

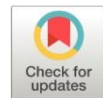


Evaluación estructural del tablero compuesto por vigas metálicas del puente sobre el Río Bulubulu, provincia del Guayas

Structural evaluation of the steel girder deck of the bridge over the Bulubulu River, Guayas province

- ¹ Miguel Ángel Intriago Santana  <https://orcid.org/0009-0009-7706-0304>
Facultad de Postgrado. Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Ecuador.
m-intriago_1311@hotmail.com
- ² Pablo Julio Lindao Tomalá  <https://orcid.org/0009-0002-1144-5518>
Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.
pjlindao@yahoo.com



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 17/05/2024

Revisado: 15/06/2024

Aceptado: 26/07/2024

Publicado: 15/08/2024

DOI: <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i3.3140>

Cítese: Intriago Santana, M. Ángel, & Lindao Tomalá, P. J. (2024). Evaluación estructural del tablero compuesto por vigas metálicas del puente sobre el Río Bulubulu, provincia del Guayas. *ConcienciaDigital*, 7(3), 168-192.
<https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i3.3140>



CONCIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://concienciadigital.org>

La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec

Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons AttributionNonCommercialNoDerivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Palabras claves:

Evaluación
Puente
Vigas
Metálicas
Diafragmas

Resumen

Introducción: Los puentes son estructuras fundamentales para el desarrollo socioeconómico a nivel mundial, son elementos esenciales para la vialidad y el Ecuador tiene puentes importantes en su red vial. Por otra parte, nuestro país al ser un territorio con un peligro sísmico alto requiere para los puentes no solo un análisis de cargas gravitacionales, si no también bajo cargas laterales provenientes de la acción sísmica. En el presente caso de estudio se abordará el comportamiento estructural del tablero del puente BuluBulu, específicamente comprenderá el análisis a flexión y a cortante de las vigas longitudinales de acero estructural, y el análisis a cargas axiales de los diafragmas de apoyos e interiores. **Objetivo:** Determinar el comportamiento estructural de las vigas longitudinales y diafragmas del tablero del puente Bulubulu antes cargas gravitacionales y carga proveniente de la acción sísmica mediante un análisis modal espectral realizado a un modelo matemático de la estructura elaborado en el programa CSI Bridge. **Metodología:** Revisar los planos estructurales del proyecto original, evaluar las cargas actuantes, elaborar un modelo matemático de la estructura en el programa CSI BRIDGE, realizar un análisis modal espectral al modelo matemático de la estructura, obtener las máximas demandas en las vigas longitudinales y en los diafragmas, verificar las relaciones demanda capacidad (D/C) a flexión y a cortante de las vigas longitudinales, además de las relaciones D/C a compresión y tensión axial de los diafragmas. **Resultados:** De las máximas demandas obtenidas del análisis estructural y de la evaluación de la capacidad de los elementos, se obtuvieron los siguientes resultados. La viga metálica longitudinal “VIGA I (1.360x0.020x0.40x0.03) m tiene la capacidad suficiente para las sollicitaciones a las cuales será sometida, trabaja al 79% para flexión negativa, 67% para flexión positiva y 25% para cortante. Los diafragmas cumplen satisfactoriamente los requisitos y filosofía de diseño de mantenerse en el rango elástico ante un sismo, para el diafragma de apoyo predomina la compresión en el diagonal trabajando a un 91% de su capacidad, mientras que para el diafragma interior predomina la tensión en el horizontal trabajando a un 49% de su capacidad. **Conclusión:** Mediante el análisis estructural mediante el modelo matemático elaborado en CSI Bridge, se

determinaron las máximas solicitaciones y más críticas en los elementos de viga longitudinal y diafragmas. Las vigas metálicas longitudinales y diafragmas interiores y de apoyos cumplen satisfactoriamente los requisitos de diseño bajo la norma AASHTO LRFD 2020, además los diafragmas cumplen con la filosofía de diseño de mantener dichos elementos en el rango elástico. Para este estudio, el diseño de viga longitudinal predomina el Estado Limite de Resistencia I, para los diafragmas de apoyo predomina el E.L Evento Extremo y para los diafragmas interiores predomina el E.L de Resistencia I. **Área de estudio general:** Ingeniería Civil y Mecánica. **Área de estudio específica:** Estructuras Metálicas. **Tipo de artículo:** Original.

Keywords:

Evaluation
Bridge
Beams
Steel
Diaphragms

Abstract

Introduction: Bridges are fundamental structures for socioeconomic development worldwide, they are essential elements for roadways and Ecuador has important bridges in its road network. On the other hand, our country, being a territory with a high seismic hazard, requires for bridges not only an analysis of gravity loads, but also under lateral loads coming from seismic action. This case study will address the structural behavior of the Bulubulu bridge deck, specifically the flexural and shear analysis of the longitudinal structural steel beams, and the axial load analysis of the support and interior diaphragms. **Objective:** To determine the structural behavior of the longitudinal beams and diaphragms of the Bulubulu Bridge deck under gravity loads and seismic loads by means of a spectral modal analysis of a mathematical model of the structure developed in the CSI Bridge program. **Methodology:** Review the structural drawings of the original project, evaluate the acting loads, develop a mathematical model of the structure in the CSI BRIDGE program, perform a spectral modal analysis of the mathematical model of the structure, obtain the maximum demands on the longitudinal beams and diaphragms, verify the demand-capacity ratios (D/C) in bending and shear of the longitudinal beams, as well as the D/C ratios in compression and axial tension of the diaphragms. **Results:** From the maximum demands obtained from the structural analysis and the evaluation of the capacity of the elements, the following results were

obtained. The steel beam "VIGA I (1.360x0.020x0.40x0.03) m" has sufficient capacity for the stresses to which it will be subjected, working at 79% for negative bending, 67% for positive bending and 25% for shear. The diaphragms satisfactorily meet the requirements and design philosophy of remaining in the elastic range in the event of an earthquake. For the end diaphragm, compression predominates in the diagonal, working at 91% of its capacity, while for the interior diaphragm, tension predominates in the horizontal, working at 49% of its capacity. **Conclusion:** Through structural analysis using the mathematical model developed at CSI Bridge, the maximum and most critical stresses in the longitudinal beam and diaphragm elements were determined. The longitudinal steel girders and the interior and support diaphragms satisfactorily meet the design requirements according to AASHTO LRFD 2020, and the diaphragms comply with the design philosophy of keeping these elements in the elastic range. For this study, the design of the longitudinal beams is governed by Limit State Strength I, the supporting diaphragms are governed by Extreme Event L.S. and the interior diaphragms are governed by Strength I L.S.

Introducción

Los puentes son estructuras fundamentales para el desarrollo socioeconómico a nivel mundial, son elementos esenciales para la vialidad y no están exceptos de sufrir daños y en muchos casos hasta colapsos a causa de las fuerzas y cargas a las que están sometidos durante su ejecución y vida útil.

Según Guerra et al. (2021), a lo largo de la historia la tecnología con la que se han construido los puentes ha evolucionado desde sus inicios hace más de 3000 años cuando se fabricaban de manera rudimentaria con materiales tales como roca barro madera y fibras que servían para la sujeción de los elementos que lo componen.

Como menciona Lombeida (2023), en la actualidad la construcción de puentes abarca muchas técnicas y se ha vuelto necesario tener en cuenta a todos los factores constructivos involucrados en su proceso, entre los elementos estructurales más relevantes se encuentran los estribos, las pilas, las vigas y el tablero que dependiendo de la longitud,

así como del ancho, el nivel de tránsito, los factores geológicos y climáticos deben ser diseñados con la finalidad de ofrecer un nivel de servicio óptimo y seguro.

