

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Rommel Cuevas Kauffmann, Ing. Miguel Peralta Salas, Ing. Giannina Ortiz Quesada, Ing. Sonia Vargas Calderón, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Rommel
Lezing Cuevas
Kauffmann

Firmado digitalmente
por Rommel Lezing
Cuevas Kauffmann
Fecha: 2021.12.02
19:24:52 -06'00'

Ing. Rommel Cuevas Kauffmann.
En representación del Director

MIGUEL
PERALTA
SALAS
(FIRMA)

Firmado digitalmente por MIGUEL
PERALTA SALAS (FIRMA)
DN: SERIALNUMBER=CPF-03-0422-0165,
SN=PERALTA SALAS, G=MIGUEL,
C=CR, O=PERSONA FISICA,
OU=CIUDADANO, CN=MIGUEL
PERALTA SALAS (FIRMA)
Razón: Estoy aprobando este documento
Ubicación: la ubicación de su firma aquí
Fecha: 2021.12.01 14:15:49-06'00'
Foxit PDF Reader Versión: 11.1.0

Ing. Miguel Peralta Salas.
Profesor Guía

GIANNINA ORTIZ
QUESADA
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
GIANNINA ORTIZ
QUESADA (FIRMA)
Fecha: 2021.11.26
08:36:48 -06'00'

Ing. Giannina Ortiz Quesada.
Profesora Lectora

SONIA VARGAS
CALDERON
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
SONIA VARGAS
CALDERON (FIRMA)
Fecha: 2021.11.26
08:16:09 -06'00'

Ing. Sonia Vargas Calderón.
Profesora Observadora

**Estudio de la capacidad de carga
máxima en puentes existentes,
para el paso de equipos
especiales, ampliación de la
Planta Hidroeléctrica Ventanas
Garita.**

Abstract

In the work carried out, the main objective was the evaluation of the maximum load capacity of two passage structures (a bridge and a sewer), for the passage of special loads, corresponding to the electromechanical equipment necessary for the modernization of the Hydroelectric Plant (PH) Ventanas Garita.

The study of the load capacity for the structures, was developed applying the current regulations for the design, inspection and evaluation of bridges, published by the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), among them, the manual Bridge Design Specifications (AASHTO LRFD, 2020) and the manual "The Manual for Bridge Evaluation, 3rd Edition"(AASHTO MBE-3, 2018).

The study of maximum load capacity for the structures was developed through a load sensitivity analysis for the configuration of two special trucks to determine the weight corresponding to the electromechanical equipment, which theoretically causes some of the structural elements to fail (tiles, walls, intermediate columns, among others).

The structures evaluated do not have information about the original designs; therefore, the requests were calculated at nominal moment and shear, using the HL-93 design loads for reference to limit the capacity of the structures.

Keywords: bridge, sewer, load capacity, evaluation, special loads

Resumen

En el trabajo realizado, el objetivo principal es la evaluación de la capacidad de carga máxima de dos estructuras (un puente y una alcantarilla), para el paso de cargas especiales, correspondientes a los equipos electromecánicos necesarios para la modernización de la Planta Hidroeléctrica (PH) Ventanas Garita.

El estudio de la capacidad de carga para las estructuras, se desarrolló aplicando la normativa vigente para el diseño, inspección y evaluación de puentes, publicadas por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), entre ellos, el manual Bridge Design Specifications (AASHTO LRFD, 2020), y el manual "The Manual for Bridge Evaluation, 3rd Edition" (AASHTO MBE-3, 2018).

No obstante, el estudio de capacidad máxima de carga para las estructuras se desarrolló mediante un análisis de sensibilidad de carga, para la configuración de dos camiones especiales, determinando el peso correspondiente al equipo electromecánico, que teóricamente hace fallar alguno de los elementos estructurales (losa, muros, columnas intermedias, entre otros).

Las estructuras evaluadas no cuentan con información sobre los diseños originales, por ende, se calcularon las solicitaciones a momento y cortante nominal, utilizando las cargas de diseño HL-93 de referencia para limitar la capacidad de las estructuras.

Palabras clave: puente, alcantarilla, capacidad de carga, evaluación, cargas especiales.

Estudio de la capacidad de carga máxima en puentes existentes, para el paso de equipos especiales, ampliación de la Planta Hidroeléctrica Ventanas Garita

JOSE MAURICIO FALLAS GONZÁLEZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Julio del 2021

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio.....	1
Resumen ejecutivo	2
Introducción	4
Metodología	6
Alcantarilla: Paso Superior N 1808.....	9
Puente: Paso Superior N 1357	21
Resultados.....	28
Análisis de los resultados	32
Conclusiones	37
Recomendaciones	38
Apéndices	39
Anexos	78
Referencias.....	96

Prefacio

El tema desarrollado en el presente proyecto corresponde al estudio y evaluación de la capacidad de carga de dos estructuras de paso (un puente y una alcantarilla), para el paso de cargas especiales, correspondientes a equipos electromecánicos, que se requieren en la modernización y ampliación de la Planta Hidroeléctrica Ventanas Garita, para incrementar la potencia a 100 MW a partir del año 2025.

El trabajo surge por la necesidad del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), por contar con los estudios de capacidad de carga, para las estructuras de paso, como puentes y alcantarillas sobre la ruta (Puerto Caldera - Ventanas Garita) para el paso de cargas especiales y de esta manera, contar con la viabilidad para el transporte de los equipos, en función de la capacidad de las estructuras.

La importancia del estudio de la capacidad de carga máxima de las estructuras para el ICE es establecer el peso máximo de los equipos electromecánicos que se pueden transportar de forma segura, sin comprometer la integridad estructural de los componentes viales existentes.

Así mismo, el ICE especifica al fabricante, el peso y las dimensiones máximas de los equipos, con la finalidad de que el peso de los equipos electromecánicos, se fabriquen en una o en varias piezas, sin superar el peso máximo en función de la capacidad de carga de las estructuras.

El estudio y evaluación de la capacidad de carga de las estructuras de paso son fundamentales, para contar con los permisos para el transporte, según la reglamentación y legislación nacional.

El objetivo principal del proyecto es el estudio de capacidad máxima de carga, para dos estructuras de paso (un puente y una alcantarilla) mediante un análisis de sensibilidad de carga, para determinar el peso máximo del equipo electromecánico que teóricamente pueden soportar las estructuras en función de su capacidad.

Agradecimientos

En primera instancia, agradezco al profesor, Ing. Miguel Peralta Salas M.Sc, por su ayuda incondicional en la realización de este proyecto, al Ing. Emmanuel Montero Carvajal, ingeniero estructural del (ICE) por su aportes y colaboración para el desarrollo del presente proyecto. Al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), en especial, al Ing. Javier Villalobos Cordero, Coordinador del Área de Ingeniería Estructural y Arquitectura del Centro de Servicio Diseño de Ingeniería y Construcción del ICE por la oportunidad brindada para realizar el presente trabajo.

De la misma manera, el autor extiende el agradecimiento a la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica, y profesores quienes contribuyeron en mi formación profesional, en los años de vida estudiantil. A mis padres y hermanos quienes me apoyaron incondicionalmente durante los estudios para culminar mi carrera con la realización del presente trabajo.

Resumen ejecutivo

El proyecto consistió en la evaluación de la capacidad de carga de dos estructuras (un puente y una alcantarilla), para el paso de cargas especiales, que son los equipos electromecánicos necesarios para la modernización de la Planta Hidroeléctrica Ventanas Garita, para incrementar la potencia a partir del año 2025.

El proyecto surgió de la necesidad del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), de contar con los estudios de capacidad de carga máxima de las estructuras de paso sobre la ruta (Puerto Caldera - Ventanas Garita) para asegurar la viabilidad del transporte de los equipos electromecánicos.

La evaluación de la capacidad de carga máxima de las estructuras para determinar el peso máximo de los equipos electromecánicos que se pueden transportar de forma segura, sin comprometer la integridad estructural de los componentes viales existentes en función de la capacidad de las mismas, es de suma importancia para el ICE, ya que se busca especificar el peso y las dimensiones máximas de los equipos electromecánicos, a los fabricantes, para ser transportados en una pieza o en varias secciones, sin superar la capacidad de las estructuras. Los estudios de capacidad de carga de las estructuras son parte de los requisitos, para la obtención de los permisos, para el transporte de cargas especiales, según la reglamentación y legislación nacional.

En la evaluación de la capacidad de carga máxima de las estructuras, se utilizó como referencia el manual Bridge Design Specifications (AASHTO LRFD, 2020), y el manual "The Manual for Bridge Evaluation, 3rd Edition" (AASHTO MBE-3, 2018) como las principales fuentes asociadas al tema, ya que, en el país no se cuenta con normativas de referencia a la evaluación de capacidad de carga viva en puentes existentes.

Las estructuras que se evaluaron fueron seleccionadas por el ICE, a partir de la información

obtenida del estudio de ruta (Puerto Caldera - Ventanas Garita) titulado "*Estudio de Viabilidad Estructural para el transporte de equipo de generación eléctrica para el Proyecto Modernización de Ventanas – Garita del Instituto Costarricense de Electricidad*" donde se cuantificaron 61 estructuras, 45 son estructuras dimensionales y 16 son estructuras de paso de carga, donde 6 son pasos superiores, 4 corresponden a puentes; y las restantes 6 son alcantarillas.

El estudio de ruta citado anteriormente consistió en la recopilación de la información existente en relación con las estructuras de paso, información de diseño, fechas de construcción, inspección de daños, levantamientos de campo de las dimensiones y geometría de las estructuras.

Las dos estructuras que se evaluaron son indicadas por ICE y corresponden a un puente de 2 tramos de 10.2 m cada uno y una alcantarilla de cuadro de concreto reforzado de 5.25 m de longitud, estas estructuras cuentan con información de la inspección de daños, reportan los principales hallazgos, la geometría y dimensiones de las estructuras, sin embargo, no tiene información de diseño, ni fecha de construcción.

La información brindada por el ICE, se verificó consultando la información del diseño en el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y en el Consejo Nacional de Concesiones (CNC) y se realizó una vista a sitio del emplazamiento de la estructura de puente.

Al no contar con información de diseños para calcular la capacidad teórica de carga de las estructuras, se utilizó un procedimiento fundamentado en la metodología y filosofías de diseño del manual Bridge Design Specifications (AASHTO LRFD, 2020), tomando como referencia la carga de diseño HL-93, las cargas que actúan sobre las estructuras y el estado actual de las

mismas, para obtener las solicitaciones (momento y cortante nominal)

Una vez definido el procedimiento, se calcularon las solicitaciones últimas, de acuerdo con las especificaciones y procedimientos de la normativa vigente para el diseño de puentes, Bridge Design Specifications (AASTHO LRFD, 2020) y con base en la información existente, para las condiciones actuales, geometría y dimensiones de los elementos estructurales.

Para las 2 estructuras utilizando el teorema de Barré y líneas de influencia, se determinó la posición del tren de carga, en la cual, genera el mayor efecto a momento y cortante.

El análisis estructural, se realizó en el *software* computacional SAP2000, donde se obtuvieron los esfuerzos a momento y cortante máximos para las combinaciones de carga que aplicaban para el diseño.

Una vez, obtenidos los valores de referencia para la capacidad de las estructuras, se realizó la evaluación para el paso cargas especiales, donde se tomaron como referencia los criterios y procedimientos propuestos en el manual (AASTHO MBE-3, 2018) para la evaluación de la capacidad de carga en estructuras existentes.

Se evaluaron dos camiones especiales con el propósito de establecer, el peso máximo del equipo electromecánico, que pueden transportar en función de la capacidad de las estructuras.

El análisis de sensibilidad de carga consiste en ir variando una carga y analizar el comportamiento teórico de una estructura o elemento estructural, como varían los efectos a momento y cortante al modificar la carga que se desea estudiar.

Se realizó un análisis de sensibilidad de carga, utilizando el *software* computacional SAP2000, mediante un proceso de iteraciones y un análisis numérico, donde se fue aumentando o disminuyendo la magnitud de la carga "P" que representa el peso de los equipos electromecánicos sobre el camión especial a evaluar, hasta determinar el valor que produce esfuerzos muy cercanos o iguales a los valores de referencia para la capacidad.

A partir del análisis de sensibilidad se logró determinar el peso máximo del equipo electromecánico que se puede transportar. Esto sin comprometer la integridad de los componentes viales existentes; la integridad del vehículo a utilizar y del equipo electromecánico como tal. Además, se logró identificar cuáles son los elementos críticos en cada estructura, que

permiten analizar otros escenarios, como sería reforzar los elementos críticos aumentando la capacidad de la estructura.

Para la alcantarilla, se determinó que el peso máximo del equipo electromecánico que se puede transportar es de 35.75 toneladas aproximadamente para las especificaciones del camión del ICE, y 81 toneladas, aproximadamente para las especificaciones, del camión especial de la empresa Carga Especiales Mincho.

Para el puente, se determinó que el peso máximo del equipo electromecánico que se puede transportar es de 57.75 toneladas, para las especificaciones del camión del ICE, y 89 toneladas para las especificaciones, del camión especial de la empresa Cargas Especiales Mincho.

Introducción

El proyecto realizado para la obtención del grado de licenciatura en Ingeniería en Construcción se realizó en el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), específicamente en el Área de Ingeniería Estructural y Arquitectura del Centro de Servicio Diseño de Ingeniería y Construcción del ICE.

El proyecto consiste en el estudio de la capacidad de carga máxima para dos estructuras, un puente y una alcantarilla, para el paso de cargas especiales, que corresponde a equipos electromecánicos que se requieren para modernizar y ampliar la Planta Hidroeléctrica (PH) Ventanas Garita, ubicada en Turrúcares de Alajuela, la cual forma parte de las centrales generadoras que aprovechan la cuenca del río Virilla, construida a mediados de los años 80 aportando 90 MW a la generación eléctrica del país, con una producción de 515 GWh al año.

El estudio surge a raíz de la necesidad del ICE de modernizar la Planta Hidroeléctrica para incrementar la potencia a 100 MW a partir del año 2025, lo que implica el remplazo de los equipos electromecánicos existentes de las unidades generadoras, por equipos nuevos, más eficientes, que se deben importar.

Para el desarrollo del estudio de la capacidad de carga de las estructuras, se utilizaron como referencia el manual Bridge Design Specifications (AASHTO LRFD, 2020), y el manual "The Manual for Bridge Evaluation, 3rd Edition" (AASHTO MBE-3, 2018) como las principales fuentes asociadas a la temática de este proyecto, para sustentar las consideraciones realizadas, procedimientos, criterios de evaluación y memorias de cálculo, para la realización del análisis de sensibilidad de carga para el puente y la alcantarilla.

Las estructuras en estudio corresponden a pasos superiores, un puente y una alcantarilla de cuadro de concreto reforzado, que no cuentan con información de diseño, ni fecha de construcción. Sin embargo, cuentan con una inspección de daños y un levantamiento de campo de la geometría y dimensiones de las estructuras.

Para calcular la capacidad de carga de las estructuras se realizó un procedimiento fundamentado en la metodología de diseño del manual Bridge Design Specifications (AASHTO LRFD, 2020) ya que, "*Históricamente, en Costa Rica se ha utilizado la normativa de la AASHTO para diseño de puentes*" (Álvarez et al., 2014, p. 2) con la finalidad de obtener un valor de la capacidad de carga viva, que tienen las estructuras.

En principio, el método consistió en calcular las solicitaciones para diseño (momento y cortante nominal), utilizando como referencia la carga viva de diseño HL-93 y las cargas permanentes según la condición actual, para limitar la capacidad de las estructuras.

El análisis de la carga viva se desarrolló mediante líneas de influencia y la aplicación del teorema de Barré, para determinar la posición del tren de carga, que causa el mayor efecto a momento en la superestructura.

Para cada estructura se realizaron modelos teóricos simplificados basados en la información existente. Para el análisis estructural, se utilizó el *software* computacional SAP2000, donde se calcularon los efectos al momento y cortante máximos para las combinaciones de carga que aplican para el diseño.

Con los valores de referencia para la capacidad de las estructuras, se realizó la evaluación para el paso cargas especiales, donde se utilizaron criterios y procedimientos propuestos en el manual (AASHTO MBE-3, 2018) para la evaluación de la capacidad de carga en estructuras existentes. En efecto, se calcularon las magnitudes de las cargas permanentes que actúan en la estructura y se analizaron dos camiones especiales con el propósito de establecer, el peso máximo del equipo electromecánico, que pueden transportar en función de la capacidad de las estructuras.

Para determinar el peso máximo del equipo electromecánico, que pueden transportar en

función de la capacidad de las estructuras, se realizó un análisis de sensibilidad de carga, utilizando el *software* computacional SAP2000, mediante un proceso de iteraciones y un análisis numérico, se fue aumentando o disminuyendo la magnitud de la carga "P" que representa el peso de los equipos electromecánicos sobre los camiones especiales evaluados, hasta determinar el valor que ocasiona esfuerzos muy cercanos o iguales a la capacidad de referencia, para los elementos estructurales (losa, muros, columnas intermedias).

A partir del análisis de sensibilidad se logró determinar el peso máximo del equipo electromecánico que se puede transportar. Sin comprometer la integridad de los componentes viales existentes, la integridad del vehículo a utilizar y del equipo electromecánico como tal. Además, se logró identificar cuáles son los elementos más críticos en cada estructura, que permite analizar otros escenarios, como sería reforzar los elementos críticos aumentando la capacidad de la estructura.

El objetivo principal es la evaluación de dos estructuras, un puente y una alcantarilla, para el paso de cargas especiales que pertenecen a materiales electromecánicos, para así lograr la modernización de la Planta Hidroeléctrica (PH) Ventanas Garita. Esta evaluación se realiza bajo la metodología de diseño donde los resultados son la capacidad de esfuerzo a momento y cortante nominal.

Metodología

En el trabajo realizado, el objetivo principal es la evaluación de la capacidad de carga viva de dos estructuras existentes (un puente y una alcantarilla), para el paso de cargas especiales correspondientes a equipos electromecánicos, que se requieren en la modernización de la Planta Hidroeléctrica (PH) Ventanas Garita.

Para la realización del proyecto, se investigó la normativa actual para la evaluación de puentes, publicada por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), ya que, en el país no se cuenta con normativas de referencia para la evaluación de capacidad de carga viva en puentes existentes.

En relación con la normativa publicada por la (AASHTO), se utilizó el manual titulado "The Manual for Bridge Evaluation, 3rd Edition" publicado por la AASHTO en el 2018, para la inspección y evaluación de puentes. De aquí en adelante para referirse a este manual como "AASHTO MBE-3".

El manual AASHTO MBE-3 proporciona métodos analíticos y empíricos para evaluar la capacidad máxima segura de carga viva en puentes o para evaluar la seguridad estructural bajo una condición de carga particular. Los métodos empíricos son índices de carga obtenidos mediante pruebas de carga. Los métodos analíticos emplean la metodología de evaluación LRFR (Load and Resistance Rating Factor), consistente con la filosofía de diseño del manual Bridge Design Specifications AASHTO LRFD.

En relación con este tema, el manual AASHTO MBE-3 comprende los procedimientos y consideraciones generales para evaluar la capacidad de carga viva en puentes existentes, para las cargas de diseño LRFD, cargas legales y cargas de permisos con sobrepeso denominadas "Cargas especiales".

En segundo lugar, se estudió la información suministrada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), y la información obtenida del Sistema de administración de estructuras de puentes (SAEP, 2021), información correspondiente al estado actual de las

estructuras, esquemas de daños, geometría y dimensiones de los componentes estructurales, (ver anexo 1 y 2).

En relación con la información del diseño de las estructuras, se investigó en el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y en el Consejo Nacional de Concesiones (CNC), sobre la información de diseño de las estructuras a evaluar, sin embargo, en estas dos instituciones no se cuenta con la información del diseño de las estructuras en estudio.

En consecuencia, la falta de información como los planos constructivos, esquemas de refuerzo (separación y cantidad de acero de refuerzo colocado), propiedades de los materiales, registro de la fecha de diseño y construcción, limita el cálculo de la "Capacidad" de carga de los elementos estructurales, de manera numérica utilizando las ecuaciones de diseño descritas en manual Bridge Design Specifications AASHTO LRFD, y finamente aplicar la metodología LRFR para evaluación de la capacidad de carga viva.

Cabe considerar que, la realización de una inspección avanzada mediante pruebas no destructivas, para obtener las propiedades necesarias para la evaluación de capacidad de carga de las estructuras, y la utilización de métodos magnéticos y radiografías para determinar el patrón de distribución del acero de refuerzo, no es factible, ya que ICE, no dispone del personal, equipos y de los recursos, para tal estudio.

En relación con las limitaciones expuestas, se analizó a fondo la información existente de las estructuras (ver anexo 1 y 2), con el objetivo de plantear un método, para estimar teóricamente la capacidad de carga viva que tienen las estructuras. A partir del análisis de la información existente, se consideraron los siguientes puntos para definir un procedimiento a seguir para calcular la capacidad de carga que tienen las estructuras:

1. Se puede inferir la carga viva utilizada en el diseño original de las estructuras, ya que, *"Históricamente, en Costa Rica se ha utilizado la*

normativa de la AASHTO para diseño de puentes” (Álvarez et al., 2014, p. 2).

2. Las estructuras han tenido tráfico normal y su condición es aceptable, según los principales hallazgos reportados a partir de las inspecciones realizadas.

3. Las estructuras cuentan con una inspección realizada en diciembre 2020, (Inspección de daños para determinar el estado actual de la estructura).

4. Las estructuras tienen información dimensional y caracterización del sistema estructural.

Con base en los puntos citados, se optó por la aplicación de un método fundamentado en la metodología de diseño, para calcular un valor aproximado de la capacidad de carga viva, que teóricamente tienen las estructuras. En principio, el método consistió en calcular las solicitaciones para diseño (momento y cortante nominal), utilizando como referencia la carga viva de diseño HL-93 y las cargas permanentes que actúan sobre las estructuras según las condiciones actuales y las cargas de diseño que apliquen.

El objetivo es calcular las solicitaciones de diseño (esfuerzos a momento y cortante nominal) para limitar la capacidad que teóricamente tienen las estructuras a estos resultados, y finalmente utilizarlos como valores de referencia para limitar los esfuerzos que producen el paso cargas especiales sobre las estructuras, de acuerdo con los criterios propuestos en el manual (AASHTO MBE-3, 2018).

Las solicitaciones se calcularon, según las especificaciones y procedimientos de la normativa vigente para el diseño de puentes, Bridge Design Specifications (AASHTO LRFD, 2020) con base en la información existente, para las condiciones actuales, geometría y dimensiones de los elementos estructurales.

Se realizó un estudio en cada estructura, para determinar la posición de la carga viva de diseño (Camión de diseño y tándem), que causa el mayor efecto a momento y cortante, añadido a esto se determinó cuál de los dos camiones de diseño crea las solicitaciones más altas, para tomarlo como el camión de referencia.

Para el análisis estructural, se realizó un modelo teórico simplificado, acorde con la información existente de las estructuras. El modelo teórico simplificado se realizó en el *software* computacional SAP2000, donde se modelaron las cargas y se utilizaron las combinaciones de cargas (Resistencia I, IV y evento extremo I) aplicando los factores mínimos

y máximos, para construir una envolvente de carga, para obtener las solicitaciones de diseño. Finalmente, las solicitaciones de diseño (esfuerzos máximos a momento y cortante nominal), son los valores de referencia para limitar los esfuerzos que se crean por el paso de camiones con cargas especiales sobre las estructuras.

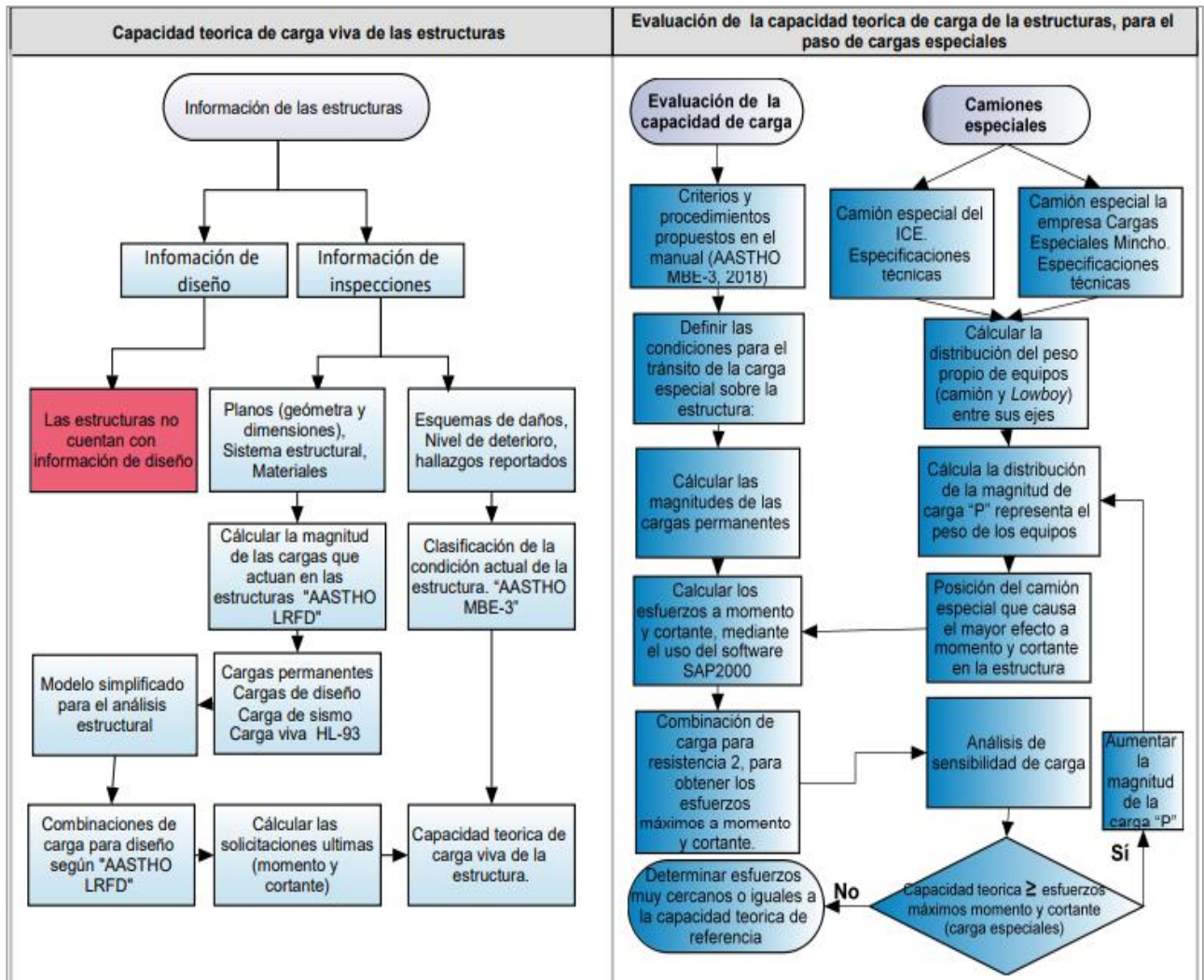
En la evaluación de la capacidad de carga de las estructuras, bajo el paso de cargas especiales, se emplearon criterios y procedimientos propuestos en el manual (AASHTO MBE-3, 2018). En efecto, se calcularon las magnitudes de las cargas permanentes que actúan en la estructura.

En cuanto a los camiones especiales, se calculó la distribución del peso propio de equipos (camión y *Lowboy*) entre sus ejes correspondientes, después se calculó la distribución de la magnitud de carga “P” que representa el peso de los equipos electromecánicos entre los ejes correspondientes. Seguidamente, se realizó un estudio, para determinar la posición de la carga especial que causa el mayor efecto a momento y cortante en la estructura.

Finalmente, se realizó el análisis estructural para calcular los esfuerzos a momento y cortante, mediante el uso del *software* computacional SAP2000, donde se modelaron las cargas permanentes y las cargas del vehículo especial, en la posición más crítica, aplicando la combinación de carga para resistencia 2 y los factores de carga mínimos y máximos, para construir la envolvente de carga, para obtener los esfuerzos máximos.

Los esfuerzos a momento y cortante obtenidos de la combinación de carga para resistencia 2 evaluando una magnitud de carga “P” que representa el peso de los equipos electromecánicos, se compararon con los esfuerzos nominales de referencia, que limitan de la capacidad de carga de las estructuras.

En función del objetivo planteado, se realizaron iteraciones, aumentando o disminuyendo la magnitud de la carga “P”, hasta determinar esfuerzos muy cercanos o iguales a los esfuerzos de referencia. De esta manera, se realizó un análisis de sensibilidad, mediante un análisis numérico en cada iteración, para hallar la magnitud de la carga “P” que representa el peso de los equipos electromecánicos, que teóricamente crean esfuerzos similares a los valores de referencia.



Alcantarilla: Paso Superior N 1808

La alcantarilla se ubica en San Juan Grande, Esparza, Puntarenas, corresponde a una de las 16 estructuras de paso de carga. El estudio de ruta (Puerto Caldera - Ventanas Garita) realizado por el (ICE), para determinar la viabilidad del transporte de los equipos electromecánicos de la modernización de la Planta hidroeléctrica (PH) Ventanas Garita.



Figura 1. Vista lateral de la Alcantarilla (Paso superior).
Fuente: (SAEP, 2021).

En el cuadro 2, se indica la información existente de la alcantarilla, esto para la evaluación de la capacidad de carga viva, para el paso de cargas especiales.

CUADRO 2. INFORMACIÓN DE LA ALCANTARILLA.		
Ítem.	Si	No
Planos de diseño.		x
Planos constructivos.		x
Esquemas de refuerzo.		x
Fecha de diseño.		x
Fecha de construcción.		x
Inspecciones.	x	
Planos (geometría y dimensiones)	x	
Restricción por Carga		x

Información:

La información general de la alcantarilla en estudio se resume en el cuadro 1.

CUADRO 1 INFORMACIÓN GENERAL DE LA ALCANTARILLA	
Nombre del paso:	P.S.S Camino Vecinal
N° de estructura:	1808
Tipo de estructura:	Paso Superior
Provincia:	Puntarenas
Cantón:	Esparza
Distrito:	San Juan Grande
Tipo de Ruta:	Ruta Nacional
Clasificación de Ruta:	Primario
Ruta N°:	27
Encargado:	Zona 3-1 Puntarenas.
Latitud Norte	9° 57' 49.52"
Latitud Oeste	84° 17' 32.78"
Kilómetro	72.198
Longitud	4.90 m

La información existente de la alcantarilla es muy limitada para realizar la evaluación de la capacidad de carga viva, por ende, se consultó la existencia de la información del diseño de la estructura en Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT).

De acuerdo con Romero, (comunicación personal, 29 de abril de 2021) la Dirección de Puentes posee copia de algunos puentes conocidos como puentes mayores, sin embargo, de las estructuras menores como pasos inferiores no se cuenta con dicha información. Así que, con respecto a la solicitud sobre el paso ubicado aproximadamente en el Km 72.19, la Dirección de Puentes no cuenta con dicha información.

Por otra parte, se investigó en el Consejo Nacional de Concesiones (CNC) acerca de la información del diseño de la alcantarilla, ya que la ruta 27 se construyó bajo un contrato de concesión de obras públicas. Sin embargo, en esta institución no cuentan con dicha información.

Inspecciones.

La alcantarilla cuenta con información de 2 inspecciones; la primera inspección fue realizada en el año 2017, la cual corresponde a una inspección de daños, según el Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP, 2021).

La segunda inspección de la alcantarilla se realizó en diciembre de 2020, por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), para verificar y determinar las condiciones actuales, esquemas de daño, geometría y dimensiones de los componentes estructurales, como parte del estudio de ruta (Puerto Caldera - Ventanas Garita).

La información de daños obtenida de las inspecciones se resume en el cuadro 3. según la clasificación para el grado de deterioro, de acuerdo con el Manual de Inspección de Puentes del MOPT, (2007):

CUADRO 3. INFORMACIÓN DE LAS INSPECCIONES		
Ítem	Daños	Grado
Losa	Eflorescencia	2
	Agrietamiento del concreto mayor a 0.2 mm	3
Muros	Agrietamiento del concreto mayor a 0.2 mm	3
	Eflorescencias	2
Cimientos	--No se tiene información--	---

Donde:

- 1 = Ningún daño visible.
- 2 = Daño visible Bajo.
- 3 = Daño visible Intermedio.
- 4 = Daño visible Avanzado.
- 5 = Daño visible Inaceptable.

El daño visible por la eflorescencia en la estructura es bajo. Esta patología "No causa problemas estructurales, sin embargo, si se encuentra en una grieta significa que posiblemente existe corrosión en el acero" (Winiker, 2019, p. 34).

De acuerdo con el Manual de Inspección de Puentes del MOPT (2007), las grietas y fisuras son rupturas que aparecen en el concreto causadas en muchos casos por los esfuerzos debidos a la carga viva y cargas muertas. En síntesis, por tensiones que superan la capacidad de resistencia.

De acuerdo con Winiker (2019), el ancho de la grieta puede afectar la capacidad de resistencia del elemento, además permite la filtración de agua u otras sustancias a través de las mismas,

afectando el acero de refuerzo, ya que se oxida y se corre, reduciendo la capacidad estructural del elemento.

A partir de la información proveniente de inspecciones y utilizando los hallazgos reportados en el informe, la condición de la estructura es buena.

Información de planos.

La información de planos es complementaria a la inspección de daños, realizada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), donde tienen las dimensiones y la geometría de los elementos estructurales (muros y losa superior), sin embargo, para los cimientos no se cuentan con información.

El sistema estructural de la alcantarilla es un marco de concreto reforzado, donde la unión del muro y la losa superior son capaces de transferir esfuerzos a momento y cortante.

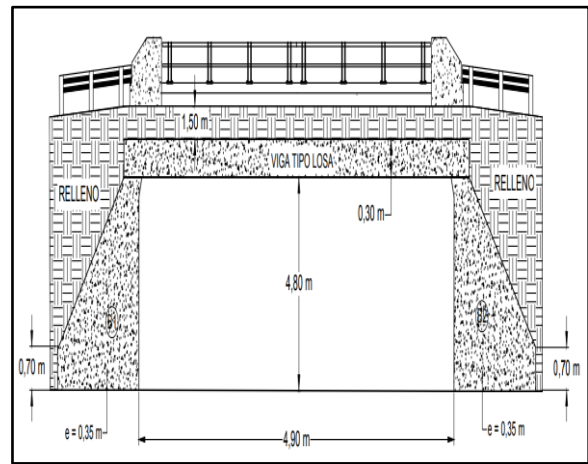


Figura 2. Vista de perfil

Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Cálculo de cargas:

Las alcantarillas son estructuras que experimentan varias cargas que no son aplicables a la mayoría de las superestructuras de puentes; como las cargas verticales y horizontales del suelo y la sobrecarga por carga viva.

De acuerdo con Bridge Design Specifications AASHTO LRFD (2020) y la información de la estructura, se identificaron las siguientes cargas:

- Carga muerta (DC): Peso propio de los componentes estructurales y accesorios.
- Carga muerta (DW): Peso propio de la superficie de rodadura y las utilidades.
- Presión de tierra vertical (EV): Producto del material de relleno sobre la estructura.
- Presión lateral de tierra (EH): Producto de la columna material a lados de la estructura.
- Presión horizontal de tierra (ES): Producto de la sobrecarga del peso propio de la superficie de rodadura.
- Carga viva (LL): Producto de la carga de diseño y carga especiales sobre la estructura.
- Carga de impacto (IM): Producto del movimiento de la sobrecarga vehicular sobre la estructura.
- Sobrecarga por carga viva (LS): Producto de la sobrecarga vehicular ubicado justo al final de la estructura.
- Carga de carril de diseño (C_{HL-93}): Carga de diseño que representa la acumulación de vehículos sobre la estructura
- Carga de sismo (EQ): Producto de la aceleración del suelo por un sismo.

Cálculo de cargas

Para calcular la magnitud de cada una de las cargas que actúan sobre la alcantarilla, se utilizaron como referencia las especificaciones y ecuaciones de diseño descritas en manual Bridge Design Specifications AASHTO LRFD.

Cargas muertas (DC) y (DW)

Las cargas muertas o permanentes se calcularon en base en la geometría y las dimensiones de la alcantarilla, además se utilizaron valores de referencia para el peso unitario de cada material.

Para los componentes estructurales de concreto reforzado se utilizó un valor de referencia para el peso unitario de 2400 kg/m³, este valor incluye tanto el peso del concreto como el peso del acero que lo refuerza.

Para el peso unitario del asfalto se utilizó un valor de referencia de 2240 kg/m³, según la Tabla 3.5.1-1 de diseño AASHTO LRFD (2020).

Presión vertical de la Tierra (EV)

La presión vertical producto del material de relleno existente sobre la losa superior de la alcantarilla, se obtuvo considerando la interacción suelo-estructura según el Artículo 12.11.2.2.1 del diseño AASHTO LRFD (2020). De igual manera, se utilizó un valor de referencia de 2000 kg/m³ para el peso unitario del material de relleno, según la tabla 3.5.1-1 de diseño AASHTO LRFD (2020).

Para considerar la interacción suelo-estructura se calculó el factor F_e para estructuras enteradas con relleno compactado a lo largo de los laterales.

$$F_e = 1 + 0.20 * \left(\frac{H}{B_c}\right) \leq 1.15 \quad \text{Ecuación 1}$$

La presión vertical del terreno sobre la losa superior de la alcantarilla se calculó mediante la ecuación (12.11.2.2.1-1) de Diseño AASHTO LRFD (2020).

$$EV = F_e * \gamma_s * H \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

B_c = Ancho exterior de la alcantarilla.

H = Profundidad del relleno desde la carpeta asfáltica hasta la alcantarilla.

F_e = Factor de interacción suelo-estructura para elementos enterrados.

γ_s = Peso unitario del material de relleno sobre la alcantarilla.

Presión lateral de tierra (EH)

La presión lateral del suelo producto de la columna material de relleno a los lados de la estructura, se calculó según las especificaciones del Artículo 3.11.5.2 de Diseño AASHTO LRFD (2020).

Al no contar con información precisa de las propiedades mecánicas del material de relleno, se utilizó un valor de referencia para el ángulo de fricción efectiva de 30 °, según la Tabla C 3.11.5.3-1 de diseño AASHTO LRFD (2020).

Partiendo de los supuestos anteriores para el ángulo de fricción del suelo y la densidad del material, propiedades fundamentales para calcular empuje horizontal que se les impone a las paredes de la alcantarilla, además, estas propiedades tienen gran influencia en el comportamiento estructural de la alcantarilla.

Para tal efecto, se utilizó en el coeficiente de empuje del suelo en reposo, ya que los muros de la alcantarilla no tienen desplazamientos horizontales, en otras palabras, la losa superior de la alcantarilla es un elemento que restringe el desplazamiento horizontal del muro.

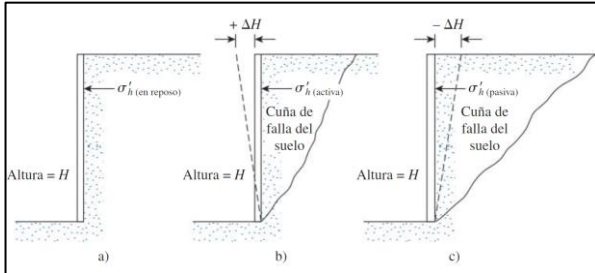


Figura 3. Empuje lateral de sobre los muros de retención. Fuente: (Das, 2016)

En este caso, el coeficiente de empuje del suelo en reposo se obtuvo mediante la ecuación, (3.11.5.2-1) de Diseño AASHTO LRFD (2020).

$$K_o = 1 - \sin(\phi'_f) \quad \text{Ecuación 3}$$

La presión lateral de tierra en la parte superior e inferior del muro de la alcantarilla, se utilizó la ecuación (3.11.5.1-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

$$EH = K_o * \gamma_s * Z \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

ϕ'_f = Ángulo de fricción efectivo del suelo.

K_o = Coeficiente de presión lateral del terreno en reposo.

γ_s = Peso unitario del material de relleno sobre la alcantarilla.

Z = Altura del relleno en la parte superior e inferior de la alcantarilla.

Presión horizontal por sobrecarga uniforme (ES)

La carpeta de asfalto existente es una sobrecarga uniforme, que crea una presión adicional en el material retenido por las paredes de la alcantarilla, según las especificaciones del Artículo 3.11.6.1 de diseño AASHTO LRFD (2020).

