cases}$$

Flecha máxima por tándem de diseño:

$$flecha_{tándem} := - \left(\int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \left(\int_0^x \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) dx - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \cdot \int_0^{\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2}} \frac{M_{tándem}(x)}{E_s \cdot I_{sist}} dx \right) = 3.961 \text{ mm}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Flecha por carga de faja:

$$flecha_{faja}(x) := - \left(\int_0^x \left(\frac{q_{faja} \cdot L \cdot s^2}{4} - \frac{q_{faja} \cdot s^3}{6} \right) ds - x \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{M_{faja}(s)}{E_s \cdot I_{sist}} ds \right)$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja, cargando ambas vías:

Flecha máxima por camión de diseño y carga de faja:

$$flecha_{camión_faja} := 2 \cdot flecha_{camión} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right)$$

$$flecha_{camión_faja} = 18.935 \text{ mm}$$

Flecha máxima por tándem de diseño y carga de faja:

$$flecha_{tándem_faja} := 2 \cdot flecha_{tándem} + 2 \cdot flecha_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right)$$

$$flecha_{tándem_faja} = 14.53 \text{ mm}$$

Flecha máxima por carga viva:

$$flecha_{IM_LL} := \max(flecha_{camión_faja}, flecha_{tándem_faja})$$

$$flecha_{IM_LL} = 18.935 \text{ mm}$$

Deformación máxima por combinación de carga Servicio I: $\Delta_{max} := flecha_{IM_LL} = 18.935 \text{ mm}$

Chequeo de requerimientos por deformaciones elásticas:

Chequeo: $\Delta_{max} = 18.935 \text{ mm} \leq \frac{L}{800} = 50 \text{ mm}$

OK.

4.4.2.2. DEFORMACIONES PERMANENTES

4.4.2.2.1. SECCIÓN RESISTENTE 1: SECCIÓN DE ACERO

Centro de gravedad: $y_{CG_s} = 52 \text{ cm}$

Inercia de la sección de acero: $I_s = (1.14 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$

4.4.2.2.2. SECCIÓN RESISTENTE 2: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_cp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 64.596 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_cp_s})^2 + \frac{b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_cp_s})^2$

$$I_{tr_cp_s} = (2.283 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.3. SECCIÓN RESISTENTE 3: SECCIÓN COMPUESTA EN EL LARGO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_lp_s} := \frac{S}{3 n} = 0.023 \text{ m}$

Centro de gravedad: $y_{CG_lp_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_lp_s}} = 65.663 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta:

$$I_{tr_lp_s} = I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_lp_s})^2 + \frac{b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s^3}{12} + b_{c_tr_lp_s} \cdot t_s \cdot (0.5 t_s - y_{CG_lp_s})^2$$

$$I_{tr_lp_s} = (1.522 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.4. SECCIÓN RESISTENTE 4: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO Y LARGO PLAZO TRANSFORMADA A HORMIGÓN

Se considera el hormigón efectivo tanto en compresión como en tracción.

Espesor del alma transformado:

$$t_{w_tr_c} := t_w \cdot n = 14.073 \text{ cm}$$

Ancho del ala superior transformado:

$$b_{f_sup_tr_c} := b_{f_sup} \cdot n = 369.421 \text{ cm}$$

Ancho del ala inferior transformado:

$$b_{f_inf_tr_c} := b_{f_inf} \cdot n = 369.421 \text{ cm}$$

Centro de gravedad:

$$y_{CG_tr_c} := \frac{A_s \cdot n \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot S \cdot 0.5 t_s}{A_s \cdot n + t_s \cdot S} = 64.596 \text{ cm}$$

Momento de inercia:

$$I_{tr_c} = (2.008 \cdot 10^{11}) \text{ mm}^4$$

4.4.2.2.5. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Servicio II:

$$1.0 \text{ DC} + 1.0 \text{ DW} + 1.3 \text{ IM LL}$$

Momento máximo por carga muerta DC:

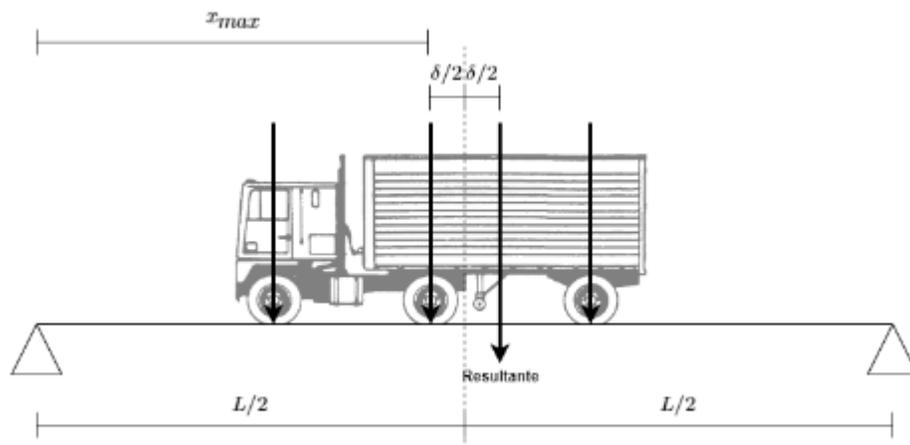
$$M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 470.209 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga muerta superpuesta DW:

$$M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$$

$$M_{DW} = 28.788 \text{ tonnef} \cdot m$$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
 Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
 El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{camión} = \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_camión_1,2} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_camión_2,3_min}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$$

$$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{camión} = (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_camión_1,2} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_camión_2,3_min} + \delta_{camión}) \right)$$

$$R_{camión} = 25.141 \text{ tonnef}$$

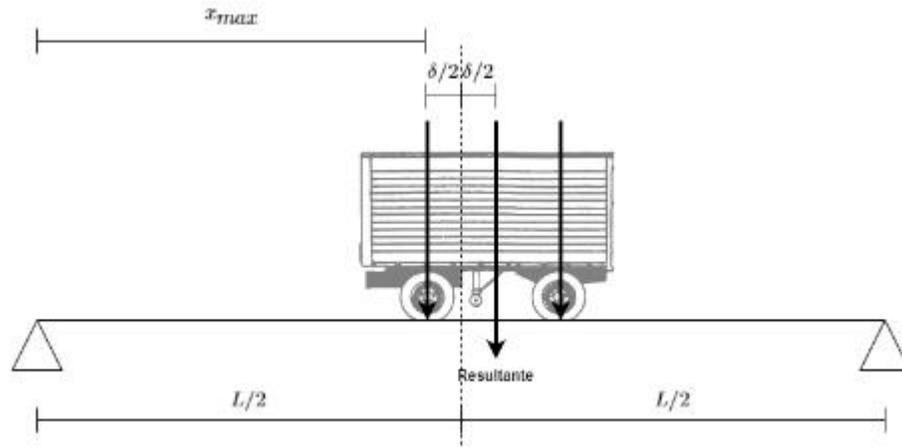
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{camión}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) \\ \text{else} \\ \quad \parallel \\ \quad R_{camión} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{camión_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} - a_{to_camión_1,2} \right) \right) - 2 CR_{camión_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) \right) \right) \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño:

$$M_{max_camión} := M_{camión} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right) = 460.174 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

**Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:
El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.**



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{tándem} := \frac{a_{lo_tándem}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{tándem} := (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \frac{L + \delta_{tándem} - a_{lo_tándem}}{L}$$

$$R_{tándem} = 14.931 \text{ tonnef}$$

Momento entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{tándem}(x) := \begin{cases} R_{tándem} \cdot x & \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \\ R_{tándem} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 \cdot CR_{tándem} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right) & \text{else} \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tándem} := M_{tándem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) = 294.062 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} := \max \left(M_{max_camión} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right), M_{max_tándem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 650.333 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 141.989 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo máximo en el hormigón en tracción:

$$f := \frac{M_{DW} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_s - y_{CG_tr_c})}{I_{tr_c}}$$

$$f = 65.233 \frac{kgf}{cm^2} \quad \leq \quad 2 f_r = 63.637 \frac{kgf}{cm^2}$$

Si el esfuerzo máximo en el hormigón a tracción supera el límite, se considera que el esfuerzo por deformaciones permanentes debe ser calculado utilizando sólo la sección de acero.

Esfuerzo máximo en el ala en compresión de la viga de acero:

$$f_{fc} := \frac{M_{DC} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{fc} = 3117.312 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en el ala en tracción de la viga de acero:

$$f_{ft} := \frac{M_{DC} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + \frac{M_{DW} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s} + 1.3 \frac{M_{LL} \cdot (t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} - y_{CG_s})}{I_s}$$

$$f_{ft} = 3117.312 \frac{kgf}{cm^2}$$

Esfuerzo máximo en la viga de acero:

$$f_f := \max(f_{fc}, f_{ft}) = 3117.312 \frac{kgf}{cm^2}$$

Chequeo de requerimientos por deformaciones permanentes:

Primer chequeo: $f_f = 3117.312 \frac{kgf}{cm^2} \leq 0.95 \cdot F_{yf} = 3339.25 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

Segundo chequeo: $f = 65.233 \frac{kgf}{cm^2} \leq 4 f_r = 127.274 \frac{kgf}{cm^2}$

OK.