Para el diseño del puente BULUBULU se realizó un modelo numérico con el software SAP 2000, considerando modelo tipo viga, con el propósito de capturar de manera más detallada el comportamiento y de manera integral (Choi et al., 2019), se realiza en otro software. Como menciona Mañueco (2018), en la actualidad se hace uso de programas como CSiBridge que es un software totalmente independiente que integra las capacidades de modelado, análisis y dimensionamiento de estructuras de puentes en un único modelo, además que considera superficies de influencia para carga vehicular (Computer & Structures Inc. [CSI], 2024), y puede evaluar el posicionamiento de carriles (National Cooperative Highway Research Program [NCHRP], 2021).

En lo referente al presente estudio se abordará específicamente la evaluación del comportamiento estructural del tablero del puente BULUBULU que está apoyado sobre vigas de acero estructural, con el propósito de obtener un modelo con un comportamiento más cercano a lo real de cómo se comporta el tablero del puente.

Respecto al tablero, este constituye la parte de la super estructura del puente y es la superficie sobre la que circularan los vehículos y la que transmite tanto cargas como sobrecargas a las vigas y al resto de la estructura, el tablero preferentemente es construido en hormigón armado y otras pocas veces en metal para alivianar el peso muerto, al tablero se lo denomina también con el nombre de losa (Rodríguez, 2020).

Metodología

La metodología empleada para el presente caso de estudio será el método cuantitativo, el cual se caracteriza por la medición numérica de resultados, además el tipo de diseño es no experimental descriptivo mismo que está basado en la observación y que no pretende intervenir con el entorno, por otra parte, se utilizará el método deductivo, el cual demuestra, comprende y explica los aspectos particulares de la realidad.

El procedimiento para el caso de estudio será el siguiente:

- Evaluar las cargas que están actuando sobre el puente de acuerdo con la normativa AASHTO LRFD 2020. Como son la carga muerta, carga viva vehicular, carga viva peatonal y de la acción sísmica según Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2015).
- Obtener las máximas demandas en las vigas de acero y en los diafragmas.
- Verificar las demandas versus la capacidad de los elementos metálicos del puente como son las vigas metálicas longitudinales y los diafragmas metálicos de acuerdo con la normativa AASHTO LRFD 2020.
- Verificar deformaciones por cargas vivas vehiculares del puente Bulubulu.

Materiales y resistencias utilizadas

Para el análisis del puente Bulubulu se consideraron los materiales de hormigón y acero estructural, las cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1

Materiales empleados

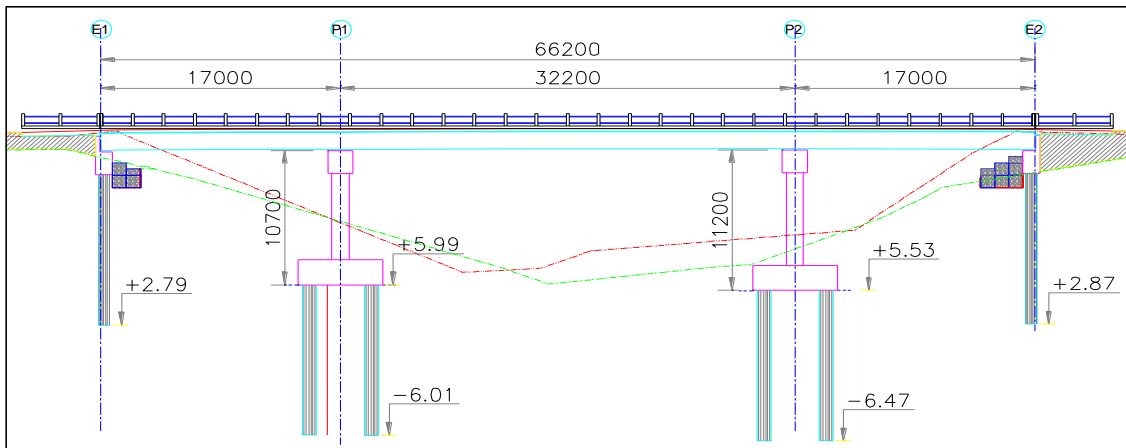
Elemento	Tipo	Peso Específico	Resistencia
Losa ts=20cm	5000 psi	2400 kgf/m ³	f'c = 350 kgf/cm ²
Viga	A709Gr50	7850 kgf/m ³	fy = 3500 kgf/cm ²
Diafragma	A709Gr50	7850 kgf/m ³	fy = 3500 kgf/cm ²

Descripción de la estructura

Está ubicado sobre el Río Bulubulu, Km 26 vía Puerto Inca - Naranjal perteneciente a la provincia de Guayas de Ecuador, es un puente tipo viga sobre 2 pilas de hormigón de 10.70m, 11.20m de altura y sobre 2 estribos en cada extremo, consta de 3 vanos de 17.00m – 32.20m – 17.00m dando una longitud total de puente igual a 66.20m (figura 1).

Figura 1

Perfil longitudinal de puente

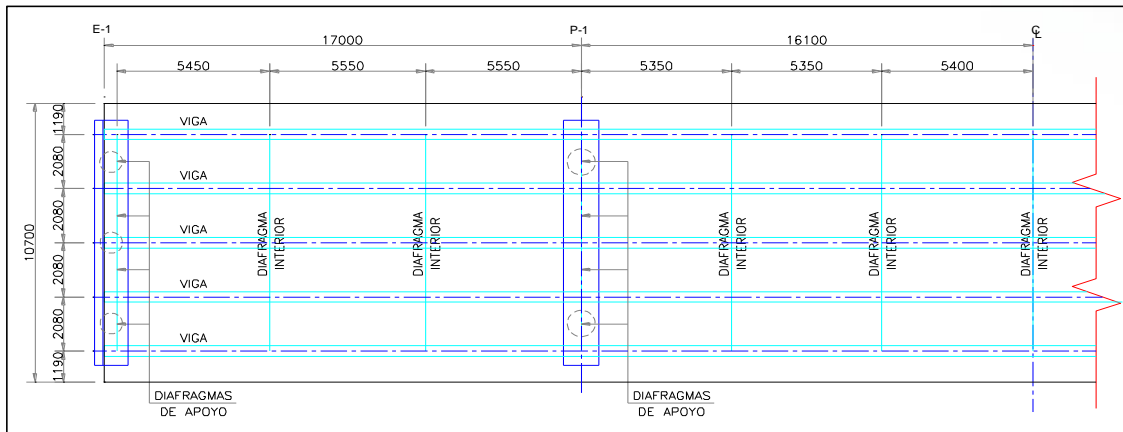


Elementos analizados que conforman la superestructura

El tablero es de sección compuesta, tiene un ancho total de 10.70m, la cual consta de una losa de hormigón de 0.20m de espesor, 5 vigas metálicas tipo I (figura 3). Barrera, acera peatonal en el lado izquierdo y barrera vehicular jersey en el lado derecho. Carpeta asfáltica de 0.075m de espesor, diafragmas de apoyo sobre estribos y pilas, diafragmas intermedios en los vanos distribuidos de acuerdo con la figura 2.

Figura 2

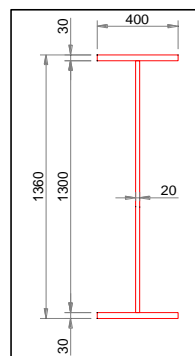
Planta, tablero de puente



En la figura 2 se observa una vista en planta del tablero el cual está conformado de diafragmas interiores, diafragmas de apoyo y vigas metálicas longitudinales.