Como resultado, la presión adicional a la presión horizontal de la tierra en las paredes de la

alcantarilla se calculó mediante la ecuación (3.11.6.1-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

$$ES = K_o * qDW \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

K_o = Coeficiente de presión lateral del terreno en reposo.

qDW = Sobrecarga uniforme aplicada en la superficie de la losa superior producto de la carpeta asfáltica.

Sobrecarga por carga viva (LS):

La sobrecarga por carga viva representa un eje del vehículo ubicado justo al final de la alcantarilla, lo que crea una presión adicional en el suelo retenido por las paredes. La altura equivalente del suelo producto de la sobrecarga por carga viva se calculó mediante la interpolación lineal a partir de los valores de la Tabla 3.11.6.4-1 del Diseño AASHTO LRFD (2020).

La presión lateral del suelo se calculó para la parte superior e inferior de los muros, utilizando la ecuación (3.11.6.4-1) según las especificaciones del Artículo 3.11.6.4 de diseño AASHTO LRFD (2020).

$$LS = K_o * \gamma_s * h_{eq} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

K_o = Coeficiente de presión lateral del terreno en reposo.

γ_s = Peso unitario del material de relleno en la alcantarilla.

h_{eq} = La altura equivalente en la parte superior e inferior de los muros de la alcantarilla, según la tabla 3.11.6.4-1 de diseño AASHTO LRFD (2020).

Carga viva vehicular (LL)

La carga viva que se utilizó en la evaluación de la capacidad de carga de la alcantarilla en función del uso previsto para los resultados obtenidos, son las siguientes:

Cargas de diseño HL-93 según las especificaciones del Artículo 3.6.1.2.1 diseño de AASHTO LRFD (2020).

Cargas de permiso especiales: El camión especial del ICE y el camión especial de la empresa Carga Especiales Mincho.

De acuerdo con las condiciones existentes para la alcantarilla, se calculó la distribución de carga viva a través del material de relleno, según las especificaciones del Artículo 3.6.1.2.6 del Diseño AASHTO LRFD (2020), considerando que, el área de contacto para las ruedas de los vehículos en la superficie de rodadura es de 0.5 m x 0.25 m, para la carga de diseño HL-93, así como se muestra en la figura 4.

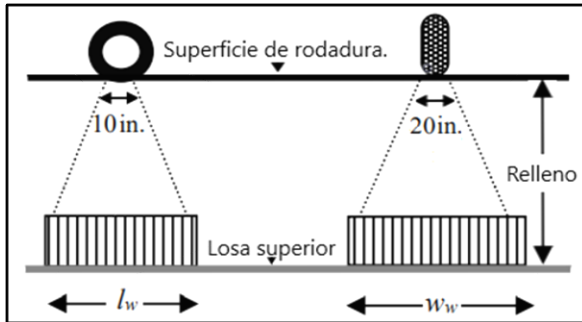


Figura 4. Ancho y longitud del área de contacto, y proyección a través del relleno.

Fuente: Obtenido de AASTHO MBE-3 (2018).

La carga de las ruedas de los vehículos se considera uniformemente distribuida en un área de incidencia rectangular, la cual se calculó utilizando la ecuación (3.61.2.6a-1) de Diseño AASHTO LRFD (2020).

$$A_{LL} = l_w * W_w \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

A_{LL} = Área incidencia rectangular de la carga viva.

W_w = Ancho de la proyección del área de contacto de la carga viva sobre la losa, (Ver figura 5).

l_w = Longitud de la proyección del área de contacto de la carga viva sobre la losa, (Ver figura 6).

Ancho de la proyección (W_w)

Para calcular el ancho de la proyección del área de contacto de la carga viva transversal al tramo sobre la losa superior. Primero se calculó el peralte de interacción de carga por eje, utilizando la ecuación (3.6.1.2.6b-1) de Diseño AASHTO LRFD (2020).

$$H_{int-T} = \frac{s_w - w_t - 0.60 - D_i}{LLDF} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde

H_{int-T} = Peralte de interacción de la rueda transversal al tramo de la alcantarilla.

s_w = Espaciamiento entre las ruedas por eje.

w_t = Ancho de la huella de la rueda en la superficie de rodadura.

D_i = Diámetro interior o luz libre de la alcantarilla.

LLDF = Factor de distribución de carga viva según la Tabla 3.6.1.2.6a-1 de Diseño AASHTO LRFD (2020).

A partir de la altura del relleno (H) y peralte de interacción de carga por eje H_{int-T} , se calculó el valor para el ancho de la incidencia de la carga viva sobre la losa superior de la alcantarilla, según las siguientes condiciones.

Si $H < H_{int-T}$ entonces:

$$W_w = w_t + LLDF(H) + 0.06 * D_i \quad \text{Ecuación 9}$$

Si $H > H_{int-T}$ entonces:

$$W_w = w_t + s_w + LLDF(H) + 0.06 * D_i \quad \text{Ecuación 10}$$

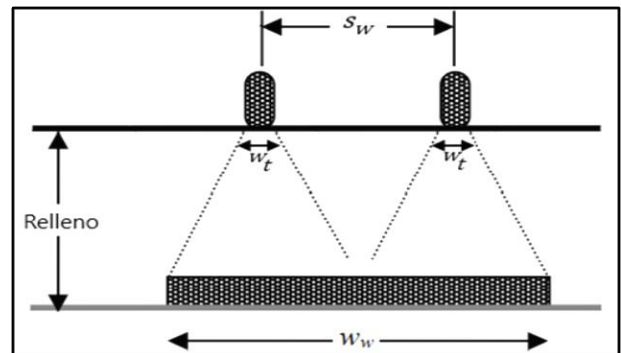


Figura 5. Distribución de la carga viva a través del relleno.

Fuente: Obtenido de AASTHO MBE-3 (2018).

Longitud de la proyección (l_w)

Para calcular la longitud de la proyección del área de contacto de la carga viva paralelo al tramo sobre la losa superior, primero se calculó el peralte de interacción de carga por eje, utilizando la ecuación (3.6.1.2.6b-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

$$H_{int-p} = \frac{s_a - l_t}{LLDF} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde

H_{int-p} = Peralte de interacción de la rueda paralelo al tramo de la alcantarilla.

s_a = Separación entre los ejes.

l_t = Longitud de la huella de la rueda en la superficie de rodadura.

LLDF = Factor de distribución de carga viva según la Tabla 3.6.1.2.6a-1 de Diseño AASHTO LRFD (2020).

A partir de la altura del relleno (H) y peralte de interacción de carga por eje H_{int-p} , se calculó el valor de la longitud de proyección de la carga viva sobre la losa superior, según las siguientes condiciones.

Si $H < H_{int-p}$ entonces.

$$l_w = l_t + LLDF(H) \quad \text{Ecuación 12}$$

Si $H > H_{int-p}$ entonces.

$$l_w = s_a + l_t + LLDF(H) \quad \text{Ecuación 13}$$

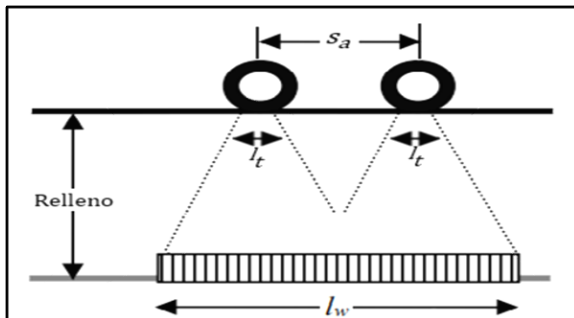


Figura 6. Distribución de la carga viva a través del relleno.
Fuente: Obtenido de AASTHO MBE-3 (2018).

Carga dinámica (IM):

De acuerdo con el artículo 6A.5.12.10.3b del manual AASTHO MBE-3 (2018), la carga dinámica o carga de impacto producto de la carga viva se tomará como se indica en el Artículo 3.6.2.2 de Diseño AASHTO LRFD (2020), excepto para vehículos de movimiento lento (≤ 10 mph), el incremento por carga dinámica no se considera.

Para tal efecto, la carga dinámica se disipa a través del material de relleno, en este sentido, la

carga dinámica se calculó mediante la ecuación (3.6.2.2-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

$$IM = 0.33 * [1 - 0.41 * (D_E)] \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde

D_E = La profundidad del relleno sobre la alcantarilla.

IM = Factor de carga dinámica, (mayor o igual a cero).

Presión vertical de carga viva (PL)

La presión vertical de la carga de diseño sobre la losa superior de la alcantarilla se calculó aplicando la ecuación (3.6.1.2.6b-7) de diseño AASHTO LRFD (2020).

$$PL = \frac{P*(1+IM)*m}{A_{LL}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

A_{LL} = Área rectangular de proyección sobre la superficie de la losa.

IM = El factor de carga dinámica.

m = Factor de presencia múltiple.

P = Carga viva aplicada en la superficie.

PL = Presión vertical por la carga viva en la superficie.

El factor de presencia múltiple es igual 0.65 ya que la alcantarilla tiene 5 carriles, según la tabla 3.6.1.1.2-1. de diseño AASHTO LRFD (2020).

El factor de carga dinámica que se utilizó es valor calculado con la ecuación 14 para las condiciones existentes de relleno sobre la alcantarilla.

Carga de carril de diseño (C_{HL-93}):

La carga de carril de diseño es una carga distribuida de 0,954 ton/m a lo largo del claro y transversamente distribuida en un carril de 3.05 m de acuerdo en el artículo 3.6.1.4 de diseño AASTHO LRFD (2020). Es importante mencionar que la carga de carril de diseño se aplica para alcantarilla con tramos mayores a 4.6 m y representa la acumulación de vehículos sobre el tramo del puente o alcantarilla.

La carga de carril es una uniformemente distribuida en la superficie de rodadura, por ende, se calculó la distribución sobre el material de relleno, para calcular el efecto en losa superior de la alcantarilla.

La distribución de la carga de carril y la carga viva de diseño, se calcularon utilizando la misma pendiente.

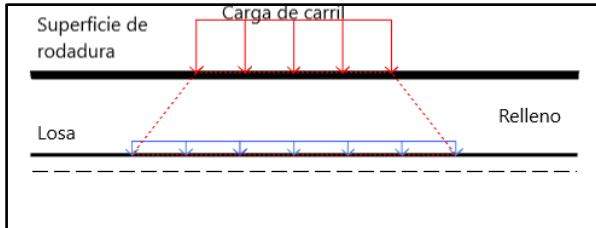


Figura 7. Distribución de la carga de carril de diseño a través del relleno.

Carga de sismo (EQ):

La fuerza sísmica sobre los muros de alcantarilla se calculó, con base en los lineamientos de la sección 6.2.4 del *Código de Cimentaciones de Costa Rica*, considerando el empuje dinámico de la fuerza horizontal generada por el sismo.

$$P_s = \frac{\gamma_s * H^2}{2} * \left(\frac{3}{4} a_{max}\right) \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

P_s = Fuerza del sismo que actúa a 0.6H de la base

γ_s = Peso unitario del suelo.

H = Altura del muro.

a_{max} = Aceleración efectiva de diseño prevista para el sitio de cimentación.

La fuerza sísmica, depende de las características del sitio de cimentación y de la zona de amenaza sísmica donde se ubica la estructura (Alcantarilla).

La zona de amenaza sísmica

Según la tabla 2.1-1 *Zonas de amenaza sísmica por provincia, cantón y distrito* del manual *Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes*, (2013) la zona de amenaza sísmica para el sitio en específico donde se ubica la estructura, se clasificó como zona III.

Provincia: Puntarenas.
 Cantón: Esparza.
 Distrito: San Juan Grande.
 Zona sísmica: III

Sitio de cimentación

El sitio de cimentación corresponde al lugar en que se construyó la alcantarilla, las características geotecnicas del sitio pueden modificar la sacudida sísmica, *específicamente las amplitudes y contenido de frecuencias, a partir del basamento rocoso.*

El sitio de cimentación se clasificó como S3 según el CSCR-10 a partir de las características ingenieriles del suelo, según la Asociación Costarricense de Geotecnia (2009).

Aceleración pico efectiva de diseño

La aceleración efectiva se obtuvo a partir de la zona sísmica y de clasificación del suelo para el sitio de cimentación.

Zona sísmica: III
 Sitio de cimentación: S3
 Aceleración efectiva de diseño: 0.20

La fuerza sísmica se puede sustituir por una fuerza distribuida, con una variación trapezoidal en la altura del muro, cuya resultante tenga la misma magnitud y punto de aplicación que la fuerza sísmica P_s , de acuerdo con la sección 6.2.4 del *Código de Cimentaciones de Costa Rica*

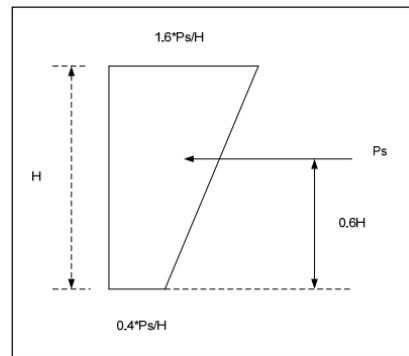


Figura 8. Variación trapezoidal equivalente a la fuerza de sismo.

Para calcular la fuerza distribuida en la parte superior e inferior del muro de la alcantarilla de cuadro, que sea equivalente a la fuerza sísmica puntual que actúa 0.6H de la base, se utilizaron las ecuaciones 17 y 18.

$$W_s = \frac{3}{5} * \gamma_s * H * (a_{max}) \quad \text{Ecuación 17}$$

$$W_i = \frac{3}{20} * \gamma_s * H * (a_{max}) \quad \text{Ecuación 18}$$

Carga de diseño HL-93:

Para tal efecto, las alcantarillas con tramos mayores a 15 ft o 4.6 m, la carga de diseño que se utiliza es la combinación que rige, entre camión de diseño o el tándem en combinación con carga de carril, según las especificaciones del Artículo 3.6.1.2 de diseño AASHTO LRFD (2020).

Camión de diseño.

Para el camión de diseño, los pesos y la separación entre los ejes y las ruedas, se tomaron como se especifica en la Figura 9.

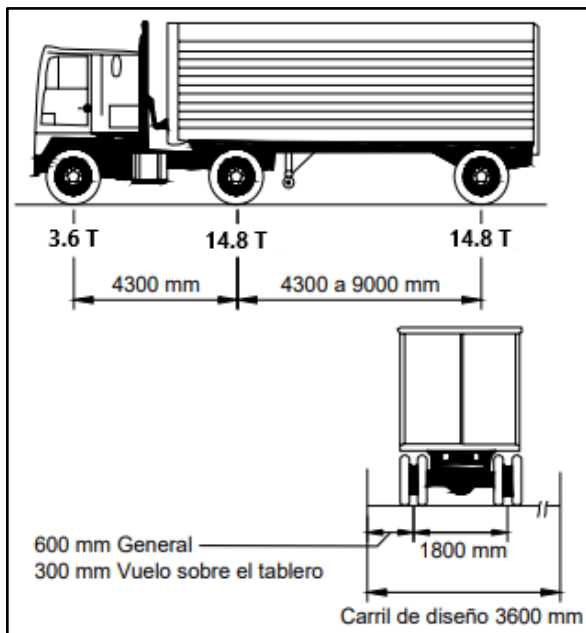


Figura 9 Camión de diseño HS20-44.
Fuente: Obtenido de (AASHTO LRFD, 2020).

Camión tándem de diseño.

El camión tándem de diseño es un vehículo de 2 ejes, con un peso 11200 kg por eje y una separación de 1200 mm. La separación transversal de las ruedas es 1800 mm, como se muestra en la figura 10.

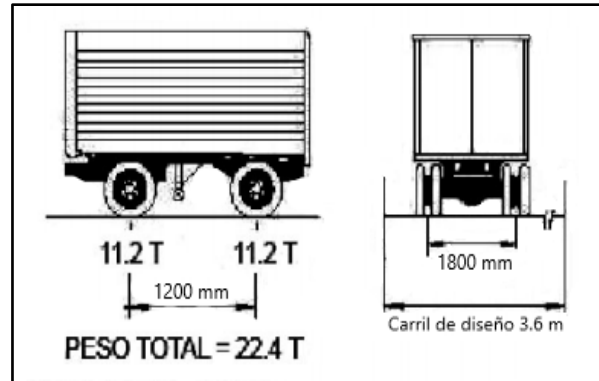


Figura 10. Camión Tándem de diseño.
Fuente: Obtenido de (AASHTO LRFD 2020).

Carga del carril de diseño.

La carga del carril de diseño consistirá en una carga de 0.95 ton/m uniformemente distribuida en dirección longitudinal. Transversalmente la carga del carril de diseño se considera uniformemente distribuida en un ancho de 3000 mm.

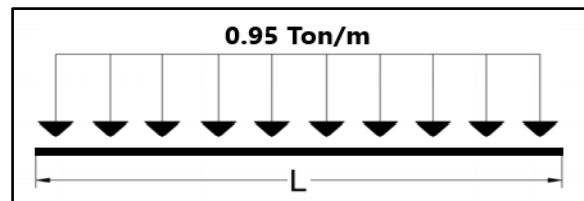


Figura 11. Distribución de la carga de carril de diseño.
Fuente: Obtenido de (AASHTO LRFD, 2020)

Análisis estructural:

Las cargas se calcularon para una franja de 1 metro de ancho, con el propósito de calcular los esfuerzos máximos de momento y cortante generados en la alcantarilla.

En primer lugar, se determinó la posición de la presión vertical producto de la carga viva de diseño, en la que genera la mayor demanda de esfuerzos. Se analizó la losa superior de la alcantarilla, como una viga doblemente empotrada, ya que, la alcantarilla es un marco rígido, donde, las uniones de los elementos son capaces de transmitir los momentos al estar construidas monolíticamente.

Se utilizó el *software* computacional SAP2000, para elaborar el modelo de la viga empotrada en

los extremos y se colocó la magnitud de carga distribuida unitaria, según la longitud de proyección sobre la losa y se calcularon los momentos negativos para cada extremo y el momento positivo, en esta misma línea, se calculó el esfuerzo a cortante para ambos extremos de viga, para la posición de la carga distribuida analizada.

Después de obtener los esfuerzos a momento y cortante se movió la carga distribuida 0.1 m desde la posición inicial y se realizó el mismo proceso hasta analizar todas las posiciones para el claro de la alcantarilla

De esta manera, se determinó la posición de la carga distribuida en la que genera el mayor momento negativo, el mayor momento positivo, el mayor cortante (ver apéndice 3).

Modelo teórico de análisis

Se realizó un modelo teórico simplificado para el análisis estructural de la alcantarilla. En el cual, se consideró 1 metro de ancho para la losa y muros laterales, como un marco bidimensional empotrado en la base de los muros, bajo la premisa de que la conexión entre los muros y la losa superior hay transferencia de esfuerzos a momento y cortante, de acuerdo con la información existen de la estructura.

El modelo teórico para el análisis estructural de la alcantarilla se realizó en el *software* computacional SAP2000, se asignaron las magnitudes de las cargas que se calcularon para las cargas permanentes y para las cargas de diseño HL-93. En esta línea, para realizar el análisis estructural de la alcantarilla, se tienen en cuenta los posibles modos de falla, para los esfuerzos a momento, cortante, en los puntos donde las secciones del elemento son críticas.

Secciones críticas

Para el sistema estructural de la alcantarilla, se identificaron 5 puntos, que son las secciones críticas de los elementos estructurales, para los posibles modos de falla, para la losa superior y las paredes laterales de la alcantarilla.

Los puntos críticos en los elementos de la estructura son puntos de interés en el análisis estructural.

Combinaciones de cargas

Los estados límites de resistencia son utilizados en el diseño de estructura de puentes, con la finalidad de proveer la estabilidad y resistencia estructural, para una combinación de carga que estadísticamente puede experimentar la estructura durante su periodo de diseño.

De acuerdo con las especificaciones de la sección 3.4 de diseño AASHTO LRFD (2020), las combinaciones de carga que se seleccionaron para determinar la magnitud de los esfuerzos generados por las cargas de diseño y cargas permanentes que actúan en la estructura.

- Resistencia I: Combinación básica de carga que representa el uso vehicular normal del puente, sin viento.
- Resistencia IV: Combinación de cargas que representa relaciones muy elevadas entre las solicitaciones provocadas por las cargas permanentes y las provocadas por las sobrecargas
- Evento Extremo I: Combinación de cargas que incluye sismos.

Por la sismicidad del país, estadísticamente la estructura puede experimentar sismos durante su periodo de diseño, por ende, se consideró la combinación de evento extremo 1.

Por la altura del relleno existente sobre la alcantarilla se consideró la Resistencia IV.

Capacidad de carga de la alcantarilla:

En los puntos de las secciones críticas para los elementos estructurales, se obtuvieron los esfuerzos de momento y cortante máximos empleando los factores de carga mínimos y máximos para construir la envolvente de carga para los estados límite de Resistencia I, IV y se analizó la combinación para "evento extremo I", utilizando el *software* computacional SAP2000.

Los esfuerzos máximos a momento y cortante obtenidos en cada punto de las secciones críticas, son los esfuerzos utilizados como valores de referencia para limitar los esfuerzos que generan el paso cargas especiales sobre las estructuras.

Evaluación de la Alcantarilla

Para la realización de la evaluación de la capacidad de carga viva de las estructuras para el paso de carga especiales, se aplicaron criterios y procedimientos expuestos en el capítulo 6A.5.12 del Manual AASTHO MBE-3.

De acuerdo con la metodología del manual AASTHO MBE-3 (2018), para evaluación de la capacidad de carga viva de una estructura, solo se deben de considerar los efectos de las cargas que actúan sobre la misma, considerando únicamente las cargas permanentes y la carga viva vehicular a evaluar, sin considerar cargas ambientales y accidentales. Por tal razón, únicamente se consideraron las siguientes cargas:

- Carga muerta (DC): Peso propio de los componentes estructurales y accesorios.
- Carga muerta (DW): Peso propio de la superficie de rodadura y las utilidades.
- Presión de tierra vertical (EV): Producto del material de relleno sobre la estructura.
- Presión lateral de tierra (EH): Producto del material a lados de la estructura.
- Presión horizontal de tierra (ES): Producto del peso de la superficie de rodadura.
- Carga viva (LL): Producto del paso de la carga especial sobre la estructura.
- Sobrecarga por carga viva (LS): Producto de la carga viva ubicada justo al final de la estructura.

La carga de sismo no se considera, ya que la probabilidad de que ocurra el sismo en el instante donde la carga especial este sobre la alcantarilla es muy baja e improbable, por lo que no se consideró la carga de sismo.

Las cargas ambientes como el viento, el hielo, la temperatura generalmente no se consideran, al menos que por las condiciones ambientales que experimenta la estructura justifique su inclusión para ser consideradas.

La carga de carril no se considera ya que, el paso de la carga de permiso especial se realizará sin otros vehículos en las estructuras, y justamente la carga de carril representa la acumulación de vehículos en la estructura.

Camión especial del ICE

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) cuenta con vehículos propios equipados para el transporte de cargas especiales, para los cuales, se analizaron las especificaciones técnicas, con el propósito de evaluar la capacidad de la alcantarilla, teniendo en cuenta el peso propio del camión y del *Lowboy*, además de la configuración de ejes, para así determinar la magnitud de carga máxima que pueden transportar, según la capacidad de carga viva de las estructuras.

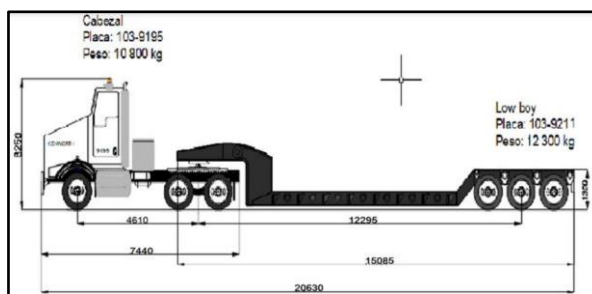


Figura 12. Camión para el transporte de cargas especiales.
Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Partiendo de la información de la ficha técnica (ver anexo 6 y 7), para el peso, dimensiones y la configuración de ejes del sistema mostrado en la figura 12, se calculó la distribución del peso propio del camión entre sus ejes, luego se calculó la distribución del peso propio de la plataforma (*Lowboy*) entre sus ejes y la quinta rueda del camión, considerando la estructura del *Lowboy* como una “viga simplemente apoyada”, finalmente, se aplicó una magnitud de carga “P” que representará el peso de los equipos electromecánicos, y se calculó la distribución de la carga P entre los ejes del *Lowboy* y la quinta rueda del camión (ver apéndice 1).

Camión especial 2

El camión especial 2 es un vehículo equipado y especializado para el transporte de cargas especiales de la empresa Cargas Especiales Mincho. Se analizó la información de las especificaciones técnicas pesos, dimensiones y configuración de ejes para el equipo según el diagrama que se muestra en la figura 13, (ver anexo 8)

De acuerdo con la información brindada por la empresa Cargas Especiales Mincho, la configuración del equipo de la figura 13, es el sistema que mayor cantidad de carga puede transportar según la legislación actual del país.

Para este camión, se realizó un proceso al camión especial del ICE para calcular la distribución del peso propio del equipo entre los

ejes y la carga “P” que representa el peso de la carga especial entre los ejes correspondientes.

Para los dos camiones especiales, se realizó un análisis para determinar la incidencia de más de una carga distribuida sobre la estructura, ya que, la longitud del tramo de la alcantarilla es muy corta, y la separación entre ejes para los camiones especiales es mayor o similar a la longitud del claro de la alcantarilla.

De la misma forma que se determinó la posición de la carga distribuida en la que genera el mayor momento negativo, el mayor momento positivo y el cortante para el camión de diseño, se realizó para los camiones especiales (ver apéndice 3).

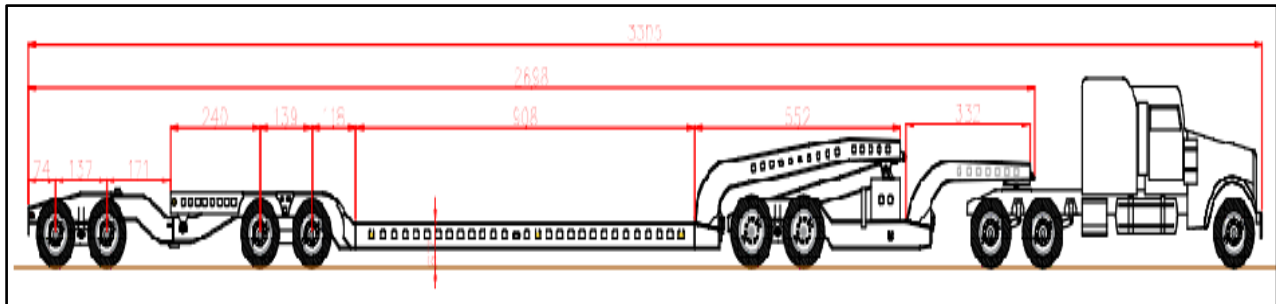


Figura 13. Camión para el transporte de cargas especiales.
Fuente: Cargas Especiales Mincho.

Evaluación: Paso de cargas especiales.

Las condiciones para el tránsito de la carga especial sobre la estructura:

- El paso de la carga de permiso especial sobre la estructura se realizará sin otros vehículos, es decir, únicamente la carga especial.
- Velocidad máxima de circulación del camión sobre la estructura es de 16 kph.
- El camión especial circulará por el centro de la vía de acceso del puente.

Las cargas se calcularon para una franja de 1 metro de ancho, para obtener los esfuerzos máximos a momento y cortante, de acuerdo con el

manual AASTHO MBE-3 (2018) para la evaluación de cargas legales o especiales se aplica un único carril cargado con un factor de múltiple presencia igual a 1. Se utilizó la combinación de carga para resistencia II según la tabla 6A.5.12.5-1 (ver anexo 9) con el propósito de aplicar los factores de carga máximos y mínimos y crear la mayor demanda a momento y cortante en las secciones críticas de la estructura.

De acuerdo con el Artículo 6A.5.12.10 del manual AASTHO MBE-3 (2018), se realizó una reducción del 50 por ciento de las cargas horizontales EH, ES y LS, para generar el mayor efecto de carga a evaluar, para el momento positivo en la losa superior.

Para la alcantarilla se analizaron dos posibles escenarios para obtener los esfuerzos máximos en la combinación de carga para resistencia 2.

- Escenario 1: Cargas verticales y horizontales máximas.

- Escenario 2: Cargas verticales máximas y horizontales mínimas.

De acuerdo con el manual AASHTO MBE-3 (2018) el factor de mayoración para una carga especial es $\gamma_{LL} = 1.1$ si el paso se realizará sin otros vehículos en el puente, para un número de veces menor a 100.

Los esfuerzos para momento y cortante, se calcularon utilizando el *software* computacional SAP2000, donde se modelaron las cargas permanentes y las cargas vivas del camión especial, para la posición donde generan el mayor efecto en la estructura. Se utilizó la combinación de carga para resistencia 2 y los factores de carga mínimos y máximos, para construir la envolvente de carga con fin de obtener los esfuerzos máximos en sesiones críticas de la estructura para los modos de falla.

Los esfuerzos de momento y cortante obtenidos de la combinación de carga para resistencia 2 de una magnitud de carga "P" que representa el peso de los equipos electromecánicos, se compararon con los esfuerzos nominales de referencia.

Se realizó un análisis de sensibilidad de carga, aumentando o disminuyendo la magnitud de la carga "P" evaluada, hasta alcanzar esfuerzos muy cercanos o iguales a los esfuerzos de referencia, en los elementos estructurales (losa y muros). Para cada una de las iteraciones, se realizó un análisis numérico, con el objetivo, de determinar la magnitud máxima de la carga "P" que representa el peso de los equipos electromecánicos, que teóricamente generan esfuerzos similares o iguales a los esfuerzos límites de referencia, utilizados como la capacidad de la estructura.

Puente: Paso Superior N 1357

El puente se ubica en Coyolar, Orotina, Alajuela y corresponde a un paso de carga según el estudio de ruta (Puerto Caldera - Ventanas Garita) realizado por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), con el objetivo de determinar la viabilidad para el transporte de los equipos electromecánicos de la modernización de la Planta Hidroeléctrica (PH) Ventanas Garita.



Figura 14. Vista lateral del puente (Paso superior).
Fuente. (SAEP, 2021)

Información

La información general del puente en estudio se resume en el cuadro 4.

CUADRO 4 INFORMACIÓN GENERAL	
Nombre del paso:	P.S.S.R.N. 34
N° de estructura:	1357
Tipo de estructura:	Paso Superior
Provincia:	Alajuela
Cantón:	Orotina
Distrito:	Coyolar
Tipo de Ruta:	Ruta Nacional
Clasificación de Ruta:	Primario
Ruta N°:	27
Encargado:	Zona 3-1 Puntarenas.
Latitud Norte:	9° 53' 14.23"
Latitud Oeste:	84° 34' 32.25"
Kilómetro:	60.6
Longitud:	20.40 m
2 tramos:	10.20 m

Para el puente en estudio se realizó un cuadro resumen, con la información, para realizar la evaluación de la capacidad de carga viva, como se muestra en el cuadro 5.

CUADRO 5. INFORMACIÓN EXISTENTE DEL PUENTE.		
Ítem.	Si	No
Planos de diseño.		x
Planos constructivos.		x
Esquemas de refuerzo.		x
Fecha de diseño.		x
Fecha de construcción.		x
Inspecciones.	x	
Planos (geometría y dimensiones).	x	
Restricción por Carga.		x

De la misma manera que se actuó para la alcantarilla, se consultó en el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y en Consejo Nacional de Concesiones (CNC), la información del diseño del puente. Sin embargo, en estas instituciones no se cuentan con dicha información para esta estructura en específico.

Inspecciones

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) realizó una inspección para verificar y determinar las condiciones actuales, esquemas de daños, geometría y dimensiones de los componentes estructurales, como parte del estudio de ruta (Puerto Caldera - Ventanas Garita).

La información obtenida se resume en el cuadro 6, para los daños identificados y la clasificación para grado de deterioro según el Manual de Inspección de Puentes del MOPT (2007):

CUADRO 6. INFORMACIÓN DE LAS INSPECCIONES DEL PUENTE.		
Ítem	Daños	Grado
Vigas-losa	Eflorescencia	2
	Agrietamiento del concreto mayor a 0.2 mm	1
	Descascaramiento	2
Bastiones	Eflorescencias	2
	Agrietamiento en una dirección mayor a 0.4 mm	5
	Descascaramiento	2
Pila	Eflorescencias	2
	Agrietamiento en una dirección mayor a 0.4 mm	3
	Descascaramiento	2
Cimientos	---No se tiene información---	---

La clasificación para el grado de deterioro según el Manual de Inspección de Puentes del MOPT (2007).

- 1 = Ningún daño visible
- 2 = Daño visible Bajo.
- 3 = Daño visible Intermedio.
- 4 = Daño visible Avanzado.
- 5 = Daño visible Inaceptable.



Figura 15. Eflorescencia en la pila y viga-losa.
Fuente: (Salazar, s.f.)

La clasificación de nivel de daño visible en la estructura producto de la eflorescencia es bajo. Esta patología en sí no representa un problema en los elementos estructurales, sin embargo, contribuye a que el concreto sea más vulnerable a

sufrir daños por otras patologías, que deterioran el acero y concreto.

En los bastiones y pila central, las grietas son los daños más graves que se identificaron en la inspección, como se muestra en el cuadro 6 y la figura 16.

Las grietas pueden reducir la capacidad de carga del elemento, además, el ancho de las grietas permite el paso de agua, microorganismos y otras sustancias que afectan el acero de refuerzo, ya que, este se oxida, pierde área y reduce la capacidad estructural del elemento.



Figura 16 Grieta en la Subestructura, Bastión 2.
Fuente:(Salazar, s.f.)

El agrietamiento es uno de los daños más importantes que se identificaron en la estructura. Las grietas verticales (ver figura 16) pueden deberse a muchas causas, entre ellas, el asentamiento de terreno, que generan esfuerzos o tensiones que superan la capacidad del elemento.

Información de planos.

En la información de planos brindada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), solo se cuenta con información geométrica y dimensiones para los elementos estructurales según las medidas tomadas durante las inspecciones.

De manera similar, los planos obtenidos del Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP, 2021) son complementarios a la inspección de daños que se realizó en el año 2017.

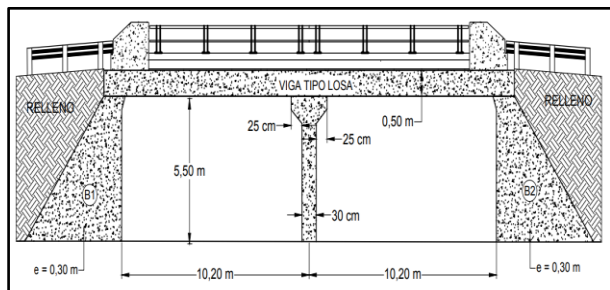


Figura 17. Vista lateral del puente.
Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Cálculo de cargas:

Para estimar la capacidad de carga viva que teóricamente tiene el puente, se consideraron los efectos de las cargas permanentes, carga de sismo y la carga viva de diseño. Por lo tanto, se partió de la información existente de la estructura y las especificaciones y procedimientos descritos Bridge Design Specifications AASHTO LRFD (2020), para identificar las cargas que actúan en la estructura, estas son:

- Carga muerta (DC): Peso propio componentes estructurales y accesorios.
- Carga muerta (DW): Peso propio de la superficie de rodadura y las utilidades.
- Carga de relleno (R): Producto del material de relleno sobre la superestructura.
- Carga viva (LL): Carga diseño HL-93
- Carga de impacto (IM): Movimiento de la carga viva sobre la estructura.

Superestructura:

Para la superestructura, se calcularon las cargas permanentes, según la geometría, dimensiones, espesores de los elementos estructurales y accesorios del puente, para las condiciones existentes, con base en la inspección realizada.

Para los materiales, y accesorios se utilizaron valores de referencia, de acuerdo con la tabla 3.5.1-1 de diseño AASHTO (2020).

Carga muerta (DC)

Para calcular el peso de los elementos de concreto reforzado, se utilizó un valor de referencia para el peso unitario de 2400 kg/m³, donde este valor incluye tanto el peso del concreto, como el peso del acero que lo refuerza.

La carga muerta (DC) de las vigas losa, se calculó mediante la siguiente ecuación.

$$W_{DC} = \gamma_c * E_s * l \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

γ_c = Peso unitario o densidad del concreto.

E_s = Peralte de la viga-losa de puente.

l = 1 metro de ancho de la viga-losa de puente.

Para la barrera de la línea de centro, tipo NEW JERSEY (2 CARAS), se utilizó un peso de 650 kg por metro lineal (Rodríguez, 2020).

Carga muerta (DW):

Para la carpeta asfáltica, se utilizó un valor de referencia para el peso unitario de 2240 kg/m³, según la Tabla 3.5.1-1 de diseño AASHTO LRFD (2020).

La carga muerta (DW) de la superficie de rodadura, se calculó mediante la siguiente ecuación.

$$W_{DW} = \gamma_a * E_s * l \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

γ_w = Peso unitario del asfalto.

E_s = Peralte de la viga-losa del puente.

l = 1 metro de ancho de la viga-losa del puente.

Carga de relleno (R):

Para la carga de relleno producto del peso propio de la columna del material sobre la superestructura del puente, se utilizó un valor de referencia para el peso unitario de 2000 kg/m³, según la Tabla 3.5.1-1 de diseño AASHTO LRFD (2020).

La carga de relleno (R) sobre las vigas losa, se calculó mediante la siguiente ecuación

$$R = \gamma_s * H * l$$

Ecuación 21

Donde:

γ_s = Peso unitario del material de relleno sobre la alcantarilla.

H = Profundidad del relleno desde la carpeta asfáltica hasta la superestructura.

l = 1 metro de ancho de la viga-losa del puente.

Carga viva (LL).

Las cargas vivas que se utilizaron en la evaluación del puente son las siguientes:

- Cargas de diseño HL-93, se tomaron como se muestra en las figuras: 9,10,11 según las especificaciones de diseño de AASHTO LRFD (2020).
- Cargas de permisos especiales: Camión del ICE como se muestra en la figura 12 y el camión de la empresa Cargas Especiales Mincho, como se muestra en la figura 13.

Para las cargas de diseño y las cargas especiales se utilizó el teorema de Barré, para determinar la posición del tren de carga, que causa el mayor efecto a momento en la superestructura (Viga-losa).

Según el teorema de Barré, la posición más desfavorable que produce el máximo momento para losas cargadas en dirección paralela al tráfico es aquella en la cual la carga más pesada y la resultante de todas las cargas aplicadas equidistan del centro de luz (Seminario, 2004, p. 57).

Para el análisis de la carga viva en la superestructura se colocó en la posición más desfavorable, para determinar los mayores efectos a cortante o momento. “El teorema de barré es un método práctico, el cual se usa para determinar el valor del momento máximo en una viga cuando es sometida a un tren de cargas puntuales.” (Barrero & Restrepo, 2018, p. 20).

Por otra parte, para determinar la posición de las cargas puntuales, en la que se genera cortante máximo para la configuración de ejes de los camiones de diseño, y los camiones de transporte de cargas especiales, se emplearon líneas de influencia, analizando la superestructura como una viga 10.2 m simplemente apoyada.

Para construir la línea de influencia para una

carga unitaria, se determinaron las ecuaciones, analizando la superestructura del puente como una viga simplemente apoyada de una longitud de 10.20 m.

Ancho franja equivalente interior de diseño

Para calcular el efecto de la carga viva de diseño, se utilizó el método de franjas equivalentes de diseño, para conseguir las solicitaciones de la carga viva por metro de ancho.

La franja equivalente interior para el diseño, según la sección 4.6.2.1.2 de manual AASHTO LRFD (2020), son aplicables para puentes con más de 4.60 m de longitud en dirección paralela al tráfico.

El ancho equivalente de diseño de la franja interior longitudinal para un carril cargado, incluyendo el efecto de presencia múltiple, se calculó según la ecuación (4.6.2.3-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

$$E = 0.25 + 0.42 * \sqrt{L_1 * W_1} \quad \text{Ecuación 22}$$

El ancho equivalente de diseño de la franja interior longitudinal con más de un carril cargado se calculó según la ecuación (4.6.2.3-2) de diseño AASHTO LRFD (2020).

$$E = 2.10 + 0.12 * \sqrt{L_1 * W_1} \leq \frac{W}{N_1} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

E = ancho equivalente (m).

