


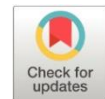


Evaluación estructural ante la acción sísmica de las pilas del puente Puerto Real de Portoviejo

*Structural evaluation of the piers of the Puerto Real Bridge in Portoviejo
Under seismic action*

- ¹ Fredy Randolph Barahona Escoto  <https://orcid.org/0009-0009-3376-3526>
Facultad de Postgrado. Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Ecuador.
chinobares3@gmail.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
- ³ Armando Douglas Reyes Pilay  <https://orcid.org/0009-0007-5717-5695>
Subdirección de Estudios y Diseños. Gobierno Autónomo descentralizado de la Provincia de Manabí. Portoviejo, Ecuador.
icardp@hotmail.com



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 11/06/2024

Revisado: 08/07/2024

Aceptado: 16/08/2024

Publicado: 25/08/2024

DOI: <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i3.1.3147>

Cítese:

Barahona Escoto, F. R., Lindao Tomalá, P. J., & Reyes Pilay, A. D. (2024). Evaluación estructural ante la acción sísmica de las pilas del puente Puerto Real de Portoviejo. *Conciencia Digital*, 7(3.1), 128-150.
<https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i3.1.3147>



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, Pilas,
Pilotes

Resumen

Introducción: La infraestructura de puentes son una parte fundamental de la vialidad, los puentes en la actualidad sirven para la interconexión de puntos geográficos que no pueden ser alcanzados por vía sólida. El Ecuador, al ser un territorio con un peligro sísmico alto requiere un análisis bajo cargas laterales provenientes de la acción sísmica. En el presente caso de estudio se abordará la capacidad estructural y el nivel de desempeño de la infraestructura del puente Puerto Real, mismo que comprenderá el análisis a flexión y a cortante de las vigas cabezales, el análisis a flexo-compresión y a cortante de las pilas y pilotes, además de la evaluación del desempeño de las pilas tipo pórticos. **Objetivo:** Evaluar el comportamiento estructural y el nivel de desempeño sísmico de las Pilas del puente Puerto Real ubicado en la ciudad de Portoviejo, ante la acción de las cargas verticales y las cargas laterales provenientes de la acción sísmica, mediante la elaboración de un modelo matemático en el programa CSI Bridge y aplicando la normativa vigente de la AASHTO LRFD, para la formulación de posibles estrategias de mejora estructural en las pilas del puente. **Metodología:** Revisión de los planos y especificaciones del puente existente, evaluación de las cargas actuantes en la infraestructura. Elaboración del modelo matemático de la estructura del puente Puerto Real en el programa CSI Bridge. Elaboración de un Análisis estático no-lineal al pórtico del puente conformado por pilas y viga cabezal, con el propósito de obtener el desempeño sísmico del sistema estructural existente del puente. **Resultados:** Las vigas cabezales 1 y 2 demuestran un comportamiento apropiado, es decir dentro del rango elástico para momento negativo con una relación demanda/capacidad crítica de 0.72 y 0.72 respectivamente. El diseño a cortante es satisfactorio, la viga cabezal 1 tiene una relación demanda/capacidad de 0.41 y la viga cabezal 2 de 0.30. Las pilas cumplen con la capacidad a flexo-compresión requerida, la demanda/capacidad crítica de 0.484 para la pila 1 y 0.465 para la pila 2, mientras que la relación demanda/capacidad a cortante es de 0.52 para la pila 1 y 0.47 para la pila 2, comprobando así que estos elementos disponen de un buen confinamiento para el sismo AASHTO con $T_r=1000$ yr. Los pilotes tienen un adecuado comportamiento a flexo-compresión con una relación