Figura 3

Viga Longitudinal "VIGA I (1,36x0,02x0,40x0,03) m"

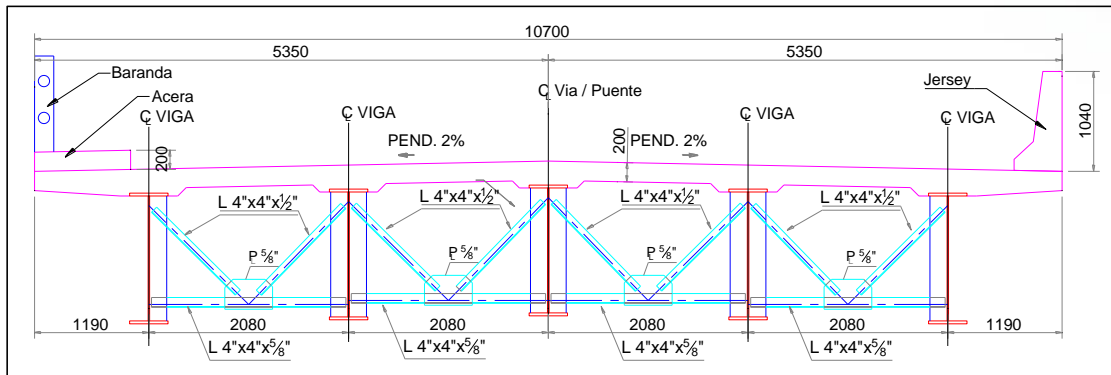


Las vigas metálicas son de perfiles I de alas paralelas con una resistencia de fluencia $F_y = 3500 \text{ kg/cm}^2$, estos elementos forman parte del sistema de la superestructura (figura 3).

Los elementos analizados en la presente investigación son las vigas metálicas longitudinales, los diafragmas de apoyo (figura 4) y diafragmas interiores (figura 5).

Figura 4

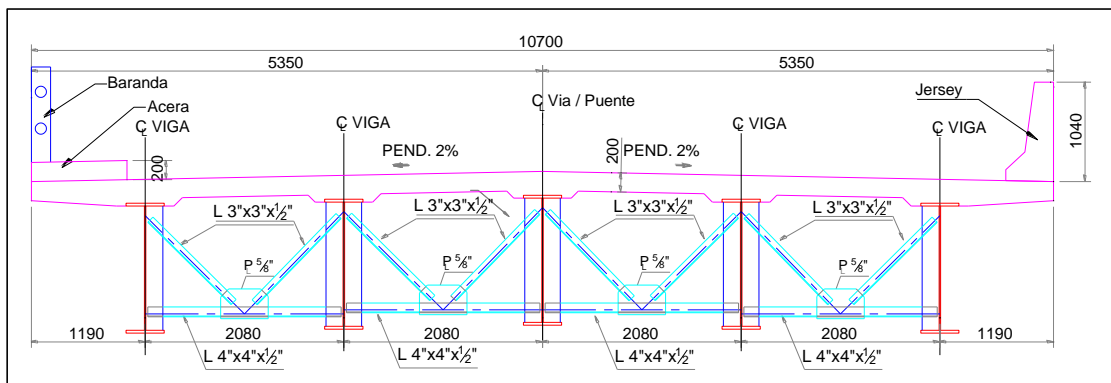
Diafragmas de apoyo



Los diafragmas de apoyo son de perfiles L con una resistencia a fluencia $F_y=3500 \text{ kg/cm}^2$ con secciones de $L4X4X5/8''$ en la horizontal y la $L4X4X1/2''$ en la diagonal.

Figura 5

Diafragmas interiores



Los diafragmas de apoyo son de perfiles L con una resistencia a fluencia $F_y=3500 \text{ kg/cm}^2$ con secciones de $L4X4X1/2''$ en la horizontal y la $L3X3X1/2''$ en la diagonal (figura 5).

Cargas muertas

Las cargas utilizadas en el modelo numérico son las descritas en la tabla 2.

Tabla 2

Cargas muertas

Elemento	Espesor (m)	P. Específico (ton/m ³)	Carga Uniforme (ton/m ²)	Tipo
Losa	0.2	2.4	0.48	DC

Tabla 2

Cargas muertas (continuación)

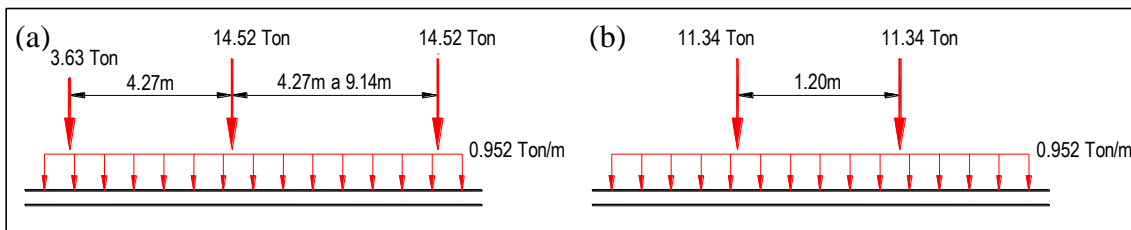
Elemento	Espesor (m)	P. Específico (ton/m ³)	Carga Uniforme (ton/m ²)	Tipo
Aceras	0.2	2.4	0.48	DC
Asfalto	0.075	2.2	0.165	DW
Instalaciones	-	-	0.05	DW
Jersey	A=0.31m ²	2.4	0.74 (ton/m)	DC
Barandas	-	-	0.15 (ton/m)	DC

Cargas vivas vehicular

Se define conforme a *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 2020)*, art. 3.6.1.2 en la cual se designa como HL-93, consiste en una combinación de: Camión de diseño o tándem de diseño, y carga de carril de diseño de 0,952 Ton/m en un ancho de 3,0m. Se considera también factor de presencia múltiple hasta 2 carriles cargados y el incremento por carga dinámica.

Figura 6

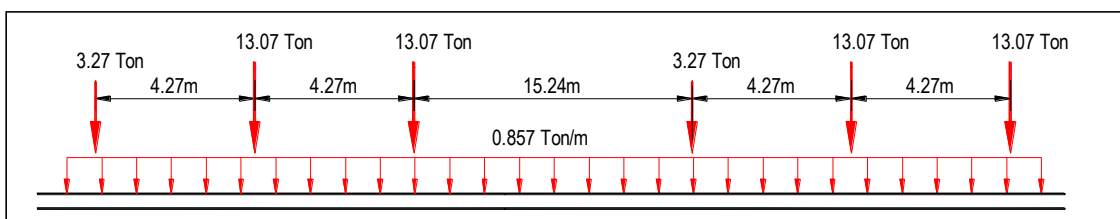
Carga vehicular HL-93: (a) camión de diseño+ carril de diseño y (b) tándem de diseño + carril de diseño



Para momento negativo entre puntos de contraflexión bajo carga uniforme, así como en la reacción de pilares interiores se define según AASHTO (2020), art. 3.6.1.3.