L_1 = menor valor (m) entre longitud real y 18.28 m.

W_1 = menor valor (m) entre ancho real y 18.28 m. para carga en múltiples carriles ó 9.14 m para carga en un solo carril.

W = ancho físico entre los bordes del puente (m)

N_1 = número de carriles de diseño.

Para calcular los efectos a momento y cortante de la carga viva de diseño por unidad de ancho, se utilizó el método de la franja equivalente de diseño.

El método de franjas equivalentes de diseño contempla implícitamente el factor de presencia múltiple, por ende, este factor ya está explícito en los resultados.

Carga impacto (IM):

De acuerdo con el artículo 6A.2.3.3 del manual AASTHO MBE-3 (2018), para vehículos de movimiento lento (Velocidad de circulación ≤ 10 mph), donde el incremento por carga dinámica no se considera.

Sin embargo, para el análisis de la carga de diseño, el camión tándem y el camión de diseño se utilizó un incremento de carga de 33 %, según las especificaciones del artículo 3.6.2 de diseño AASHTO LRFD (2020). Sin embargo, para el caso en estudio, existe un relleno de 0.6 m, por ende, para tal efecto, la carga dinámica se disipa a través del material de relleno, en este sentido, la carga dinámica se calculó mediante la ecuación 14.

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

Figura 18. Tolerancia de carga dinámica, IM.
Fuente: Obtenido de (AASHTO LRFD 2020)

Carga del carril de diseño.

La carga del carril de diseño consistió en una carga de 0.95 ton/m uniformemente distribuida en dirección longitudinal. Transversalmente la carga del carril de diseño se considera uniformemente distribuida en un ancho de 3000 mm.

De acuerdo con (Ramírez & Leon, 2010) el efecto de la carga de carril se puede considerar uniformemente distribuida en el ancho franja equivalente de diseño.

Carga de sismo (EQ)

La carga de sismo se tomó como solicitaciones horizontales, según los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes (CFIA, 2013) utilizando el coeficiente de aceleración, multiplicado por el peso tributario de la carga permanente y por el factor de importancia del puente.

Para calcular la carga sísmica, se determinó la zona de amenaza sísmica, en la cual se encuentra emplazado el puente. Luego se determinó el sitio de cimentación, el cual se obtiene a partir de parámetros geotécnicos de la rigidez del medio soportante y finalmente se realizó la clasificación e importancia operacional.

La zona de amenaza sísmica

Según la tabla 2.1-1 *Zonas de amenaza sísmica por provincia, cantón y distrito* del manual *Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes*, (2013) la zona de amenaza sísmica para el sitio en específico donde se ubica la estructura es zona III

Provincia: Alajuela
Cantón: Orotina
Distrito: Coyolar
Zona sísmica: III

Sitio de cimentación

El sitio de cimentación corresponde al lugar en que se construyó el puente, *las características geotécnicas del sitio pueden modificar la sacudida sísmica, específicamente las amplitudes y contenido de frecuencias, a partir del basamento rocoso* (CFIA, 2013).

El sitio de cimentación se supuso como S4 según el (CFIA, 2013) apoyados en las características ingenieriles del suelo, según la Asociación Costarricense de Geotecnia (2009).

Es importante aclarar que no se cuenta con un estudio de suelos para clasificar el sitio de cimentación, por ende, se tomó como S4 según (CFIA, 2013).

Aceleración pico efectiva de diseño

La aceleración efectiva se obtuvo a partir de la zona sísmica y de clasificación del suelo para el sitio de cimentación según la tabla 2.4-1. Coeficientes sísmicos espectrales C_a y C_v (CFIA, 2013).

Zona sísmica: III
Sitio de cimentación: S4
Aceleración efectiva: 0.367

Clasificación y factor de importancia operacional

El puente se clasificó como esencial, ya que se ubica a lo largo de rutas primarias con un tránsito promedio diario (TPD) > 5000 vehículos, con un factor de importancia igual a 1.

En las combinaciones de carga, aplicando los factores máximos, para calcular los esfuerzos a momento y cortante nominales, que se utilizaron para limitar la capacidad de la estructura.

Método de análisis para la superestructura.

Según las especificaciones AASHTO LRFD, 2020 para el método de análisis de superestructuras tipo losa, expone el método de franjas equivalentes para el diseño de losas, básicamente consiste en dividir el tablero en franjas ya sea paralelas o perpendiculares a la línea de tráfico.

Se mencionan dos métodos; el método de franjas equivalente aproximado, para franjas perpendiculares a la línea de tráfico y método tradicional para los casos donde aplique el método aproximado.

El método de análisis para la superestructura se realizó utilizando la simplificación del método de franja equivalentes tradicional para diseño.

La superestructura se analizó como una losa simplemente apoyada, de acuerdo con las características del puente.

El modelo teórico para el análisis estructural de la superestructura se realizó en el *software* computacional SAP2000, se asignaron las magnitudes de las cargas que se calcularon para las cargas permanentes y para la carga de diseño HL-93 que rige, en esta línea, se tienen en cuenta los posibles modos de falla para la superestructura, a momento en el centro del claro, y cortante en los extremos del claro.

Las combinaciones de carga que se aplicaron para determinar la magnitud de los esfuerzos generados por las cargas de diseño y cargas permanentes que actúan en la estructura, corresponden a las siguientes:

- Resistencia I: Combinación básica de carga que representa el uso vehicular normal del puente, sin viento.
- Evento Extremo I: Combinación de cargas que incluye sismos.

Evaluación de la superestructura

Para la realización de la evaluación de la capacidad de carga viva de la superestructura del puente para el paso de cargas especiales, se aplicaron criterios y procedimientos expuestos en el capítulo 6A.5.12 del Manual AASTHO MBE-3.

Para la evaluación de la superestructura únicamente se consideraron las siguientes cargas:

- Carga muerta (DC): Peso propio de los componentes estructurales y accesorios.
- Carga muerta (DW): Peso propio de la superficie de rodadura y las utilidades.
- Carga de relleno (R): Producto del material de relleno sobre la superestructura.
- Carga viva (LL): Producto del paso de la carga especial sobre la estructura.

Las condiciones para el tránsito de la carga especial sobre la estructura:

- El paso de la carga de permiso especial sobre la estructura se realizará sin otros vehículos, es decir, únicamente la carga especial.
- Velocidad máxima de circulación del camión sobre la estructura es de 16 kph.
- El camión especial circulará por el centro de la vía de acceso del puente.

De la misma manera que se realizó la evaluación para la alcantarilla, se actuó para la superestructura del puente, calculando los esfuerzos a momento y cortante en SAP2000 para la combinación de carga para resistencia 2, aplicando los factores de mayoración para las cargas permanentes y para la carga especial un factor de 1.1

De acuerdo con el manual AASHTO MBE-3 (2018) el factor de mayoración para una carga especial es $\gamma_{LL} = 1.1$. si el paso se realizara sin otros vehículos en el puente, para un número de veces menor a 100.

Se calcularon los esfuerzos para momento y cortante, utilizando el *software* computacional SAP2000, donde se modelaron las cargas permanentes y las cargas vivas del camión especial, para la posición donde generan el mayor efecto en la estructura, y se aplicó la combinación de carga para resistencia 2 donde se emplearon los factores máximos, para construir la envolvente de carga con fin de obtener los esfuerzos máximos.

Los esfuerzos de momento y cortante obtenidos de la combinación de carga para resistencia 2 para una magnitud de carga "P" que representa el peso de los equipos electromecánicos, se compararon con los esfuerzos nominales de referencia que generan las cargas permanentes y carga de diseño en combinaciones de carga.

De esta manera, se realizaron iteraciones, aumentando o disminuyendo la magnitud de la carga "P", hasta alcanzar esfuerzos muy cercanos o iguales a los esfuerzos de referencia obtenidos para la superestructura. Para cada una de las iteraciones, se realizó un análisis numérico, con el objetivo, de determinar la magnitud máxima de la carga "P" que representa el peso de los equipos electromecánicos, que teóricamente generan esfuerzos similares o iguales a los esfuerzos de referencia producto de la carga de diseño.

Resultados

Alcantarilla.

A continuación, se presenta la magnitud de las cargas, que se modelaron para calcular los esfuerzos a momento y cortante nominal, que se utilizaron como referencia para la capacidad de la alcantarilla.

CUADRO 7. CARGAS DE DISEÑO.			
Cargas.\ Elemento	Losa superior [B - C]	Muro parte inferior [A] y [D]	Muro parte superior [B] y [C]
DC (↓)	720 kg/m	---	---
DW (↓)	202 kg/m	---	---
EV (↓)	3139 kg/m	---	---
ES (→)	---	101 kg/m	101 kg/m
EH (→)	---	6500 kg/m	1400 kg/m
LS (→)	---	569 kg/m	1226 kg/m
EQ (→)	---	306 kg/m	1224 kg/m

CUADRO 8. CARGA VIVA DE DISEÑO.		
Carga.\ Elemento	Losa	Longitud de distribución
PLC.Tándem (↓)	1211 kg/m	3.18 m
CHL-93 (↓)	122 kg/m	5.25 m
PLC.Diseño (↓)	1273 kg/m	1.96 m

CUADRO 9. POSICIÓN DE LA CARGA VIVA DISEÑO PARA.			
Carga.\	Esfuerzo Max.	P. Inicial	P. final
PLC.Tándem (↓)	Cortante	0.00 m	3.19 m
PLC.Tándem (↓)	Momento (-)	0.40 m	3.59 m
PLC.Tándem (↓)	Momento (+)	1.03 m	4.22 m

Se presentan los resultados para el momento y cortante nominal en las secciones críticas para los elementos estructurales de la alcantarilla obtenidos del modelo teórico realizado en el software computacional SAP2000.

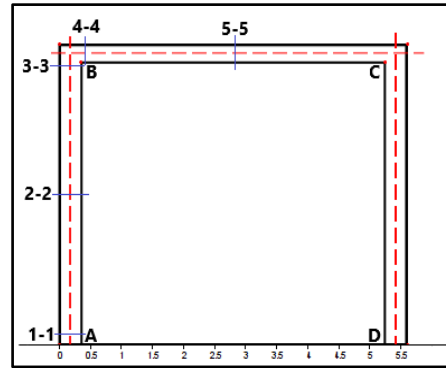


Figura 19. Secciones críticas en los elementos estructurales de la alcantarilla.

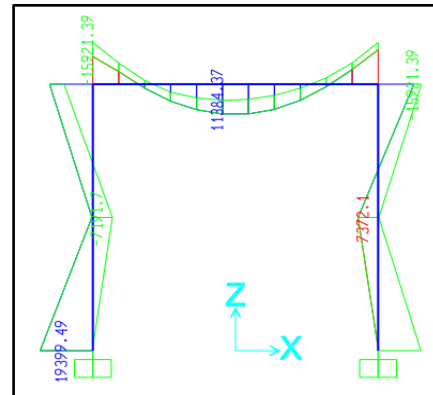


Figura 20. Diagrama de esfuerzos para los momentos máximos.

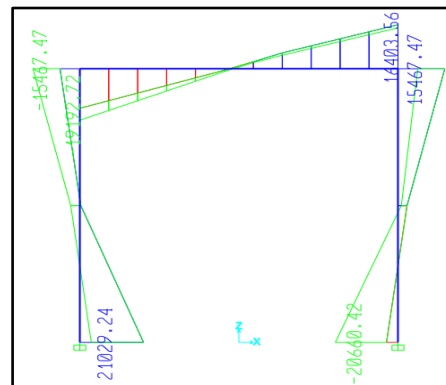


Figura 21. Diagrama de envolvente para el esfuerzo cortante máximos.

CUADRO 10 MOMENTO Y CORTANTE NOMINAL EN LAS SECCIONES CRÍTICAS.		
Elemento.	Momento Máximo (kgf-m)	Cortante Máximo (kgf)
Muro [1-1]	19399.49	21029.24
Muro [2-2]	-7372.1	-3097.55
Muro [3-3]	15929.18	-15467.47
Losa [4-4]	-15929.18	-19192.72
Losa [5-5]	11389.45	0.00

Evaluación para el paso de carga especiales

A continuación, se presenta la magnitud de las cargas permanentes, para la evaluación de capacidad de la alcantarilla para el paso de cargas especiales.

CUADRO 11. CARGAS A EVALUAR.			
Cargas.\Elemento	Losa superior [B - C]	Muro parte inferior [A] y [D]	Muro parte superior [B] y [C]
DC (↓)	720 kg/m	---	---
DW (↓)	202 kg/m	---	---
EV (↓)	3139 kg/m	---	---
ES (→)	---	101 kg/m	101 kg/m
EH (→)	---	6500 kg/m	1400 kg/m
LS (→)	---	569 kg/m	1226 kg/m

Evaluación del camión del ICE

CUADRO 12. POSICIÓN DE LA CARGA VIVA DISTRIBUIDA A EVALUAR			
Carga.\	Esfuerzo Max.	P. Inicial	P. Final
PLc. ICE (↓)	Cortante	0.00 m	3.19 m
PLc. ICE (↓)	Momento (-)	0.40 m	3.59 m
PLc. ICE (↓)	Momento (+)	1.03 m	4.22 m

Los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad de carga, mediante las iteraciones, para determinar la magnitud de la carga "P" que genera esfuerzos a momento y cortante en puntos críticos de los elementos muy cercanos o iguales a los valores límite de referencia que se presentan en el cuadro 10.

CUADRO 13. CARGA "P" A EVALUAR Y CARGA DISTRIBUIDA		
Iteración	Carga P (kg)	Carga distribuida (kg/m)
Iteración 1	35000	2114.51
Iteración 2	36000	2151.00
Iteración 3	35750	2141.81

CUADRO 14. EVALUACIÓN DE LA CARGA "P" PARA MOMENTO.				
	Valor Límite	P=35000 kg	P=36000 kg	P=35750 kg
Elemento.	M(kgf-m)	M(kgf-m)	(kgf-m)	M(kgf-m)
Muro [1-1]	19399.5	14323.6	14300.2	14306.1
Muro [2-2]	-7372.1	-6504.3	-6493.5	-6496.2
Muro [3-3]	15929.2	15514.9	15570.3	15556.2
Losa [4-4]	-15929.2	-15514.9	-15570.3	-15556.2
Losa [5-5]	11389.5	11336.3	11394.9	11380.0

CUADRO 15 EVALUACIÓN DE LA CARGA "P" PARA CORTANTE.				
Elemento.	Valor Límite	P=35000 kg	P=36000 kg	P=35750 kg
	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)
Muro [1-1]	21029.2	19077.5	19064.1	19067.4
Muro [2-2]	-3097.5	-2961.4	-2974.9	-2971.5
Muro [3-3]	-15467.5	-14019.1	-14032.6	-14029.2
Losa [4-4]	-19192.7	-19095.8	-19185.8	-19163.3

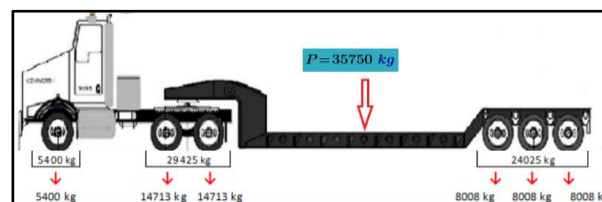


Figura 22. Diagrama de distribución del peso propio del equipo y de la carga "P" entre los ejes, para el camión de (ICE)

Evaluación del Camión 2.

CUADRO 16. POSICIÓN DE LA CARGA VIVA DISTRIBUIDA A EVALUAR			
Carga.\	Esfuerzo Max.	P. Inicial	P. final
PLc. Coyunda (↓)	Cortante	0.00 m	3.36 m
PLc. Coyunda (↓)	Momento (-)	0.40 m	3.76 m
PLc. Coyunda (↓)	Momento (+)	0.94 m	4.30 m

CUADRO 17. CARGA DISTRIBUIDA A EVALUAR		
Iteración	Carga P (kg)	Carga distribuida (kg/m)
Iteración 1	80000	2066.801
Iteración 2	82000	2112.730
Iteración 3	81000	2089.766

Los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad de carga, mediante iteraciones, para determinar la magnitud de la carga "P" que genera esfuerzos a momento y cortante en puntos críticos de los elementos muy cercanos o iguales a los valores límite de referencia que se presentados en el cuadro 10.

CUADRO 18. EVALUACIÓN DE LA CARGA "P" PARA MOMENTO.				
	Valor Límite	P=80000 kg	P=82000 kg	P=81000 kg
Elemento.	M(kgf-m)	M(kgf-m)	(kgf-m)	M(kgf-m)
Muro [1-1]	19399.49	14250.15	14014.94	14032.57
Muro [2-2]	-7372.1	6455.85	-6440.83	-6286.83
Muro [3-3]	15929.18	15560.04	15633.51	15596.78
Losa [4-4]	-15929.2	15560	-15633.5	-15596.8
Losa [5-5]	11389.5	11330.95	11407.58	11369.27

CUADRO 19 EVALUACIÓN DE LA CARGA "P" POR CORTANTE.				
	Valor Límite	P=80000 kg	P=82000 kg	P=81000 kg
Elemento.	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)
Muro [1-1]	21029.2	19038.82	19020.5	19029.7
Muro [2-2]	-3097.5	-2867.0	-3018.4	-3009.3
Muro [3-3]	-15467.5	-14019.1	-14076.1	-14066.9
Losa [4-4]	-19192.7	-19127.2	-19244.1	-19185.8

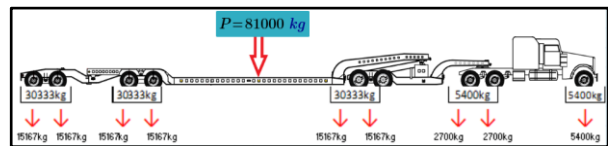


Figura 23. Diagrama de distribución del peso propio del equipo y de la carga "P" entre los ejes, para el camión de (2)

Puente: Paso Superior N 1357

Los resultados obtenidos de las cargas permanentes que actúan sobre la superestructura del puente para una franja de 1 m de ancho.

CUADRO 20. CARGAS PERMANENTES EN LA SUPERESTRUCTURA.	
Cargas.\Elemento	Superestructura
DC (↓)	1200 kg/m
DW (↓)	156 kg/m
R (↓)	1200 kg/m

La posición para el camión tándem y camión de diseño, en la causan el mayor efecto a momento y cortante en la superestructura

CUADRO 21. POSICIÓN DE LOS EJES TÁNDEM DISEÑO (SUPERESTRUCTURA)			
Carga.\	Esfuerzo Max.	P. 1	P. 2
PLc.Tándem (↓)	Cortante	0.00 m	1.2 m
PLc.Tándem (↓)	Momento (+)	4.8 m	6.00 m

CUADRO 22. POSICIÓN DE LOS EJES CAMIÓN DE DISEÑO (SUPERESTRUCTURA)				
Carga.\	Esfuerzo	P. 1	P. 2	P. 3
PLc.Diseño (↓)	Cortante	0.00 m	4.27 m	8.54 m
PLc.Diseño (↓)	Momento (+)	1.55m	5.82 m	10.9 m

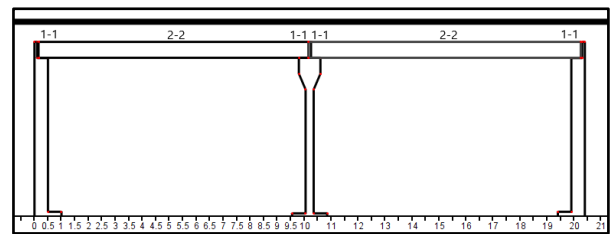


Figura 24. Secciones críticas en los elementos de la superestructura de puente.

El momento y cortante nominal para las cargas que actúan en la superestructura.

CUADRO 23 MOMENTO Y CORTANTE NOMINALES PARA LA SUPERESTRUCTURA.		
Elemento.	Momento Máximo [2-2] (kgf-m)	Cortante Máximo [1-1] (kgf)
Superestructura	78225.897	33101.342
(φ _c)	0.9	0.9
Valor Límite	70403.308	29791.207

Evaluación de la carga especial (Camión del ICE)

Resultados obtenidos para la posición más desfavorable del camión especial del ICE, para uno de los tramos.

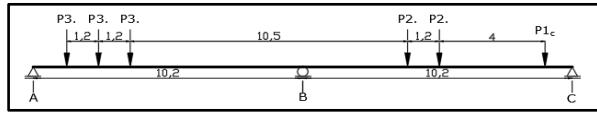


Figura 25. Análisis de las dimensiones de camión y con respecto a la longitud de los tramos del puente.

CUADRO 24. POSICIÓN DEL CAMIÓN DEL ICE PARA CONTANTE

Carga.\	Esfuerzo	P2. (m)	P2. (m)	P1. (m)
PLC.ICE (↓)	Cortante	0.00	1.20	5.2
PLC.ICE (↓)	Momento (+)	3.927	5.127	9.127

Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad de carga, mediante iteraciones, para determinar la magnitud de la carga "P" que genera esfuerzos a momento y cortante en puntos críticos de los elementos muy cercanos o iguales a los valores límite de referencia que se presentan en el cuadro 23.

CUADRO 25 ESFUERZOS A MOMENTO Y CORTANTE EN LA SUPERESTRUCTURA.

Iteración	Carga "P"	Momento [2-2] (kgf-m)	Cortante [1-1] (kgf)
1	35000	62961.18	25586.024
2	40000	64613.81	26278.261
3	45000	66267.547	26970.49
4	50000	67922.194	27662.734
5	55000	69577.597	28354.971
6	60000	71233.635	29047.208
7	57500	70239.942	28631.866

CUADRO 26 CAPACIDAD TEÓRICA Y LA DEMANDA PARA LA CARGA "P=57000 kg".

Superestructura	Momento Máx [2-2]	Cortante Máx [1-1]
Capacidad	70403.308 kgf-m	29791.207 kgf
Demanda	70239.942 kgf-m	28631.866 kgf

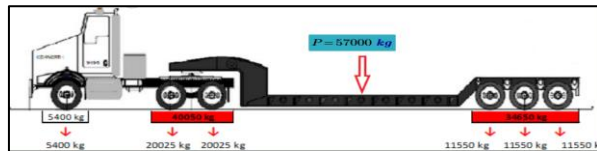


Figura 26. Diagrama de distribución del peso propio del equipo y de la carga "P" entre los ejes, para el camión de (ICE)

Evaluación de la carga especial (Camión 2).

Resultados obtenidos para la posición más desfavorable del camión especial 2, para uno de los tramos

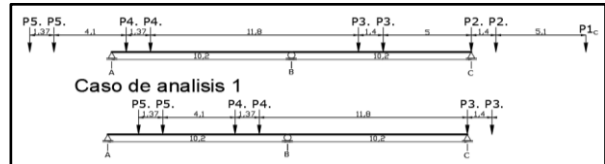


Figura 27. Análisis de las dimensiones de camión y con respecto a la longitud de los tramos del puente.

CUADRO 27. POSICIÓN DEL CAMIÓN 2 PARA MOMENTO Y CONTANTE

CARGA.\	Esfuerzo	P5. (M)	P5. (M)	P4. (M)	P4. (M)
PLC.2 (↓)	Cortante	0.00	1.37	5.48	6.85
PLC.2 (↓)	Momento (+)	2.703	4.073	8.183	9.553

Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad de carga, mediante iteraciones, para determinar la magnitud de la carga "P" que genera esfuerzos a momento y cortante en puntos críticos de la superestructura muy cercanos o iguales a los valores límite de referencia que se presentados en el cuadro 23.

CUADRO 28 ESFUERZOS EN LAS SECCIONES CRÍTICAS DE LA SUPERESTRUCTURA.

Iteración	Carga "P"	Momento [2-2] (kgf-m)	Cortante [1-1] (kgf)
1	50000	57958.401	24622.027
2	60000	60475.788	25924.778
3	70000	62993.176	27227.529
4	80000	65510.563	28530.28
5	90000	68027.95	29833.031
6	89000	67776.212	29702.756

CUADRO 29 CAPACIDAD TEÓRICA Y LA DEMANDA PARA LA CARGA "P = 89000 kg".

Superestructura	Momento Máx [2-2]	Cortante Máx [1-1]
Capacidad	70403.308 kgf-m	29791.207 kgf
Demanda	67776.212 kgf-m	29702.756kgf

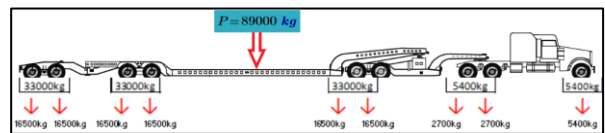


Figura 28. Diagrama de distribución del peso propio del equipo y de la carga "P" entre los ejes, para el camión de (2)

Análisis de los resultados

En relación con el método que se utilizó para estimar la capacidad de carga que teóricamente tienen las estructuras, se utilizó la carga de diseño HL-93 de referencia y las cargas existentes para la condición actual de las estructuras, calculando las solicitaciones para diseño y realización de las combinaciones para estados límite de resistencia, según las especificaciones del manual Bridge Design Specifications (AASHTO LRFD, 2020) para tomarlos de referencia en la evaluación de la capacidad de carga, para el paso de cargas especiales, es un método aceptable, ya que las estructuras han tenido tráfico normal, sin presentar daños graves.

De acuerdo con las especificaciones del manual Bridge Design Specifications AASHTO LRFD, los estados límite están destinados a proporcionar estructuras de puente capaces de soportar las cargas de diseño de forma segura durante una vida útil determinada.

Desde una perspectiva más general, el método empleado para limitar la capacidad de carga que teóricamente tienen las estructuras es apropiado ya que “históricamente, en Costa Rica se ha utilizado la normativa de la AASHTO para diseño de puentes” (Álvarez et al., 2014, p. 2).

Es conveniente acotar, que el método utilizado, permite calcular las solicitaciones que se supone fueron utilizadas para diseñar las estructuras; hipotéticamente son una referencia de la capacidad de carga para las estructuras, en relación con las limitaciones por la carencia de información de los diseños originales.

Alcantarilla:

Para el estudio de la capacidad de carga de la alcantarilla, para el paso de cargas especiales, primero se abordará el tema para obtención de la capacidad teórica de la estructura, en carencia de información de diseño.

Capacidad teórica de carga para la alcantarilla.

La magnitud de las cargas permanentes y las cargas de diseño, que se presentan en el cuadro 7 y 8, se calcularon según los procedimientos y especificaciones descritas por Bridge Design Specifications AASHTO LRFD, 2020.

En relación con la información que se utilizó sobre las dimensiones y geometría de los elementos, se usaron las medidas de campo elaboradas por el ICE. Sin embargo, por la limitación con respecto a la información de diseño, para las propiedades del suelo y material de relleno, se utilizaron valores de referencia, según la tabla 3.5.1-1 de diseño AASHTO LRFD (2020).

El camión tándem de diseño, genera los efectos más altos en la estructura para el momento positivo, negativo y cortante.

En el cuadro 9 se presentan los resultados obtenidos para la posición de la carga distribuida del camión tándem, para generar el máximo efecto del momento positivo, negativo y cortante.

Con respecto al análisis estructural de la alcantarilla, se utilizó un modelo teórico simplificado, analizando un marco para 1 metro de ancho para la losa y muros laterales como un marco bidimensional empotrado en la base de los muros, donde la conexión entre los muros y la losa superior es rígida y hay transferencia de momentos, como se muestran en las figuras 19 y 20.

La simplificación de la alcantarilla para el análisis estructural puede generar demandas más altas, que otros modelos más precisos para el análisis estructural, descritos en Bridge Design Specifications AASHTO LRFD. Sin embargo, no fue posible emplear métodos más puntuales por la carencia en la información de la estructura, como la falta de información de los cimientos.

Desde otro punto de vista, la ejecución del análisis para los efectos de las cargas utilizadas

en la simplificación del modelo teórico de análisis para la alcantarilla, tanto para determinar los esfuerzos a momento y cortante nominales de referencia para evaluar los efectos de cargas especiales. Para ambos casos se generan demandas un poco más altas. En síntesis, la realización de la evaluación comparando los esfuerzos de momentos y cortante con los esfuerzos a momento y cortante de referencia, no es significativo, si el modelo teórico simplificado de análisis genera demandas más altas que modelos más precisos y refinados.

Los factores de carga mínimos-máximos, se emplearon para analizar 2 escenarios. Para la combinación de carga resistencia 1, en el primer escenario, se consideraron las cargas horizontales y verticales máximas, para tener en cuenta la condición más crítica de cargas en la estructura.

En el segundo escenario, se analizaron cargas verticales máximas y horizontales mínimas, para tener en cuenta el caso; donde las cargas horizontales sean menores que las cargas que se calcularon, ya que, por las limitaciones, se utilizaron valores de referencia para las propiedades del suelo y material de relleno.

Para el sistema estructural de la alcantarilla, las cargas horizontales reducen los efectos de las cargas verticales a existir transferencia de esfuerzos en la losa superior y los muros. En tal caso, para el momento positivo en la losa superior de la alcantarilla, se aplicó una reducción del 50 por ciento a las cargas horizontales EH y ES, sin combinarlas con los factores de carga, de acuerdo con las especificaciones del artículo 3.11.7 Diseño AASTHO LRFD (2020).

El objetivo de las combinaciones de carga para resistencia 1, IV y evento extremo I, es construir la envolvente para obtener los esfuerzos máximos en las secciones críticas de la estructura, para los modos de falla de la alcantarilla como se muestra en las figuras 19 y 20.

Como resultado de las consideraciones tomadas, supuestos y cálculos para el análisis estructural de la alcantarilla, se utilizó el camión tándem HL-93 como referencia de la carga viva del diseño de la alcantarilla. Se presentan los resultados en el cuadro 10, estos valores corresponden a los esfuerzos máximos para momento, cortante, en los puntos de secciones críticas, para la envolvente de carga las combinaciones para resistencia 1, IV y evento extremo I.

Los resultados del cuadro 10, son valores de referencia, para limitar los esfuerzos generados por camiones especiales, según el manual AASTHO MBE-3.

Evaluación para el paso de cargas especiales.

Para la realización de la evaluación teórica de la capacidad de carga viva de la alcantarilla para el paso de cargas especiales, se tomaron en cuenta criterios y procedimientos expuestos en la sección 6A.5.12 del Manual AASTHO MBE-3 (2018).

En relación con los daños identificados en los componentes estructurales como el agrietamiento de grado 3, con grietas mayores a 0.2 mm en los muros y la losa, y eflorescencia grado 2, estos pueden afectar y reducir la capacidad de los elementos estructurales.

De acuerdo con Ing. Emmanuel Montero Carvajal, ingeniero estructural del ICE, se debe considerar que, la estructura esta agrietada, aplicando una reducción del 50% en la inercia de los elementos estructurales, según las especificaciones del capítulo 8 del Código Sísmico de Costa Rica, 2016. En tal caso, reducir la inercia de los elementos en el modelo de análisis ocasiona esfuerzos un poco más altos para la carga que es analizada, alcanzando con una carga más pequeña los esfuerzos límites de referencia.

Es importante mencionar que, aunque los daños identificados, pueden no afectar o reducir la resistencia de los elementos, si el acero de refuerzo principal que soporta las cargas permanece correctamente anclado y confinado, sin perder área. Sin embargo, se evalúa la alcantarilla para el escenario más crítico, reduciendo la inercia de los elementos en 50%.

Para calcular los esfuerzos máximos se utilizó combinación de carga para resistencia 2 utilizando los factores de cargas máximos y mínimos según la Tabla 6A.5.12.5-1 *Estados límite y factores de carga para la capacidad de carga de las alcantarillas*, del manual AASTHO MBE-3 (2018).

La reducción del 50 por ciento en las cargas horizontales EH y ES, para obtener el momento positivo máximo en la losa superior de la alcantarilla, es importante, ya que las cargas horizontales reducen los efectos de las cargas

verticales, existe transferencia de esfuerzos entre los muros y la losa superior.

La evaluación de cargas de permiso especial se realizó para la condición, sin otros vehículos en el puente, utilizando un factor de mayoración para la carga viva $\gamma_{LL} = 1.1$, según los criterios de la Tabla 6A.4.5.4.2a-1 *Factores de carga permitidos*, del manual AASTHO MBE-3 (2018). En tal caso, toda la capacidad de la alcantarilla funciona para soportar el paso de la carga especial, no existen otras cargas de vehículos en la estructura. Por otra parte, se tiene control del peso del equipo y carga especial a transportar y de la velocidad de circulación sobre la estructura.

Evaluación de Camión del ICE

Para la configuración y dimensiones del camión del ICE, se tomó en cuenta el peso propio y se realizó la distribución del peso sobre sus ejes. Como resultado se tiene que los ejes más críticos, son los ejes sobre la quinta rueda, ya que, estos ejes reciben parte del peso del automotor y parte del peso propio del *Lowboy*, además, parte del peso de la carga especial sobre el *Lowboy*.

Con respecto a la separación de ejes en relación con el tramo de la alcantarilla se concluye que, el caso más crítico se presenta cuando los ejes sobre la quinta rueda están sobre el tramo, para tal caso, la carga distribuida del eje delantero del camión ya salido de la alcantarilla. En todo caso, cuando se encuentra una porción de la carga distribuida de los ejes del camión, no es crítica, ya que, la carga distribuida del eje delantero del camión es pequeña en comparación con la carga distribuida de los ejes intermedios.

En el cuadro 12, se presentan los resultados obtenidos para la posición de la distribución más crítica del camión especial del (ICE), a partir del análisis, para determinar la posición de la carga distribuida, para así generar el máximo efecto en el momento positivo, negativo y cortante, así como las reacciones máximas en la estructura.

En los cuadros 14 y 15, se presentan los valores correspondientes a los esfuerzos a momento, cortante por las cargas permanentes y por la carga "P" que representa el peso de los equipos electromecánicos, utilizando el camión especial de ICE, para los puntos en secciones críticas para la combinación de carga de resistencia 2 que generan esfuerzos muy cercanos o iguales a los valores límite de referencia del

cuadro 10. Para una carga de 36 toneladas, se supera la capacidad teórica de la alcantarilla, siendo la losa superior el elemento más crítico de la alcantarilla.

En la figura 22, se muestra el diagrama de la distribución del peso propio del equipo y de la carga "P" sobre los ejes, correspondiente a la última iteración realizada para carga "P = 35.75 toneladas", esta carga genera esfuerzos muy cercanos a los valores límites de referencia del cuadro 10.

De acuerdo con las especificaciones de la ficha técnica del camión de Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en particular, capacidad máxima para los ejes sobre la quinta rueda es de 30 toneladas, ya que la suspensión *Hendrickson* trasera del camión tiene una capacidad de 29.5 toneladas, y la combinación de las llantas traseras tiene una capacidad máxima de carga de 30 toneladas. Precisamente las llantas son los elementos finales que dictaminan la capacidad de carga real del camión.

Evaluación de Camión especial 2.

Para la configuración y dimensiones del camión de la empresa, y la distribución del peso sobre sus ejes, se determinó que el caso más crítico de carga para la alcantarilla se presenta cuando hay solo una carga distribuida sobre el claro, ya que la separación más corta entre ejes es similar al tramo de la alcantarilla.

En los cuadros 17 y 18, se presentan los resultados de las iteraciones realizadas hasta determinar la magnitud de la carga "P" que representa el peso de los equipos electromecánicos hasta determinar la magnitud de la carga "P" que genera esfuerzos muy cercanos o iguales a los valores límite de referencia del cuadro 10, evaluando la capacidad de carga de la alcantarilla para el camión especial de la empresa *Mincho Carga Especiales*.

Los esfuerzos en los puntos de secciones críticas demuestran que, para una carga de 82 toneladas, se supera la capacidad teórica de la alcantarilla, siendo la losa superior el elemento más crítico de la alcantarilla al fallar por momento y cortante.

En la figura 23, se presenta el diagrama de la distribución del peso propio del equipo y de la carga "P" entre los ejes del camión de la empresa *Mincho Carga Especiales*, y los valores corresponden a la última iteración realizada para

carga “P = 81 toneladas”, en iteración se obtuvieron esfuerzos muy cercanos a los valores límite de referencia del cuadro 10, como resultado del análisis y consideraciones tomadas en los cálculos, sobre el estado actual de la estructura.

Según la empresa Cargas especiales Mincho, (2021) y las especificaciones técnicas del camión especial, la capacidad de carga máxima para el sistema son de 80 toneladas, sin embargo, por lo corto del tramo de la alcantarilla y la configuración especial de ejes del sistema y camión, para el transporte de especiales, la capacidad de la alcantarilla es aproximadamente 81 toneladas.

Puente:

Para el estudio de la capacidad de carga de la superestructura del puente, para el paso de cargas especiales, primero se abordará el tema para obtención de la capacidad teórica de la estructura, en carencia de información de diseño.

Capacidad teórica para la superestructura

La magnitud de las cargas permanentes del cuadro 20, se calcularon según las dimensiones y geometría de los elementos. Sin embargo, la limitación con respecto a la información de diseño, para el peso unitario del material de relleno, se utilizaron valores de referencia, según la tabla 3.5.1-1 de diseño AASHTO LRFD (2020).

El camión tándem de diseño, genera los efectos más altos para momento en la superestructura y camión de diseño los efectos más altos por cortante, en consecuencia, se utilizaron los efectos máximos de cada camión.

En los cuadros 21 y 22, se presentan los resultados obtenidos para la posición de los ejes para los camiones de diseños, para generar el máximo efecto del momento y cortante.

Con respecto al análisis estructural de la superestructura, se utilizó el ancho de franja equivalente de diseño, analizando uno de los tramos simplemente apoyando.

Para la combinación de carga resistencia 1, se aplicaron los factores de carga máximos para obtener los esfuerzos máximos en las secciones

críticas de la superestructura, como se muestra en la figura 24.

Como resultado de las consideraciones tomadas, supuestos y cálculos para el análisis de la superestructura del puente, utilizando las cargas de diseño HL-93 como referencia de la carga viva del diseño del puente, se presentan los resultados del cuadro 23, estos valores corresponden a los esfuerzos máximos para momento, cortante, en los puntos de secciones críticas.

A partir de la información proveniente de inspecciones y hallazgos reportados en el informe de daños para la estructura, como el agrietamiento de grado 3, con grietas mayores a 0.2 mm, eflorescencia grado 2 y descascaramiento grado 2 en superestructura, pueden afectar y reducir la capacidad de los elementos.

La condición de la estructura es aceptable, sin embargo, se aplicó factor de condición: $\phi_c = 0.9$ siendo conservadores, por las limitaciones de la información existente y hallazgos reportados en el informe de daños, básicamente se utilizó el 90% de los esfuerzos cálculos para las cargas de diseño, como referencia, para limitar los esfuerzos generados por camiones especiales, según el manual AASTHO MBE-3.

Evaluación para el paso de cargas especiales.

Para la realización de la evaluación teórica de la capacidad de carga viva de la superestructura para el paso de carga especiales, se tomaron en cuenta criterios y procedimientos expuestos en la sección 6 del Manual AASTHO MBE-3 (2018).

Para calcular los esfuerzos máximos se utilizó combinación de carga para resistencia 2 utilizando los factores de cargas máximos según la Tabla 6A.5.12.5-1 *Estados límite y factores de carga para la capacidad de carga de las alcantarillas*, del manual AASTHO MBE-3 (2018).

Evaluación de Camión del ICE

Para la configuración y dimensiones del camión del ICE, se tomó en cuenta el peso propio y se realizó la distribución del peso sobre sus ejes. Como resultado se tiene que los ejes más críticos; son los ejes sobre la quinta rueda, ya que, estos ejes reciben parte del peso del automotor y parte

del peso propio del *Lowboy*, además, parte del peso de la carga especial sobre el *Lowboy*.

Con respecto a las dimensiones del camión y la separación de los ejes en relación con la longitud del puente, se tiene que, el caso más crítico se presenta cuando el cabezal está sobre uno de los tramos, como se muestra en la figura 25. En todo caso, cuando entran los ejes de *Lowboy* a uno de los tramos, el cabezal está en el siguiente tramo o fuera del puente.

En el cuadro 24, se presentan los resultados obtenidos para la posición más desfavorable, para crear el máximo efecto en el momento positivo y cortante.

En el cuadro 25, muestran los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad de carga, mediante iteraciones, determinado la magnitud de la carga "P" que genera esfuerzos a momento y cortante en puntos críticos de la superestructura iguales o muy cercanos a los valores límite de referencia que se presentan en el cuadro 23. Para una carga de "P" igual a 60 toneladas, se supera la capacidad teórica de la superestructura.