demanda/capacidad crítica de 0.756 en los pilotes de la pila 1 y en los pilotes de la pila 2 es de 0.945, mientras que la relación demanda/capacidad a cortante es de 1.23 para los pilotes de la pila 1 y 0.91 para los pilotes de la pila 2. Respecto al nivel de desempeño sísmico, para el Pórtico Y-Y de la Pila 1 está en Daño Severo (Sd3) con un punto de desempeño de $S_a=0.66g$, $\Delta=14.60$ cm, para el Pórtico X-X de la Pila 1 está en Daño Severo (Sd3) con un punto de desempeño de $S_a=0.384g$, $\Delta=21.60$ cm. Por otra parte, al nivel de desempeño sísmico, para el Pórtico Y-Y de la Pila 2 está en Daño Moderado (Sd2) con un punto de desempeño de $S_a=0.63g$, $\Delta=4.70$ cm, para el Pórtico X-X de la Pila 2 está en Daño Severo (Sd3) con un punto de desempeño de $S_a=0.50g$, $\Delta=20.80$ cm. **Conclusión:** El análisis de cargas permitió obtener la condición más crítica y desfavorable para la infraestructura del puente, de esta forma se determinaron las máximas demandas del puente Puerto Real a través del modelo numérico tridimensional en CSI Bridge. Las vigas cabezales están diseñadas a flexión correctamente de manera elástica para un $R=1$ para momento negativo y momento positivo, Las columnas disponen de la resistencia a flexo-compresión necesaria, además poseen un adecuado confinamiento que garantizara la incursión al rango inelástico. La propuesta de pilotes para el puente Puerto Real cumple con la relación demanda/capacidad a flexo-compresión y a cortante. **Área de estudio general:** Ingeniería Civil y Mecánica. **Área de estudio específica:** Estructuras de Hormigón Armado. **Tipo de artículo:** Artículo original.

Keywords:

Evaluation, Bridge Beams, Steel, Diaphragms

Abstract

Introduction: Bridge infrastructure is a fundamental part of the road system; bridges are currently used for the interconnection of geographical points that cannot be reached by solid road. Ecuador, being a territory with a high seismic hazard, requires an analysis under lateral loads coming from seismic action. This case study will address the structural capacity and performance level of the Puerto Real bridge infrastructure, including the flexural and shear analysis of the header beams, the flexural-compression and shear analysis of the piers and piles, as well as the evaluation of the performance of the portal piers. **Objective:** Evaluate the structural behavior and seismic performance level

of the piers of the Puerto Real bridge located in the city of Portoviejo, under the action of vertical loads and lateral loads from seismic action, through the development of a mathematical model in the CSI Bridge program and applying the current AASHTO LRFD standards, for the formulation of possible structural improvement strategies in the bridge piers. **Methodology:** Review of the drawings and specifications of the existing bridge, evaluation of the loads acting on the infrastructure. Elaboration of the mathematical model of the Puerto Real bridge structure in the CSI Bridge program. Development of a non-linear static analysis of the bridge gantry consisting of piers and header beam, to obtain the seismic performance of the existing structural system of the bridge. **Results:** Header beams 1 and 2 demonstrate appropriate behavior, i.e. within the elastic range for negative moment with a critical demand/capacity ratio of 0.72 and 0.72 respectively. The shear design is satisfactory, head beam 1 has a demand/capacity ratio of 0.41 and head beam 2 of 0.30. The piles comply with the required flexural compression capacity, the critical demand/capacity of 0.484 for pile 1 and 0.465 for pile 2, while the shear demand/capacity ratio is 0.52 for pile 1 and 0.47 for pile 2, proving that these elements have a good confinement for the AASHTO earthquake with $T_r=1000$ yr. The piles have an adequate flexural-compression behavior with a critical demand/capacity ratio of 0.756 for piles in pile 1 and 0.945 for piles in pile 2, while the shear demand/capacity ratio is 1.23 for piles in pile 1 and 0.91 for piles in pile 2. Regarding the seismic performance level, for Pile 1 Y-Y portal is at Severe Damage (Sd3) with a performance point of $S_a=0.66g$, $\Delta=14.60$ cm, for Pile 1 X-X portal is at Severe Damage (Sd3) with a performance point of $S_a=0.384g$, $\Delta=21.60$ cm. On the other hand, at the seismic performance level, for the Y-Y Gantry of Stack 2 is in Moderate Damage (Sd2) with a performance point of $S_a=0.63g$, $\Delta=4.70$ cm, for the X-X Gantry of Stack 2 is in Severe Damage (Sd3) with a performance point of $S_a=0.63g$, $\Delta=4.70$ cm, for the X-X Gantry of Stack 1 is in Severe Damage (Sd3) with a performance point of $S_a=0.384g$, $\Delta=21.60$ cm. **Conclusion:** The load analysis allowed obtaining the most critical and unfavorable condition for the bridge infrastructure, thus determining the maximum demands of the Puerto Real bridge through the three-