4.4.3. ESTADO LÍMITE DE FATIGA

4.4.3.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 940 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.4.3.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| 1.0 \right. \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \right. \end{array} \right\| = 1$$

Resistencia a corte por fluencia:

$$V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 306.62 \text{ tonnef}$$

Corte crítico:

$$V_{cr} := C \cdot V_p = 306.62 \text{ tonnef}$$

4.4.3.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Corte máximo por carga muerta DC:

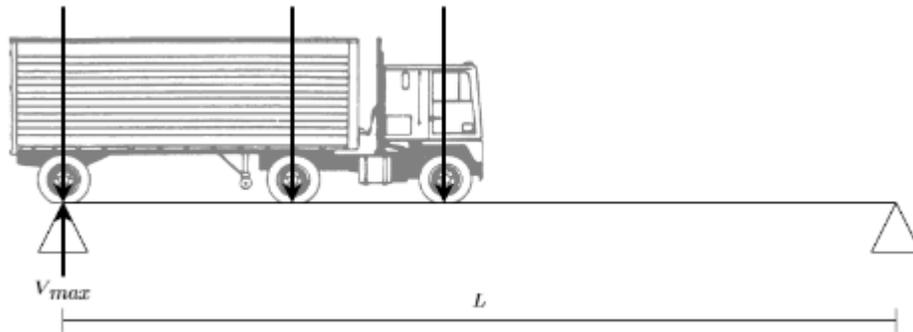
$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 47.021 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 2.879 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1.2} + a_{lo_fatiga_2.3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2.3} - a_{lo_fatiga_1.2}) \right) + \frac{2 CR_{fatiga_2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2.3}) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 38.815 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V.1} \cdot V_{fatiga}, g_{V.2} \cdot V_{fatiga}) = 8.475 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 62.612 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de fatiga:

$$\text{Chequeo: } V_u = 62.612 \text{ tonnef} \quad \leq \quad V_{cr} = 306.62 \text{ tonnef}$$

OK.

4.4.4. ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

4.4.4.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN COMPUESTA EN EL CORTO PLAZO TRANSFORMADA A ACERO

Se considera el hormigón efectivo sólo en compresión.

Ancho transformado de hormigón: $b_{c_tr_s} := \frac{S}{n} = 0.068 \text{ m}$

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 940 \text{ mm}$

Centro de gravedad: $y_{CG_tr_s} := \frac{A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc}) + t_s \cdot b_{c_tr_s} \cdot 0.5 t_s}{A_s + t_s \cdot b_{c_tr_s}}$

$y_{CG_tr_s} = 64.596 \text{ cm}$

Inercia de la sección compuesta: $I_{tr_cp_s} := I_s + A_s \cdot (y_{CG_s} + rec + h_{sc} - y_{CG_tr_s})^2 + \frac{b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s}^3}{12} + b_{c_tr_s} \cdot y_{CG_tr_s} \cdot (0.5 y_{CG_tr_s})^2$

$I_{tr_cp_s} = (1.756 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$

Profundidad de la sección compuesta: $D_t := t_s = 126 \text{ cm}$

4.4.4.2. MOMENTO PLÁSTICO

Eje neutro plástico desde el borde superior de la losa:

$$c := \begin{cases} \text{if } 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc}) \geq F_y \cdot A_s \\ \quad \frac{F_y \cdot A_s}{0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup}) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \geq F_y \cdot (h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \quad \frac{F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} + 2 rec + 2 h_{sc}) + h_w \cdot t_w + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf})}{2 F_y \cdot b_{f_sup} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else if } F_y \cdot (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + h_w \cdot t_w) + 0.85 f'_c \cdot b_s \cdot (rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \geq F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot t_{f_inf}) \\ \quad \frac{F_y \cdot (t_w \cdot (h_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup})}{2 F_y \cdot t_w + 0.85 f'_c \cdot b_s} \\ \text{else} \\ \quad \frac{F_y \cdot (b_{f_inf} \cdot (t_w + 2 rec + 2 h_{sc} + 2 t_{f_sup} + 2 h_w) - b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} - h_w \cdot t_w)}{2 F_y \cdot b_{f_inf} + 0.85 f'_c \cdot b_s} \end{cases}$$

$c = 31.403 \text{ cm}$

Área de hormigón a compresión: $A_{c_c} := b_s \cdot c = 1884.197 \text{ cm}^2$

Área de acero a compresión:

$$A_{s,c} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel 0 \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \\ \text{else} \\ \quad \parallel A_s \end{cases}$$

$$A_{s,c} = 228.245 \text{ cm}^2$$

Área de acero a tracción:

$$A_{s,t} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel A_s \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel A_s - b_{f,sup} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel A_s - (b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)) \\ \text{else} \\ \quad \parallel 0 \end{cases}$$

$$A_{s,t} = 342.155 \text{ cm}^2$$

Centro del área del hormigón en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{c,c}} := \frac{c}{2} = 15.702 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en compresión desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s,c}} := \begin{cases} \text{if } c \leq \text{rec} + h_{sc} \\ \quad \parallel \text{"No aplica"} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc}) \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}) \cdot (t_{f,sup} + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup}))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup})} \\ \text{else if } c \leq \text{rec} + h_{sc} + t_{f,sup} + h_w + t_{f,inf} \\ \quad \parallel \frac{\text{rec} + h_{sc} + \frac{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} \cdot (0.5 \cdot t_{f,sup}) + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w) \cdot (t_{f,sup} + h_w + 0.5 \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w))}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)}}{b_{f,sup} \cdot t_{f,sup} + t_w \cdot h_w + b_{f,inf} \cdot (c - \text{rec} - h_{sc} - t_{f,sup} - h_w)} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{rec} + h_{sc} + y_{CG_{c,c}} \end{cases}$$