En la figura 26, se muestra el diagrama de la distribución del peso propio del equipo y de la carga "P" sobre los ejes, correspondiente a la última iteración realizada, para una carga "P = 57.75 toneladas", esta carga genera esfuerzos muy cercanos a los valores límite de referencia como se muestra en cuadro 26.

De acuerdo con las especificaciones de la ficha técnica del camión de Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en particular, capacidad máxima para los ejes sobre la quinta rueda es de 30 toneladas, ya que la suspensión *Hendrickson* trasera del camión tiene una capacidad de 29.5 toneladas, y la combinación de las llantas traseras tiene una capacidad máxima de carga de 30 toneladas. Precisamente las llantas son los elementos finales que dictaminan la capacidad de carga real que se puede cargar el camión.

Evaluación de Camión especial 2.

Para la configuración y dimensiones del camión 2 de la empresa *Mincho Carga Especiales*, y la distribución del peso sobre sus ejes, se determinó que el caso más crítico para cualquiera de los tramos de la super estructura se presenta cuando los ejes de atrás de *Lowboy* están sobre

cualquiera de los tramos, por ende, se evaluó para esta condición, como se muestra en la figura 27.

En el cuadro 27, se presentan los resultados obtenidos para la posición de los más desfavorables, para generar el máximo efecto en el momento y cortante para cualquiera de los tramos.

En el cuadro 28, se muestran los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad de carga, mediante iteraciones, así determinando la magnitud de la carga "P" que genera esfuerzos a momento y cortante en puntos críticos de la superestructura iguales o muy cercanos a los valores límite de referencia que se presentan en el cuadro 23. Para una carga de "P" igual a 90 toneladas, se supera la capacidad teórica por cortante de la superestructura.

El análisis de sensibilidad de carga demuestra que, una carga de "P" igual a 89 toneladas se obtuvieron esfuerzos muy cercanos a los valores límite de referencia como se muestra en el cuadro 29.

En la figura 28 se presenta el diagrama de la distribución del peso propio del equipo y de la carga "P" entre los ejes del camión de la empresa *Mincho Carga Especiales*, y los valores corresponden a la última iteración realizada para carga "P = 89 toneladas", como resultado del análisis y consideración de los cálculos, sobre el estado actual de la estructura.

De acuerdo con las especificaciones del camión 2 de la empresa Cargas Especiales Mincho, la capacidad carga máxima de equipo es de 80 toneladas, sin embargo, por la configuración especial de ejes del sistema y camión, para transportar carga de especiales, la capacidad del puente es aproximadamente de 89 toneladas.

Conclusiones

En Costa Rica se carece de guías para la evaluación de puentes existentes, que hagan referencia a la normativa internacional, solo se cuenta con la guía titulada “Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes” que hace referencia a la American Association of State Highway and Transportation Officials.

Las estructuras que se evaluaron no cuentan con información de diseño, planos constructivos, esquemas de refuerzo propiedades de los materiales y registros de las fechas de diseño y construcción.

La evaluación de la capacidad teórica de carga viva de las estructuras se realizó tomando como referencia las cargas de diseño de la normativa AASTHO, limitando los esfuerzos (momento y cortante) de las cargas especiales a los esfuerzos de las cargas de diseño.

La clasificación de la condición de la alcantarilla es aceptable, los daños y/o defectos reportados son agrietamiento de grado 3, con grietas mayores a 0.2 mm y eflorescencia de grado 2.

Para la alcantarilla, se concluyó que el peso máximo del equipo electromecánico no debe superar 35.75 toneladas aproximadamente para las especificaciones del camión del ICE, y 81 toneladas aproximadamente para las especificaciones del camión especial de la empresa Carga Especiales Mincho.

Del análisis de sensibilidad de carga, para la alcantarilla, se concluyó, que la losa superior es el elemento más crítico, bajo el paso de cargas especiales.

La clasificación de la condición de la superestructura del puente es aceptable, los daños y/o defectos reportados son agrietamiento de grado 3, con grietas mayores a 0.2 mm, eflorescencia de grado 2 y descascaramiento de grado 2.

Para la superestructura del puente, se concluyó que el peso máximo del equipo electromecánico no debe superar 57.75 toneladas aproximadamente para las especificaciones del camión del ICE, y 89 toneladas aproximadamente para especificaciones del camión especial de la empresa Carga Especiales Mincho.

El camión especial de la empresa *Cargas Especiales Mincho*, es el camión con la configuración de ejes que más carga puede transportar, con una capacidad limitada de 80 toneladas, en este caso, el camión limita el peso de los equipos electromecánicos.

La velocidad de circulación del camión especial sobre la estructura no debe exceder la velocidad máxima de 16 km/h, de lo contrario, crea una carga de impacto, y esto pondría en riesgo la integridad de la estructura.

Si se cambian las dimensiones o la configuración de ejes de los camiones especiales analizados, se debe hacer la respectiva revisión y análisis estructural, pues de lo contrario, esto pondría en riesgo la integridad de la estructura.

Recomendaciones

El camión especial del ICE tiene una capacidad limitada de 36 toneladas, por lo tanto, se recomienda utilizar el camión de la empresa *Carga Especiales Mincho*, pues este puede transportar hasta 80 toneladas.

Se recomienda realizar un estudio de suelos para obtener las características y parámetros geotécnicos del sitio de emplazamiento de las estructuras, para obtener resultados más precisos, ya que no se contaron con estos parámetros geotécnicos en la evaluación de la capacidad de las estructuras.

Se recomienda realizar la evaluación de las subestructuras para el puente, ya que no se evaluaron en este trabajo por las limitaciones con respecto a la información para evaluación de la estructura.

Se debe complementar el estudio de capacidad de carga viva de las estructuras, con pruebas de carga, para tener datos que; mediante un análisis teórico adecuado, permitan estimar la capacidad de carga viva de las estructuras, y reducir considerablemente las incertidumbres ligadas a los modelos matemáticos.

Realizar una nueva inspección de daños, antes de realizar el transporte de los equipos electromecánicos, para verificar que las condiciones son las mismas, que las consideradas en el análisis para evaluación de la estructura.

El equipo electromecánico se debe pesar antes de salir del muelle en Puerto Caldera, para garantizar que no se exceda la capacidad teórica de las estructuras.

Se recomienda la implementación de la metodología LRFR del manual AASHTO MBE-3, para la evaluación de la capacidad de carga de puentes; este manual brinda métodos prácticos y sencillos, para la evaluación de las estructuras de puentes.

Apéndices

Apéndice 1. Memoria de cálculo para las cargas que actúan en la Alcantarilla (Paso Superior N°1808-P.SS).

Apéndice 2. Memoria de cálculo para determinar la posición de la carga distribuida sobre la alcantarilla en la que genera los máximos efectos a momento positivo, negativo y cortante.

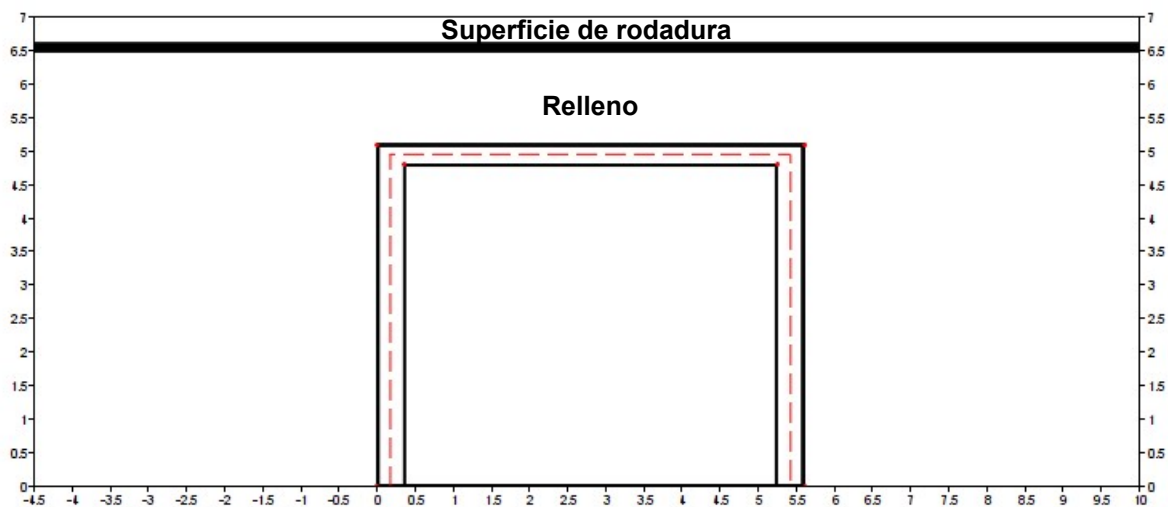
Apéndice 3. Memoria de cálculo para las cargas que actúan en la Puente (Paso Superior N 1357).

Apéndice 1.

1808 - Alcantarilla P.S.S Camino Vecinal

Dimensiones de la alcantarilla para la estimación de carga que actúan sobre la misma.

$L := 5.6 \text{ m}$	= Longitud total de la alcantarilla (m).
$B := 4.9 \text{ m}$	= Diámetro interior o luz libre de la alcantarilla (m).
$T := 1$	= Número de tramos de la alcantarilla.
$R := 1.40 \text{ m}$	= Profundidad del relleno sobre la alcantarilla (m).
$E_s := 0.30 \text{ m}$	= Espesor de la losa superior (m).
$h := 4.80 \text{ m}$	= Altura o luz libre de la alcantarilla (m).
$E_a := 0.09 \text{ m}$	= Espesor de la capa de asfalto (m).
$t := 0.35 \text{ m}$	= Espesor del muro (m).
$A := 32.0 \text{ m}$	= Ancho de la alcantarilla (m).
$C := 5$	= Cantidad de carriles.



Propiedades de los materiales, para la estimación de carga que actúan sobre la alcantarilla.

$\phi'_f := 30^\circ$	= Ángulo efectivo de fricción del suelo ($^\circ$) (Supuesto).
$\gamma_a := 2240 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	= Peso propio de la carpeta asfáltica según la tabla 3.5.1-1, AASHTO LRFD.
$\gamma_c := 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	= Peso unitario o densidad del concreto según la tabla 3.5.1-1, AASHTO LRFD.
$\gamma_s := 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	= Peso unitario del material de relleno, según la tabla 3.5.1-1, AASHTO LRFD.

Consideraciones para la estimación de cargas que actúan sobre la estructura.

1. La estimación de cargas se realizó para una franja de **1 metro** de ancho de la estructura (Alcantarilla).
2. La capa de asfalto se consideró solo en los cálculos de carga muerta (sin contribución de resistencia).
3. La alcantarilla se consideró como un marco de concreto reforzado, donde las conexiones son capaces de transferir momentos.
4. $V := 16 \text{ kph}$ = Velocidad máxima de circulación para los camiones especiales, con los equipos electromecánicos sobre la estructura.

Consideraciones para la estimación de cargas que actúan sobre la estructura.

AASHTO LRFD 2020 se refiere a Bridge Design Specifications, Ninth Edition,

Apéndice 1.

CÁLCULO DE CARGAS, PARA EL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DEL PUENTE ALCANTARILLA DE CONCRETO ARMADO.

A) Carga muerta.

A.1) Carga muerta (DC).

Peso de losa superior por m lineal.

$$W_{L_{sup}} := E_s \cdot \gamma_c \cdot 1 \text{ m} = 720 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Donde:

$$E_s = 0.3 \text{ m} \quad = \text{Espesor de la losa superior.}$$

$$\gamma_c = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad = \text{Peso unitario o densidad del concreto.}$$

$$W_{L_{sup}} = 720 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad = \text{Peso de la losa superior por } m \text{ lineal.}$$

Peso de cada pared o muro lateral por m lineal:

$$W_{muro} := t \cdot \gamma_c \cdot 1 \text{ m} = 840 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Donde:

$$t = 0.35 \text{ m} \quad = \text{Espesor del muro.}$$

$$\gamma_c = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad = \text{Peso unitario o densidad del concreto.}$$

$$W_{muro} = 840 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad = \text{Peso para cada muro por } m \text{ lineal.}$$

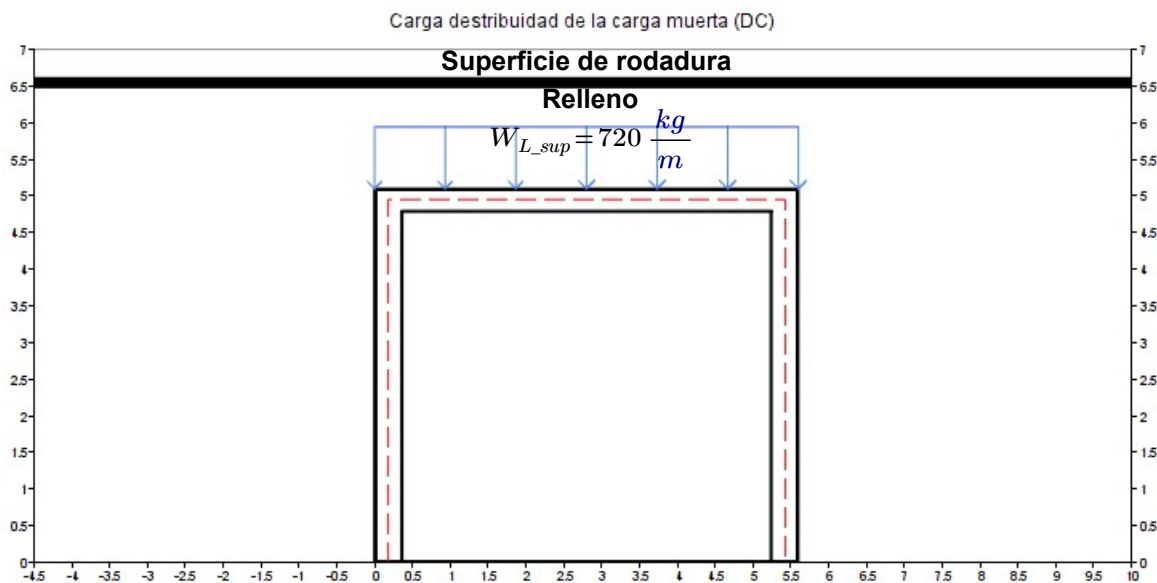
$$h = 4.8 \text{ m} \quad = \text{Altura o luz libre de la alcantarilla.}$$

Peso del muro izquierdo por un metro de ancho.

$$P_{muro} := W_{muro} \cdot h = 4032 \text{ kg}$$

Peso del muro derecho por un metro de ancho.

$$P_{muro} := W_{muro} \cdot h = 4032 \text{ kg}$$



Nota: El sistema estructural de la alcantarilla es un marco rígido de concreto reforzado, donde las conexiones son capaces de transferir momentos.

Apéndice 1.

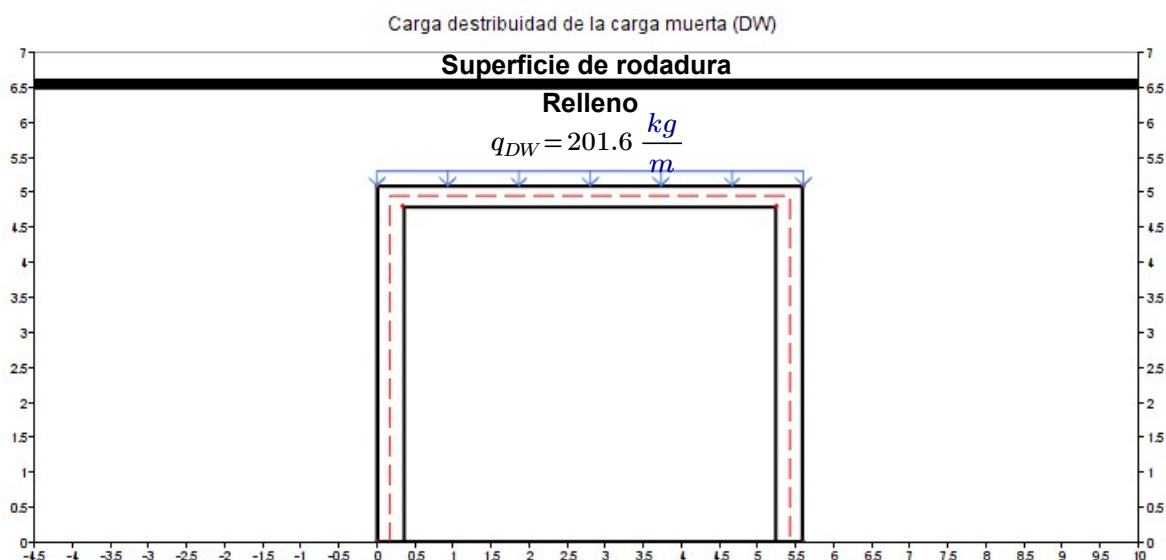
A.2) Carga muerta (DW).

Peso propio de la carpeta de rodadura (asfalto).

$$W_{DW} := E_a \cdot \gamma_a \cdot 1 \text{ m} = 201.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Carga distribuida de la carpeta de rodadura (asfalto) sobre la losa superior de la alcantarilla.

$$q_{DW} := W_{DW} = 201.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$



B) Presión Vertical del Terreno (EV).

La modificación de la carga de tierra por la interacción suelo-estructura se calculó de acuerdo con el Artículo 12.11.2.2.1 de diseño AASHTO LRFD (2020).

El factor F_e para tener en cuenta la interacción suelo-estructura, se calculó mediante la ecuación (12.11.2.2.1-2) de diseño AASHTO LRFD (2020).

Donde :

$$B_c := L = 5.6 \text{ m} \quad = \text{Ancho exterior de la alcantarilla.}$$

$$H := R + E_a = 1.49 \text{ m} \quad = \text{Profundidad del relleno desde la carpeta asfáltica hasta la alcantarilla.}$$

$$F_e := 1 + 0.20 \cdot \left(\frac{H}{B_c} \right) = 1.053$$

La presión vertical del terreno (EV) sobre la losa superior de la alcantarilla, se calculó mediante la ecuación (12.11.2.2.1-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

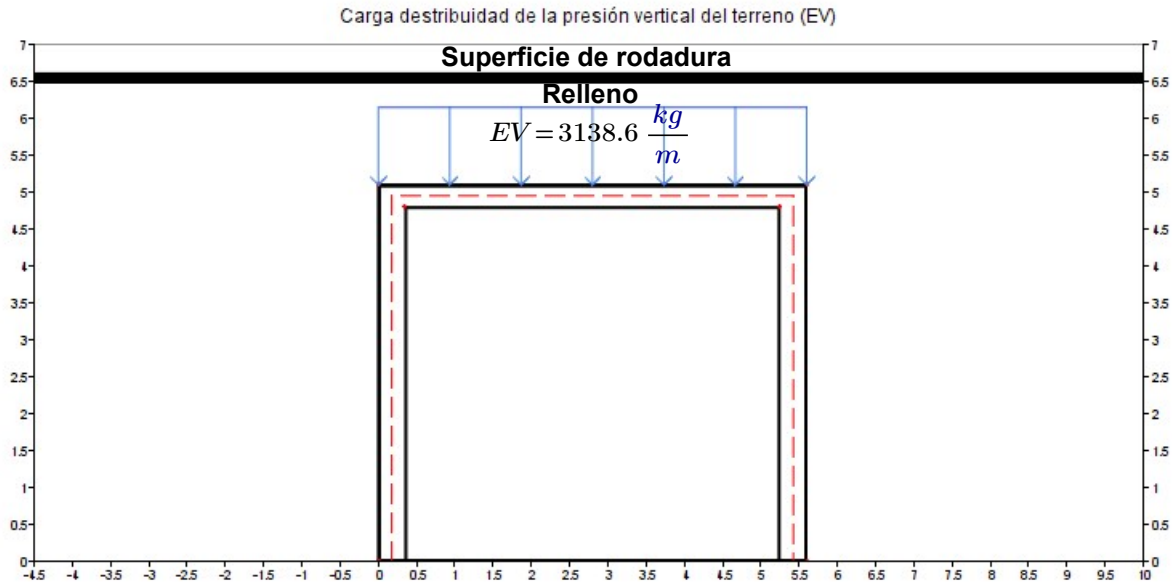
Donde :

$$\gamma_s = 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad = \text{Peso unitario del material de relleno sobre la alcantarilla.}$$

$$F_e = 1.053 \quad = \text{Factor de interacción suelo-estructura para elementos enterrados.}$$

$$EV := F_e \cdot \gamma_s \cdot H \cdot 1 \text{ m} = 3138.579 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Apéndice 1.



C) Presión horizontal del terreno (EH).

C.1) Coeficiente de empuje del suelo en reposo K_o .

El coeficiente de empuje de suelo en reposo K_o se calculó mediante la ecuación (3.11.5.2-1) de diseño AASHTO LRFD.

Donde :

$$\phi'_f := 30^\circ \quad = \text{Ángulo de fricción efectivo del suelo } (^\circ).$$

$$K_o := 1 - \sin(\phi'_f) = 0.5$$

C.2) Presión horizontal del terreno (EH)

La presión lateral del terreno (EH) en la parte superior e inferior de los muros de la alcantarilla, se calculó mediante la ecuación (3.11.5.1-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

Donde :

$$K_o = 0.5 \quad = \text{Coeficiente de empuje del suelo en reposo .}$$

$$\gamma_s = 2000 \frac{kg}{m^3} \quad = \text{Peso unitario del material de relleno sobre la alcantarilla.}$$

$$Z_s := R = 1.4 \text{ m} \quad = \text{La altura del relleno en la parte superior de la alcantarilla .}$$

$$Z_i = 6.5 \text{ m} \quad = \text{La altura del relleno en la parte inferior de la alcantarilla .}$$

Presión lateral del terreno en la parte superior de los muros de la alcantarilla:

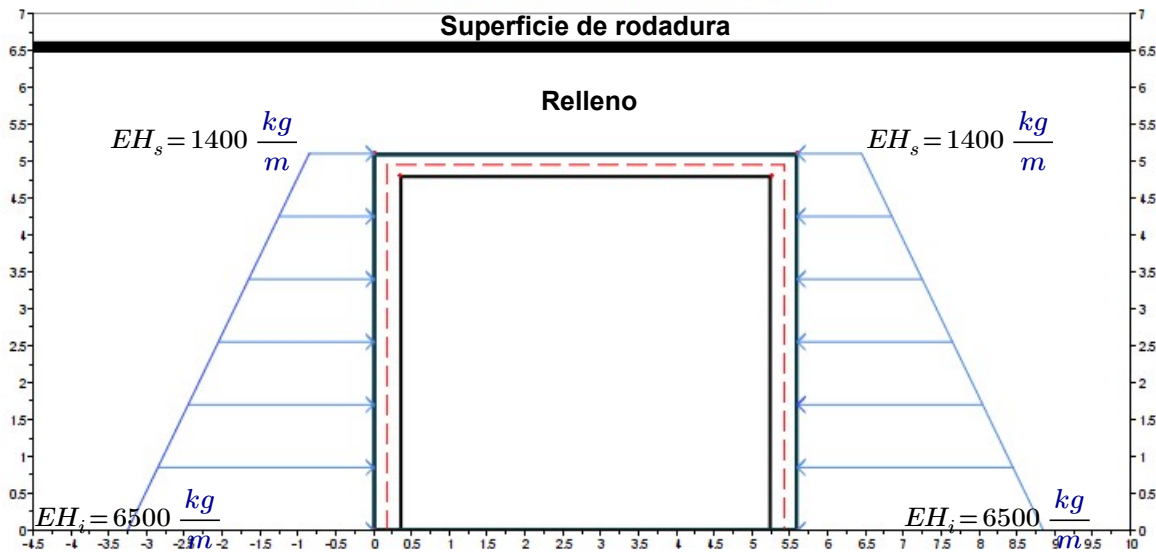
$$EH_s := K_o \cdot \gamma_s \cdot Z_s \cdot 1 \text{ m} = 1400 \frac{kg}{m}$$

Presión lateral del terreno en la parte inferior de los muros de la alcantarilla:

$$EH_i := K_o \cdot \gamma_s \cdot Z_i \cdot 1 \text{ m} = 6500 \frac{kg}{m}$$

Apéndice 1.

Carga distribuida de la presión lateral del terreno (EH)



D) Presión horizontal del terreno por sobrecarga (ES).

La carpeta asfáltica es una sobrecarga uniforme y se calculó de acuerdo con las especificaciones del Artículo 3.11.6.1 de Diseño AASHTO LRFD (2020).

La presión horizontal del terreno por sobrecarga en los muros de la alcantarilla, se calculó mediante la ecuación (3.11.6.1-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

Donde :

$K_o = 0.5$ = Coeficiente de empuje del suelo en reposo .

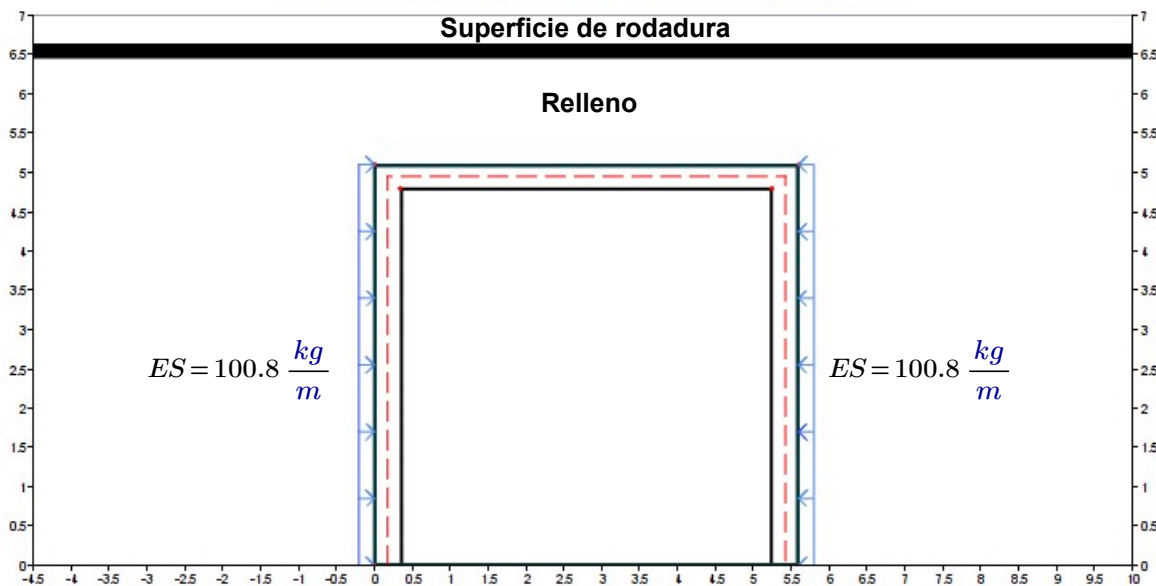
$q_{DW} = 201.6 \frac{kg}{m}$ = Sobrecarga uniforme aplicada en la superficie de la losa superior.

ES = Empuje horizontal constante por sobrecarga uniforme

Presión lateral del terreno en los muros de la alcantarilla.

$$ES := K_o \cdot q_{DW} = 100.8 \frac{kg}{m}$$

Carga distribuida de la presión lateral del terreno por sobrecarga (ES)



Apéndice 1.

E) Sobrecarga por carga viva (LS).

La sobrecarga por carga viva representa un eje del vehículo ubicado justo al final de la alcantarilla, lo que crea una presión adicional en el suelo retenido.

La presión del terreno, se calculó según las especificaciones del Artículo 3.11.6.4 de diseño AASHTO LRFD (2020).

La presión lateral del terreno en la parte superior de la alcantarilla producto de la sobrecarga por carga viva, se calculó mediante la ecuación (3.11.6.4-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

Donde:

$K_o = 0.5$ = Coeficiente de presión lateral del terreno en reposo.

$\gamma_s = 2000 \frac{kg}{m^3}$ = Peso unitario total del suelo.

La altura equivalente del suelo se calculó mediante la interpolación lineal, con base en los valores de la tabla 3.11.6.4-1 de diseño AASHTO LRFD (2020).

Abutment Height (ft)	h_{eq} (ft)
5.0	4.0
10.0	3.0
≥ 20.0	2.0

La presión lateral del terreno en la parte superior de la alcantarilla.

Donde:

$Z_s = 1.4 \text{ m}$ = Profundidad a la que se ubica la losa superior.

$h_{eq} = 1.219 \text{ m}$ = altura equivalente del suelo para carga vehicular.

$$LS_{sup} := K_o \cdot \gamma_s \cdot h_{eq} \cdot 1 \text{ m} = 1219.2 \frac{kg}{m}$$

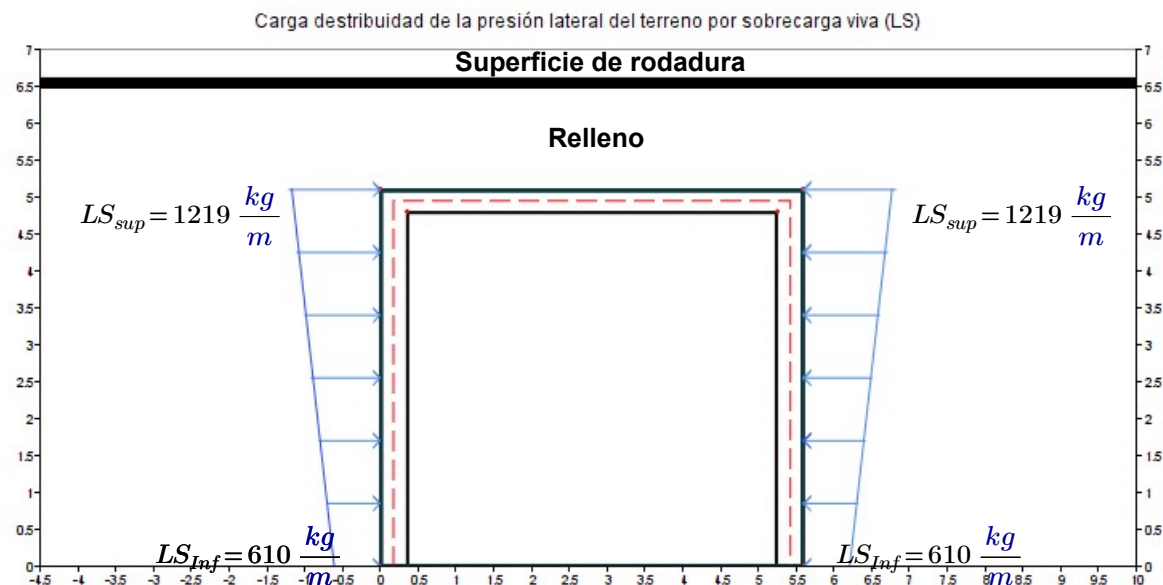
La presión lateral del terreno en la parte superior de la alcantarilla.

Donde:

$Z_i = 6.5 \text{ m}$ = Profundidad a la que se ubica la losa inferior.

$h_{eq} = 0.61 \text{ m}$ = altura equivalente del suelo para carga vehicular.

$$LS_{Inf} := K_o \cdot \gamma_s \cdot h_{eq} \cdot 1 \text{ m} = 609.6 \frac{kg}{m}$$



Apéndice 1.

E) Carga de sismo (EQ).

La demanda sísmica sobre los muros de alcantarilla, se cálculo con base en los lineamientos de la sección 6.2.4 del *Código de Cimentaciones de Costa Rica*, para calcular el empuje dinámico producto de la fuerza horizontal generada por el sismo.

La fuerza sísmica depende de las características del sitio de cimentación y de la zona de amenaza sísmica donde se ubica la estructura (Alcantarilla).

Donde:

Z_{III} = Zona sísmica según la tabla 2.1 *Zonas de amenaza sísmica por provincia, cantón y distrito* del CSCR-10.

S_3 = Sitio de cimentación según la características geotécnicas y el artículo 2.2 de CSCR-10

a_{max} = Aceleración efectiva de diseño prevista para el sitio de cimentación según la tabla 13.2 CSCR-10

E.1 Fuerza sísmica que actúa en los muros de la alcantarilla.

Donde:

P_s = Fuerza del sismo que actúa a 0.6H de la base..

$\gamma_s = 2000 \frac{kg}{m^3}$ = Peso unitario total del suelo .

$H_m := 5.1 m$ = Altura del muro.

$a_{max} := 0.2$ = Aceleración efectiva de diseño prevista para el sitio de cimentación CSCR-10

$$P_s := \frac{\gamma_s \cdot (H_m)^2}{2} \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot a_{max} \right) \cdot 1 m = 3901.5 kg$$

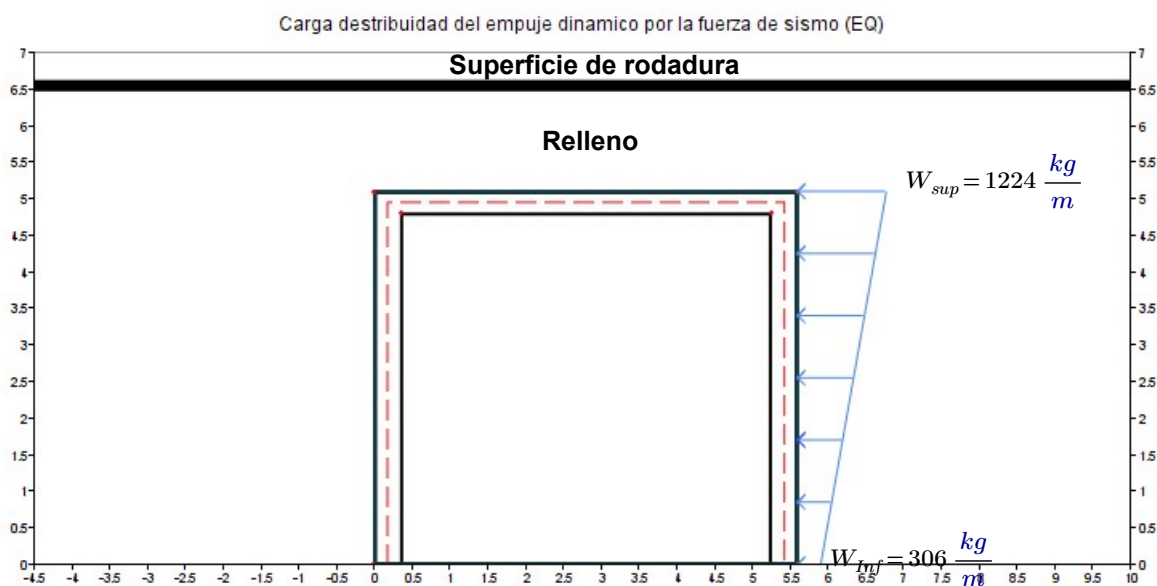
Se cálculo el empuje dinámico generado por la fuerza sísmica, como una carga distribuida trapezoidal sobre el muro de la alcantarilla, equivalente a la fuerza sísmica puntual que actúa 0.6H de la base.

Empuje dinámico en la parte superior de la alcantarilla.

$$W_{sup} := \frac{3}{5} \gamma_s \cdot H_m \cdot a_{max} \cdot 1 m = 1224 \frac{kg}{m}$$

Fuerza sísmica en la parte superior de la alcantarilla.

$$W_{Inf} := \frac{3}{20} \gamma_s \cdot H_m \cdot a_{max} \cdot 1 m = 306 \frac{kg}{m}$$



Apéndice 1.

F) Carga Viva (LL).

Para calcular la transmisión de cargas de las ruedas a la estructura enterrada a través del relleno, se tienen las siguientes consideraciones generales.

$T = 1$ = Número de tramos de la alcantarilla.

$R = 1.4 \text{ m}$ = Altura del relleno sobre la alcantarilla.

$L = 5.6 \text{ m}$ = Longitud total del tramo de la alcantarilla.

1. *Alcantarillas de tramo simple: Los efectos de carga viva se desprecian cuando la profundidad del relleno es mayor a $8 \text{ ft} = 2.44 \text{ m}$ y excede también la longitud del tramo.*
2. *Alcantarillas de tramos múltiples: Los efectos se desprecian cuando la profundidad del relleno excede la distancia entre caras interiores de las paredes externas.*
3. *La distribución de las cargas de las ruedas a las alcantarillas con $2 \text{ ft} = 0.61 \text{ m}$ o más de relleno debe ser como se especifica en el Artículo 3.6.1.2.6 de Diseño AASHTO LRFD (2020).*
4. *La distribución de las cargas de las ruedas para alcantarillas con menos de $2 \text{ ft} = 0.61 \text{ m}$ de relleno se tomará como se especifica en el Artículo 4.6.2.10 de Diseño AASHTO LRFD (2020).*

Caso = "3. El efecto de la carga viva se calcula según el Art 3.6.1.2.6 de Diseño AASHTO LRFD (2020)."

F.1) La distribución de la carga de las ruedas sobre rellenos de $2 \text{ ft} = 0.61 \text{ m}$ o más

La transmisión de carga de las ruedas a la estructura a través del relleno, se calculó de acuerdo con las especificaciones del Artículo 3.6.1.2.6 del diseño AASHTO LRFD (2020), aplicando las ecuaciones de la (3.6.1.2.6a-1) a la (3.6.1.2.6b-7).

La carga de las ruedas son consideradas como cargas uniformemente distribuidas, en un área rectangular (A_{LL}). Se calculó mediante la ecuación (3.6.1.2.6a-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

$$A_{LL} = l_w \cdot W_w$$

Donde

A_{LL} = Área rectangular en la profundidad H .

l_w = Longitud de la proyección de la carga viva, paralela al tramo de alcantarilla.

W_w = Ancho de la proyección de la carga viva, transversal al tramo de alcantarilla.

Los términos l_w y W_w se calcularon según las especificaciones del Artículo. 3.6.1.2.6b y 3.6.1.2.6c de diseño AASHTO LRFD (2020).

F.2) Ancho de la proyección para la carga viva de diseño (camión de diseño HL-93).

La profundidad o peralte de interacción de carga por eje (H_{int_T}), se calculó mediante la ecuación (3.6.1.2.6b-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

Donde

H_{int_t} = Peralte de interacción de la rueda transversal al tramo de la alcantarilla.

$s_w := 6 \text{ ft}$ = Espaciamiento de las ruedas, Art 3.6.1.2.2 de diseño AASHTO LRFD (2020)

$w_t := 20 \text{ in}$ = Ancho de la huella de la rueda.

$D_i := B = 4.9 \text{ m}$ = Diámetro interior o luz libre de la alcantarilla.

$LLDF := 1.15$ = Factor de distribución de carga viva, según en la tabla 3.6.1.2.6a-1.

$$H_{int_T} := \frac{s_w - w_t - 0.06 \cdot D_i}{LLDF} = 0.893 \text{ m}$$

Apéndice 1.

El valor de $H = 1.49 \text{ m}$ y $H_{int_T} = 0.893 \text{ m}$

Si $H < H_{int_T}$

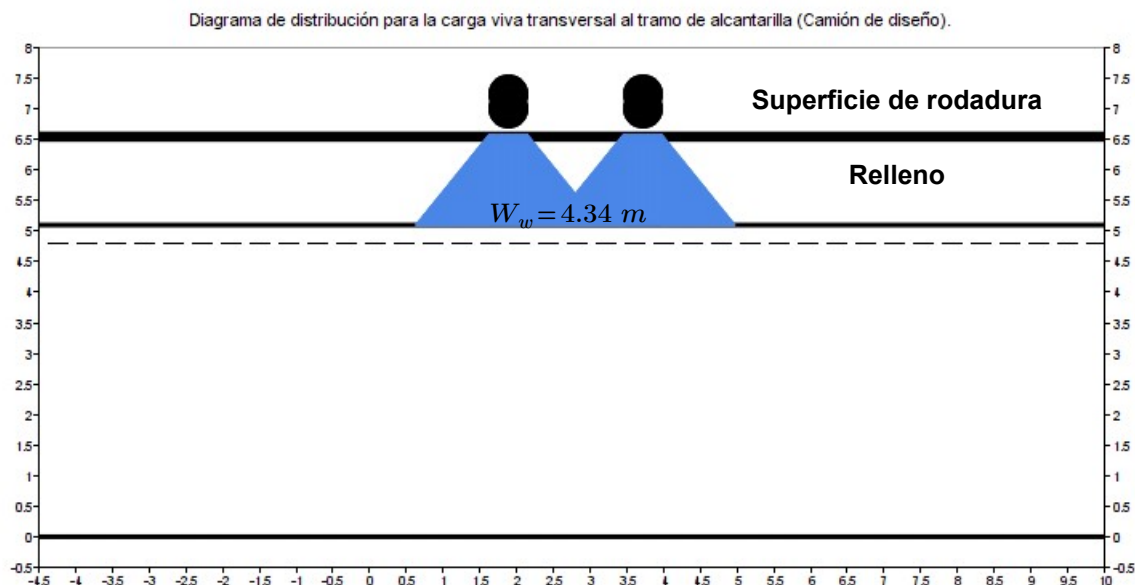
$$W_w := w_t + LLDF \cdot (H) + 0.06 \cdot D_i = 2.516 \text{ m}$$

Si $H > H_{int_T}$

$$W_w := w_t + s_w + LLDF \cdot (H) + 0.06 \cdot D_i = 4.344 \text{ m}$$

Ancho de la proyección de la carga viva sobre la losa, para el camión de diseño.

$$W_w = 4.344 \text{ m}$$



F.3) Longitud de la proyección para la carga viva para el camión de diseño.