Figura 7

Configuración de vehículos para momento negativo



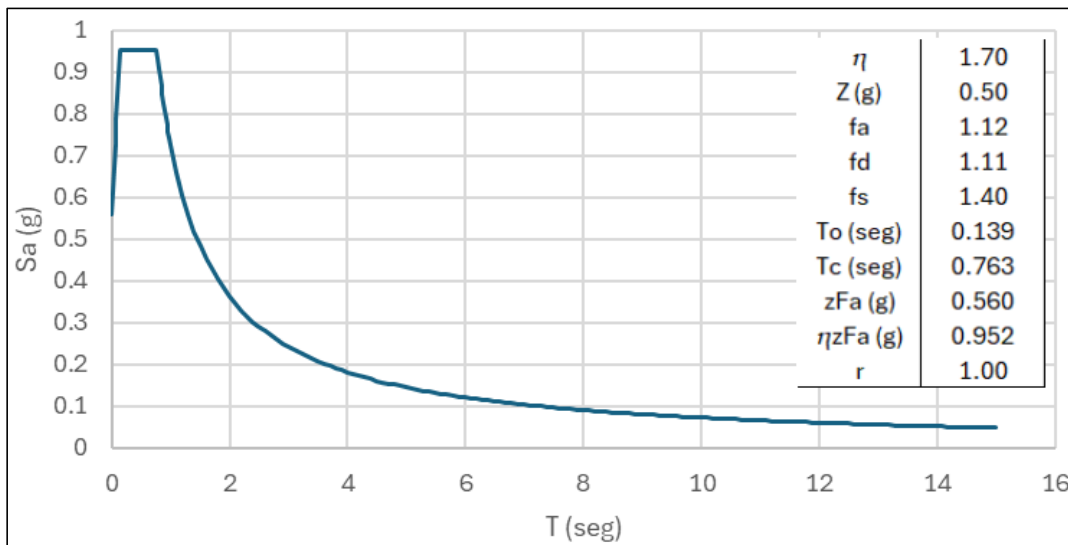
Además, se consideró una carga viva peatonal de 0,366 ton/m² sobre la acera.

Carga sísmica

La carga sísmica fue definida por medio de un espectro de diseño de aceleraciones definido por la norma NEC (2015), para un período de retorno de diseño $T_r=1000$ años, con un factor $z=0,5g$, suelo tipo D. El factor de modificación de respuesta R , se consideró un $R=1$ para el análisis y diseño de vigas longitudinales como de diafragmas intermedios (Federal Highway Administration [FHWA], 2014). Para los diafragmas de apoyos se utilizó un $R=2$ ya que se considera un aporte a la disipación de fuerza sísmica por parte de los apoyos tipo POT (figura 8).

Figura 8

Espectro de diseño para provincia del Guayas

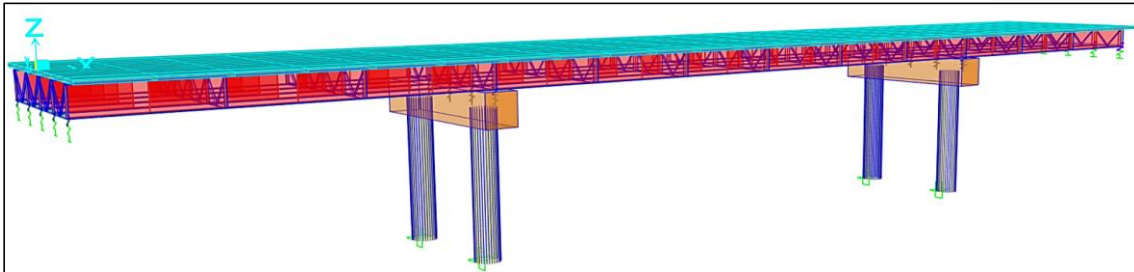


Modelo matemático tridimensional del puente Bulubulu

El modelo matemático realizado en CSI Bridge permitirá obtener el comportamiento más realista de la estructura, en este se realizará el análisis estructural. El modelo matemático es elaborado de acuerdo con la geometría y materiales descritos en los apartados anteriores, se considera empotramientos en los estribos y base de columnas (figura 9).

Figura 9

Modelo matemático del puente Bulubulu elaborado en CSI Bridge



Obtención de las máximas demandas

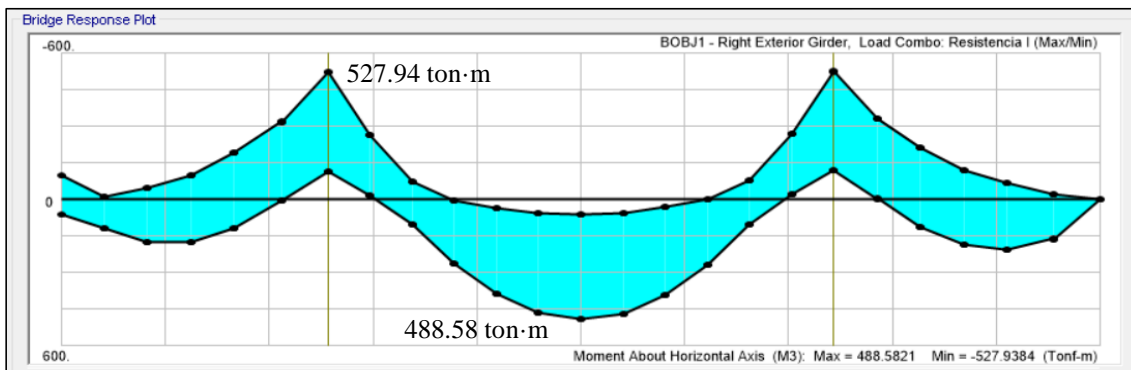
Las máximas demandas fueron analizadas para las combinaciones de diseño de acuerdo con AASHTO (2020), en donde las combinaciones de carga predominantes son:

- Servicio 1: DC + DW + LL + IM + PL (1)
- Resistencia 1: 1,25DC + 1,5DW + 1,75(LL+IM + PL) (2)
- Evento Extremo 1: 1,25DC + 1,5DW + 0,5(LL+IM+PL) + EQ (3)

Las máximas demandas de interés son aquellas que solicitan a la sección de viga compuesta (Girder), por lo tanto, los siguientes diagramas de fuerzas internas pertenecen a la Girder (viga) exterior derecha, siendo esta la viga crítica de análisis.

Figura 10

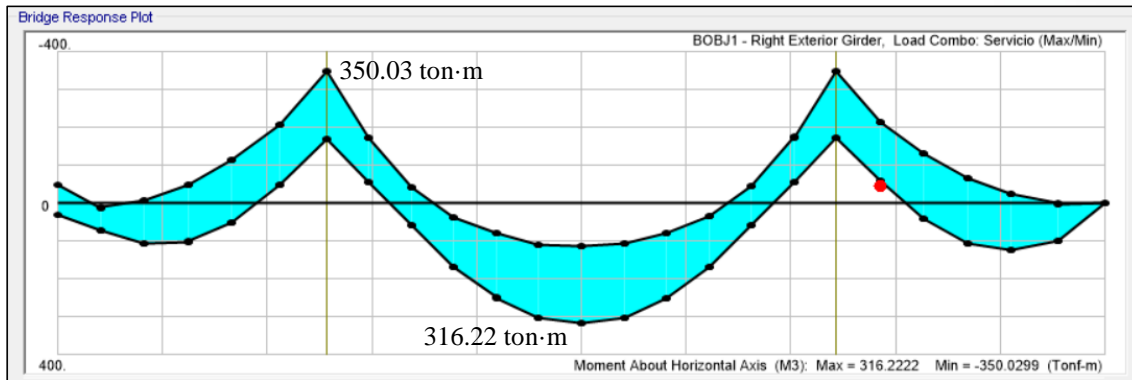
Envolvente resistencia – DMF (Viga Exterior Derecha)



En la figura 10 se observa las máximas demandas obtenidas por momento en la viga tipo I por la envolvente de Resistencia I $M_u(-) = 527,94 \text{ ton}\cdot\text{m}$; $M_u(+)=488,58 \text{ ton}\cdot\text{m}$.