$$y_{CG_{s_c}} = 18.156 \text{ cm}$$

Centro del área de acero en tracción desde el borde superior de la losa:

$$y_{CG_{s_t}} = \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ rec + h_{sc} + y_{CG_{s_c}} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ c + \frac{b_{f_sup} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc}) + h_w \cdot t_w \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + 0.5 h_w) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (t_{f_sup} - c + rec + h_{sc} + h_w + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - b_{f_sup} \cdot (c - rec - h_{sc})} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ c + \frac{t_w \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) \cdot 0.5 \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup}) + b_{f_inf} \cdot t_{f_inf} \cdot (h_w - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + 0.5 t_{f_inf})}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}))} \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ c + \frac{b_{f_inf} \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w) \cdot 0.5 \cdot (t_{f_inf} - c + rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w)}{A_s - (b_{f_sup} \cdot t_{f_sup} + t_w \cdot h_w + b_{f_inf} \cdot (c - rec - h_{sc} - t_{f_sup} - h_w))} \\ \text{else} \\ \text{"No aplica"} \end{cases}$$

$$y_{CG_{s_t}} = 99.583 \text{ cm}$$

Distancia desde el borde superior de la losa al eje neutro plástico:

$$D_p := c = 31.403 \text{ cm}$$

Profundidad del alma de la viga de acero a compresión:

$$D_{cp} := \max(c - rec - h_{sc} - t_{f_sup}, 0 \text{ cm}) = 11.403 \text{ cm}$$

Momento plástico:

$$M_p = \begin{cases} \text{if } c \leq rec + h_{sc} \\ \left\| 0.85 f_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} \\ \left\| 0.85 f_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w \\ \left\| 0.85 f_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right\| \\ \text{else if } c \leq rec + h_{sc} + t_{f_sup} + h_w + t_{f_inf} \\ \left\| 0.85 f_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) + F_y \cdot A_{s_t} \cdot (y_{CG_{s_t}} - c) \right\| \\ \text{else} \\ \left\| 0.85 f_c \cdot c \cdot b_s \cdot 0.5 \cdot c + F_y \cdot A_{s_c} \cdot (c - y_{CG_{s_c}}) \right\| \end{cases}$$

$$M_p = 989.134 \text{ tonnef} \cdot m$$

4.4.4.3. COMPACIDAD DE LA SECCIÓN

Chequeo de requerimientos de compacidad de la sección:

Primer chequeo: $F_{yf} = 3515 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \leq 4921 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

OK.

Segundo chequeo: $\frac{D}{t_w} = 58.75 \leq 150$

OK.

Tercer chequeo: $\frac{2 D_{cp}}{t_w} = 14.254 \quad \leq \quad 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{F_{yc}}} = 91.904$
 OK.

La sección califica como: **COMPACTA**

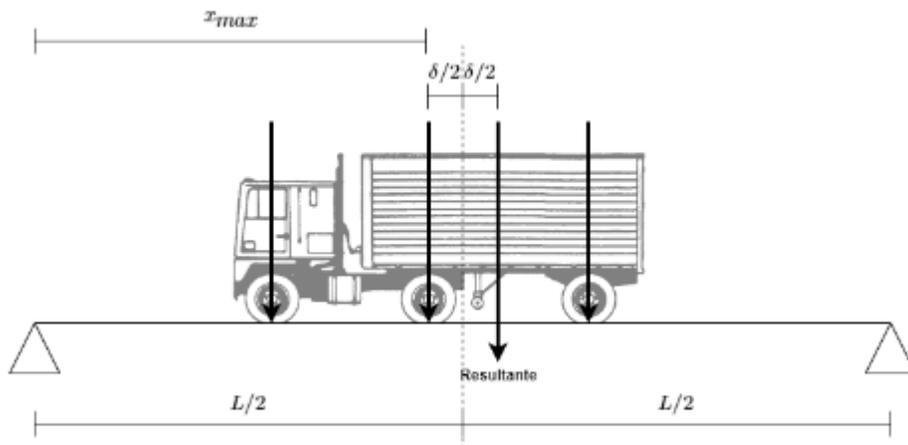
4.4.4.4. CÁLCULO DE ESFUERZOS

Combinación de carga: Resistencia I: **1.25 DC + 1.50 DW + 1.75 IM LL**

Momento máximo por carga muerta DC: $M_{DC} := \frac{(PP_{losa} + PP_{viga}) L^2}{8} = 470.209 \text{ tonnef} \cdot m$

Momento máximo por carga muerta superpuesta DW: $M_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) L^2}{8}$
 $M_{DW} = 28.788 \text{ tonnef} \cdot m$

Posición de camión de diseño que produce el mayor momento:
 Se considera la distancia longitudinal mínima entre los dos últimos ejes.
 El momento máximo se da bajo el segundo eje del camión.