La profundidad o peralte de interacción de carga por eje (H_{int_T}), se calculó mediante la ecuación (3.6.1.2.6b-4) de diseño AASHTO LRFD (2020).

Donde

H_{int_p} = Peralte de interacción del eje paralelo al tramo de la alcantarilla.

$s_a := 4.27 \text{ m}$ = Espaciamiento entre los ejes para el camión de diseño, Art 3.6.1.2.2.

$LLDF := 1.15$ = Factor de distribución de carga viva, según se especifica en la tabla 3.6.1.2.6a-1

$l_t := 0.25 \text{ m}$ = Longitud de huella de la rueda.

$$H_{int_P} := \frac{s_a - l_t}{LLDF} = 3.496 \text{ m}$$

El valor de $H = 1.49 \text{ m}$ y $H_{int_P} = 3.496 \text{ m}$

Si $H < H_{int_P}$ entonces

$$l_w := l_t + LLDF \cdot (H) = 1.964 \text{ m}$$

Si $H > H_{int_t}$ entonces

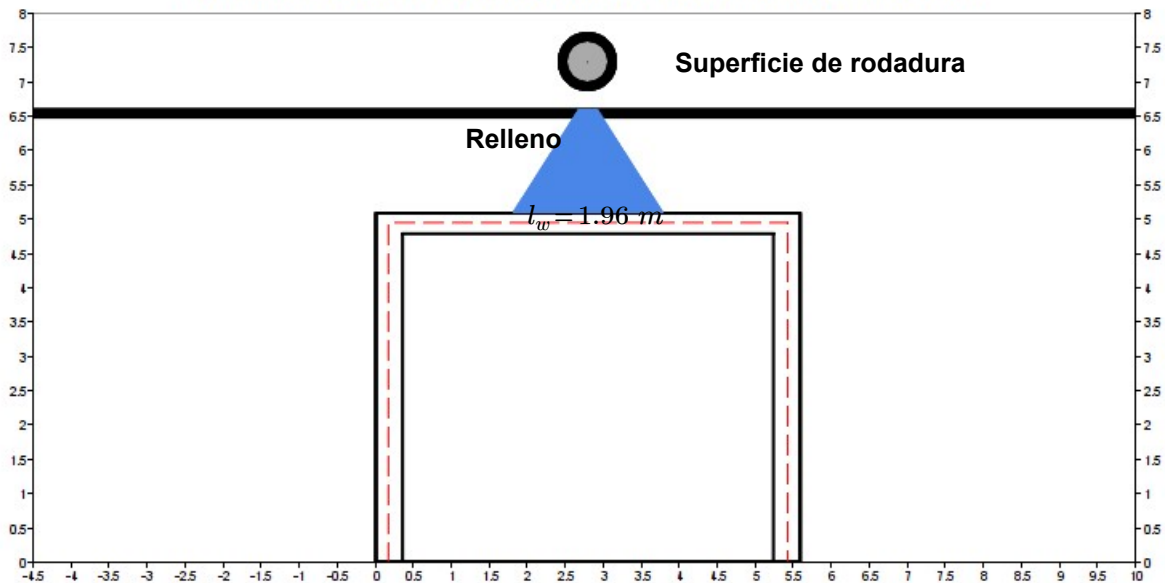
$$l_w := l_t + s_a + LLDF \cdot (H) = 6.234 \text{ m}$$

La longitud de la proyección de la carga viva sobre la losa, para el camión de diseño.

$$l_w = 1.96 \text{ m}$$

Apéndice 1.

Diagrama de distribución de carga viva paralela al tramo de alcantarilla (Camión de diseño)



F.4) Carga dinámica (IM).

La carga dinámica para alcantarilla, se calculó como se indica en el Artículo 3.6.2.2 de diseño AASHTO LRFD 2020, **excepto** para vehículos de movimiento lento ($\leq 10 \text{ mph} = 16.093 \text{ kph}$), el incremento la carga dinámica puede eliminarse.

El factor de carga dinámica (IM) para el caso de elementos enterrados, se calculó mediante la ecuación (3.6.2.2-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

$$IM = 0.33 [1 - 0.41 \cdot (D_E)] \geq 0$$

Donde :

$D_E = 1.49$ = La profundidad del relleno sobre la alcantarilla.

$$IM := 0.33 \cdot (1 - 0.41 \cdot (D_E)) = 0.128$$

$V = 16 \text{ kph}$ = Velocidad de circulación del camión con el equipo sobre la estructura.

El factor de carga dinámica (IM) para las condiciones de análisis descritas para vehículos especiales:

$$IM = 0$$

F.5) Presión vertical de la carga viva sobre la alcantarilla del camión de diseño.

Donde:

PL = Presión vertical por la carga viva en la superficie de la losa.

$P = 14800 \text{ kg}$ = Carga viva aplicada en la superficie de las ruedas.

$IM = 0.128$ = Factor de impacto por cargas dinámicas, Art. 3.6.2.2 AASTHO LRFD (2020)

$m := 0.65$ = Factor de presencia múltiple, Art 3.6.1.1.2-1 AASTHO LRFD (2020)

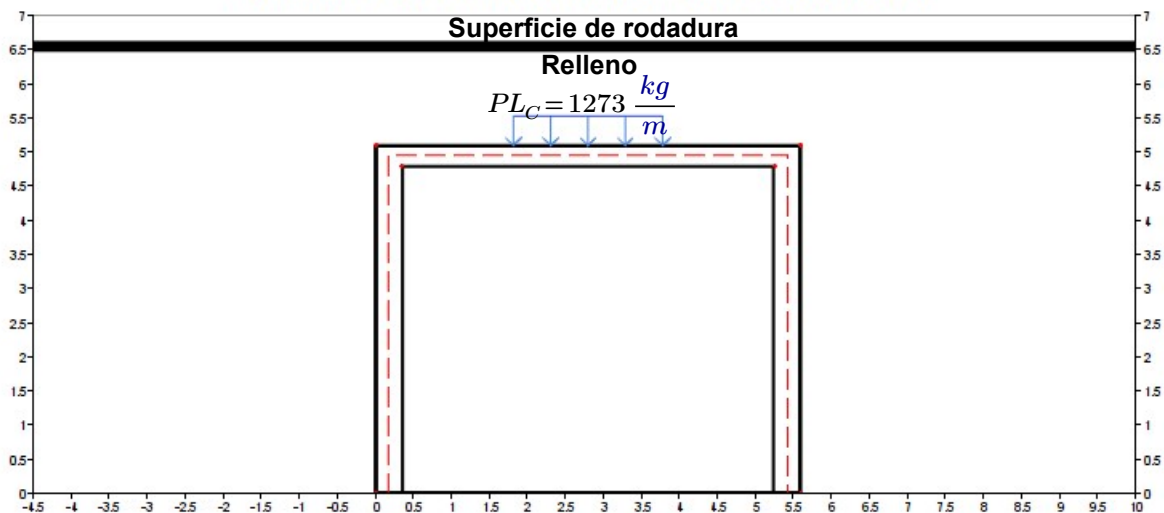
A_{LL} = Área rectangular en la profundidad H (m^2).

$$A_{LL} := l_w \cdot W_w = 8.53 \text{ m}^2$$

$$PL_C := \frac{(P) \cdot (1 + IM) \cdot m}{A_{LL}} = 1272.59 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Apéndice 1.

Diagrama de la carga distribuida de los ejes del camión Diseño sobre la losa



G) Carga de carril HL-93

La carga de carril de diseño, es una carga distribuida de 0,954 ton/m a lo largo del claro artículo 3.6.1.4 de diseño AASTHO LRFD 2020.

$$W_{HL_{93}} := 952.4 \frac{kg}{m} = \text{Carga de carril HL-93 sobre la superficie de rodadura.}$$

$$w_{tc} := 3.05 \text{ m} = \text{Ancho de carril HL-93 sobre la superficie de rodadura.}$$

$$L = 5.6 \text{ m} = \text{Longitud total de la alcantarilla.}$$

$$H = 1.49 \text{ m} = \text{Profundidad del relleno desde la carpeta asfáltica hasta la alcantarilla.}$$

Ancho de proyección de la carga de carril HL-93 sobre la losa superior de la alcantarilla.

$$W_{wc} := w_{tc} + LLDF \cdot (H) + 0.06 \cdot D_i = 5.058 \text{ m}$$

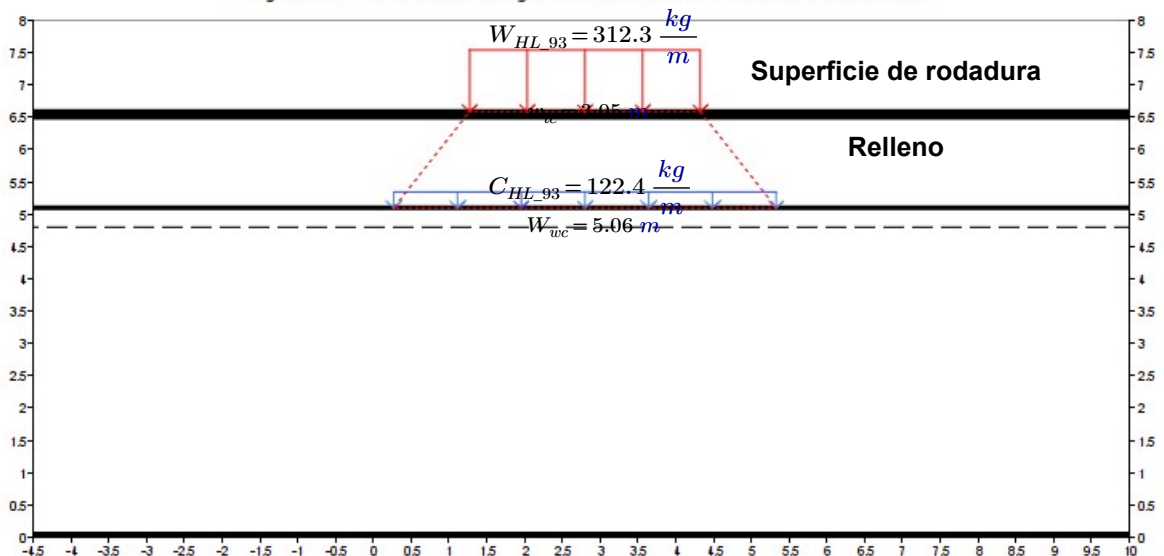
$$W_{wc} = 5.058 \text{ m} = \text{Ancho de proyección de la carga de carril HL-93 sobre la losa superior.}$$

$$n := \frac{w_{tc}}{W_{wc}} = 0.603$$

Carga distribuida sobre la losa superior de la alcantarilla

$$C_{HL_{93}} := n \cdot \frac{W_{HL_{93}}}{w_{tc}} \cdot m. = 122 \frac{kg}{m^2}$$

Diagrama de distribución de carga de carril transversal al tramo de alcantarilla



Apéndice 1.

H) Distribución de la carga viva a través del relleno, para el camión de diseño Tándem.

H.1) Ancho de proyección de la carga viva a través del relleno.

La distribución de la carga viva a través del relleno sobre la alcantarilla, se calculó según las especificaciones del Artículo 3.6.1.2.6 del Diseño LRFD.

Donde:

$s_w := 1.80 \text{ m}$ = Espaciamiento de las ruedas para el camión tándem, Art. 3.6.1.2.3 LRFD

$w_t := 20.0 \text{ in}$ = Ancho de la huella de la rueda.

$D_i := B = 4.9 \text{ m}$ = Diámetro interior o luz libre de la alcantarilla .

$LLDF := 1.15$ = Factor de distribución de carga viva según la tabla 3.6.1.2.6a-1.

H_{int_t} = Profundidad o peralte de interacción de la rueda transversal al tramo.

$$H_{int_T} := \frac{s_w - w_t - 0.06 \cdot D_i}{LLDF} = 0.868 \text{ m}$$

El valor de $H = 1.49 \text{ m}$ y $H_{int_T} = 0.868 \text{ m}$

Si $H < H_{int_T}$

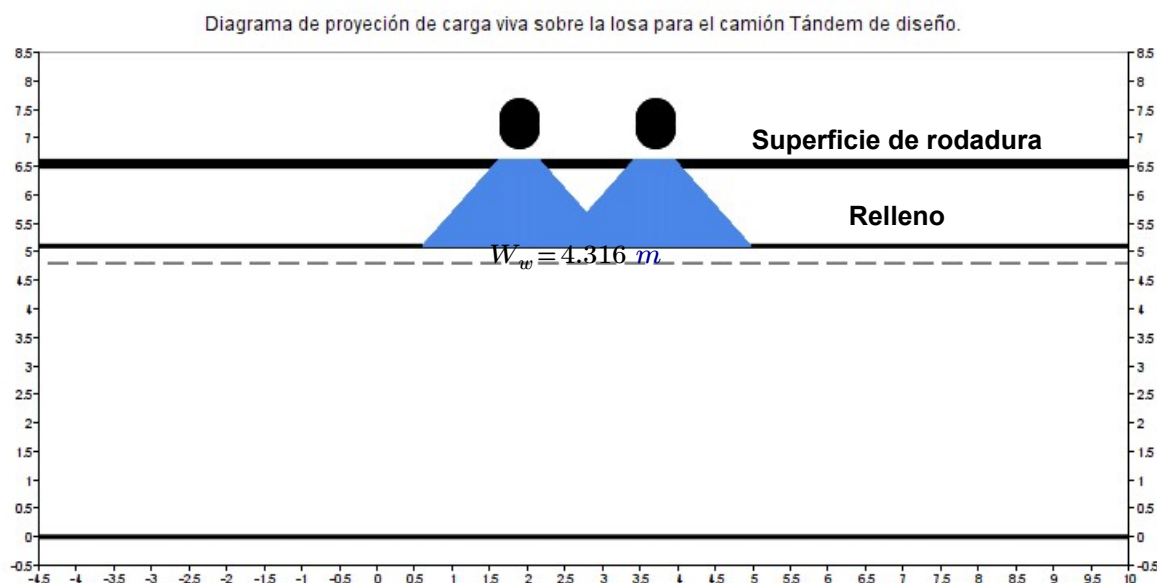
$$W_w := w_t + LLDF \cdot (H) + 0.06 \cdot D_i = 2.516 \text{ m}$$

Si $H > H_{int_T}$

$$W_w := w_t + s_w + LLDF \cdot (H) + 0.06 \cdot D_i = 4.316 \text{ m}$$

El ancho de la proyección de la carga viva sobre la losa, a través del relleno es:

$$W_w = 4.316 \text{ m}$$



H.2) Longitud de proyección de la carga viva a través del relleno.

La distribución de la carga viva a través del relleno sobre la alcantarilla, se calculó según las especificaciones del Artículo 3.6.1.2.6 de Diseño AASTHO LRFD (2020).

La profundidad o peralte de interacción de carga por eje (H_{int_T}), se calculó mediante la ecuación (3.6.1.2.6b-4) de Diseño AASTHO LRFD.

H_{int_p} = Profundidad o peralte de interacción del eje paralelo al tramo de la alcantarilla.

$s_a := 1.22 \text{ m}$ = Espaciamiento de ejes para el camión tándem (m).

$LLDF := 1.15$ = Factor de distribución de carga viva como se especifica en la tabla 3.6.1.2.6a-1.

$l_t := 0.25 \text{ m}$ = Longitud de huella de la rueda.

$$H_{int_P} := \frac{s_a - l_t}{LLDF} = 0.843 \text{ m}$$

Apéndice 1.

Se tiene que valor de $H = 1.49 \text{ m}$ y $H_{int_P} = 0.843 \text{ m}$

Si $H < H_{int_P}$

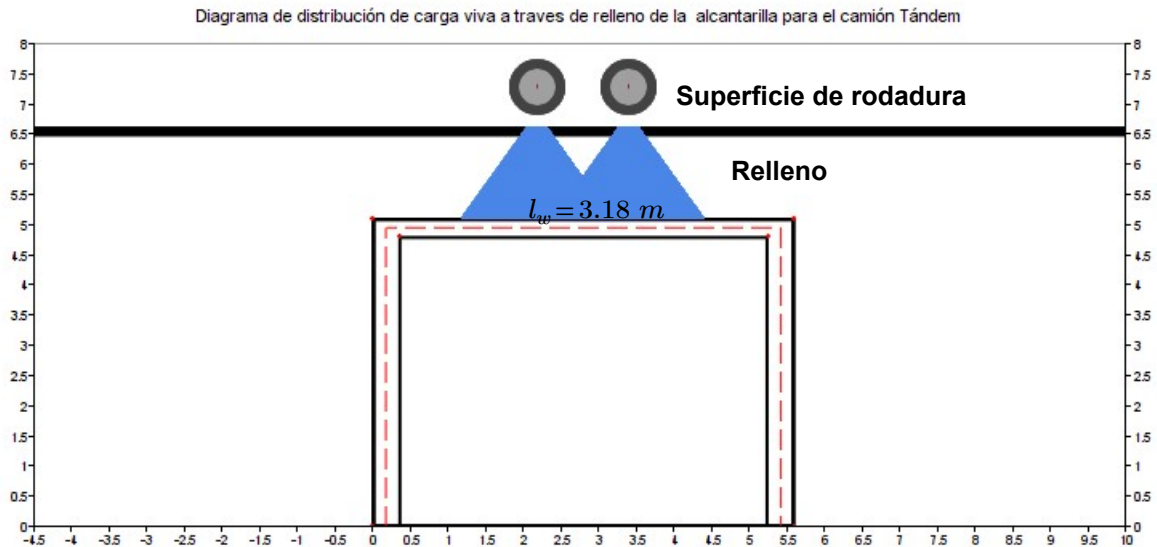
$$l_w := l_t + LLDF \cdot (H) = 1.96 \text{ m}$$

Si $H > H_{int_t}$

$$l_w := l_t + s_a + LLDF \cdot (H) = 3.18 \text{ m}$$

La longitud de la proyección de la carga viva sobre la losa, para el camión Tándem de diseño.

$$l_w = 3.18 \text{ m}$$



H.3) La presión vertical de la carga viva sobre la alcantarilla, para el camión Tándem.

PL = Presión vertical por la carga viva en la superficie de la losa.

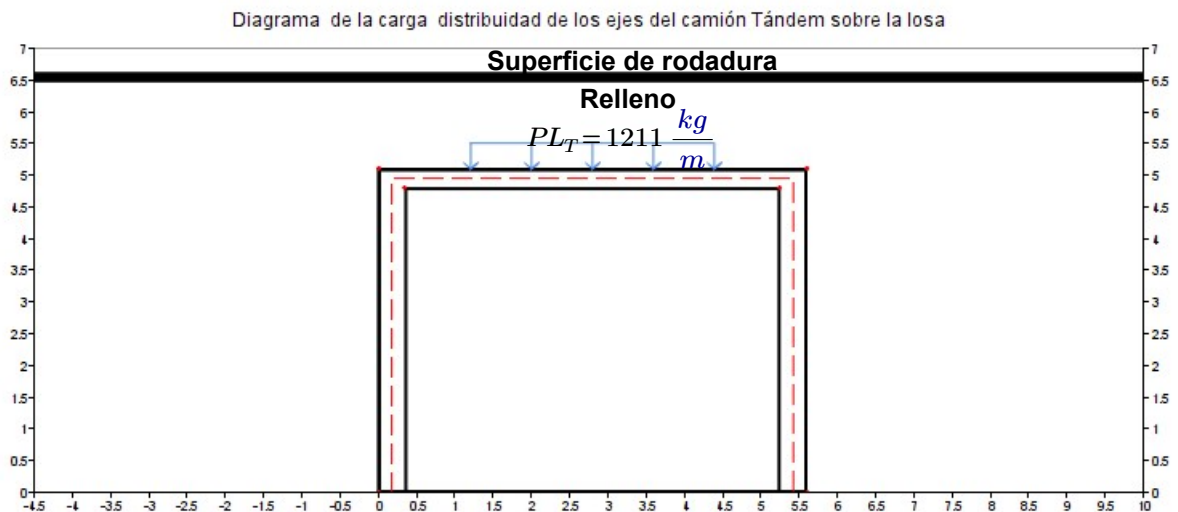
$P := 22680 \text{ kg}$ = Carga viva aplicada en la superficie de las ruedas.

$IM = 0.128$ = Factor de impacto por cargas dinámicas, Art. 3.6.2.2 AASTHO LRFD (2020)

$m. = 0.65$ = Factor de presencia múltiple, Art. 3.6.1.1.2-1 AASTHO LRFD (2020)

$A_{LL} = 13.738 \text{ m}^2$ = Área rectangular en la profundidad.

$$PL_T := \frac{(P) \cdot (1 + IM) \cdot m.}{A_{LL}} = 1211 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$



Apéndice 1.

Resumen de los cálculos de las cargas permanentes que actúan en la estructura, camión de diseño y tándem de diseño

- Carga muerta (DC): Peso propio de los componentes estructurales y accesorios.
- Carga muerta (DW): Peso propio de la superficie de rodadura y las utilidades.
- Presión de tierra vertical (EV): Producto del material de relleno sobre la estructura.
- Presión lateral de tierra (EH): Producto de la columna material a lados de la estructura.
- Presión horizontal de tierra (ES): Producto de la sobrecarga del peso propio de la superficie de rodadura.
- Presión vertical de carga viva (PL): Producto de la cargas de diseño sobre la estructura.
- Sobrecarga por carga viva (LS): Producto de la sobrecarga vehicular ubicado justo al final de la estructura.
- Carga de de carril de diseño (C_{HL-93}): Carga de diseño que representa la acumulación de vehículos sobre la estructura.
- Carga de sismo (EQ):

Cargas	DC (↓)	DW (↓)	EV (↓)	ES(→)	EH (→)	PL (↓) C.diseño	PL (↓) Tandem	LS (→)	C_{HL-93} (↓)	EQ (→)
P. Superior	720 kg/m	202 kg/m	3139 kg/m	101 kg/m	1400 kg/m	1273 kg/m	1211 kg/m	1219 kg/m	122 kg/m	1224 kg/m
P. Inferior	---	---	---	101 kg/m	6500 kg/m	---	---	610 kg/m	122 kg/m	306 kg/m
Longitud l_w	---	---	---	---	---	1.96 m	3.18 m	---	---	---

Las combinaciones de carga para el estado límite de Resistencia I

Caso 1. Para cargas verticales y horizontales máximas.

$$RU_1 = n \cdot (1.25 \cdot DC + 1.5 \cdot DW + 1.5 \cdot ES + 1.3 \cdot EV + 1.35 \cdot EH + 1.75 \cdot PL + 1.75 \cdot C_{HL-93} + 1.75 \cdot LS)$$

Caso 2. Para cargas verticales máximas y horizontales mínimas.

$$RU_1 = n \cdot (1.25 \cdot DC + 1.5 \cdot DW + 1.3 \cdot EV + 0.75 \cdot ES + 0.9 \cdot EH + 1.75 \cdot PL + 1.75 \cdot C_{HL-93} + 0 \cdot LS)$$

Para el momento positivo en la losa superior de la alcantarilla, se aplicó una reducción del 50 por ciento a las carga horizontales EH y ES, sin combinarlas con los factores de carga, de acuerdo con las especificaciones del artículo 3.11.7 Diseño AASTHO LRFD (2020).

Las combinaciones de carga para el estado límite de Resistencia IV

$$RU_4 = n \cdot (1.5 \cdot DC + 1.5 \cdot DW + 1.5 \cdot ES + 1.5 \cdot EV + 1.5 \cdot EH)$$

Las combinaciones de carga para el estado límite Evento extremo I

$$EU_1 = (1.25 \cdot DC + 1.5 \cdot DW + 1.5 \cdot ES + 1.3 \cdot EV + 1.35 \cdot EH + 0.5 \cdot PL + 0.5 \cdot C_{HL-93} + 0.5 \cdot LS + 1 \cdot EQ)$$

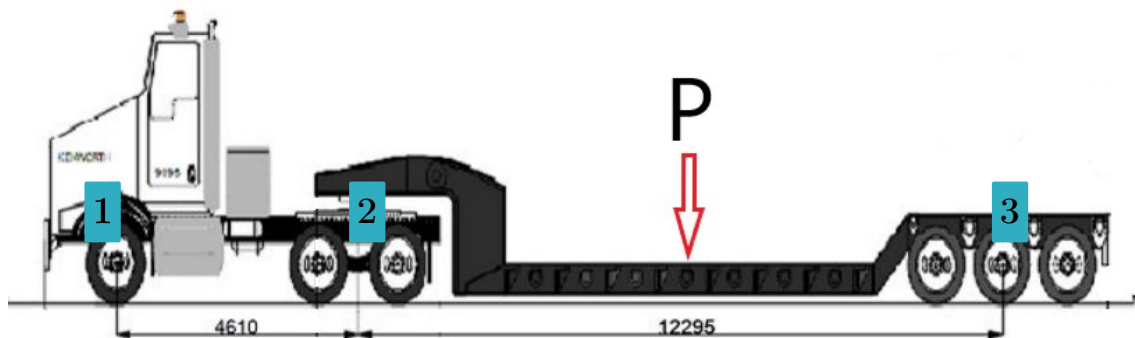
Apéndice 1.

I) Diagrama del camión especial del (ICE), para el transporte de las cargas especiales .

$Peso_del_Cabezal := 10800 \text{ kg}$

$P := 35750 \text{ kg}$

$Peso_del_Lowboy := 12300 \text{ kg}$



a) Distribución del peso propio del cabezal entre sus ejes.

Para el eje delantero del cabezal $P_{1C} := \frac{Peso_del_Cabezal}{2} = 5400 \text{ kg}$

Para los ejes de atrás del cabezal $P_{2C} := \frac{Peso_del_Cabezal}{2} = 5400 \text{ kg}$

b) Distribución del peso propio del Lowboy entre sus ejes y los ejes del cabezal.

Para los ejes de atrás del cabezal $P_{2L} := \frac{Peso_del_Lowboy}{2} = 6150 \text{ kg}$

Para los ejes de atrás del Lowboy. $P_{3L} := \frac{Peso_del_Lowboy}{2} = 6150 \text{ kg}$

c) Distribución del peso propio del equipo entre los ejes del Lowboy y cabezal.

Para ejes de atrás del cabezal $P_{2P} := \frac{P}{2} = 17875 \text{ kg}$

Para los ejes de atrás del Lowboy. $P_{3P} := \frac{P}{2} = 17875 \text{ kg}$

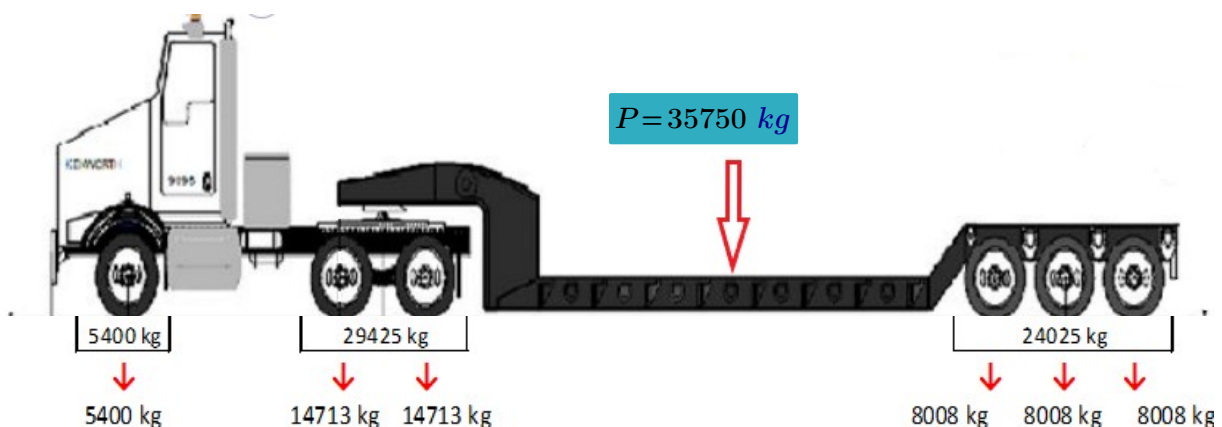
Distribución del peso propio del cabezal, Lowboy y la carga "P" para los ejes de atrás del cabezal.

$$Ejes_de_atras_del_Cabezal := P_{2C} + P_{2L} + P_{2P} = 29425 \text{ kg}$$

Distribución del peso propio del Lowboy y la carga "P" para los ejes de atrás del del Lowboy.

$$Ejes_del_Lowboy := P_{3L} + P_{3P} = 24025 \text{ kg}$$

Diagrama de distribución de cargas por eje, para el camión y el Lowboy del (ICE).



Apéndice 1.

I.1) Presión vertical de la carga de los ejes del camión sobre la losa de la alcantarilla.

$\#ejes := 2$ = Cantidad de ejes del camión a evaluar sobre la alcantarilla.

$s_a := 1.22 \text{ m}$ = Separación entre ejes del camión a evaluar.

$P2. = 14713 \text{ kg}$ = Peso por eje del camión a evaluar sobre la alcantarilla.

$m. := 1$ = Factor de presencia múltiple según el Art. 6A.4.5.4.2b, AASTHO MBE-3 (2018)

$IM. = 0$ = El factor de incremento por carga dinámica Art. 6A.5.12.10.3b AASTHO MBE-3

$$l_w := l_t + (\#ejes - 1) \cdot s_a + LLDF \cdot (H) = 3.18 \text{ m}$$

$$W_w = 4.32 \text{ m}$$

$$A_{LL} := l_w \cdot W_w = 13.738 \text{ m}^2$$

$$PL_2 := \frac{\#ejes \cdot P2. \cdot (1 + IM.) \cdot m.}{A_{LL}} = 2141.808 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Diagrama de distribución de la carga viva para los ejes del camión del ICE sobre la alcantarilla.

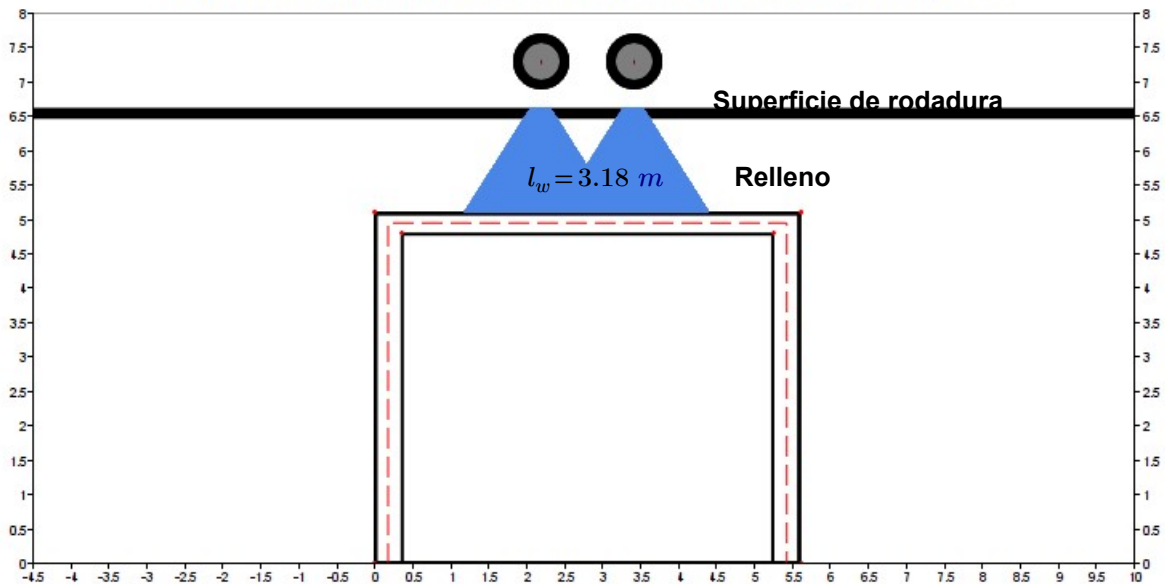
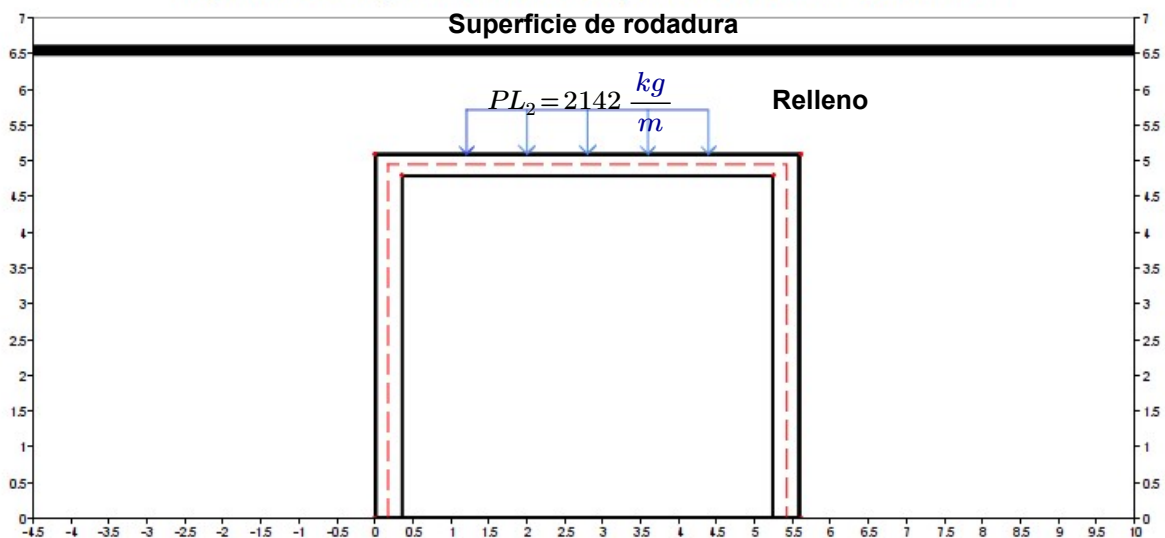


Diagrama de la carga distribuida de los ejes del camión del ICE sobre la losa



Apéndice 1.

I.2) Presión vertical de la carga de los ejes del Lowboy sobre la losa de la alcantarilla.

- $\#ejes := 3$ = Cantidad de ejes del *Lowboy* a evaluar sobre la alcantarilla.
- $s_a := 1.22 \text{ m}$ = Separación entre ejes del *Lowboy* a evaluar sobre la alcantarilla.
- $P3. = 8008 \text{ kg}$ = Peso por eje del *Lowboy* a evaluar sobre la alcantarilla.
- $m. = 1$ = Factor de presencia múltiple según el Art. 6A.4.5.4.2b, AASTHO MBE-3 (2018)
- $IM. = 0$ = El factor de incremento por carga dinámica Art. 6A.5.12.10.3b AASTHO MBE-3

$$l_w := l_t + (\#ejes - 1) \cdot s_a + LLDF \cdot (H) = 4.4 \text{ m}$$

$$W_w = 4.32 \text{ m}$$

$$A_{LL} := l_w \cdot W_w = 19.003 \text{ m}^2$$

$$PL_3 := \frac{\#ejes \cdot P3. \cdot (1 + IM.) \cdot m.}{A_{LL}} = 1264 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Diagrama de distribución de carga viva para los ejes del *Lowboy* sobre la alcantarilla.

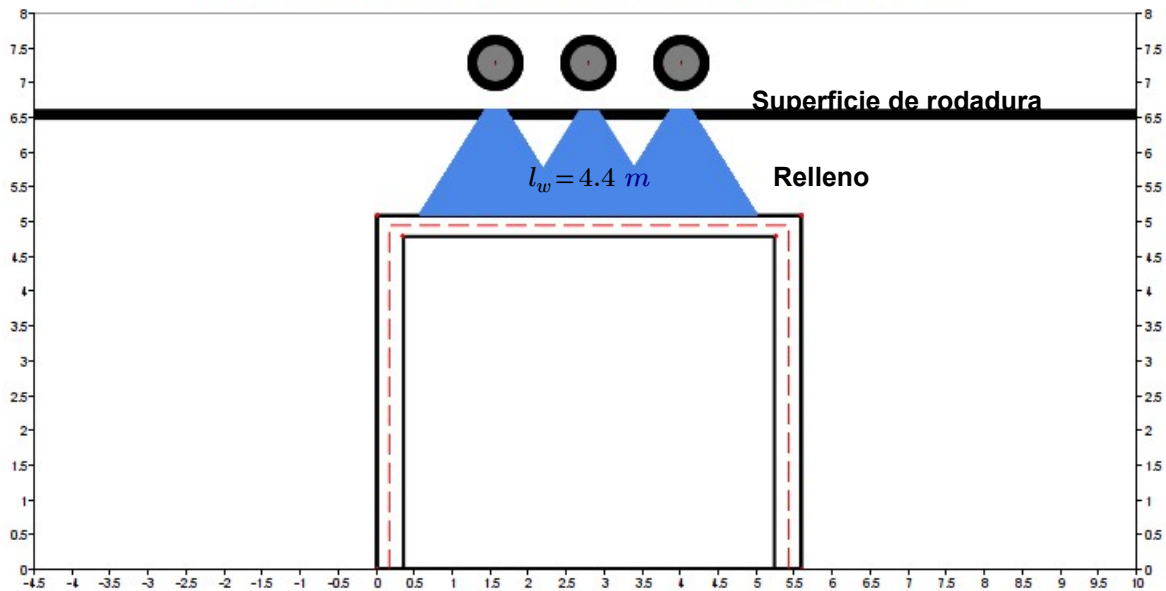
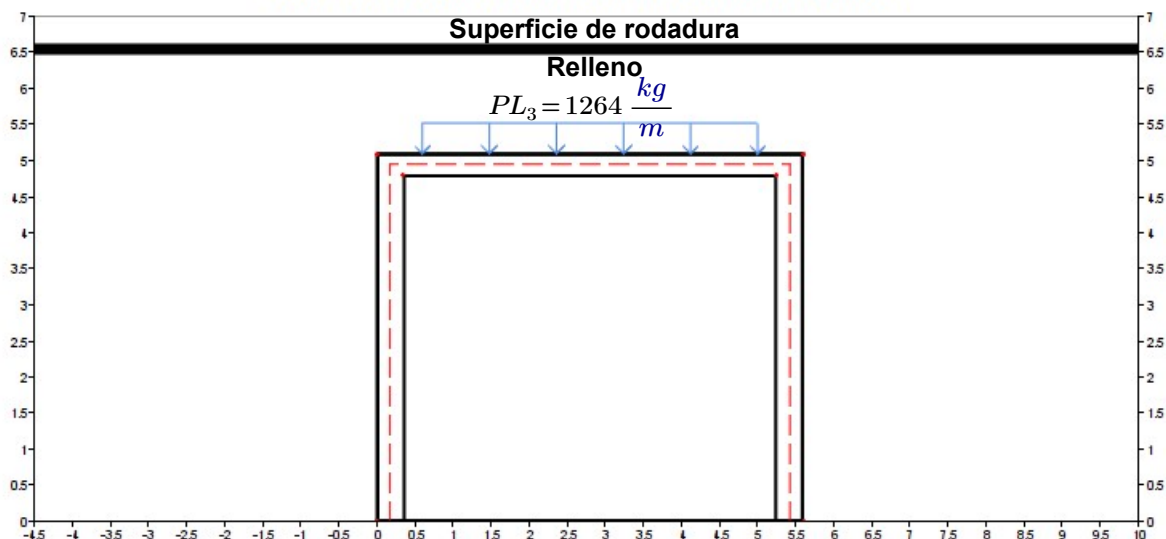


Diagrama de la carga distribuida de los ejes del *lowboy* sobre la losa



Apéndice 1.

Resumen de los cálculos de las cargas permanentes que actúan en la estructura, y la carga del *Lowboy*.