Figura 11

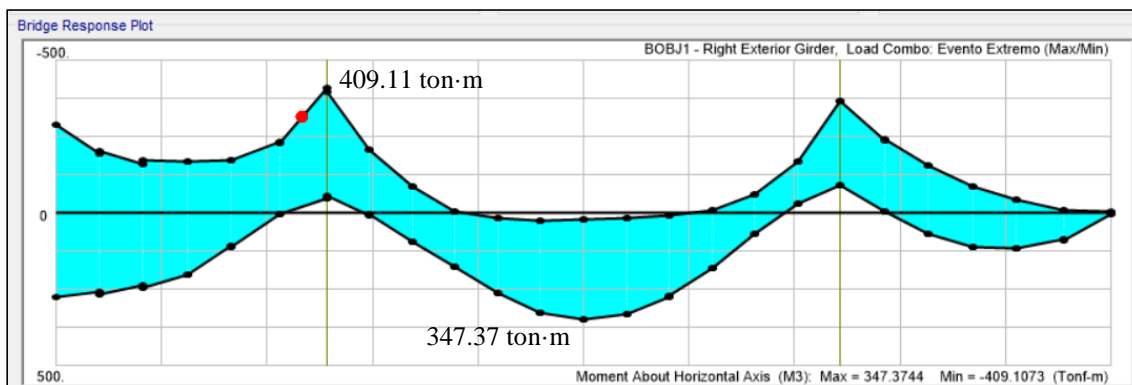
Envolvente Servicio – DMF (Viga Exterior Derecha)



En la figura 11 se observa las máximas demandas obtenidas por momento en la viga tipo I por la envolvente de Servicio $M_u (-) = 350,03 \text{ ton}\cdot\text{m}$; $M_u (+) = 316,22 \text{ ton}\cdot\text{m}$.

Figura 12

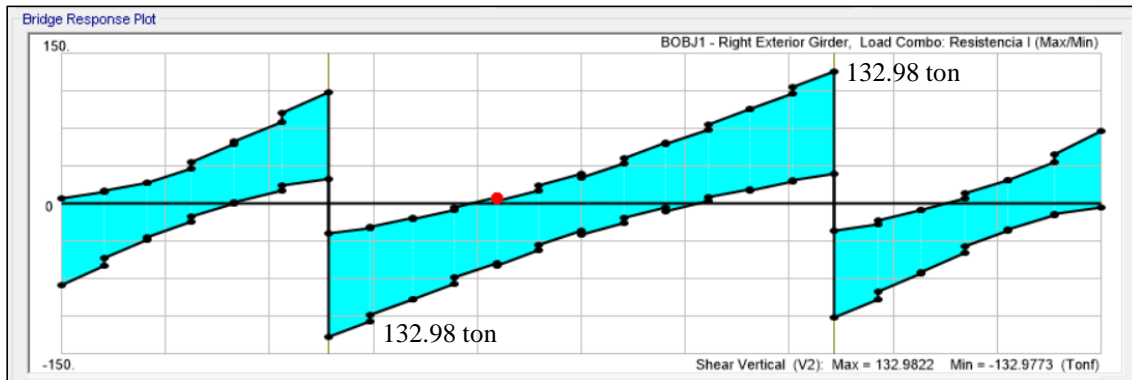
Envolvente evento extremo – DMF (Viga Exterior Derecha)



En la figura 12 se observa las máximas demandas obtenidas por momento en la viga tipo I por la envolvente de Evento extremo $M_u (-) = 409,11 \text{ ton}\cdot\text{m}$; $M_u (+) = 347,37 \text{ ton}\cdot\text{m}$.

Figura 13

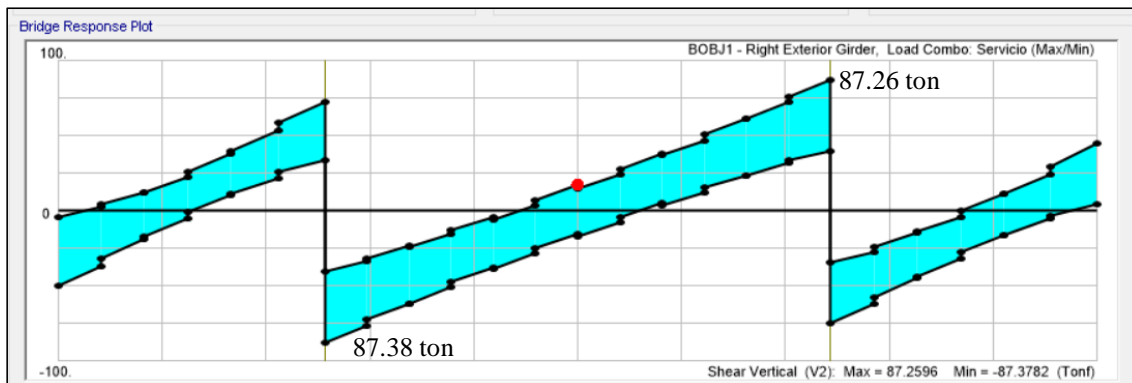
Envolvente resistencia – DFC (Viga Exterior Derecha)



En la figura 13 se observa las máximas demandas obtenidas por fuerza cortante en la viga tipo I por la envolvente de Resistencia I $V_u = 132,98$ ton.

Figura 14

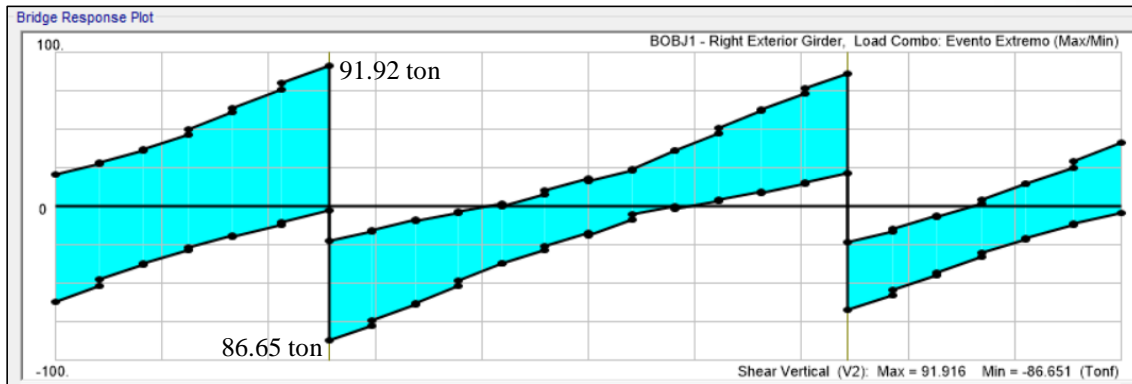
Envolvente servicio – DFC (Viga Exterior Derecha)



En la figura 14 se observa las máximas demandas obtenidas por fuerza cortante en la viga tipo I por la envolvente de Servicio $V_u = 87,38$ ton.