Distancia delta entre segundo eje y resultante: $\delta_{camión} := \frac{-2 CR_{camión_1} \cdot a_{to_{camión_1,2}} + 2 CR_{camión_2,3} \cdot a_{to_{camión_2,3_{min}}}}{2 CR_{camión_1} + 4 CR_{camión_2,3}}$

$\delta_{camión} = 1.423 \text{ m}$

Reacción en apoyo izquierdo: $R_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión_1}}{L} \cdot \left(\frac{L}{2} + a_{to_{camión_1,2}} + \frac{\delta_{camión}}{2} \right) + \frac{2 CR_{camión_2,3}}{L} \cdot (L - a_{to_{camión_2,3_{min}}} + \delta_{camión}) \right)$

$R_{camión} = 25.141 \text{ tonnef}$

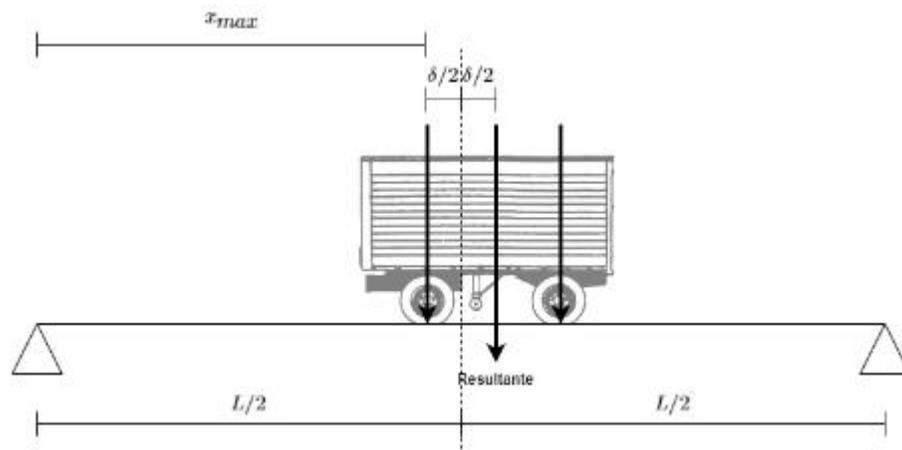
Momento por camión de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{camión}}(x) = \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x \right. \\ \text{else if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{camión}_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \right) \right) \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{camión}} \cdot x - (1 + IM) \cdot \left(2 CR_{\text{camión}_1} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} - a_{\text{lo_camión_1,2}} \right) \right) - 2 CR_{\text{camión}_2,3} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por camión de diseño: $M_{\text{max_camión}} := M_{\text{camión}} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{camión}}}{2} \right) = 460.174 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el eje del tándem más cercano al centro de la luz.



Distancia delta entre eje y resultante:

$$\delta_{\text{tándem}} := \frac{a_{\text{lo_tándem}}}{2} = 0.61 \text{ m}$$

Reacción en apoyo izquierdo:

$$R_{\text{tándem}} := (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \frac{L + \delta_{\text{tándem}} - a_{\text{lo_tándem}}}{L}$$

$$R_{\text{tándem}} = 14.931 \text{ tonnef}$$

Momento por tándem de diseño entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{\text{tándem}}(x) := \begin{cases} \text{if } x \leq \frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| R_{\text{tándem}} \cdot x - (1 + IM) \cdot 2 CR_{\text{tándem}} \cdot \left(x - \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{\text{tándem}}}{2} \right) \right) \right. \end{cases}$$

Momento máximo por tándem de diseño:

$$M_{max_tándem} := M_{tándem} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) = 294.062 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento por carga de faja entre apoyo izquierdo y centro de la luz:

$$M_{faja}(x) := \frac{q_{faja} \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q_{faja} \cdot x^2}{2}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Momento máximo por carga viva LL:

$$M_{LL} = \max \left(M_{max_camión} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{camión}}{2} \right), M_{max_tándem} + M_{faja} \left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{tándem}}{2} \right) \right)$$

$$M_{LL} = 650.333 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento máximo por carga viva distribuido:

$$M_{LL} := \max (g_{M_1} \cdot M_{LL}, g_{M_2} \cdot M_{LL}) = 141.989 \text{ tonnef} \cdot m$$

Momento último:

$$M_u := 1.25 \cdot M_{DC} + 1.50 M_{DW} + 1.75 \cdot M_{LL}$$

$$M_u = 879.424 \text{ tonnef} \cdot m$$

Resistencia nominal a flexión:

$$M_n := \left\| \begin{array}{l} \text{if } D_p \leq 0.1 D_t \\ \left\| M_p \right\| \\ \text{else} \\ \left\| M_p \cdot \left(1.07 - 0.7 \frac{D_p}{D_t} \right) \right\| \end{array} \right\| = 885.806 \text{ tonnef} \cdot m$$

Chequeo de requerimientos por estado límite de resistencia:

Chequeo: $M_u = 879.424 \text{ tonnef} \cdot m \leq \phi_f \cdot M_n = 885.806 \text{ tonnef} \cdot m$

OK.