Cargas	DC (↓)	DW(↓)	EV(↓)	ES (→)	EH (→)	PL ₂ (↓)	PL ₃ (↓)	LS (→)
Parte superior	720 kg/m	202 kg/m	3139 kg/m	101 kg/m	1400 kg/m	2142 kg/m	1264 kg/m	1219 kg/m
Parte Inferior	---	---	---	101 kg/m	6500 kg/m	--	--	610 kg/m
l_w	---	---	---	--	--	3.18 m	4.40 m	---

Para cargas verticales y horizontales máximas.

$$RU_2 = (1.25 \cdot DC + 1.5 DW + 1.5 ES + 1.3 EV + 1.35 EH + 1.1 PL + 1.1 \cdot LS)$$

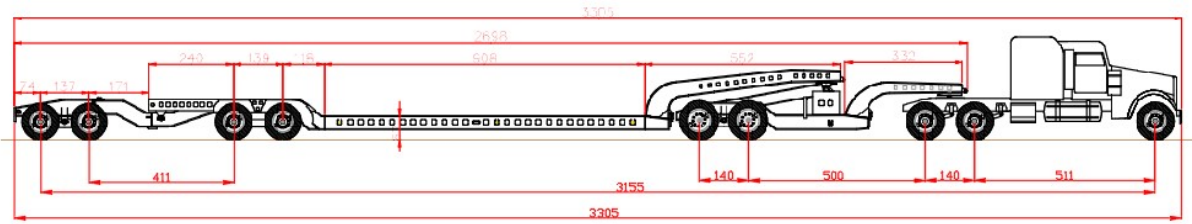
Para cargas verticales máximas y horizontales mínimas.

$$RU_2 = (1.25 \cdot DC + 1.5 \cdot DW + 1.3 EV + 0.75 \cdot ES + 0.9 \cdot EH + 1.1 \cdot PL + 0 LS)$$

De acuerdo con el Artículo 6A.5.12.10 del manual AASHTO MBE-3 (2018), el efecto de las cargas horizontales EH, ES y LS, puede reducir los efectos causados por otras cargas y recomienda una reducción del 50 por ciento en la carga horizontal de tierra.

Apéndice 1.

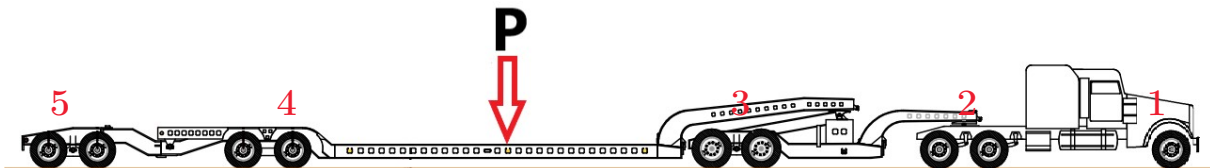
J) Camión para el transporte cargas especiales de la Empresa (Cargas Especiales Mincho).



$Peso_del_Cabezal := 10800 \text{ kg}$

$P := 81000 \text{ kg}$

$Peso_del_Lowboy := 10000 \text{ kg}$



a) Distribución del peso propio del cabezal entre sus ejes.

Para el eje delantero del cabezal

$$P1_C := \frac{Peso_del_Cabezal}{2} = 5400 \text{ kg}$$

Para los ejes de atrás del cabezal

$$P2_C := \frac{Peso_del_Cabezal}{2} = 5400 \text{ kg}$$

b) Distribución del peso propio del Lowboy entre sus ejes

Para los ejes del Lowboy.

$$P3_L := \frac{Peso_del_Lowboy}{3} = 3333.333 \text{ kg}$$

$$P4_L := \frac{Peso_del_Lowboy}{3} = 3333.333 \text{ kg}$$

$$P5_L := \frac{Peso_del_Lowboy}{3} = 3333.333 \text{ kg}$$

c) Distribución del peso de la carga "P" entre los ejes de atrás del Lowboy y cabezal.

Para los ejes del Lowboy.

$$P3_P := \frac{P}{3} = 27000 \text{ kg} \quad P4_P := \frac{P}{3} = 27000 \text{ kg} \quad P5_P := \frac{P}{3} = 27000 \text{ kg}$$

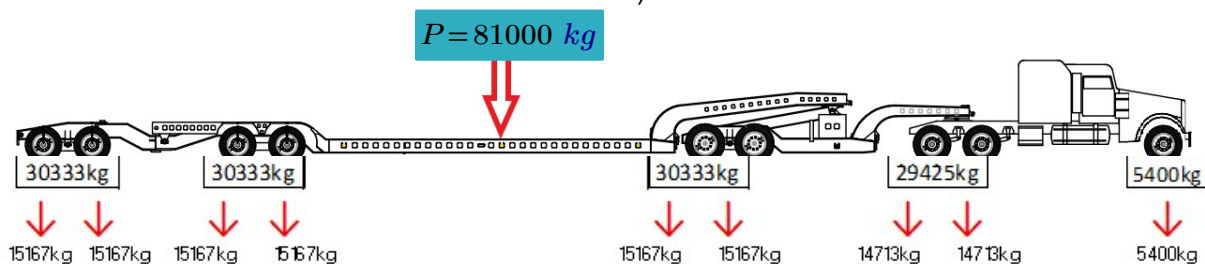
Distribución del peso del cabezal, Lowboy y la carga "P" para los ejes de atrás del del cabezal.

$$Ejes_de_atras_del_Cabezal := P2_C = 5400 \text{ kg}$$

Distribución del peso del Lowboy y la carga "P" para los ejes del Lowboy.

$$Ejes_del_Lowboy := P3_L + P3_P = 30333.333 \text{ kg}$$

Diagrama de distribución de cargas por eje para el camión y sistema a utilizar (Cargas Especiales Mincho).



Apéndice 1.

J.1) Presión vertical de la carga de los ejes del camión sobre la losa de la alcantarilla

- $\#ejes := 2$ = Cantidad de ejes del camión **a evaluar** sobre la alcantarilla.
- $s_a := 1.4 \text{ m}$ = Separación entre ejes del camión .
- $P3. = 15167 \text{ kg}$ = Peso por eje del camión **a evaluar** sobre la alcantarilla.
- $m. = 1$ = Factor de presencia múltiple según el Art. 6A.4.5.4.2b, AASTHO MBE-3 (2018)
- $IM. = 0$ = El factor de incremento por carga dinámica Art. 6A.5.12.10.3b AASTHO MBE-3

$$l_w := l_t + (\#ejes - 1) \cdot s_a + LLDF \cdot (H) = 3.36 \text{ m}$$

$$W_w = 4.32 \text{ m}$$

$$A_{LL} := l_w \cdot W_w = 14.515 \text{ m}^2$$

$$PL_3 := \frac{\#ejes \cdot P3. \cdot (1 + IM.) \cdot m.}{A_{LL}} = 2089.766 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Diagrama de distribución de carga viva paralela al tramo de alcantarilla

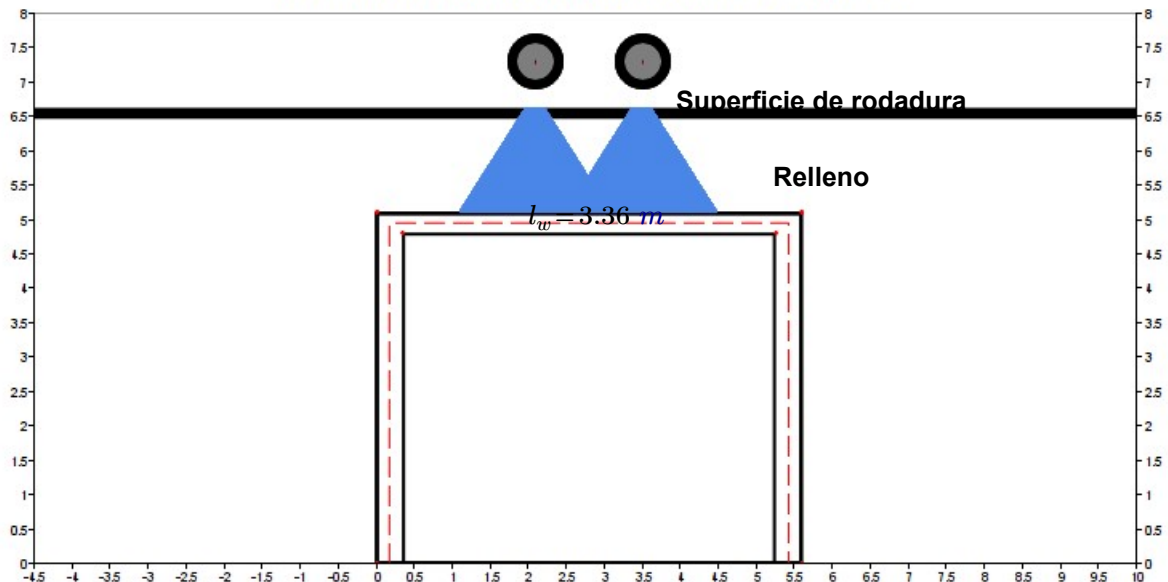
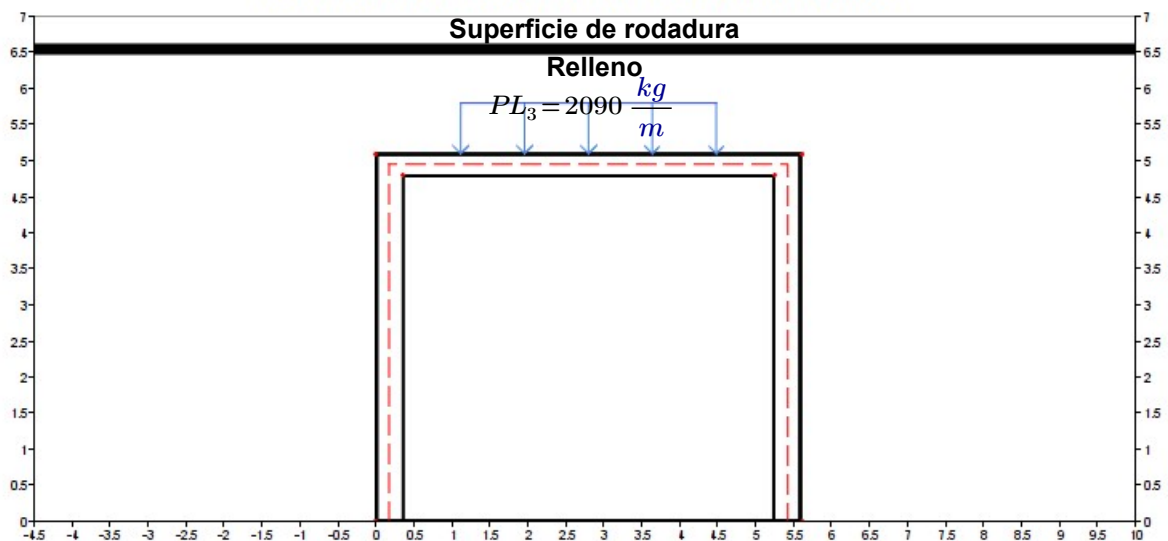


Diagrama de cuerpo libre de la distribución de la carga viva sobre la losa.



Apéndice 1.

J.2) Presión de la carga viva sobre la alcantarilla, para los ejes de atrás del sistema

- $\#ejes := 2$ = Cantidad de ejes del sistema **Lowboy a evaluar** sobre la alcantarilla.
 $s_a := 1.4 \text{ m}$ = Separación entre ejes del sistema **Lowboy a evaluar** sobre la alcantarilla.
 $P4. = 15167 \text{ kg}$ = Peso por ejes del sistema **Lowboy a evaluar** sobre la alcantarilla..
 $m. = 1$ = Factor de presencia múltiple según el Art. 6A.4.5.4.2b, AASTHO MBE-3 (2018)
 $IM. = 0$ = El factor de incremento por carga dinámica, Art. 6A.5.12.10.3b AASTHO MBE-3

$$l_w := l_t + (\#ejes - 1) \cdot s_a + LLDF \cdot (H) = 3.36 \text{ m}$$

$$W_w = 4.32 \text{ m}$$

$$A_{LL} := l_w \cdot W_w = 14.515 \text{ m}^2$$

$$PL_4 := \frac{\#ejes \cdot P4. \cdot (1 + IM.) \cdot m.}{A_{LL}} = 2089.766 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Diagrama de distribución de carga viva sobre la alcantarilla para los ejes de atrás del sistema (Lowboy)

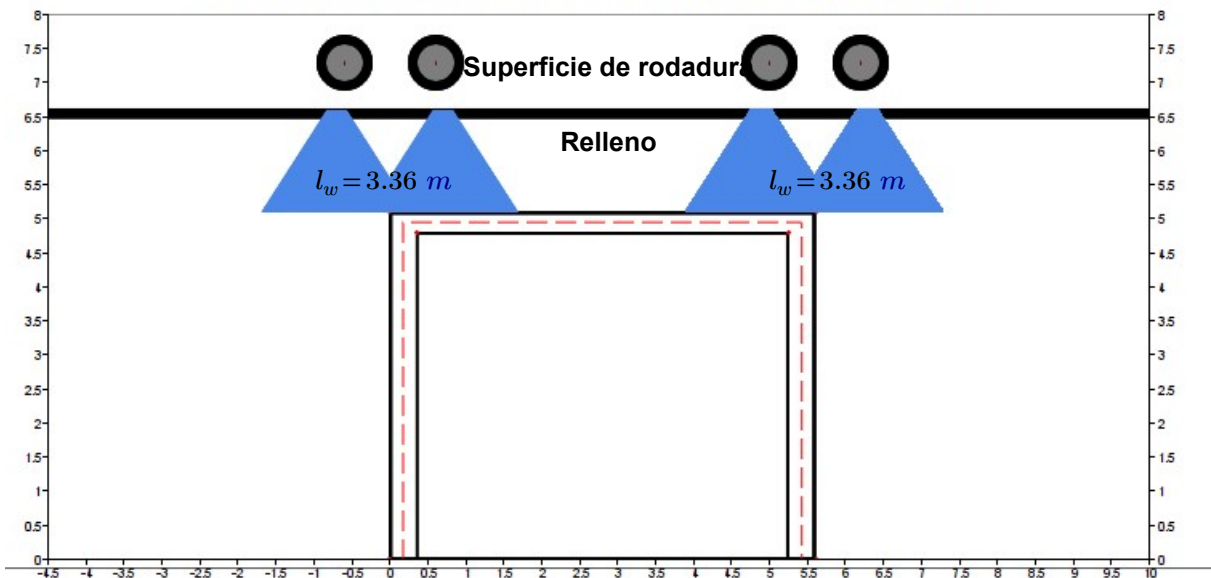
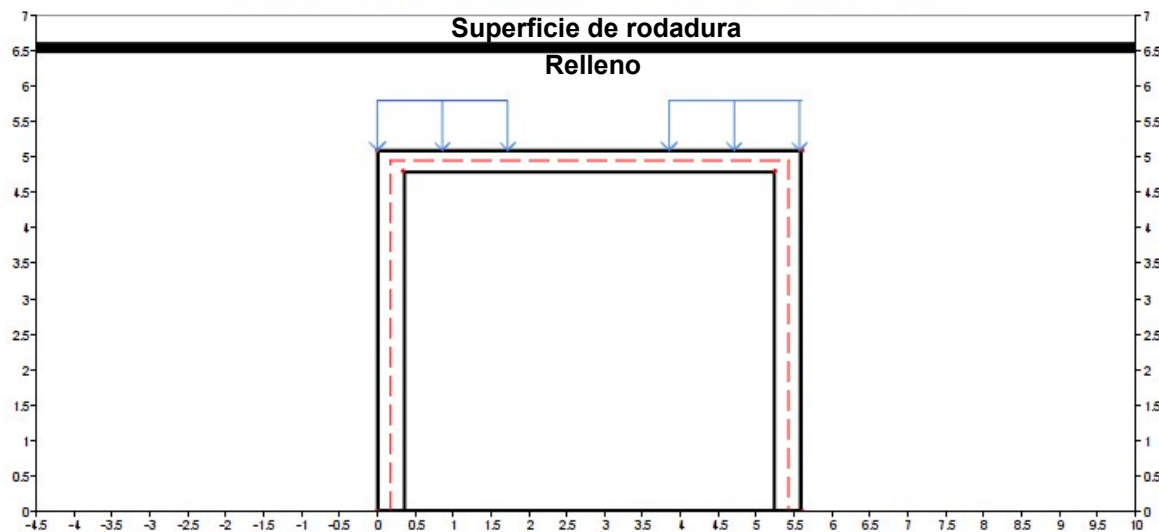


Diagrama de la carga distribuida de los ejes del sistema Lowboy sobre la losa



Nota: El caso más crítico de carga distribuida sobre la alcantarilla se presenta cuando hay solo una carga sobre el claro, ya que la separación entre ejes es similar al tramo.

Apéndice 1.

Cargas	DC (↓)	DW (↓)	EV (↓)	ES (→)	EH (→)	PL ₃ (↓)	PL ₄ (↓)	PL ₅ (↓)	LS (→)
Parte superior	720 kg/m	202 kg/m	3139 kg/m	101 kg/m	1400 kg/m	2090 kg/m	2090 kg/m	2090 kg/m	1219 kg/m
Parte inferior	---	---	---	101 kg/m	6500 kg/m	---	---	---	610 kg/m
l_w	---	---	---	---	---	3.36 m	1.56 m	1.56 m	---

Apéndice 2

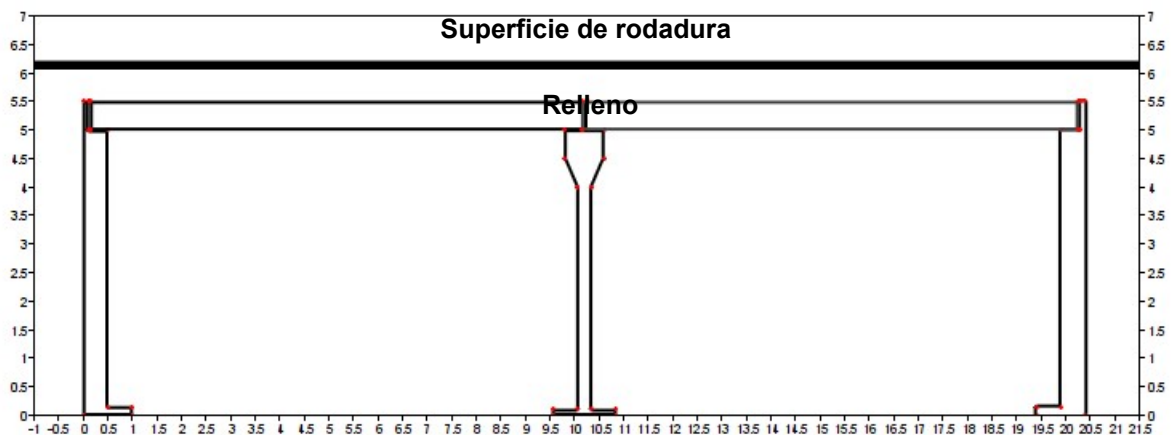
	Punto inicial	Punto Final	MA (-)kgf-m	MC (+) kgf-m	MB (-) kgf-m	VA (kgf)	VB (kgf)
1	0	3.19	-1.89054586	0.90475615	-1.13630425	-2.36453691	0.82546309
2	0.1	3.29	-1.93392394	0.93503356	-1.2121566	-2.297566	0.892434
3	0.2	3.39	-1.96486801	0.96210291	-1.2881566	-2.22822371	0.96177629
4	0.3	3.49	-1.98418792	0.98846532	-1.36361969	-2.1567651	1.0332349
5	0.4	3.59	-1.99255034	1.01118568	-1.43789262	-2.08344966	1.10655034
6	0.5	3.69	-1.9906264	1.03021477	-1.51030425	-2.00852796	1.18147204
7	0.6	3.79	-1.9790783	1.04614765	-1.58018345	-1.93225503	1.25774497
8	0.7	3.89	-1.95858166	1.05993736	-1.64685906	-1.85489038	1.33510962
9	0.8	3.99	-1.92979866	1.06984787	-1.7096689	-1.77668009	1.41331991
10	0.9	4.09	-1.89340045	1.07585682	-1.76793736	-1.69788814	1.49211186
11	1	4.19	-1.85006264	1.07796421	-1.82100224	-1.6187651	1.5712349
12	1.1	4.29	-1.81439821	1.07759284	-1.92944519	-1.54788814	1.74211186
13	1.2	4.39	-1.75667114	1.07392394	-1.96586577	-1.46728859	1.82271141
14	1.3	4.49	-1.68505145	1.06634899	-1.94226398	-1.38195078	1.80804922
15	1.4	4.59	-1.62061745	1.05484564	-1.96781208	-1.30404922	1.88595078
16	1.5	4.69	-1.55257718	1.05327069	-1.98480984	-1.22708725	1.96291275
17	1.6	4.79	-1.48160626	1.02438926	-1.99258613	-1.15132886	2.03867114
18	1.7	4.89	-1.40837136	1.00253691	-1.99047875	-1.07701566	2.11298434
19	1.8	4.99	-1.33353915	0.97835794	-1.97781208	-1.00441611	2.18558389
20	1.9	5.09	-1.25778076	0.95159732	-1.95392394	-0.93377181	2.25622819
21	2	5.19	-1.18176286	0.92331991	-1.9181387	-0.86534676	2.32465324
22	2.1	5.29	-1.10616555	0.89172707	-1.87058166	-0.80073826	2.35060403
			-1.99255034	1.07796421	-1.99258613	-2.36453691	2.35060403

Apéndice 3

Puente: Paso Superior N 1357

Dimensiones del puente para la estimación de carga que actúan sobre la misma.

$L := 10.2 \text{ m}$	= Longitud de los tramos del puente (Sesgado 6.3°).
$T := 2$	= Número de tramos de la puente
$R := 0.60 \text{ m}$	= Profundidad del relleno sobre la puente (m)
$E_s := 0.50 \text{ m}$	= Espesor de la losa superior (m)
$E_i := 0.40 \text{ m}$	= Ancho de asiento (m)
$h := 5.00 \text{ m}$	= Altura o luz libre de la puente (m)
$E_a := 0.07 \text{ m}$	= Espesor de la capa de asfalto (m)
$t := 0.50 \text{ m}$	= Espesor del muro (m)
$A := 32.70 \text{ m}$	= Ancho de la alcantarilla (m).
$C := 5$	= Cantidad de carriles.
$S := 6.30^\circ$	= Puente sesgado.



Materiales del puente para la estimación de carga que actúan sobre la misma.

$\phi'_f := 30^\circ$	= Ángulo efectivo de fricción del suelo ($^\circ$) (Supuesto)
$\gamma_a := 2240 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	= Peso propio de la capeta asfáltica según la Tabla 3.5.1-1, AASHTO LRFD
$\gamma_c := 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	= Peso unitario o densidad del concreto según la Tabla 3.5.1-1, AASHTO LRFD
$\gamma_s := 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	= Peso unitario del material de relleno sobre la puente (Supuesto)

Consideraciones para la estimación de las cargas que actúan sobre la estructura

1. La estimación de cargas permanentes se realiza para una franja de **1 metro** de ancho de la estructura (Puente).
2. La capa de asfalto se considera solo en los cálculos de carga muerta (sin contribución de resistencia).
3. El puente de viga-losa de concreto reforzado simplemente apoyadas.
4. $V := 16 \text{ kph}$ = Velocidad máxima de circulación del camión con el equipo especial sobre la estructura.

Consideraciones para la estimación de carga que actúan sobre la estructura

"LRFD" se refiere: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Ninth Edition, LRFD-9

Apéndice 3

CÁLCULO DE CARGAS PARA EL ANALISIS DEL PUENTE DE CONCRETO ARMADO

A. Superestructura:

A.1) Carga muerta (DC)

Componentes estructurales

Peso propio de las viga-losa por m lineal

$$W_{Viga_losa} := E_s \cdot \gamma_c \cdot 1 \text{ m} = 1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Donde:

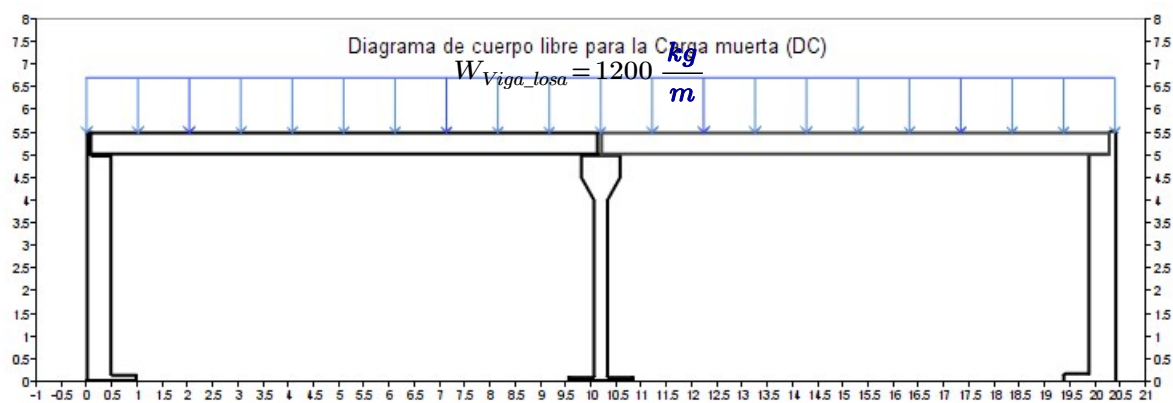
$$E_s = 0.5 \text{ m} = \text{Espesor de la viga-losa.}$$

$$\gamma_c = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \text{Peso unitario o densidad del concreto}$$

$$W_{Viga_losa} = 1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = \text{Peso de la losa superior por } m \text{ lineal}$$

Peso propio de la barrera de lineal de centro.

Para la barrera de la línea de centro, tipo NEW JERSEY (2 CARAS), se utilizó un peso de: 650 kg por metro lineal.

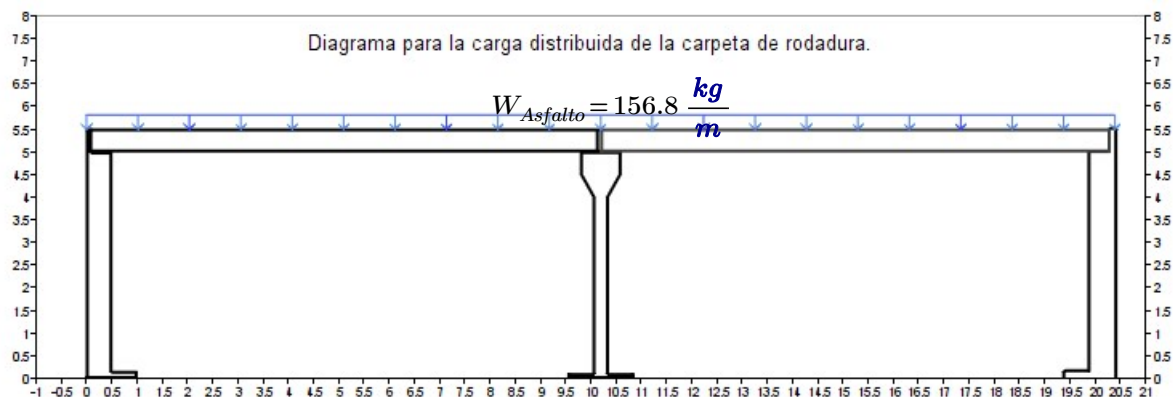


A.2) Carga muerta (DW)

Peso propio de la carpeta de rodadura (asfalto) :

$$W_{Asfalto} := E_a \cdot \gamma_a \cdot 1 \text{ m} = 156.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Carga distribuida de la carpeta de rodadura sobre el puente.



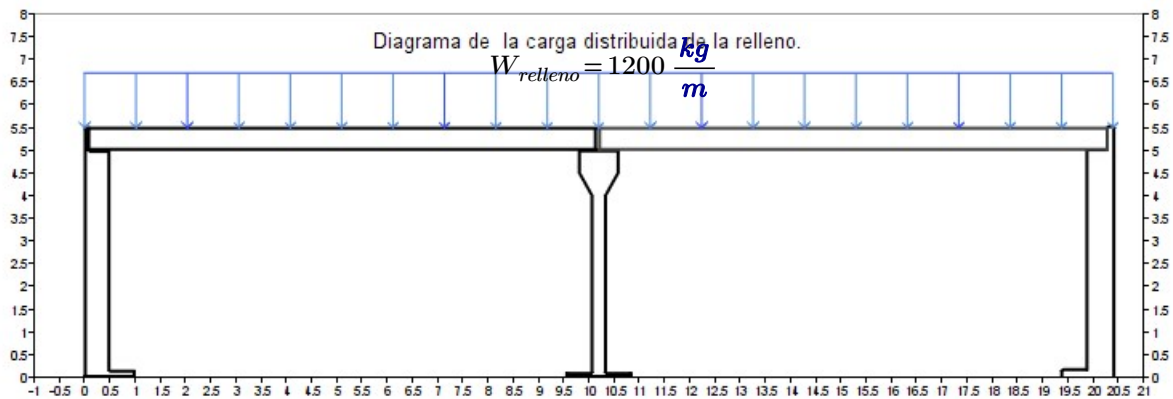
Apéndice 3

A.3) Carga relleno (R)

Peso propio del material de relleno

$$W_{relleno} := R \cdot \gamma_s \cdot 1 \text{ m} = 1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

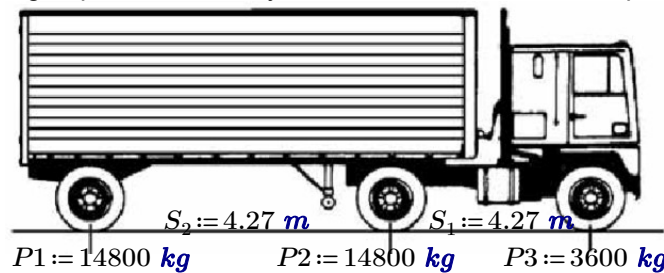
Carga distribuida del relleno existente entre asfalto y las viga-losa del puente.



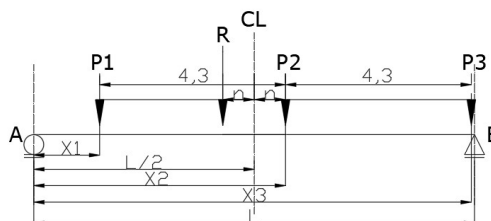
A.3) Análisis de la Carga viva de diseño (LL)

A.3.1 Camión de Diseño

Para las cargas de diseño y las cargas especiales se utilizó el teorema de Barré, para determinar la posición del tren de carga, que causa el mayor efecto a momento en la superestructura



A.3.1.1 Momento máximo por flexión al centro del claro (camión de diseño)



$R := P3 + P2 + P1$ = Resultante del tren de carga para el camión de diseño

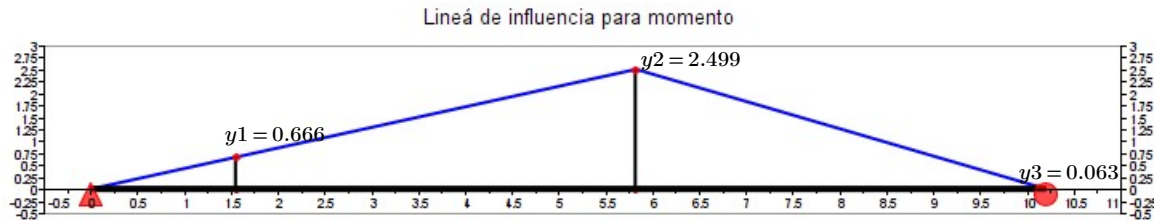
Aplicando el teorema de barré, se cálculo la posición del tren de carga que causa el mayor efecto a momento en la superestructura

- $x1 = 1.55 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P1$ para el camión de diseño
- $x2 = 5.82 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P2$ para el camión de diseño
- $x3 = 10.09 \text{ m}$ = Posición del eje delantero $P3$ para el camión de diseño

Los valores de $y1, y2, y3$, corresponden a las ordenadas de la línea de influencia, para la posición del tren de carga, tomando con referencia la carga mas pesada.

- $y1 = 0.666$ = Ordenada para la posición del eje de atrás $P1$ para el camión de diseño
- $y2 = 2.499$ = Ordenada para la posición del eje de atrás $P2$ para el camión de diseño
- $y3 = 0.063$ = Ordenada para la posición del eje delantero $P3$ para el camión de diseño

Apéndice 3



Momento máximo en el centro del claro para el camión de diseño.

$$M_{C.Diseño} := y1 \cdot P1 + y2 \cdot P2 + y3 \cdot P3 = 47064.5 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

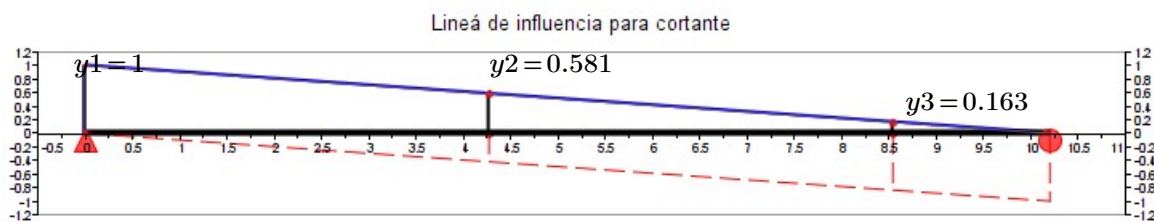
A.3.1.2 cálculo de la máxima fuerza cortante del camión de diseño

Se determinó la posición del camión para generar el mayor efecto cortante en superestructura, mediante la líneas de influencia para cortante

- $x1 = 0 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P1$ para el camión de diseño
- $x2 = 4.27 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P2$ para el camión de diseño
- $x3 = 8.54 \text{ m}$ = Posición del eje delantero $P3$ para el camión de diseño

Los valores de $y1, y2, y3$, corresponden a las ordenadas de la línea de influencia para cortante, en la posición del tren de carga para genera el mayor efecto.

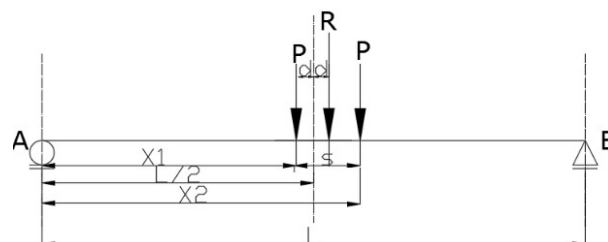
- $y1 = 1$ = Ordenada para la posición del eje de atrás $P1$ para el camión de diseño
- $y2 = 0.581$ = Ordenada para la posición del eje de atrás $P2$ para el camión de diseño
- $y3 = 0.163$ = Ordenada para la posición del eje delantero $P3$ para el camión de diseño



La fuerza cortante máxima para el camión de diseño.

$$V_{C.Diseño} := P1 (y1) + P2 \cdot (y2) + P3 \cdot (y3) = 23990.196 \text{ kg}$$

A.3.2 Camión de Tándem Diseño



A.3.2.1) Cálculo del momento máximo por flexión para el centro del claro (C. Tándem)

Donde:

- $P := 11200 \text{ kg}$ = Peso por eje para el camión tándem de diseño.
- $s := 1.20 \text{ m}$ = Separación entres ejes para el camión tándem de diseño.
- $R_t := P. + P.$ = Resultante del tren de carga para el camión tándem de diseño.

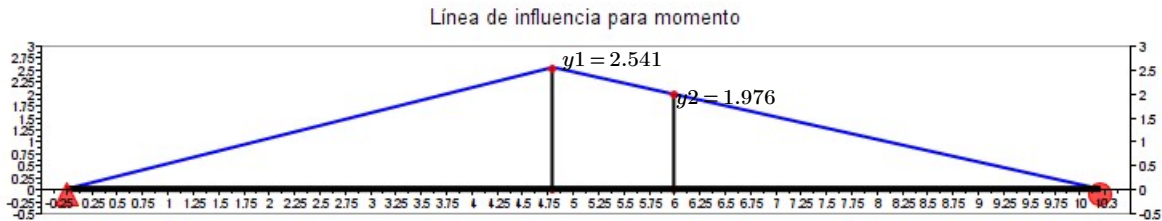
Aplicando el teorema de barré, se cálculo la posición del tren de carga que causa el mayor efecto a momento en la superestructura

- $x1 = 4.8 \text{ m}$ = Posición del eje del camión tándem de diseño
- $x2 = 6 \text{ m}$ = Posición del eje del camión tándem de diseño

Apéndice 3

Los valores de y_1, y_2, y_3 , corresponden a las ordenadas de la línea de influencia para momento, para la posición del tren de carga que causa el mayor efecto.

$y_1 = 2.541$ = Ordenada para la posición del eje de atrás del camión tándem de diseño
 $y_2 = 1.976$ = Ordenada para la posición del eje de adelante del camión tándem de diseño



En la posición del camión Tándem de diseño que el mayor momento en superestructura, se calculó el momento máximo utilizando la línea de influencia.

Momento máximo en el centro del claro para el camión tándem

$$M_{C.Tándem} := y_1 \cdot P. + y_2 \cdot P. = 50597.647 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

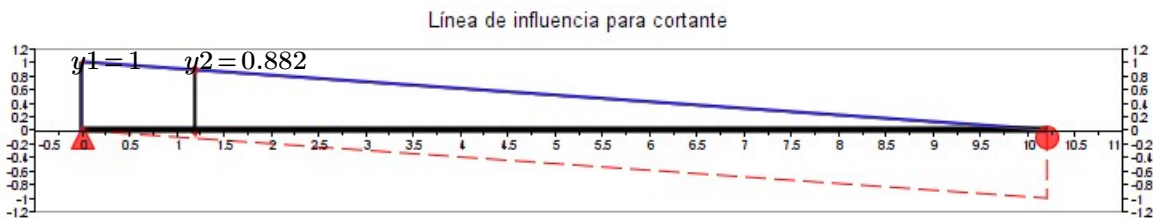
A.3.2.2 Cálculo de máxima fuerza cortante del camión de Tándem

Se determinó la posición del camión para generar el mayor efecto cortante en superestructura, utilizando líneas de influencia.

$x_1 = 0 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás del camión tándem de diseño
 $x_2 = 1.2 \text{ m}$ = Posición del eje de adelante del camión tándem de diseño

Los valores de y_1, y_2, y_3 , corresponden a las ordenadas de la línea de influencia para cortante, para la posición del tren de carga que causa el mayor efecto.

$y_1 = 1$ = Ordenada para la posición eje del camión tándem de diseño
 $y_2 = 0.882$ = Ordenada para la posición eje del camión tándem de diseño



La fuerza cortante máxima para el camión de Tándem de diseño

$$V_{C.Tándem} := P. \cdot (y_1) + P. \cdot (y_2) = 21082.353 \text{ kg}$$

A.4) Carga de carril HL-93

La carga de carril de diseño se usa una carga distribuida de 0,954 ton/m a lo largo del claro o vano

$$W_{HL_{93}} := 952.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = \text{Carga de carril HL-93 sobre la superficie de rodadura.}$$

$$w_{tc} := 3.05 \text{ m} = \text{Ancho de carril HL-93 sobre la superficie de rodadura.}$$

$$L = 10.2 \text{ m} = \text{Longitud para un tramo del puente.}$$

A.4.1) Momento máximo de la carga de carril de diseño.

$$M_{C.Carril} := \frac{W_{HL_{93}} \cdot L^2}{8} = 12385.96 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

A.4.2) Fuerza cortante de la carga de carril de diseño

$$V_{C.Carril} := W_{HL_{93}} \cdot \frac{L}{2} = 4857.24 \text{ kg}$$

Apéndice 3

A.5) Carga de dinámica

El factor de carga dinámica (IM) para el caso de elementos enterrados, se calculó mediante la ecuación (3.6.2.2-1) de diseño AASHTO LRFD (2020).

$$IM = 0.33 [1 - 0.41 \cdot (D_E)] \geq 0$$

Donde :

$D_E := R = 0.6$ m = La profundidad del relleno sobre la superestructura.

$$IM := 0.33 \cdot (1 - 0.41 \cdot (0.6)) = 0.249$$

A.6) Combinación de carga que rige: (Camión de diseño o Tándem) * IM + carga de carril

Momento máximo que rige por flexión al centro de cada claro (Carga de diseño)

$$M_{LL+IM} := \max(M_{C.Tándem} \cdot (1 + IM) + M_{C.Carril}, M_{C.Diseño} \cdot (1 + IM) + M_{C.Carril}) = 75573.316 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Fuerza cortante máxima que rige en los extremos de cualquiera de los claro (Carga de diseño)

$$V_{LL+IM} := \max(V_{C.Tándem} \cdot (1 + IM) + V_{C.Carril}, V_{C.Diseño} \cdot (1 + IM) + V_{C.Carril}) = 34816.677 \text{ kg}$$

A.7) Ancho de franja equivalente de diseño para la carga viva.