Figura 15

Envolvente evento extremo – DFC (Viga Exterior Derecha)

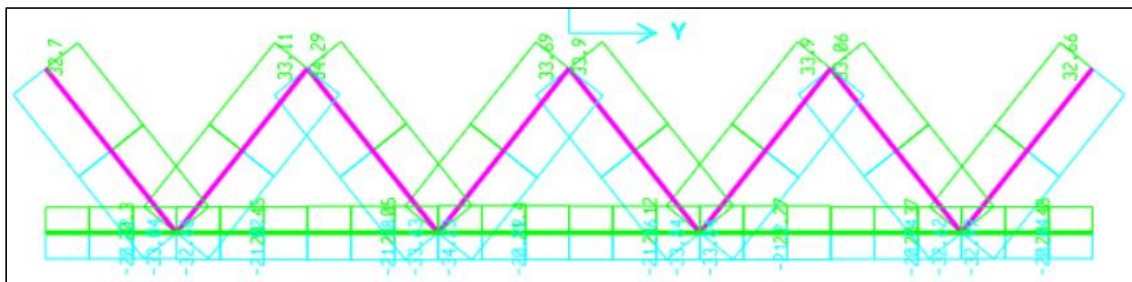


En la figura 15 se observa las máximas demandas obtenidas por fuerza cortante en la viga tipo I por la envolvente de Evento extremo $V_u = 91,92$ ton

Las máximas demandas para los diafragmas fueron obtenidas a partir de una envolvente que considera Servicio, Resistencia y Evento Extremo. Se puede tomar de forma independiente sin interacción de otros esfuerzos (California Department of Transportation [CALTRANS], 2016).

Figura 16

Envolvente - DFA (Diafragmas de Apoyo)



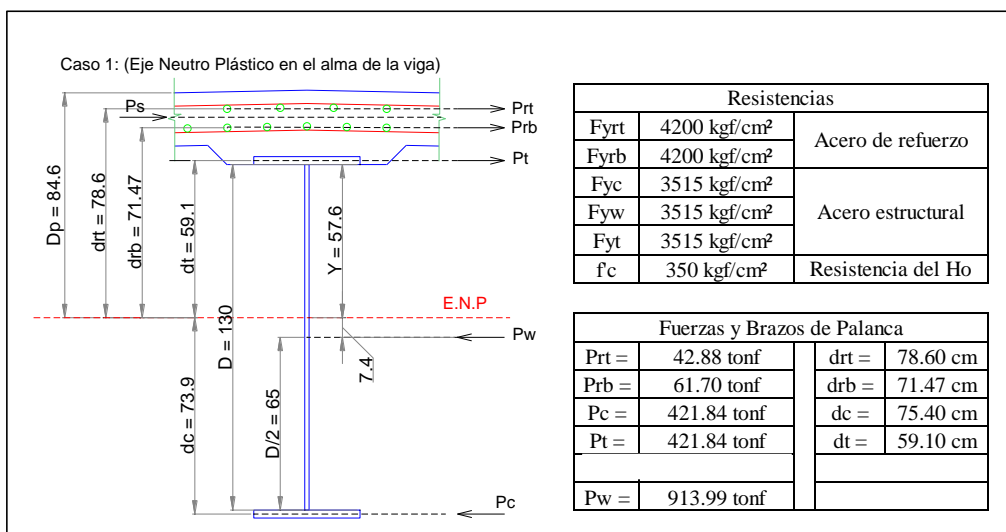
En la figura 16 se observa las máximas demandas obtenidas por Carga axial en los diafragmas de apoyo por la envolvente $F_u (+) = 34,29$ ton; $F_u (-) = 34,23$ ton.

Evaluación de la capacidad estructural de los elementos

Capacidad a flexión negativa en vigas: se evaluó la capacidad de una viga sección compuesta, tomando en cuenta la sección viga I más el aporte del acero de refuerzo superior. Primero, se obtuvo el eje neutro plástico (ENP) de acuerdo con AASHTO (2020), este está localizado en el alma de viga, a una distancia de 0,576m medido desde la cara inferior del patín superior. Las ecuaciones que aplican al caso de estudio son “Caso 1” en la obtención del Momento Plástico “Mp” (figura 18).

Figura 18

Eje neutro plástico (flexión negativa)



$$M_p = \frac{P_w}{2D} [\bar{Y}^2 + (D - \bar{Y})^2] + [P_{rt}d_{rt} + P_{rb}d_{rb} + P_t d_t + P_c d_c] \quad (4)$$

$$M_p = 946.11 \text{ tonf} \cdot \text{m} \quad (5)$$

En la tabla 5 se muestran las propiedades de las secciones.

Tabla 5

Propiedades de la sección

Sección	I (mm ⁴)	S bottom (mm ³)	S top (mm ³)
Solo Viga	14276866666.7	20995392.2	20995392.2
Compuesta n=8	30620776710.8	28610465.2	56732972.8
Compuesta 3n=24	22189821739.9	25520633.7	29965412.8

En tabla 5 se muestra las propiedades de las secciones de viga sola y viga compuesta, donde se resume Momento de Inercia “I” y Modulo de sección “S” (Chen & Duan, 2014).

Tabla 6

Cálculo momento de fluencia

Momentos de Inercia					
Momentos Negativos		Modulo Elástico		Momento de Fluencia	
MD1	106.60 tonf-m	Sncb	0.0209954 m	MAD	1140.07 tonf-m
MD2	50.07 tonf-m	Sstt	0.056733 m	My	1534.36 tonf-m
MD3	148.75 tonf-m	Sltt	0.0452379	-	-

MD1=Momento generado combinación DEAD.

MD2=Momento generado por asfalto.

MD3=Momento generado por combinación DC.

My=Momento de fluencia determinado como se especifica en el artículo D6.2.

$$MAD = Sstt \left(FyW - \frac{1.25MD_1}{Sncb} - \frac{1.50MD_2 + 1.25MD_3}{Sltt} \right) \quad (6)$$

$$My = 1.25M_{D1} + 1.50M_{D2} + 1.25M_{D3} + MAD \quad (7)$$

En la tabla 7 se muestra como la Viga “VIGA I (1,36x0,02x0,40x0,03) m” trabaja al 79% de su capacidad para un momento negativo Mu = 527,94 ton-m.

Tabla 7

Capacidad y D/C a flexión negativa en VIGA

T chaflan	8 cm
Rh	1
Dp	846mm
Dt	1610 mm
Mn	664.34 tonf-m
Mu	527.94 tonf-m
φ	1
Mu/φMn	0.79

Para determinar la capacidad se calcula en función de:

$$Mn = \{Mp \quad for \ D_p \leq 0,1D_t\} \leq 1.3R_hMy \quad (8)$$

$$Mn = \{M_p \left[1,07 - 0,7 \frac{D_p}{D_t} \right] \quad for \ > 0,1D_t\} \leq 1.3R_hMy \quad (9)$$

Donde:

Tchaflan= chaflan+Ala superior

R_h =factor de hibridez determinado como se especifica en el artículo 6.10.1.10.1