4.4.4.5. DUCTILIDAD

Chequeo de requerimientos de ductilidad:

Chequeo: $D_p = 31.403 \text{ cm} \leq 0.42 D_t = 52.92 \text{ cm}$

OK.

4.5. DISEÑO A CORTE

Factor de resistencia a corte: $\phi_v := 1.0$

4.5.1. SECCIÓN RESISTENTE: SECCIÓN DE ACERO

Profundidad del alma de la viga de acero: $D := h_w = 940 \text{ mm}$

Coefficiente de pandeo por corte: $k := 5$

4.5.2. RESISTENCIA AL CORTE

Relación entre resistencia por pandeo y por fluencia:

$$C := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \frac{D}{t_w} \leq 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| 1.0 \right. \\ \text{else if } \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)} \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}} \right. \\ \text{else} \\ \quad \left\| \frac{1.12}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \cdot \left(\frac{E_s \cdot k}{F_{yw}}\right) \right. \end{array} \right\| = 1$$

Resistencia a corte por fluencia: $V_p := 0.58 F_{yw} \cdot D \cdot t_w = 306.62 \text{ tonnef}$

Resistencia nominal al corte: $V_n := C \cdot V_p = 306.62 \text{ tonnef}$

4.5.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS

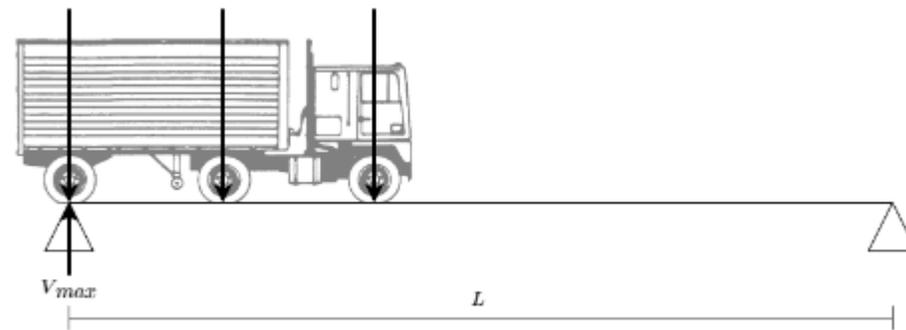
Combinación de carga: Resistencia I: $1.25 \text{ DC} + 1.50 \text{ DW} + 1.75 \text{ IM LL}$

Corte máximo por carga muerta DC: $V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 47.021 \text{ tonnef}$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW: $V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 2.879 \text{ tonnef}$

Posición de camión de diseño que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje del camión.



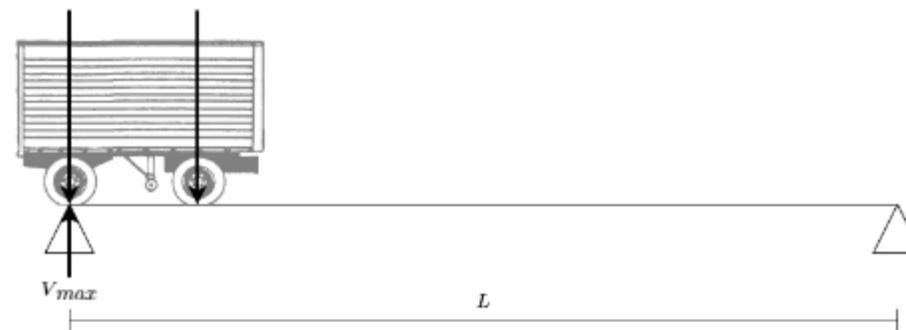
Corte máximo por camión de diseño:

$$V_{camión} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{camión.1}}{L} \cdot (L - a_{lo_camión.2.3_min} - a_{lo_camión.1.2}) + \frac{2 CR_{camión.2.3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_camión.2.3_min}) \right)$$

$$V_{camión} = 48.425 \text{ tonnef}$$

Posición de tándem de diseño que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el segundo eje del tándem.



Corte máximo por tándem de diseño:

$$V_{tándem} := (1 + IM) \cdot \left(\frac{2 CR_{tándem}}{L} \cdot (2L - a_{lo_tándem}) \right)$$

$$V_{tándem} = 29.862 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de faja:

$$V_{faja} := \frac{q_{faja} \cdot L}{2} = 19.04 \text{ tonnef}$$

Se debe considerar la combinación más desfavorable entre camión de diseño y carga de faja ó tándem de diseño y carga de faja:

Corte máximo por carga viva LL:

$$V_{LL} := \max(V_{camión} + V_{faja}, V_{tándem} + V_{faja})$$

$$V_{LL} = 67.465 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga viva distribuido:

$$V_{LL} := \max(g_{V_1} \cdot V_{LL}, g_{V_2} \cdot V_{LL}) = 14.73 \text{ tonnef}$$

Corte último:

$$V_u := 1.25 V_{DC} + 1.50 V_{DW} + 1.75 V_{LL}$$

$$V_u = 88.871 \text{ tonnef}$$

Chequeo de requerimientos de resistencia al corte:

Chequeo: $V_u = 88.871 \text{ tonnef} \leq \phi_v \cdot V_n = 306.62 \text{ tonnef}$

OK.