De acuerdo con las especificaciones del artículo 4.6.2.3 de diseño AASHTO LRFD (2020).

Donde:

E = Ancho equivalente

L_1 = Menor valor entre longitud real y $60 \text{ ft} = 18.288 \text{ m}$

W_1 = Menor valor entre ancho real y $60 \text{ ft} = 18.288 \text{ m}$ para carga en múltiples carriles ó $30 \text{ ft} = 9.144 \text{ m}$ para carga en un solo carril

W = Ancho físico entre los bordes del puente $W := 24.9 \text{ m}$

N_L = Número de carriles de diseño. $N_L := 5$

A.5.1) Para un carril cargado.

$$L_1 := \min(L, 60 \text{ ft}) = 10.2 \text{ m}$$

$$W_1 := \min(W, 30 \text{ ft}) = 9.144 \text{ m}$$

$$E_1 := 0.25 \text{ m} + 0.41 \cdot \sqrt{L_1 \cdot W_1} = 4.21 \text{ m}$$

A.5.2) Para 2 o mas carriles cargados

$$L_1 := \min(L, 60 \text{ ft}) = 10.2 \text{ m}$$

$$W_1 := \min(W, 60 \text{ ft}) = 18.288 \text{ m}$$

$$E_2 := 2.10 \text{ m} + 0.12 \cdot \sqrt{L_1 \cdot W_1} = 3.739 \text{ m} \quad \frac{W}{N_L} = 4.98 \text{ m}$$

El ancho equivalente para las fajas longitudinales tanto para cortante y momento, incluyendo el efecto de presencia múltiple.

$$E := \min(E_1, E_2) = 3.739 \text{ m}$$

Apéndice 3

A.5.2) Momento y cortante para un metro de ancho

El momento y cortante del peso propio de la losa.

$$M_{DC} := \frac{W_{Viga_losa} \cdot L^2}{8} = 15606 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$V_{DC} := \frac{W_{Viga_losa} \cdot L}{2} = 6120 \text{ kg}$$

El momento y cortante del peso del material de relleno.

$$M_{EV} := \frac{W_{relleno} \cdot L^2}{8} = 15606 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$V_{EV} := \frac{W_{relleno} \cdot L}{2} = 6120 \text{ kg}$$

El momento y cortante del peso de la carpeta asfáltica.

$$M_{DW} := \frac{W_{Asfalto} \cdot L^2}{8} = 2039.184 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$V_{DW} := \frac{W_{Asfalto} \cdot L}{2} = 799.68 \text{ kg}$$

El momento y cortante de la carga viva de diseño HL-93.

$$M_{LL} := \frac{M_{LL+IM}}{E} = 20212.469 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$V_{LL} := \frac{V_{LL+IM}}{E} = 9311.898 \text{ kg}$$

A.6) Carga sísmica por superestructura (P_{EQ}):

Donde:

P_{EQ} = Carga sísmica para la superestructura.

$P_{DC} + P_{DW}$ = Carga muerta de superestructura más la carga de asfalto de la superestructura

$I := 1$ = Factor de importancia.

$C_a := 0.367$ = Coeficiente sísmico de aceleración horizontal

$$P_{EQ} := ((W_{Viga_losa} \cdot L) + (W_{Asfalto} \cdot L)) \cdot I \cdot C_a = 5079.045 \text{ kg}$$

A.7) Combinaciones de carga

A.7.1) Combinaciones de carga para resistencia 1

$$RU_1 = (1.25 \cdot DC + 1.5 \cdot DW + 1.3 \cdot EV + 1.35 + 1.75 \cdot LL)$$

El momento nominal de diseño por metro de ancho, para cada tramos de la superestructura.

$$M_n := 1.25 \cdot M_{DC} + 1.5 \cdot M_{DW} + 1.3 \cdot M_{EV} + 1.75 \cdot M_{LL} = 78225.897 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

El cortante nominal de diseño por metro de ancho de la superestructura

$$V_n := 1.25 \cdot V_{DC} + 1.5 \cdot V_{DW} + 1.3 \cdot V_{EV} + 1.75 \cdot V_{LL} = 33101.342 \text{ kg}$$

A.7.2) Combinaciones de carga para Evento extremo 1

$$EU_1 = (1.25 \cdot DC + 1.5 \cdot DW + 1.3 \cdot EV + 1.35 + 1.75 \cdot LL)$$

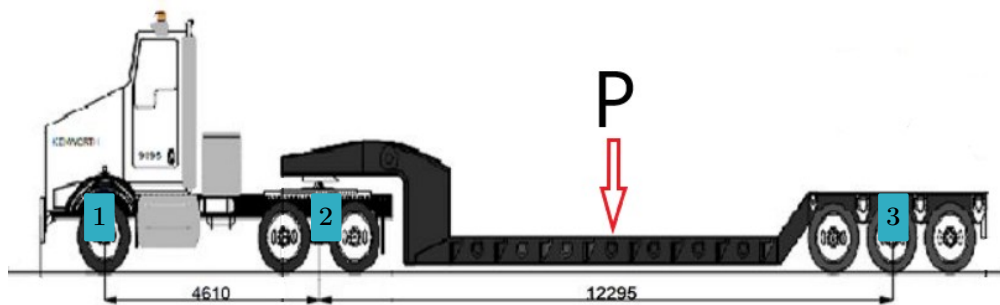
Apéndice 3

B) Camión especial del ICE

$Peso_del_Cabezal := 10800 \text{ kg}$

$P := 57000 \text{ kg}$

$Peso_del_Lowboy := 12300 \text{ kg}$



B.1) Distribución del peso propio y la carga "P" que representa el equipo electromecánico

B.1.1) Distribución del peso propio del cabezal entre sus ejes.

Para el eje delantero del cabezal $P1_C := \frac{Peso_del_Cabezal}{2} = 5400 \text{ kg}$

Para los ejes de atrás del cabezal $P2_C := \frac{Peso_del_Cabezal}{2} = 5400 \text{ kg}$

B.1.2) Distribución del peso propio del Lowboy entre sus ejes y los ejes del cabezal

Para los ejes de atrás del cabezal $P2_L := \frac{Peso_del_Lowboy}{2} = 6150 \text{ kg}$

Para los ejes de atrás del Lowboy $P3_L := \frac{Peso_del_Lowboy}{2} = 6150 \text{ kg}$

B.1.3) Distribución del peso propio del equipo entre los ejes de atrás del Lowboy y cabezal

Para ejes de atrás del cabezal $P2_P := \frac{P}{2} = 28500 \text{ kg}$

Para los ejes de atrás del Lowboy. $P3_P := \frac{P}{2} = 28500 \text{ kg}$

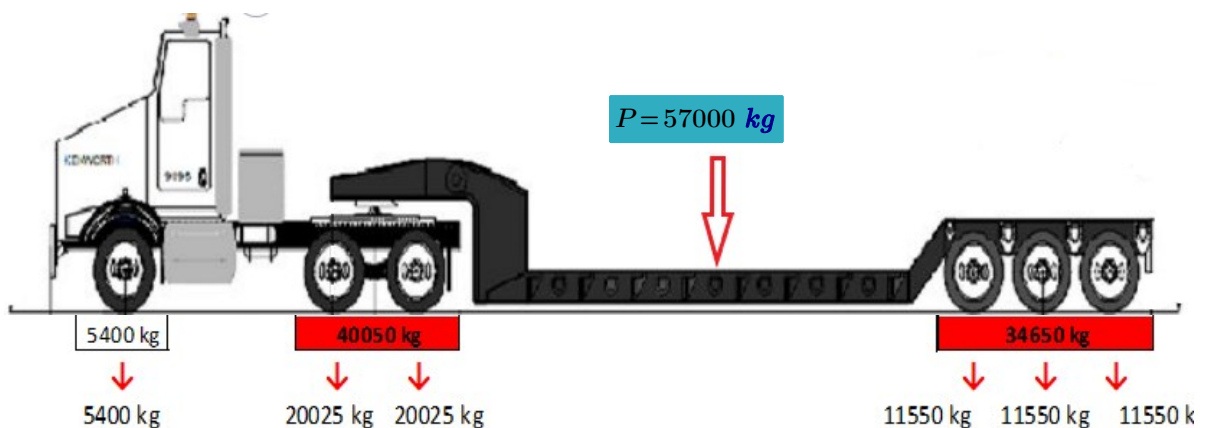
Distribución del peso del cabezal, Lowboy y la carga "P" para los ejes de atrás del del cabezal

$$Ejes_de_atras_del_Cabezal := P2_C + P2_L + P2_P = 40050 \text{ kg}$$

Distribución del peso del Lowboy y la carga "P" para los ejes de atrás del del Lowboy

$$Ejes_del_Lowboy := P3_L + P3_P = 34650 \text{ kg}$$

B.1.3) Diagrama de distribución de cargas por eje para el camión y Lowboy a evaluar del ICE



B.1.5) Carga por eje, para la configuración y las dimensiones del ICE

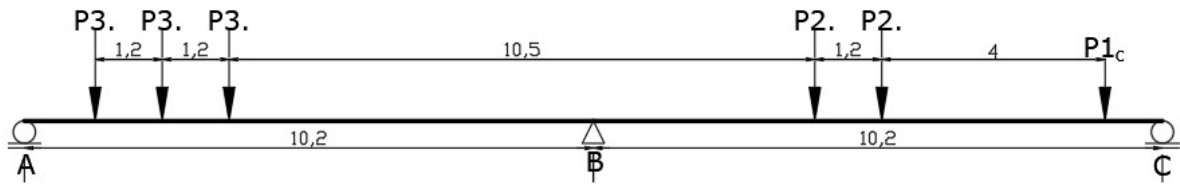
$P1_C = 5400 \text{ kg}$ = Peso del eje delantero del cabezal sobre tramo del puente

$P2. = 20025 \text{ kg}$ = Peso de los ejes de atrás del cabezal sobre tramo del puente

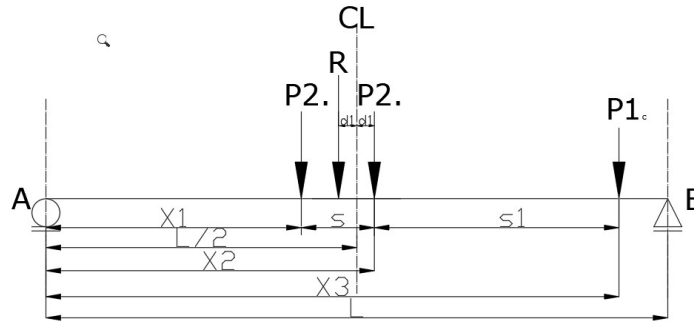
$P3. = 11550 \text{ kg}$ = Peso de los ejes del Lowboy sobre tramo del puente

Apéndice 3

B.2) Análisis de las dimensiones de del camión del ICE respecto a la longitud de los tramos del puente.



Análisis de la posición de los ejes del (cabezal) camión del ICE, sobre uno de los tramos del puente, para obtener la fuerza cortante y momento máximo



B.2.1) Posición del cabezal del ICE, para el momento máximo por flexión al centro del claro

$R_c := P2. + P2. + P1c =$ Resultante del tren de carga para el camión del ICE

$s1 := 4 \text{ m}$ = Separación entre eje delantero y los ejes de atrás para el camión del ICE

$s := 1.20 \text{ m}$ = Separación entre ejes para el camión del ICE

Aplicando el teorema de barré, se calculó la posición del tren de carga que causa el mayor efecto a momento en la superestructura

$x1 = 3.927 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P2.$ para el camión del ICE

$x2 = 5.127 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P2.$ para el camión del ICE

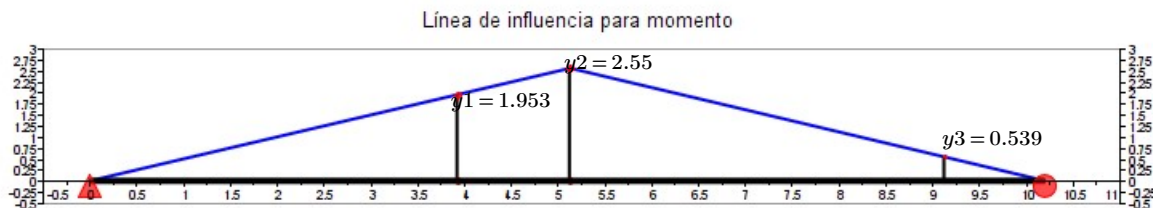
$x3 = 9.127 \text{ m}$ = Posición del eje delantero $P1c$ para el camión del ICE

Los valores $y1, y2, y3$, corresponden a las ordenadas de la línea de influencia para momento, en la posición del tren de carga, que causa el mayor efecto, tomando con referencia la carga mas pesada

$y1 = 1.953$ = Ordenada para la posición del eje de atrás $P2.$ para el camión del ICE

$y2 = 2.55$ = Ordenada para la posición del eje de atrás $P2.$ para el camión del ICE

$y3 = 0.539$ = Ordenada para la posición del eje delantero $P1c$ para el camión del ICE



Se calculó el momento máximo en la superestructura, mediante la aplicación de la línea de influencia para momento.

$$M_{C,ICE} := y1 \cdot P2. + y2 \cdot P2. + y3 \cdot P1c = 93085.684 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

B.2.2) Posición del cabezal del ICE para obtener la fuerza cortante máxima

Se determinó utilizando líneas de influencia la posición de los ejes del cabezal para generar el mayor efecto cortante en superestructura.

$x1 = 0 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P2.$ para el camión del ICE

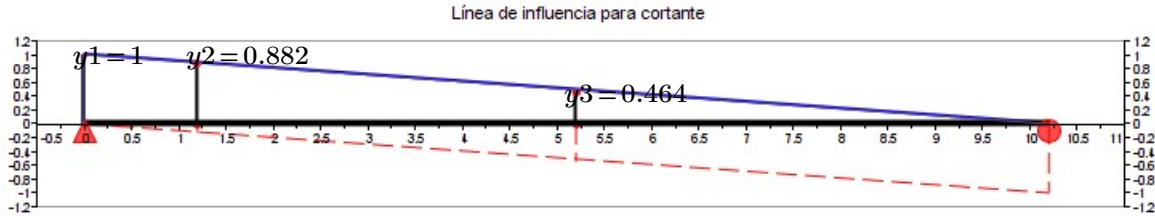
$x2 = 1.2 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P2.$ para el camión del ICE

$x3 = 5.2 \text{ m}$ = Posición del eje delantero $P1c$ para el camión del ICE

Apéndice 3

Los valores y_1, y_2, y_3 , corresponden a las ordenadas de la línea de influencia para cortante, según la posición del tren de carga para generar el mayor efecto en la superestructura

- $y_1 = 1$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P_2 . para el camión del ICE
- $y_2 = 0.882$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P_2 . para el camión del ICE
- $y_3 = 0.464$ = Ordenada para la posición del eje delantero P_{1C} para el camión del ICE

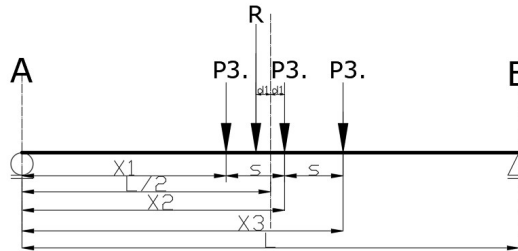


La fuerza cortante máxima para los ejes de cabezal del ICE.

$$V_{C,ICE} := y_1 \cdot P_2 + y_2 \cdot P_2 + y_3 \cdot P_{1C} = 40198.235 \text{ kg}$$

B.3) Análisis de la posición de los ejes del (Lowboy) para camión del ICE, sobre uno de los tramos del puente, para obtener el la fuerza cortante y momento máximo.

Para los ejes del Lowboy se cálculo la posición sobre uno de los tramos del puente utilizando el teorema de Barré.



B.3.1) Posición del Lowboy, para generar el momento máximo por flexión al centro del claro

$R_c := P_3 + P_3 + P_3$. = Resultante del tren de carga para el Lowboy del camión del ICE

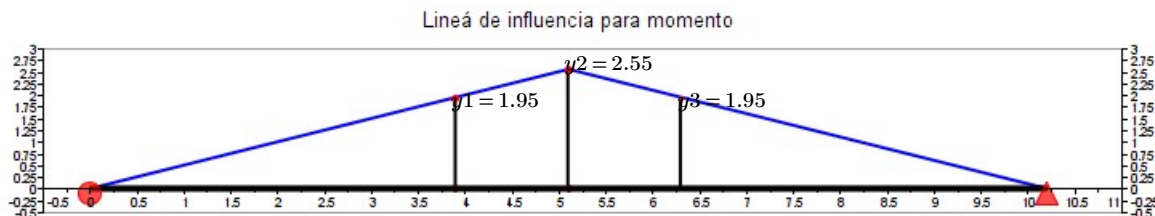
$s := 1.20 \text{ m}$ = Separación entre ejes del Lowboy para el camión del ICE

Aplicando el teorema de barré, se cálculo la posición del tren de carga del Lowboy, en la que genera el mayor efecto a momento en la superestructura

- $x_1 = 3.9 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás P_3 . para el Lowboy del camión del ICE
- $x_2 = 5.1 \text{ m}$ = Posición del eje intermedio P_3 . para el Lowboy del camión del ICE
- $x_3 = 6.3 \text{ m}$ = Posición del eje de eje adelante P_3 . para el Lowboy del camión del ICE

Los valores y_1, y_2, y_3 , corresponden a las ordenadas de la línea de influencia para momento, tomando con referencia la carga mas que causa el mayor efecto, para la posición del tren de carga

- $y_1 = 1.95$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P_3 . para el Lowboy camión del ICE
- $y_2 = 2.55$ = Ordenada para la posición del eje de intermedio P_3 . para el Lowboy camión del ICE
- $y_3 = 1.95$ = Ordenada para la posición del eje delantero P_3 . para el Lowboy camión del ICE



Se cálculo el momento máximo en la superestructura empleando la línea de influencia para momento.

$$M_{L,ICE} := (y_1 \cdot P_3 + y_2 \cdot P_3 + y_3 \cdot P_3) = 74497.5 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Apéndice 3

B.3.2) Posición del *Lowboy* del ICE para obtener la fuerza cortante máxima

Se determinó utilizando la línea de influencia para cortante, la posición del *Lowboy* para generar el mayor efecto cortante en superestructura, .

$x_1 = 0 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás P_3 . del *Lowboy* del camión del ICE

$x_2 = 1.2 \text{ m}$ = Posición del eje intermedio P_3 . del *Lowboy* del camión del ICE

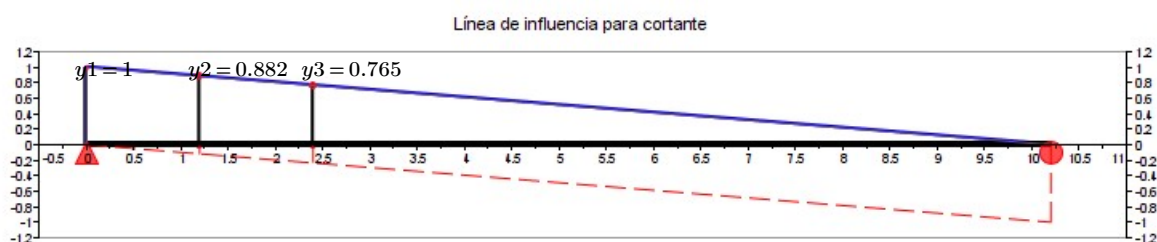
$x_3 = 2.4 \text{ m}$ = Posición del eje de adelante P_3 . del *Lowboy* del camión del ICE

Los valores y_1, y_2, y_3 , corresponden a las ordenadas de la línea de influencia por cortante, para la posición del tren de carga, que genera el mayor efecto.

$y_1 = 1$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P_2 . del *Lowboy* del camión del ICE

$y_2 = 0.882$ = Ordenada para la posición del eje intermedio P_2 . del *Lowboy* del camión del ICE

$y_3 = 0.765$ = Ordenada para la posición del eje de adelante P_{1C} del *Lowboy* del camión del ICE



La fuerza cortante máxima para los ejes del *Lowboy* del camión del ICE.

$$V_{LLICE} := y_1 \cdot P_3 + y_2 \cdot P_3 + y_3 \cdot P_3 = 30573.529 \text{ kg}$$

B.4) Efecto de la carga que rige del Cabezal o *Lowboy* para cualquier de los tramos

Momento máximo que rige por flexión al centro del claro para cualquiera de los tramos

$$M_{LLICE} := \max(M_{CICE}, M_{LICE}) = 93085.684 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Fuerza cortante máxima que rige para cualquiera de los tramos

$$V_{LLICE} := \max(V_{CICE}, V_{LICE}) = 40198.235 \text{ kg}$$

En resumen, la carga del cabezal es la que rige para momento y cortante en cualquiera de los tramos

Combinaciones de carga para resistencia 2

$$RU_2 = (1.25 \cdot DC + 1.5 \cdot DW + 1.3 \cdot EV + 1.35 + 1.1 \cdot LL)$$

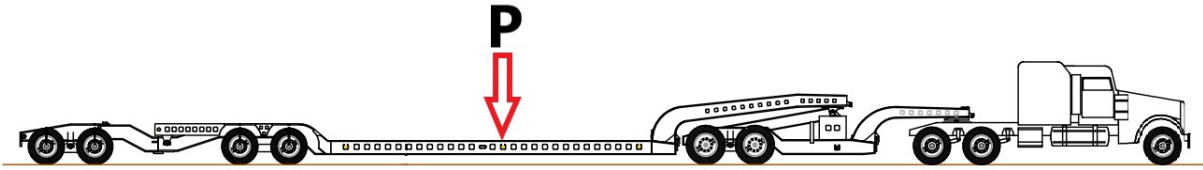
Apéndice 3

C) Camión especial del 2

$Peso_del_Cabezal := 10800 \text{ kg}$

$P := 89000 \text{ kg}$

$Peso_del_Lowboy := 10000 \text{ kg}$



C.1) Distribución del peso propio y la carga "P" que representa el equipo electromecánico

C.1.1) Distribución del peso propio del cabezal entre sus ejes.

Para el eje delantero del cabezal

$$P1_C := \frac{Peso_del_Cabezal}{2} = 5400 \text{ kg}$$

Para los ejes de atrás del cabezal

$$P2_C := \frac{Peso_del_Cabezal}{2} = 5400 \text{ kg}$$

C.1.2) Distribución del peso propio del Lowboy entre sus ejes

Para los ejes del Lowboy.

$$P3_L := \frac{Peso_del_Lowboy}{3} = 3333.333 \text{ kg}$$

$$P4_L := \frac{Peso_del_Lowboy}{3} = 3333.333 \text{ kg}$$

$$P5_L := \frac{Peso_del_Lowboy}{3} = 3333.333 \text{ kg}$$

C.1.3) Distribución del peso de la carga "P" entre los ejes de atrás del Lowboy y cabezal.

Para los ejes del Lowboy.

$$P3_P := \frac{P}{3} = 29666.667 \text{ kg} \quad P4_P := \frac{P}{3} = 29666.667 \text{ kg} \quad P5_P := \frac{P}{3} = 29666.667 \text{ kg}$$

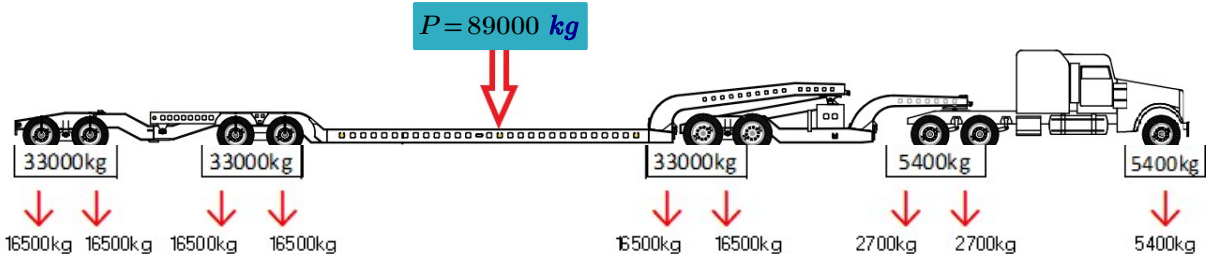
Distribución del peso del cabezal, Lowboy y la carga "P" para los ejes de atrás del cabezal.

$$Ejes_del_Cabezal := P2_C = 5400 \text{ kg}$$

Distribución del peso del Lowboy y la carga "P" para los ejes del Lowboy.

$$Ejes_del_Lowboy := P3_L + P3_P = 33000 \text{ kg}$$

C.1.3) Diagrama de distribución de cargas por eje para el sistema (Cargas Especiales Mincho).



C.1.4) Carga por eje, para la configuración y las dimensiones del sistema para el camión 2

$P1_C = 5400 \text{ kg}$ = Peso del eje delantero del cabezal sobre tramo del puente

$P2 = 2700 \text{ kg}$ = Peso de los ejes de atrás de la cabezal sobre tramo del puente

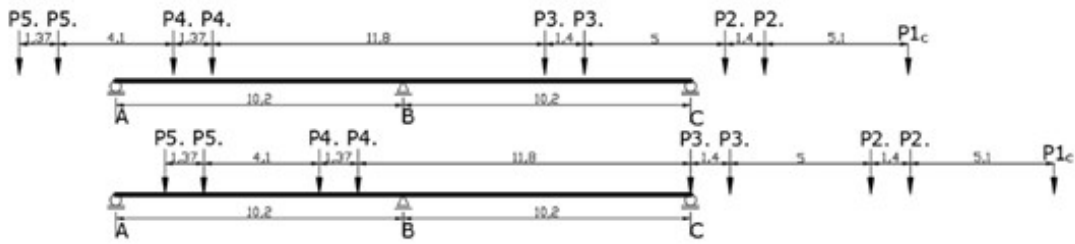
$P3 = 16500 \text{ kg}$ = Peso por eje del Lowboy sobre tramo del puente

$P4 = 16500 \text{ kg}$ = Peso por eje del Lowboy sobre tramo del puente

$P5 = 16500 \text{ kg}$ = Peso por eje del Lowboy sobre tramo del puente

Apéndice 3

C.2) Análisis de las dimensiones del camión de la empresa carga especiales Mincho respecto a la longitud de los tramos del puente.



Caso 1. Análisis para ejes P3. y P2. del sistema con respecto a la longitud de los tramos del puente.

C.2.1) Posición del Lowboy, para generar el momento máximo por flexión al centro del claro

Donde:

$P3. = 16500 \text{ kg}$ = Peso por eje para el Lowboy.

$s := 1.4 \text{ m}$ = Separación entre ejes del Lowboy.

$R_t := P. + P.$ = Resultante del tren de carga para el Lowboy.

Aplicando el teorema de Barré, se calculó la posición del tren de carga que causa el mayor efecto a momento en la superestructura

$x1 = 4.75 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás P3. para el Lowboy

$x2 = 6.15 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás P3. para el Lowboy

Los valores $y1, y2, y3$, corresponden a las ordenadas de la línea de influencia para momento, tomando con referencia la carga que genera el mayor efecto, para la posición del tren de carga

$y1 = 2.538$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P3. para el Lowboy

$y2 = 1.886$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P3. para el Lowboy



Se calculó el momento máximo para la superestructura, utilizando la líneas de influencia.

$$M_{caso1} := y1 \cdot P3. + y2 \cdot P3. = 72996.324 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

C.2.2) Posición del Lowboy para obtener la fuerza cortante máxima

Se determinó utilizando líneas de influencia la posición del camión para generar el mayor efecto cortante en superestructura.

$x1 = 0 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás P3. para el Lowboy

$x2 = 1.4 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás P3. para el Lowboy

$x3 = 6.4 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás P2. para el camión

$x4 = 7.8 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás P2. para el camión

Los valores $y1, y2, y3$, corresponden a las ordenadas de la línea de influencia para cortante, para la posición del tren de carga que genera el mayor efecto.

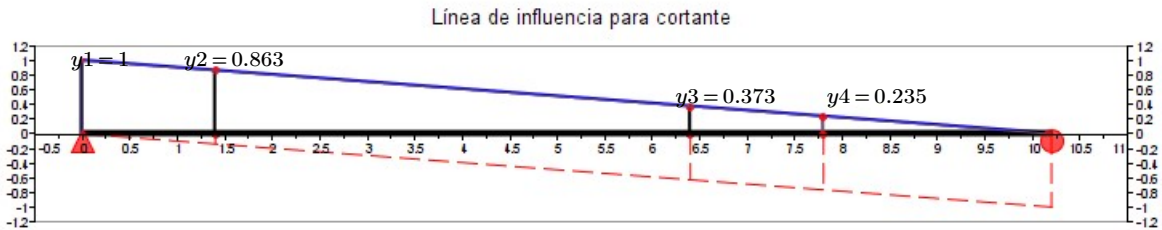
$y1 = 1$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P3. para el Lowboy

$y2 = 0.863$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P3. para el Lowboy

$y3 = 0.373$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P3. para el Lowboy

$y4 = 0.235$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P3. para el Lowboy

Apéndice 3



Caso1. La fuerza cortante máxima para los ejes del *Lowboy* del camión 2

$$V_{Ejes3_2} := y1 \cdot P3. + y2 \cdot P3. + y3 \cdot P2. + y4 \cdot P2. = 32376.471 \text{ kg}$$

C.3) Caso 2. Análisis para ejes P4 y P5 del sistema para camión de la empresa *Carga Especiales Mincho* respecto a la longitud de los tramos del puente.

C.3.1) Posición del *Lowboy*, para generar el momento máximo por flexión al centro del claro

$P4. = 16500 \text{ kg}$ = Peso por eje para los ejes de atrás del *Lowboy*.

$P5. = 16500 \text{ kg}$ = Peso por eje para los ejes de atrás del *Lowboy*.

$s := 1.37 \text{ m}$ = Separación entre los ejes P4 de atrás del *Lowboy*.

$s1 := 4.11 \text{ m}$ = Separación entres ejes 4 y 5 del *Lowboy*.

$R_c := P4. + P4. + P5. + P5.$ = Resultante del tren de carga para el camión tándem de diseño.

Aplicando el teorema de barré, se cálculo la posición del tren de carga que causa el mayor efecto a momento en la superestructura

$x1 = 2.703 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P5.$ para el *Lowboy*

$x2 = 4.073 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P5.$ para el *Lowboy*

$x3 = 8.183 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P4.$ para el camión

$x4 = 9.553 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P4.$ para el camión

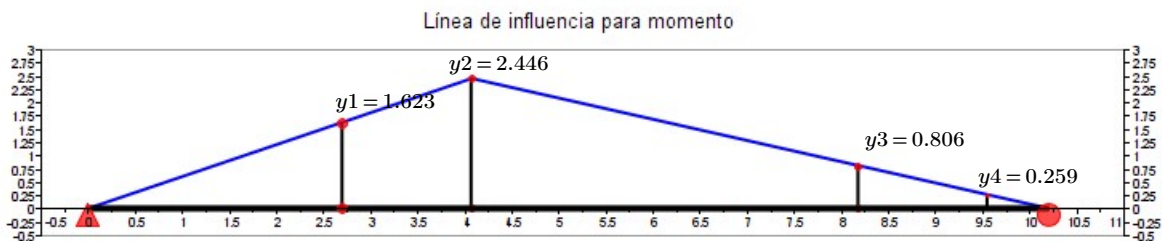
Los valores $y1, y2, y3$, corresponden a las ordenadas de la línea de influencia para momento, tomando como referencia la carga más pesada, para la posición del tren de carga

$y1 = 1.623$ = Ordenada para la posición del eje de atrás $P5.$ para el *Lowboy*

$y2 = 2.446$ = Ordenada para la posición del eje de atrás $P5.$ para el *Lowboy*

$y3 = 0.806$ = Ordenada para la posición del eje de atrás $P4.$ para el *Lowboy*

$y4 = 0.259$ = Ordenada para la posición del eje de atrás $P4.$ para el *Lowboy*



Se calculó el momento máximo para la posición de los ejes de atrás del *Lowboy*, que generan el momento máximo en superestructura.

$$M_{caso2} := (y1 \cdot P5. + y2 \cdot P5. + y3 \cdot P4. + y4 \cdot P4.) = 84711.364 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

C.3.2) Posición del *Lowboy* para obtener la fuerza cortante máxima

Se determinó utilizando líneas de influencia la posición del camión para generar el mayor efecto cortante en superestructura.

$x1 = 0 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P5.$ para el *Lowboy*

$x2 = 1.37 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P5.$ para el *Lowboy*

$x3 = 5.48 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P4.$ para el camión

$x4 = 6.85 \text{ m}$ = Posición del eje de atrás $P4.$ para el camión

Apéndice 3

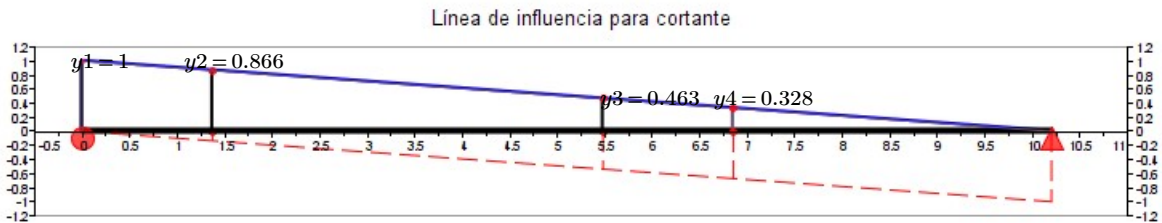
Los valores y_1, y_2, y_3 , corresponden a las ordenadas de la línea de influencia para cortante, para la posición del tren de carga que genera el mayor efecto.

$y_1 = 1$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P_5 . para el *Lowboy*

$y_2 = 0.866$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P_5 . para el *Lowboy*

$y_3 = 0.463$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P_4 . para el *Lowboy*

$y_4 = 0.328$ = Ordenada para la posición del eje de atrás P_4 . para el *Lowboy*



Caso 1. La fuerza cortante máxima para los ejes del *Lowboy* del camión 2

$$V_{Ejes5_4} := y_1 \cdot P_5 + y_2 \cdot P_5 + y_3 \cdot P_4 + y_4 \cdot P_4 = 43838.235 \text{ kg}$$

Momento máximo que rige por flexión al centro del claro para cualquiera de los tramos

$$M_{LL_2} := \max(M_{caso1}, M_{caso2}) = 84711.364 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Fuerza cortante máxima que rige para cualquiera de los tramos

$$V_{LL_2} := \max(V_{Ejes3_2}, V_{Ejes5_4}) = 43838.235 \text{ kg}$$

En resumen, la carga de los ejes P_5 y P_4 . es la que rige para momento y cortante en cualquiera de los tramos

C.4) Combinaciones de carga para resistencia 2.

$$RU_1 = (1.25 \cdot DC + 1.5 \cdot DW + 1.3 \cdot EV + 1.35 + 1.1 \cdot LL)$$

Anexos

Anexo 1. Información de Inspecciones de la Alcantarilla (Paso Superior N°1808-P.SS).

Fuente: Obtenido del ICE (2021).

Anexo 2. Información de las Inspecciones Puente Paso Superior N° 1357-P.S.S.R.N.34.

Fuente: Obtenido del ICE (2021)



PASO SUPERIOR N° 1808 - P.S.S. CAMINO VECINAL

MATRIZ DE INSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS CON CARGA

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD - INGENIERÍA & CONSTRUCCIÓN

Nombre del Paso	P.S.S Camino Vecinal	Provincia	Puntarenas	Tipo de Ruta	Ruta Nacional	Latitud Norte	9° 57' 49,52"	Latitud	9,913755	N° de Estructura	1808
Tipo de Estructura	Paso Superior	Cantón	Esparza	Clasificación de Ruta	Primario	Latitud Oeste	84° 17' 32,78"	Longitud	-84,675766	Fecha de Diseño	No indica
Longitud Total	4,90 m	Distrito	San Juan Grande	Ruta N°	27	Encargado	Zona 3-1 Puntarenas	Kilómetro	72,1980	Fecha de Construcción	No indica

ELEMENTOS BÁSICOS				VISTA PANORÁMICA				EVALUACIÓN ESTADO DE LA ESTRUCTURA			
N° de Superestructuras	1	Dirección de la vía hacia	Cáldera					Grado de Daño	Descripción		
N° de Subestructuras	2	Cruza sobre	Camino Vecinal					1	Ningún daño visible.		
N° de Tramos	1	Especificación para Diseño	No se tiene información					2	Daño visible Bajo.		
Longitud de desvío	0,76 km	Restricción por Altura	0,00 m					3	Daño visible Intermedio.		
Pendiente Longitudinal	0,00 %	Restricción por Ancho	0,00 m					4	Daño visible Avanzado.		
Carga de Diseño	Desconocida	Restricción por Carga	0,00 Ton	5	Daño visible Inaceptable.						
Servicios Públicos				Características de Pintura				N/A			
Fecha de Última Pintura				Empresa Encargada				No Aplica			

LOSA DE RODAMIENTO											
Material de la Losa	N/A	Espesor	N/A	Ancho total	23,90 m	Calzada	23,30 m	Altura Libre Vertical Inferior	4,82 m	Ancho de Vía de Acceso	17,50 m
DIMENSIONES DEL CAMINO											
Acero de Refuerzo Expuesto											
Ondulación											
Surcos											
Baches											
Sobrecapas											
Nidos de Piedra											
Eflorescencia											
Agregamiento en una dirección											

SUPERESTRUCTURA N° 1											
VIGAS											
N° de Tramos	Atorción en Planta	Material	Superestructura	Tipo de Viga	Longitud Total	Tramo Máximo	N° de Elementos Principales	Espaciamiento entre Elementos Principales		Altura	
1	Recto	N/A	Concreto Reforzado	Marco Rígido	Losa	4,90 m	1	-		0,30 m	
Acero de Refuerzo Expuesto											
Oxidación											
Falla en Soldadura o Placa											
Nidos de Piedra											
Agregamiento en una dirección											
Corrosión											

JUNTAS DE EXPANSIÓN											
Ubicación Inicial											
Acero de Refuerzo Expuesto											
Filtración de Aguas											
Deformación											
Falla en Soldadura o Placa											

SUBESTRUCTURA N° 1											
BASTIÓN											
Nombre	B1	Material	Concreto	Tipo	Otros	Altura	4,80 m	Ancho	0,35 m	Largo	32,00 m
Nidos de Piedra											
Acero de Refuerzo Expuesto											
Inclinación											
Agregamiento en una dirección											
FUNDACIONES											
Tipo											
Agregamiento en una dirección											
Acero de Refuerzo Expuesto											
Nidos de Piedra											
Eflorescencia											
APOYOS											
Inicial											
Corrosión											
Oxidación											
Eflorescencia											

SUBESTRUCTURA N° 2											
BASTIÓN											
Nombre	B2	Material	Concreto	Tipo	Otros	Altura	4,80 m	Ancho	0,35 m	Largo	32,00 m
Nidos de Piedra											
Acero de Refuerzo Expuesto											
Inclinación											
Agregamiento en una dirección											
FUNDACIONES											
Tipo											
Agregamiento en una dirección											
Acero de Refuerzo Expuesto											
Nidos de Piedra											
Eflorescencia											
APOYOS											
Inicial											
Corrosión											
Oxidación											
Eflorescencia											

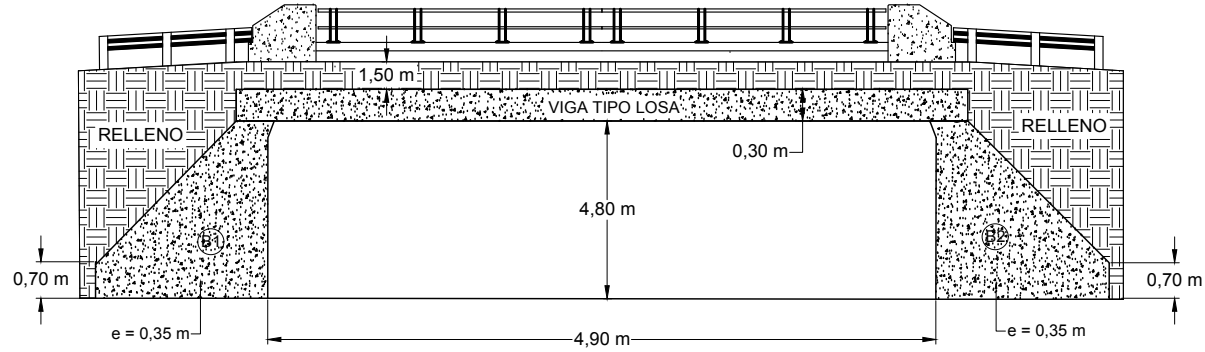
OBSERVACIONES											
1. Existe un relleno sobre el paso superior de aproximadamente 1,40m de espesor.											
2. No se reportan ancho de la losa, por tratarse de una estructura tipo Viga Losa.											
3. No se reporta información de fundaciones debido a que no es posible observarlas en campo ni se cuenta con planos de diseño para verificar la información, se reporta ancho y largo observado expuesto en cada bastión.											
4. No se reporta información de losa por tratarse de una estructura tipo viga losa, esta corresponde a la viga principal en concreto.											
5. La distancia medida en campo de bastión a bastión es de 4,86m.											
ANTECEDENTES DE INSPECCIÓN						Fecha	Inspector	Tipo de Inspección			
						2017	Tommy P.	Inspección de Daños			
RESPONSABLE 1	FIRMA	RESPONSABLE 2	FIRMA	TIPO DE INSPECCIÓN	FECHA DE INSPECCIÓN	LÁMINA					
Miguel Peña Salas		Kevin Salazar Guzmán		Inspección Rutinaria	Diciembre, 2020	N° 01					
											N° 04

N° 1	VISTA LATERAL	N° 3 VISTA A LO LARGO LÍNEA DE CENTRO
		
N° 4	SUBESTRUCTURA B1	N° 5 SUBESTRUCTURA B2

		
--	---	--

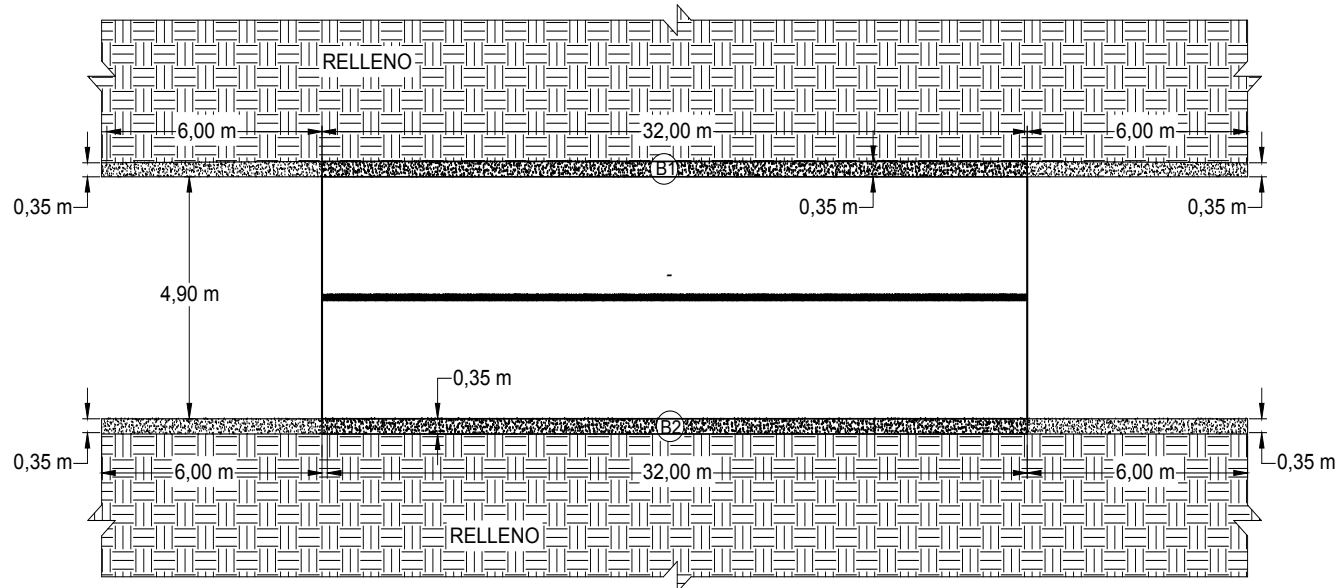
<i>RESPONSABLE</i>	<i>FECHA</i>	<i>LÁMINA</i>
Kevin Salazar Guzmán	Diciembre, 2020	N° 02 / N° 04

N° 1 VISTA DE PERFIL



N° 2 VISTA EN PLANTA

Nota: Las dimensiones presentadas fueron tomadas en inspección en campo, utilizando un medidor de distancia láser con una precisión de $\pm 0,1$ cm.