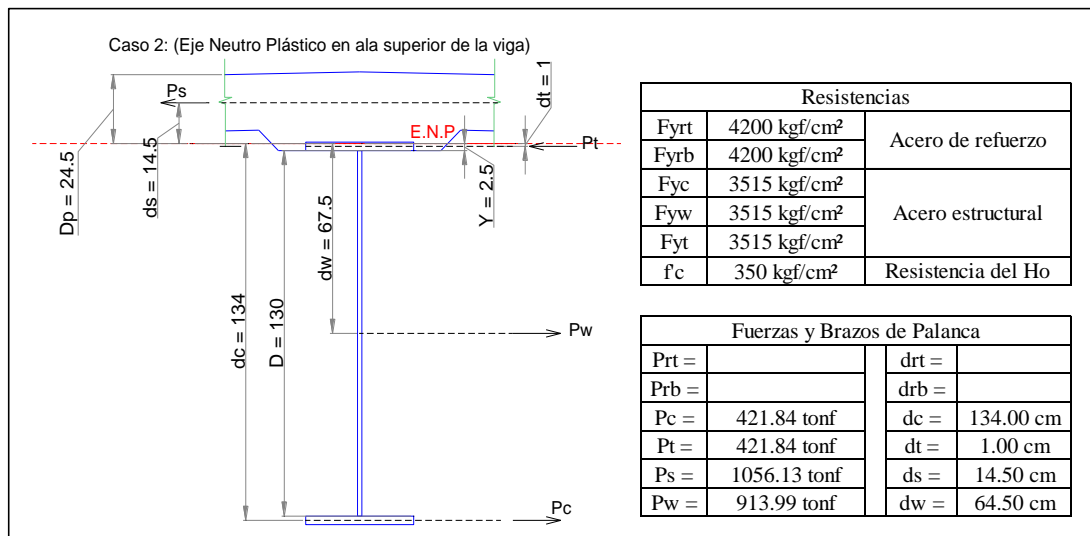
D_p =Distancia entre la cara superior del tablero de hormigón y el eje neutro de la sección compuesta cuando se produce el momento plástico

D_t =Profundidad total de la sección compuesta (mm)

Capacidad a flexión positiva en vigas: el eje neutro fue calculado para el “Caso 2” de AASHTO (2020), este está localizado en el ala superior de la viga, a una distancia de 0,025m medido desde la cara inferior del patín superior.

Figura 19

Eje neutro plástico (flexión positiva)



En la tabla 8 se muestra como la Viga “VIGA I (1,36x0,02x0,40x0,03) m trabaja al 67% de su capacidad para un momento positivo $M_u = 488,58$ ton-m.

Tabla 8

Capacidad y D/C a Flexión Positiva en VIGA I

Momentos Positivos		Modulo Elástico		Momento de Fluencia	
MD1	84.62 tonf-m	Sncb	0.0209954 m ³	MAD	635.54 tonf-m
MD2	43.15 tonf-m	Sstb	0.0286105 m ³	My	942.98 tonf-m
MD3	109.55 tonf-m	Sltt	0.0255206 m ³	-	-
Demanda /Capacidad de la viga					
Mn				723.99tonf-m	
Mu				488.58 tof-m	
φ				1	
Mu/ φMn				0.67	

Capacidad a cortante en vigas: de acuerdo con AASHTO (2020), se debe cumplir que $\phi V_n \geq V_u$. En la tabla 9 se muestra como la viga metálica trabaja al 25% de su capacidad para un cortante $V_u = 132,98$ ton.

Tabla 9
Capacidad y D/C a cortante en VIGA I

Elemento	V_n	ϕ	ϕV_n	$V_u/\phi V_n$
VIGA I(1360x20x40x30) mm	132,98	1	530,115	0,25

$$V_p = 0,58F_{yw}D_{tw} \quad (10)$$

$$V_n = V_p \left[c + \frac{0,87(1-c)}{\sqrt{1+\left(\frac{d_0}{D}\right)^2}} \right] \quad (11)$$

Capacidad a compresión de diafragmas: de acuerdo con AASHTO (2020), se debe cumplir que $\phi P_n \geq P_u$.

Tabla 10
D/C a compresión en diafragmas

Elemento	Ubicación	Tipo	P_u	ϕP_n	$P_u/\phi P_n$
L 4"x4"x5/8"	Apoyo	Horizontal	21,38	51,91	0,41
L 4"x4"x1/2"	Apoyo	Diagonal	34,23	37,78	0,91
L 4"x4"x1/2"	Interior	Horizontal	15,87	42,39	0,37
L 3"x3"x1/2"	Interior	Diagonal	7,17	23,27	0,31

Capacidad a tensión de diafragmas: de acuerdo con AASHTO (2020), se debe cumplir que $\phi T_n \geq T_u$.

Tabla 11
D/C a Tensión en Diafragmas

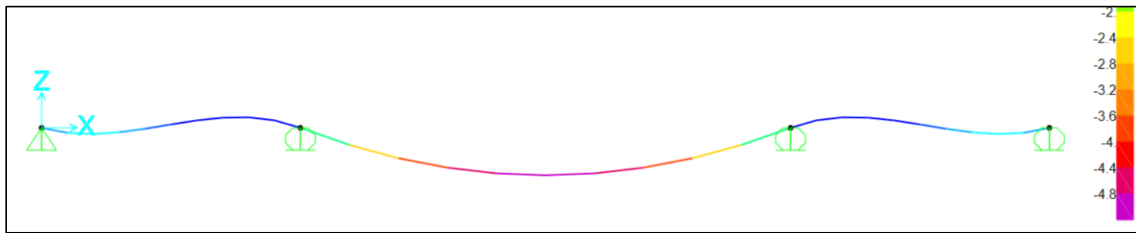
Elemento	Ubicación	Tipo	T_u	ϕT_n	$T_u/\phi T_n$
L 4"x4"x5/8"	Apoyo	Horizontal	21,40	69,61	0,31
L 4"x4"x1/2"	Apoyo	Diagonal	34,29	56,62	0,61
L 4"x4"x1/2"	Interior	Horizontal	26,26	53,35	0,49
L 3"x3"x1/2"	Interior	Diagonal	11,00	44,76	0,25

Análisis de deflexiones

Deflexiones elásticas: las deflexiones fueron calculadas de acuerdo con AASHTO (2020), Cap. 3, C2.5.2.6.2 usando un modelo estructural de la viga más crítica en Sap2000, considerando el máximo efecto entre (caso 1: $\Delta_{camión}$ ó caso 2: $0,25\Delta_{camión} + \Delta_{carril}$), vale destacar que se utilizó las inercias de la viga compuesta [propiedades a corto plazo (η)] (Barker & Puckett, 2014). A continuación, se presentan la deformada de viga.

Figura 20

Deflexión máxima por carga viva vehicular



Considerando la deflexión permisible como:

$$\Delta_{admissible} = \frac{L}{1000} = \frac{32200 \text{ mm}}{1000} = 32,2 \text{ mm}$$

Se utilizó un factor de distribución de deflexiones de: $m_{g_{deflexion}} = \frac{n_{lanes}}{n_{vigas}} = \frac{2}{5} = 0,4$

La deflexión máxima es 4,80 mm predomina caso 2, < 32,20 mm lo cual satisface.

Por otra parte, se verificó el criterio de Longitud de Tramo/Peralte de acuerdo con AASHTO (2020), Cap. 2, 2.5.2.6.3

Tabla 12

Verificación de relación Tramo/Peralte

Sección Simple		Sección Compuesta	
Hmin = 0.033L	1056 mm	Hmin = 0.033L	1280 mm
Hbeam=	1360 mm	Hgirder=Hbeam+ts+Hchaflan	1650 mm
Hbeam ≥ H min, ok		Hgirder ≥ H min, ok	

Deflexiones permanentes: se verificó las alas en tensión de la sección compuesta para el servicio de acuerdo con AASHTO (2020), Cap. 6, 6.10.4.2.

En la tabla 13 se muestra cómo cumple la serviciabilidad para Momento Negativo en vigas interiores y exteriores, se consideró MD1 igual a DC y MD2 como la carga DW,

mientras que en la tabla 14 muestra como cumple para momento positivo (American Institute of Steel Construction [AISC], 2022).