5. CONECTORES DE CORTE

Factor de resistencia de conectores de corte:

$$\phi_{sc} := 0.85$$

Resistencia a la fatiga de un conector de corte:

$$Z_r := 0.375 \text{ tonnef} \cdot \frac{w}{cm} = 1.5 \text{ tonnef}$$

Fuerza de corte nominal:

$$P := \min(0.85 f'_c \cdot b_s \cdot t_s, F_{yw} \cdot D \cdot t_w + F_{yt} \cdot b_{f.inj} \cdot t_{f.inj} + F_{yc} \cdot b_{f.smp} \cdot t_{f.smp})$$

$$P = 1606.5 \text{ tonnef}$$

Resistencia nominal al corte de un conector de corte:

$$Q_n := 0.3 \cdot (t_{f.sc} + 0.5 t_{w.sc}) \cdot L_c \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c}$$

$$Q_n = 41.719 \text{ tonnef}$$

Resistencia al corte de un conector de corte:

$$Q_r := \phi_{sc} \cdot Q_n = 35.461 \text{ tonnef}$$

5.1. NÚMERO DE CONECTORES DE CORTE

El número de conectores de corte requerido corresponde a los necesarios entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

Chequeo de requerimientos de número de conectores de corte:

Chequeo:
$$n_{sc_req} := \frac{P}{Q_r} = 45.303 \quad \leq \quad n_{sc} = 46$$

OK.

5.2. SEPARACIÓN LONGITUDINAL

Combinación de carga: Fatiga I: 1.5 IM LL

Para efectos de esta sección, se debe considerar además la carga permanente sin mayorar.

Se debe cumplir con la separación longitudinal máxima normativa, correspondiente a 600 mm.

También se debe cumplir con el requerimiento de separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga.

Además, se verifica la separación longitudinal máxima tal que se ubique el número de conectores de corte requerido entre el apoyo y el punto de máximo momento por carga de fatiga.

Corte máximo por carga muerta DC:

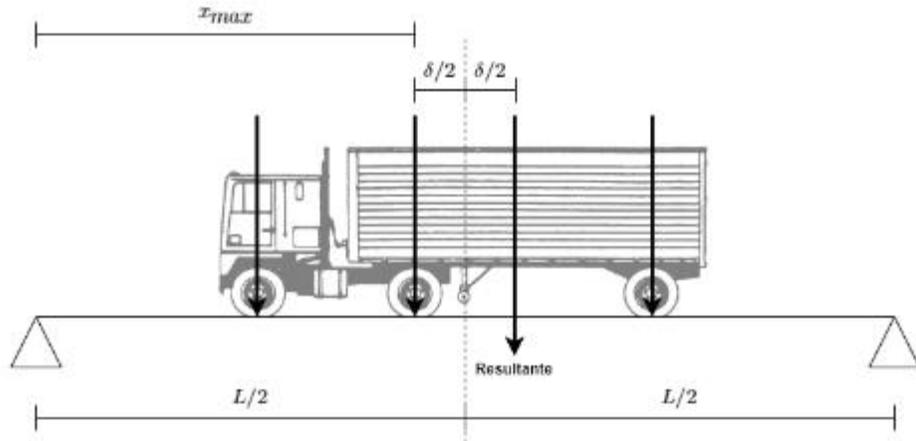
$$V_{DC} := \frac{(PP_{viga} + PP_{losa}) \cdot L}{2} = 47.021 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga muerta superpuesta DW:

$$V_{DW} := \frac{(PP_{pav} + PP_{baranda} + PP_{barrera}) \cdot L}{2} = 2.879 \text{ tonnef}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor momento:

El momento máximo se da bajo el segundo eje de la carga de fatiga.