RESPONSABLE

Kevin Salazar Guzmán

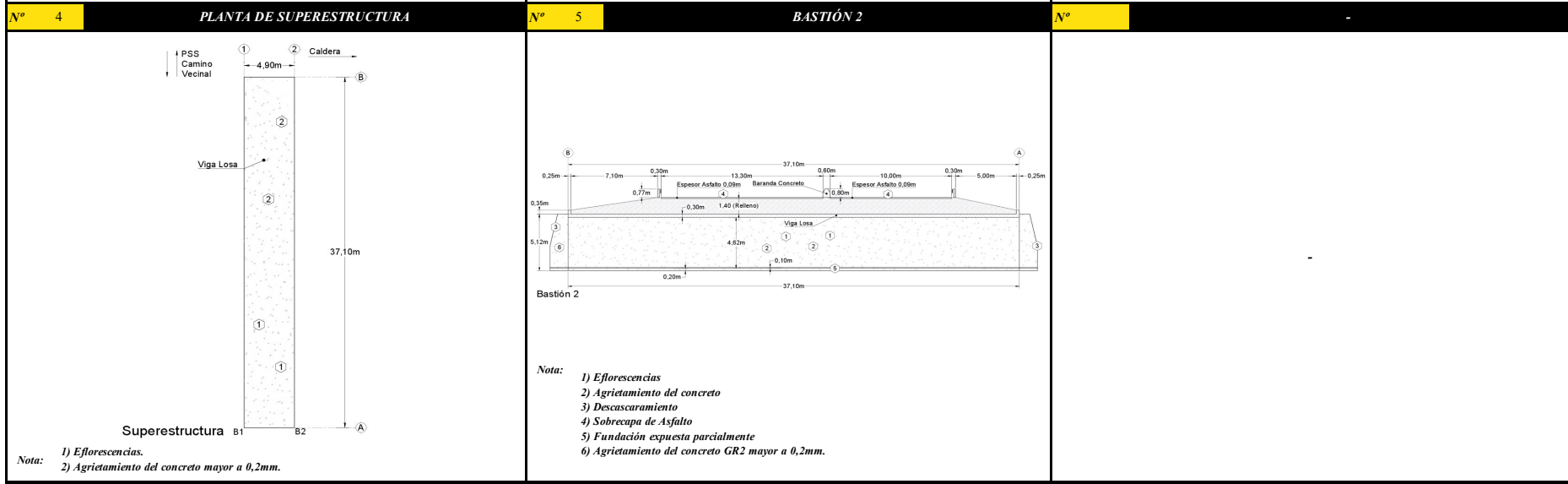
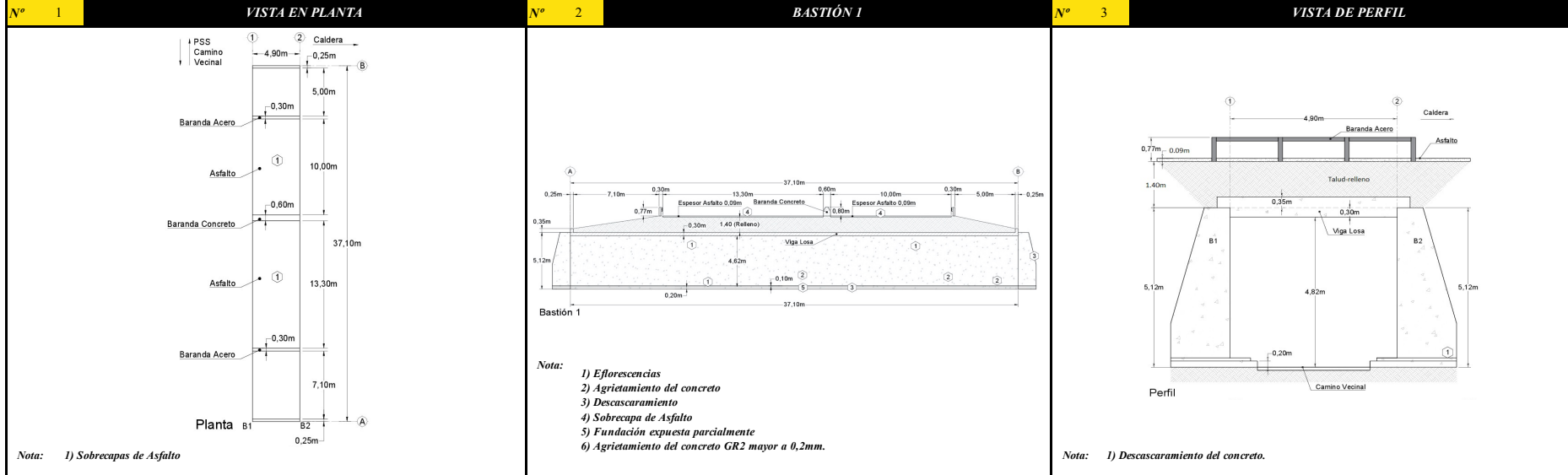
FECHA

Diciembre, 2020

LÁMINA

N° 03

N° 04



RESPONSABLE	FUENTE	FECHA	LÁMINA
Tommy P.	SAEP, MOPT	2017	N° 04 N° 04

N° 1	N° 2	N° 3
<p><i>VISTA LATERAL</i></p> 	<p><i>VISTA LATERAL</i></p> 	<p><i>LOSA-PILA</i></p> 
N° 4	N° 5	N° 6
<p><i>VISTA A LO LARGO LÍNEA DE CENTRO</i></p> 	<p><i>FILTRACIÓN Y EFLORESCENCIA</i></p> 	<p><i>SUPERESTRUCTURA</i></p> 

RESPONSABLE

Kevin Salazar Guzmán







FECHA

Diciembre, 2020

LÁMINA

N° 02

N° 05

<p>N° 7</p>	<p>N° 8</p>	<p>N° 9</p>
<p>AGRIETAMIENTO</p>	<p>EFLORESCENCIA</p>	<p>AGRIETAMIENTO</p>
		
<p>N° 10</p>	<p>N° 11</p>	<p>N° 12</p>
<p>AGRIETAMIENTO</p>	<p>AGRIETAMIENTO</p>	<p>PILA</p>
		

RESPONSABLE

FECHA

LÁMINA

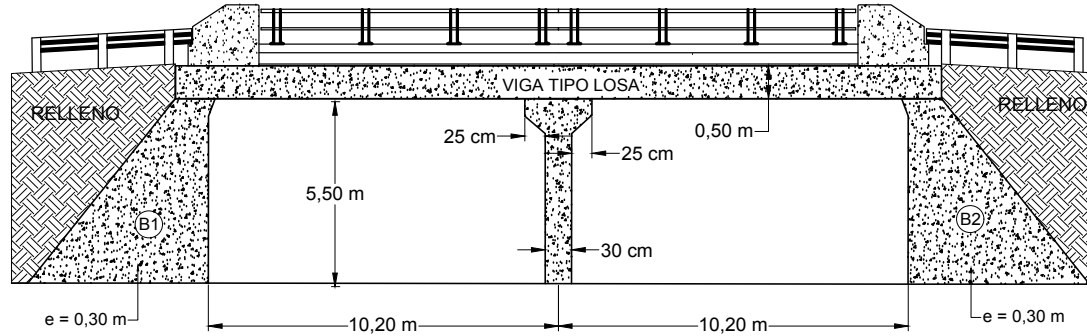
Kevin Salazar Guzmán

Diciembre, 2020

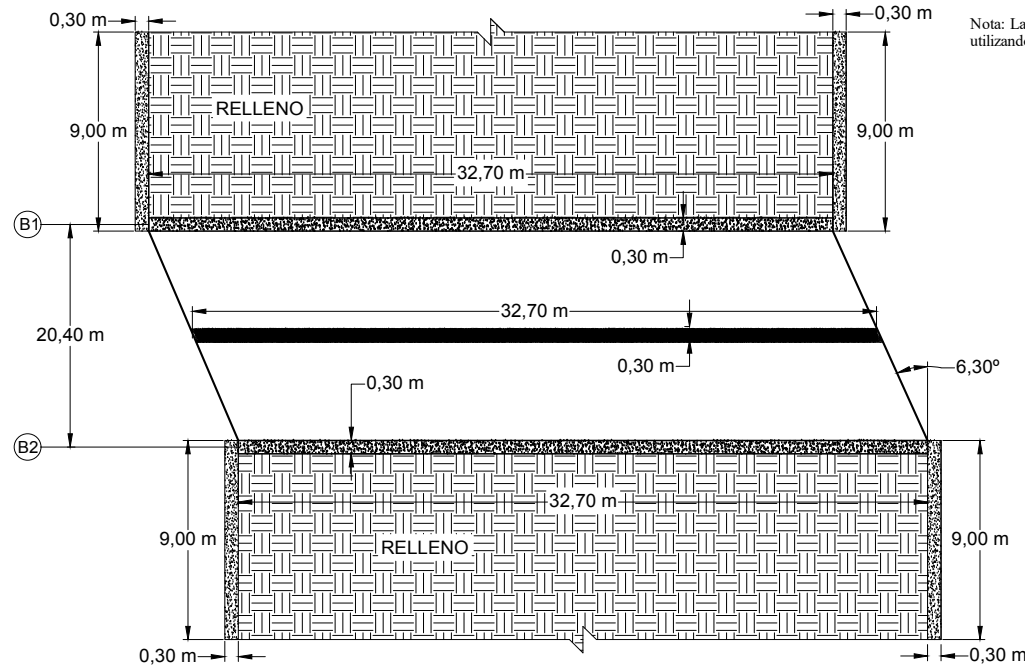
N° 03

N° 05

N° 1 VISTA DE PERFIL



N° 2 VISTA EN PLANTA



Nota: Las dimensiones presentadas fueron tomadas en inspección en campo, utilizando un medidor de distancia láser con una precisión de $\pm 0,1$ cm.

RESPONSABLE

FECHA

LÁMINA

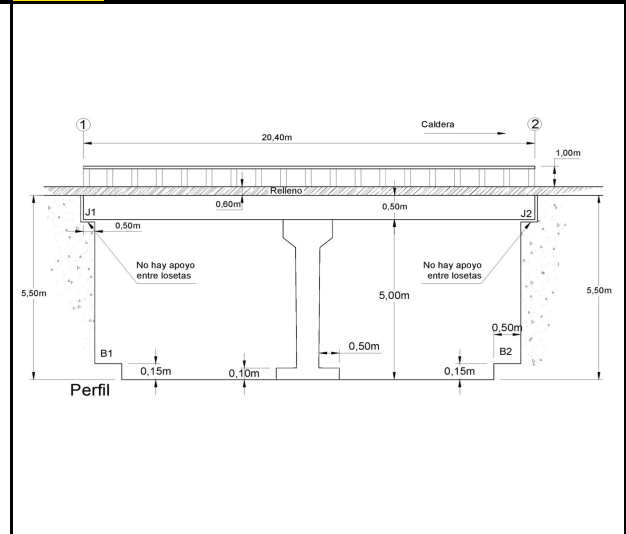
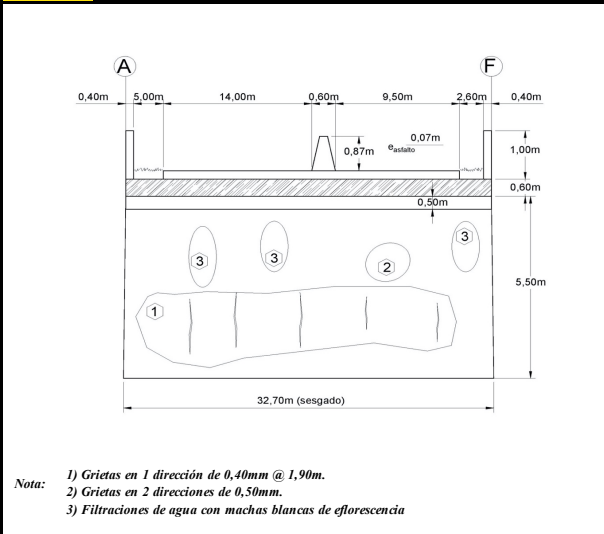
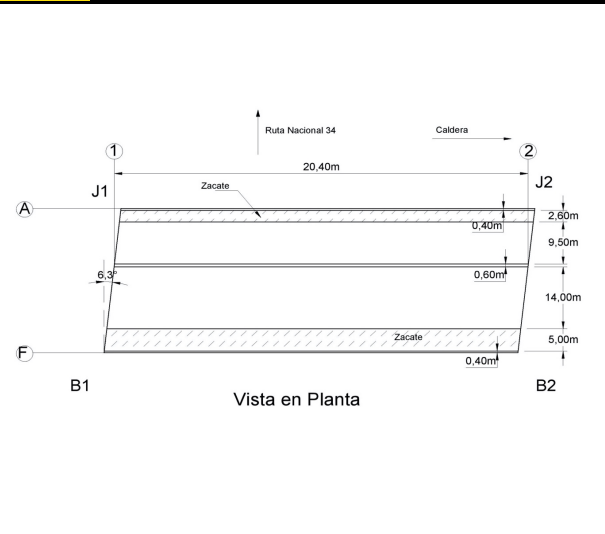
Kevin Salazar Guzmán

Diciembre, 2020

N° 04

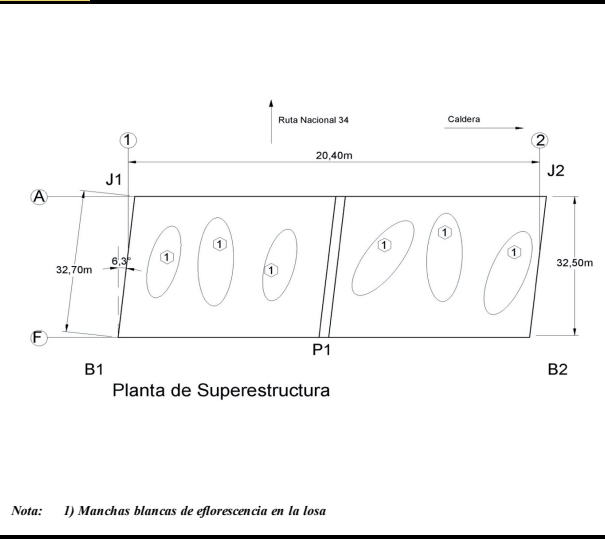
N° 05

N° 1 VISTA EN PLANTA N° 2 BASTIÓN 1 N° 3 VISTA DE PERFIL

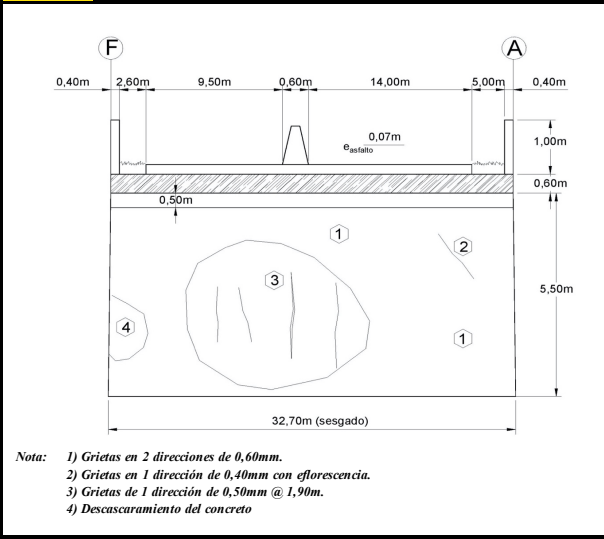


Nota: 1) Grietas en 1 dirección de 0,40mm @ 1,90m.
2) Grietas en 2 direcciones de 0,50mm.
3) Filtraciones de agua con machas blancas de eflorescencia

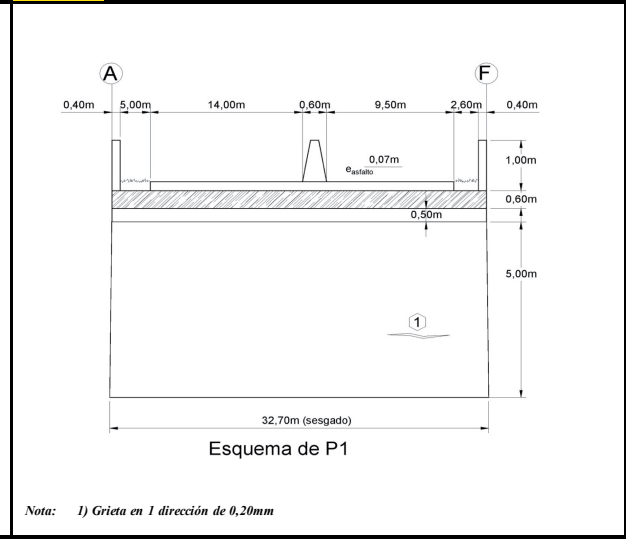
N° 4 PLANTA DE SUPERESTRUCTURA



N° 5 BASTIÓN 2



N° PILA



Nota: 1) Manchas blancas de eflorescencia en la losa

Nota: 1) Grietas en 2 direcciones de 0,60mm.
2) Grietas en 1 dirección de 0,40mm con eflorescencia.
3) Grietas de 1 dirección de 0,50mm @ 1,90m.
4) Descascaramiento del concreto

Nota: 1) Grieta en 1 dirección de 0,20mm

RESPONSABLE FUENTE FECHA LÁMINA

Jorge Meléndez

SAEP, MOPT

2017

N° 05 / N° 05

Anexo 3. Pesos unitarios de materiales (de acuerdo con Tabla 3.5.1-1, AASHTO)

Tabla 3.5.1-1 – Densidades

Material		Densidad (kg/m ³)
Aleaciones de aluminio		2800
Superficies de rodamiento bituminosas		2250
Hierro fundido		7200
Escoria		960
Arena, limo o arcilla compactados		1925
Hormigón	Agregados de baja densidad	1775
	Agregados de baja densidad y arena	1925
	Densidad normal con $f'_c \leq 35$ MPa	2320
	Densidad normal con $35 < f'_c \leq 105$ MPa	$2240 + 2,29 f'_c$
Arena, limo o grava sueltos		1600
Arcilla blanda		1600
Grava, macadán o balasto compactado a rodillo		2250
Acero		7850
Sillería		2725
Madera	Dura	960
	Blanda	800
Agua	Dulce	1000
	Salada	1025
Elemento		Masa por unidad de longitud (Kg/mm)
Rieles para tránsito, durmientes y fijadores por vía		0,30

Fuente: Obtenido de (AASHTO LRFD 2004).

Anexo 4. Combinaciones y factores de carga (tabla 3.4.1-1, AASHTO).

Table 3.4.1-1—Load Combinations and Load Factors

Load Combination Limit State	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	Use One of These at a Time				
										EQ	BL	IC	CT	CV
Strength I (unless noted)	γ_p	1.75	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—	—
Strength II	γ_p	1.35	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—	—
Strength III	γ_p	—	1.00	1.00	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—	—
Strength IV	γ_p	—	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	—	—	—	—	—	—	—
Strength V	γ_p	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—	—
Extreme Event I	1.00	γ_{EQ}	1.00	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—	—
Extreme Event II	1.00	0.50	1.00	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00	1.00	1.00	1.00
Service I	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—	—
Service II	1.00	1.30	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	—	—	—	—	—	—	—
Service III	1.00	γ_{LL}	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—	—
Service IV	1.00	—	1.00	1.00	—	1.00	1.00/1.20	—	1.00	—	—	—	—	—
Fatigue I— LL, IM & CE only	—	1.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fatigue II— LL, IM & CE only	—	0.80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Note: For Service I, the load factor for *EV* equals 1.2 for Stiffness Method Soil Failure as shown in Table 3.4.1-2.

Fuente: Obtenido de (AASHTO LRFD 2020).

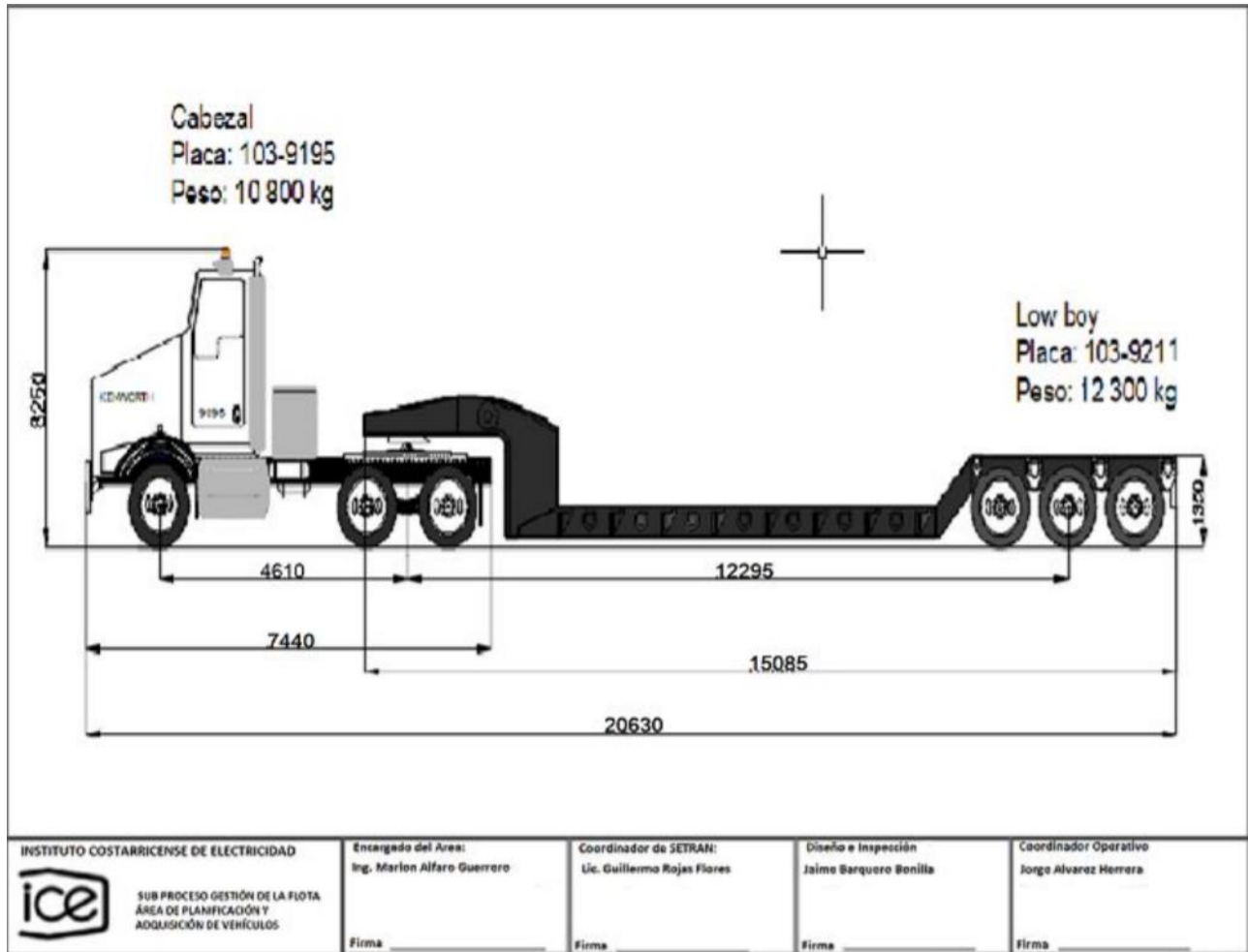
Anexo 5. Factores de carga para cargas permanentes γ_L , (tabla 3.4.1-2, AASHTO LRFD).

Table 3.4.1-2—Load Factors for Permanent Loads, γ_p

Type of Load, Foundation Type, and Method Used to Calculate Downdrag		Load Factor	
		Maximum	Minimum
<i>DC</i> : Component and Attachments		1.25	0.90
<i>DC</i> : Strength IV only		1.50	0.90
<i>DD</i> : Downdrag	Piles, α Tomlinson Method	1.40	0.25
	Piles, λ Method	1.05	0.30
	Drilled shafts, O’Neill and Reese (2010) Method	1.25	0.35
<i>DW</i> : Wearing Surfaces and Utilities		1.50	0.65
<i>EH</i> : Horizontal Earth Pressure			
• Active		1.50	0.90
• At-Rest		1.35	0.90
• <i>AEP</i> for anchored walls		1.35	N/A
<i>EL</i> : Locked-in Construction Stresses		1.00	1.00
<i>EV</i> : Vertical Earth Pressure			
• Overall and Compound Stability		1.00	N/A
• Retaining Walls and Abutments		1.35	1.00
• MSE wall internal stability soil reinforcement loads			
○ Stiffness Method			
▪ Reinforcement and connection rupture		1.35	N/A
▪ Soil failure – geosynthetics (Service I)		1.20	N/A
○ Coherent Gravity Method		1.35	N/A
• Rigid Buried Structure		1.30	0.90
• Rigid Frames		1.35	0.90
• Flexible Buried Structures			
○ Metal Box Culverts, Structural Plate Culverts with Deep Corrugations, and Fiberglass Culverts		1.50	0.90
○ Thermoplastic Culverts		1.30	0.90
○ All others		1.95	0.90
• Internal and Compound Stability for Soil Failure in Soil Nail Walls		1.00	N/A
<i>ES</i> : Earth Surcharge		1.50	0.75

Fuente: Obtenido de (AASHTO LRFD 2020).

Anexo 6. Diagrama del camión especial del (ICE), para el transporte de las cargas especiales.



Fuente: Obtenido del ICE (2021)

Anexo 7. Ficha Técnica del camión especial del (ICE).

los siguientes datos correspondientes a los principales cabezales que utilizamos para las cargas especiales :

1	Marca:	Kenworth
2	Modelo:	T800
3	Motor:	ISX600, Cummins.
4	Potencia:	600 hp (447 kw)@2000 rpm.
5	Torque:	2779 Nm@1200 rpm.
6	Transmisión:	Eaton-Fuller RTLO20918B – 18 velocidades.
7	Tracción	6x4 con bloqueos transversal y longitudinal de diferenciales.
8	Sistema de ejes:	Delantero: Reforzado marca Meritor de 20 000 lbs. (9 Ton) Modelo MFS. Trasero: Reforzado marca Meritor de 58 000 lbs. (26.3 Ton)Modelo RT58-1985
9	Sistema de suspensión:	Delantera: Ballestas para servicio pesado de 20 000 lbs. (9 ton) Trasera: Para servicio pesado marca Hendrickson de 65 000 lbs (29.5 Ton)
10	Capacidad de arrastre Teórica:	120 Toneladas
11	Capacidad de vencer pendiente Teórica:	25° o 46.6% de pendiente.
12	Llantas delanteras:	425/65 R22.5 con una capacidad de máxima de carga 5 150 kg.
13	Llantas traseras:	315/80 R22.5 con una capacidad de 3 750 kg dual, 4 125 kg single.
14	Velocidad mínima de desplazamiento en la última marcha	90 km/h.
15	Sistema de chasis.	Doble completo reforzado para servicio pesado.

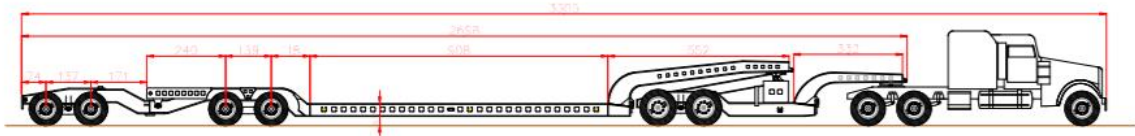
Ahora bien, en cuanto a capacidades de peso de éstos Kenworth en particular, el conjunto combinado de todos los elementos estructurales, llámese quinta rueda, chasis, suspensión y llantas, les podría indicar que, para ellos, si se diera una carga puntual sobre la quinta rueda la máxima posible PERMITIDA sería de 30 Toneladas, ya que, la suspensión Hendrickson trasera es de 29.5 toneladas (mas fs) de capacidad y la combinación de las llantas traseras dan una capacidad máxima de carga de 30 toneladas, las llantas son los elementos finales que dictaminan la capacidad de carga real que se puede soportar sobre un camión.

En el caso de los camiones tándem, que dicho sea de paso es el modelo que más tenemos para la atención de los servicios, estas serían las especificaciones técnicas de los mismos :


	Marca:	Freightliner
2	Modelo:	M2-112
3	Motor:	MERCEDES BENZ MBE 4000
4	Potencia:	276 KW ó 370 hp
5	Torque:	1450 lb/ft ó 1966 Nm
6	Transmisión:	EATON FULLER RTO 14908LL
7	Tracción	6 x 4
8	Sistema de ejes:	MERITOR DELANTERO 13200 LBS-TRASERO 23.000 LBS
9	Sistema de suspensión:	HENDRICKSON RT-463 DE 46.000 LBS
10	Capacidad de arrastre Teórica:	ESTE DATO NO LO TENGO
11	Capacidad de vencer pendiente Teórica:	25º ó 46.6% de pendiente
12	Llantas delanteras:	11R22.5
13	Llantas traseras:	11R22.5
14	Velocidad mínima de desplazamiento en la última marcha	90 Kph
15	Sistema de chasis.	VIGA C DOBLE REFORZADO

Fuente: Obtenido del ICE (2021).

Anexo 8. Diagrama Camión especial de la Empresa Cargas Especiales Mincho.



medidas en centímetros

Cliente:	Mincho	Tipo Equipo:	Cabezal	Hoja:	1 de 1	
Fecha:	Mayo 2021	Nombre Equipo:	Coyunda	Escala:	1:15	
Peso Equipo:	10 ton	Capacidad Carga:	80 ton	Revisión:	1	

Fuente: Obtenido de *Cargas Especiales Mincho* (2021)

Anexo 9. Factores de Carga Permitidos γ_L (Tabla 6A.4.5.4.2a-1)

Bridge Type	Limit State	DC		DW		Design Load ^a		Legal Load ^b	Permit ^b Load	LS		EH ^c		EV		ES ^d	
		Max	Min	Max	Min	Inv.	Opr.			Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
		γ_{DC}	γ_{DC}	γ_{DW}	γ_{DW}	γ_{LL}	γ_{LL}			γ_{LL}	γ_{LL}	γ_{LS}	γ_{LS}	γ_{EH}	γ_{EH}	γ_{EV}	γ_{EV}
Reinforced Concrete Box Culvert	Strength I	1.25	0.90	1.50	0.65	1.75	1.35	2.00	—	Same as LF for Design/ Legal Loads	0.00	1.35	0.90	1.30	0.90	1.50	0.75
	Strength II	1.25	0.90	1.50	0.65	—	—	—	Table 6A.4.5.4.2a-1	Same as LF for Permit Loads	0.00	1.35	0.90	1.30	0.90	1.50	0.75

Notes:

^a In addition to the load factor, use the 1.2 multiple presence factor for single-lane loading

^b Multiple presence factor is not included and is not required for single-lane loading

^c Use a 50 percent reduction to *EH* for rating positive moment in top slabs; need not be combined with the minimum load factor

^d Use a 50 percent reduction to *ES* for rating positive moment in top slabs; need not be combined with the minimum load factor. Water loads on interior walls are neglected.

Fuente: Obtenido de AASTHO MBE-3 (2018)

Anexo 10. Estados límite y factores de carga para la capacidad de carga de la alcantarilla, Tabla 6A.5.12.5-1.

Permit Type	Frequency	Loading Condition	DF ^a	ADTT (one direction)	Load Factor by Permit Weight Ratio ^b		
					GVW / AL < 2.0 (kip/ft)	2.0 < GVW / AL < 3.0 (kip/ft)	GVW / AL > 3.0 (kip/ft)
Routine or Annual	Unlimited Crossings	Mix with traffic (other vehicles may be on the bridge)	Two or more lanes	>5,000	1.4	1.35	1.30
				=1,000	1.35	1.25	1.20
				<100	1.30	1.20	1.15
	Unlimited Crossings (Reinforced Concrete Box Culverts) ^c	Mix with traffic (other vehicles may be on the bridge)	One lane	All ADTTs	1.40		
					All Weights		
Special or Limited Crossing	Single-Trip	Escorted with no other vehicles on the bridge	One lane	N/A	1.10		
	Single-Trip	Mix with traffic (other vehicles may be on the bridge)	One lane	All ADTTs	1.20		
	Multiple Trips (less than 100 crossings)	Mix with traffic (other vehicles may be on the bridge)	One lane	All ADTTs	1.40		

Notes:

^a DF = LRFD-distribution factor. When one-lane distribution factor is used, the built-in multiple presence factor should be divided out.

^b Permit Weight Ratio = GVW/AL; GVW = Gross Vehicle Weight; AL = Front axle to rear axle length; Use only axles on the bridge.

^c Refer to Article 6A.5.12.

Fuente: Obtenido de AASTHO MBE-3 (2018)

Referencias

- Álvarez, L. G., Castillo, R., & Vargas, L. G. (2014). Evaluación de la capacidad de carga viva vehicular de puentes en Costa Rica. *CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA CIVIL, CIC 2014, San José, Costa Rica*, No 1:14 p.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *LRFD bridge design specifications*. (9th Edition). American Association of State Highway and Transportation Officials. <https://subscriptions.techstreet.com/products/858344>
- American Association of State Highway and Transportation Officials & Subcommittee on Bridges and Structures. (2018). *The Manual for bridge evaluation* (3rd edition). http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpMBEE0007/viewerType:toc/root_slug>manual-bridge-evaluation
- Asociación Costarricense de Geotecnia & Comisión Código de Cimentaciones de Costa Rica. (2009). *Código de Cimentaciones de Costa Rica*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Barrero, R. S., & Restrepo, J. E. (2018). *Actualización de la Cartilla "Modelos de Puentes de Placa y Viga y Alcantarillas de Cajón" de 1988 para Superestructuras en Concreto Reforzado con Luces Entre 10 y 20 Metros* [Licenciatura en Ingeniería en Civil]. Universidad Católica de Colombia.
- Cargas especiales Mincho. (2021). *Diagrama camión de transporte de carga especiales*.
- Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2013). *Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes*. <https://www.codigosismico.or.cr/images/lineamientos.pdf>
- Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2016). *Código Sísmico de Costa Rica 2010* (Quinta edición). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Das, B. M. (2016). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2007). *Manual de Inspección de Puentes*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/31625228-76c4-44cf-963e-8d8b31540a79/manual_inspeccion2007.pdf?MOD=AJPERES
- Ramírez, P., & Leon, N. (2010). *APOYO DIDACTICO EN LA ASIGNATURA DE PUENTES*. UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN.
- Rodríguez, A. (2020). *Puentes* (8th Edition). <https://www.scribd.com/document/476450723/PUENTES-8-EDICION-ARTURO-RODRIGUEZ-pdf>

Romero, A. (2021, abril 29). *Consulta de información del diseño puente (Paso superior P.S.S.R.N. 34) para evaluación de la capacidad de carga viva.* [Comunicación personal].

SAEP. (2021). *Sistema de Administración de Estructuras de Puentes.* https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagIdentificarPuente.faces

Salazar, K. (s.f.). *Estudio de viabilidad estructural para el transporte de equipo de generación eléctrica para proyecto modernización de Ventanas – Garita del Instituto Costarricense de Electricidad.*

Seminario, E. (2004). *GUÍA PARA EL DISEÑO DE PUENTES CON VIGAS Y LOSAS* [Licenciatura, Universidad de Piura]. <https://hdl.handle.net/11042/1364>

The American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). *AASHTO MBE-3 The Manual for Bridge Evaluation* (tercera edición). <https://www.astm-org.ezproxy.itcr.ac.cr/cgi-bin/resolver.cgi?3PC+AASHTO+AASHTO+MBE-3+en-US>

The American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS* (9th Edition).

Winiker, T. F. (2019). *Manual para el mantenimiento de puentes en Costa Rica* [Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Construcción]. Instituto Tecnológico de Costa Rica.