Tabla 13
Análisis serviciabilidad - momento negativo

Vigas Interiores-Momento Negativo						
MD1 (ton-m)	MD2 (ton-m)	MD3 (ton-m)	1.3M LL + IM (ton-m)	S top (beam) (mm ³)	S top (girder) (mm ³)	Esfuerzo (kgf/cm ²)
121.21	-	-	-	20995392.16	-	577.32
--	56.23	-	-	-	24892479.29	225.89
-	-	0.00	-	-	24892479.29	0.00
-	-	-	126.86	--	24892479.29	509.63
σ_{total}						1312.84
$0.8 \cdot R_h \cdot f_{ys}$						2800
$\sigma_{total} < 0.8 \cdot R_h \cdot f_{ys}$						OK
Vigas Exteriores-Momento Negativo						
MD1 (ton-m)	MD2 (ton-m)	MD3 (ton-m)	1.3M LL + IM (ton-m)	S top (beam) (mm ³)	S top (girder) (mm ³)	Esfuerzo (kgf/cm ²)
148.75	-	-	-	20995392.16	-	708.49
-	50.07	-	-	-	25177234.5	198.87
-	-	0.00	-	-	25177234.5	0.00
-	-	-	157.5	-	25177234.5	625.57
σ_{total}						1532.93
$0.8 \cdot R_h \cdot f_{ys}$						2800
$\sigma_{total} < 0.8 \cdot R_h \cdot f_{ys}$						OK

Tabla 14
Análisis serviciabilidad - momento positivo

Vigas Interiores-Momento Positivo						
MD1 (ton-m)	MD2 (ton-m)	MD3 (ton-m)	1.3M LL + IM (ton-m)	S top (beam) (mm ³)	S top (girder) (mm ³)	Esfuerzo (kgf/cm ²)
103.6	-	-	-	20995392.16	-	493.44
-	43.12	-	-	-	27024466.44	159.56
-	-	0	-	-	27024466.44	0.00
-	-	-	132.56	-	30363621.03	436.58
σ_{total}						1089.58
$0.8 \cdot R_h \cdot f_{ys}$						3325
$\sigma_{total} < 0.8 \cdot R_h \cdot f_{ys}$						OK
Vigas Exteriores-Momento Positivo						
MD1 (ton-m)	MD2 (ton-m)	MD3 (ton-m)	1.3M LL + IM (ton-m)	S top (beam) (mm ³)	S top (girder) (mm ³)	Esfuerzo (kgf/cm ²)
109.55	-	-	-	20995392.16	-	521.78
-	43.15	-	-	-	27248089.41	158.36
-	-	0.00	-	-	27248089.41	0.00
-	-	-	168.26	-	30544866.7	550.86
σ_{total}						1231.00
$0.8 \cdot R_h \cdot f_{ys}$						3325
$\sigma_{total} < 0.8 \cdot R_h \cdot f_{ys}$						OK

Conclusiones

- Definir las cargas actuantes permitió establecer la condición más crítica para cargas gravitatorias considerando los pesos muertos y carga sísmica a partir de un espectro de aceleración de acuerdo con NEC-SE-DS.
- El Análisis Estructural del puente fue realizado mediante un modelo matemático en CSI Bridge V.25, el cual reflejó el comportamiento detallado de la estructura ante las cargas para la cual fue sometida, obteniendo así las máximas demandas para las vigas longitudinales y los diafragmas.
- La viga longitudinal “VIGA I (1,36x0,02x0,40x0,03) m tiene una adecuada capacidad a flexión y a cortante, trabajando al 79% para flexión negativa, 67% para flexión positiva y 25% para cortante.
- Los diafragmas en apoyos tienen buena capacidad a compresión y a tensión, trabajando a tensión al 61% y a 91% a compresión.
- Los diafragmas interiores horizontales tienen buena capacidad a compresión y a tensión, trabajando al 37% en compresión y al 49% en tensión.
- Los diafragmas interiores diagonales tienen buena capacidad a compresión y a tensión, trabajando al 31% en compresión y al 25% en tensión.
- La verificación de serviciabilidad es satisfactoria para la “VIGA I (1,36x0,02x0,40x0,03) m, se verificaron las deflexiones por debajo de $L/1000$ y esfuerzos menores que los admisibles.
- Para este estudio, el diseño de viga longitudinal predomina E.L de Resistencia I, para diafragma de apoyo predomina E.L Evento Extremo y para diafragma interior predomina E.L de Resistencia I.

Conflicto de intereses

Los autores expresan que no hay conflictos de interés en el manuscrito presentado.

Referencias Bibliográficas

American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO].

(2020). LRFD Bridge Design Specifications.

<https://store.transportation.org/item/collectiondetail/202>

American Institute of Steel Construction [AISC]. (2022). Steel Bridge Design

Handbook. <https://www.aisc.org/nsba/design-and-estimation-resources/steel-bridge-design-handbook/>

Barker, R., & Puckett, J. (2013). Design of highway bridges an LRFD Approach.

JohnWiley& Sons, Inc.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118411124>

- California Department of Transportation [CALTRANS]. (2016). Seismic design specifications for steel bridges. https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/engineering/documents/seismicdesigncriteria-sdc/201605-seismicdesignspecsteelbridges_secondedition.pdf
- Chen, W., & Duan, L. (2014). Superstructure design. Taylor & Francis Group, LLC. <https://www.routledge.com/Bridge-Engineering-Handbook-Superstructure-Design/Chen-Duan/p/book/9781439852217>
- Choi, B., Moreno, L., Lim, C. S., Nguyen, D., & Lee, T. H. (2019). Seismic performance evaluation of a fully integral concrete bridge with end-restraining abutments. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 12. <https://doi.org/10.1155/2019/6873096>
- Computer & Structures Inc. [CSI]. (2024). CSiBridge bridge analysis, design, and rating. <https://www.csiamerica.com/products/csibridge>.
- Delgado, C., Vera, W., & Rodríguez, R. (2018). Propuesta de puente aplicando el método de diseño AASHTO LRFD para la ciudad de Manta. *Dominio de las ciencias*, 4(3), 189-210. <https://doi.org/10.23857/dc.v4i3.803>
- Federal Highway Administration [FHWA]. (2014). LRFD Seismic Analysis and design of bridges. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/seismic/nhi130093.pdf>
- Guerra, O., Peña, F., & Yunapanta, J. (2021). Propuesta de reforzamiento de vigas de alma llena de puentes [metálicos con fibra de carbono y resina epóxica [Tesis de maestría, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador]. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/34195>
- Lombeida, C. (2023). Diseño estructural de un puente para paso peatonal y ganado vacuno, en la parroquia Pucayacu, cantón La Maná, provincia de Cotopaxi [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25260>
- Mañueco, N. (2018). Evaluación de 4 puentes vehiculares tipo viga sobre el río Rímac utilizando el manual de inspección del MTC y software csibridge, Lima 2018 [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo, Lima]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/35482>
- National Cooperative Highway Research Program [NCHRP]. (2021). Proposed Modification to AASHTO Cross-Frame Analysis and Design. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/26074/proposed-modification-to-aashto-cross-frame-analysis-and-design>

Norma Ecuatoriana de la Construcción [NEC]. (2015). Peligro sísmico diseño sismo resistente. MIDUVI. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>

Rodríguez A. (2020). Puentes con AASHTO LRFD 2017 (8th Edition).
https://www.academia.edu/49312415/PUENTES_2020_Ing_Arturo_Rodr%C3%ADguez_Serqu%C3%A9n

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Conciencia Digital**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Conciencia Digital**.



Indexaciones