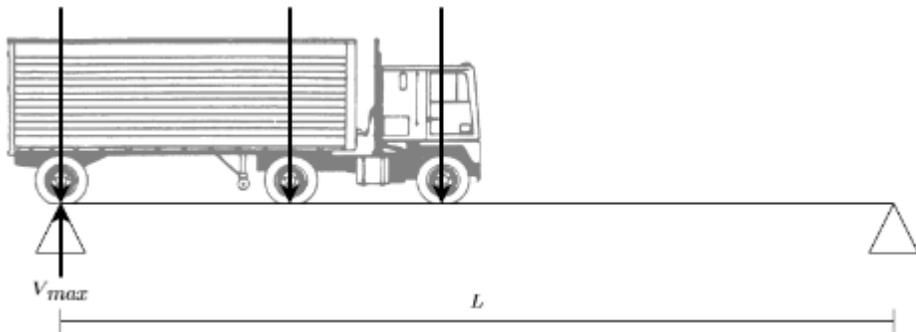
Distancia delta entre segundo eje y resultante:

$$\delta_{fatiga} := \frac{-2 CR_{fatiga_1} \cdot a_{lo_fatiga_1_2} + 2 CR_{fatiga_2_3} \cdot a_{lo_fatiga_2_3}}{2 CR_{fatiga_1} + 4 CR_{fatiga_2_3}}$$

$$\delta_{fatiga} = 3.591 \text{ m}$$

Posición de carga de fatiga que produce el mayor corte:

El corte máximo se da en el apoyo sobre el que se ubica el tercer eje de la carga de fatiga.



Corte máximo por carga de fatiga:

$$V_{fatiga} := \begin{cases} \text{if } L \leq a_{lo_fatiga_1,2} + a_{lo_fatiga_2,3} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_2,3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2,3}) \right) \right) \\ \text{else} \\ \left((1 + IM_{fatiga}) \cdot \left(\frac{2 CR_{fatiga_1}}{L} \cdot (L - a_{lo_fatiga_2,3} - a_{lo_fatiga_1,2}) + \frac{2 CR_{fatiga_2,3}}{L} \cdot (2L - a_{lo_fatiga_2,3}) \right) \right) \end{cases}$$

$$V_{fatiga} = 38.815 \text{ tonnef}$$

Corte máximo por carga de fatiga distribuido:

$$V_{fatiga} := \max(g_{V,1} \cdot V_{fatiga}, g_{V,2} \cdot V_{fatiga}) = 8.475 \text{ tonnef}$$

Corte por combinación de fatiga:

$$V_f := V_{DC} + V_{DW} + 1.50 V_{fatiga} = 62.612 \text{ tonnef}$$

Primer momento del área de hormigón a compresión en torno al eje neutro de la sección compuesta en el corto plazo:

$$Q := \frac{b_s}{n} \cdot y_{CG_cp_s} \cdot \frac{y_{CG_cp_s}}{2} = (1.423 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$$

Inercia de la sección compuesta en el corto plazo:

$$I_{tr_cp_s} = (1.756 \cdot 10^{10}) \text{ mm}^4$$

Resistencia longitudinal a corte por fatiga por unidad de largo:

$$V_{fat} := \frac{V_f \cdot Q}{I_{tr_cp_s}} = 0.051 \frac{\text{tonnef}}{\text{mm}}$$

Separación longitudinal máxima normativa:

$$P_{sc_norm} := 600 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por estado límite de fatiga:

$$P_{sc_fatiga} := \frac{n_{sc} \cdot Z_r}{V_{fat}} = 1360.114 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima por número requerido:

$$P_{sc_num} := \frac{\left(\frac{L}{2} - \frac{\delta_{fatiga}}{2} \right)}{n_{sc}} = 395.748 \text{ mm}$$

Separación longitudinal máxima:

$$P_{max} := \min(P_{sc_norm}, P_{sc_fatiga}, P_{sc_num}) = 395.748 \text{ mm}$$

Chequeo de requerimientos de separación longitudinal:

Chequeo:

$$P_{sc} = 390 \text{ mm}$$

$$\leq P_{max} = 395.748 \text{ mm}$$

OK.

ANEXO B: CATÁLOGO CINTAC DE PERFILES CANAL

Canales especificación técnica Cintac ET-11/MA-7-2

Especificaciones Generales	
Largo normal:	6 mts. Otros largos previa consulta.
Recubrimiento:	Negro.
Extremos:	Lisos de máquina.
Calidades normales:	ASTM A36 / NCH 203 G A240ES
Otras dimensiones:	A pedido, previa consulta a CINTAC.

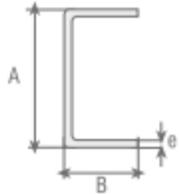


Diagrama de un perfil de canal con dimensiones A, B y e.

Dimensiones nominales			Peso teórico	SAP
A	B	e	P	
mm	mm	mm	Kg/m	
50	25	2	1,47	43000022
50	25	3	2,12	43000023
80	40	2	2,41	43000024
80	40	3	3,54	43000025
80	40	4	4,61	43000026
100	50	2	3,04	43000027
100	50	3	4,48	43000028
100	50	4	5,87	43000029
100	50	5	7,20	43000030
125	50	2	3,43	43000031
125	50	3	5,07	43000032
125	50	4	6,65	43000033
150	50	2	3,82	43000034
150	50	3	5,66	43000035
150	50	4	7,44	43000036
150	50	5	9,17	43000037
150	75	3	6,83	43000038
150	75	4	9,01	43000039
150	75	5	11,3	43000040

Fuente: Cintac, 2019