dimensional numerical model in CSI Bridge. The head girders are designed to flex correctly in an elastic manner for an $R=1$ for negative moment and positive moment. The columns have the necessary flexural and compressive strength, as well as an adequate confinement that will guarantee the incursion into the inelastic range. The pile proposal for the Puerto Real Bridge complies with the demand/capacity ratio at flexo-compression and shear. **Type of article:** original.

1. Introducción

Una parte fundamental de la vialidad es la edificación de puentes que sirven para la interconexión de puntos geográficos que no pueden ser alcanzados por vía sólida; los puentes entrelazan y acortan las distancias, así como también posibilitan el cuidado de las fuentes hídricas (Rodríguez, 2022). Como menciona Moran (2023), estos puentes producen desarrollo, progreso, fortalecimiento económico y de infraestructura a nivel mundial. Según Jiménez & Carreño (2023), se ha evidenciado las pérdidas de vidas generadas por el colapso parcial o completo de un puente durante los efectos de un sismo, razón por la cual la evaluación de estructuras de este tipo es de suma importancia debido a que nuestro país está en una zona de alta sismicidad. Además, Chuquipoma (2020), menciona que en los puentes son la respuesta estructural a la seguridad peatonal que entra en armonía con las estructuras viales y el desarrollo.

La evaluación estructural del puente Puerto Real se realizará mediante el análisis de un modelo matemático de la estructura utilizando el programa CSI Bridge. Como menciona Mañueco (2018), CSI Bridge es uno de los programas más utilizados en la actualidad, programa con una alta capacidad de modelado, análisis y dimensionamiento de este tipo de estructuras. Con respecto al presente caso de estudio se abordará la evaluación del comportamiento sísmico-estructural de la infraestructura del Puente Puerto Real, el cual consiste en: viga cabezal, pilas, pilotes.

2. Metodología

La metodología empleada será el método cuantitativo, el cual se caracteriza por la medición numérica de resultados, cuyo tipo de diseño es no experimental descriptivo mismo que está basado en la observación, el cual no pretende intervenir con el entorno, por otra parte, se utilizará el método deductivo, método que se caracteriza de demostrar, comprender y explicar los aspectos particulares de la realidad. El procedimiento para el caso de estudio será el siguiente:

- Determinar los fundamentos teóricos-conceptuales sobre la pila como elemento estructural fundamental para edificación y sismo resistencia de los puentes.
- Revisión de los planos y especificaciones del puente existente, relevamiento estructural de los elementos que componen el puente Puerto Real, así como la evaluación de las cargas actuantes en la infraestructura.
- Elaboración del modelo matemático del puente Puerto Real en el programa CSI Bridge, con la finalidad de reflejar el comportamiento real de la estructura para obtener la relación demanda/capacidad más crítica de los elementos estructurales, los cuales serán: viga cabezal, pilas y pilotes.
- Realizar un Análisis estático no-lineal al pórtico del puente conformado por pilas y viga cabezal, con el propósito de obtener el nivel de desempeño sísmico del sistema de resistencia sísmica.

Elementos analizados que conforman la infraestructura

Los elementos analizados en la infraestructura del puente Puerto Real son las pilas 1 y 2, los cuales están conformados por viga cabezal, pilas y pilotes, estos se muestran en la figura 1 y 2, además los cortes transversales de las pilas se muestran en la figura 3 y 4.

Figura 1

Viga cabezal y columnas de pila 1

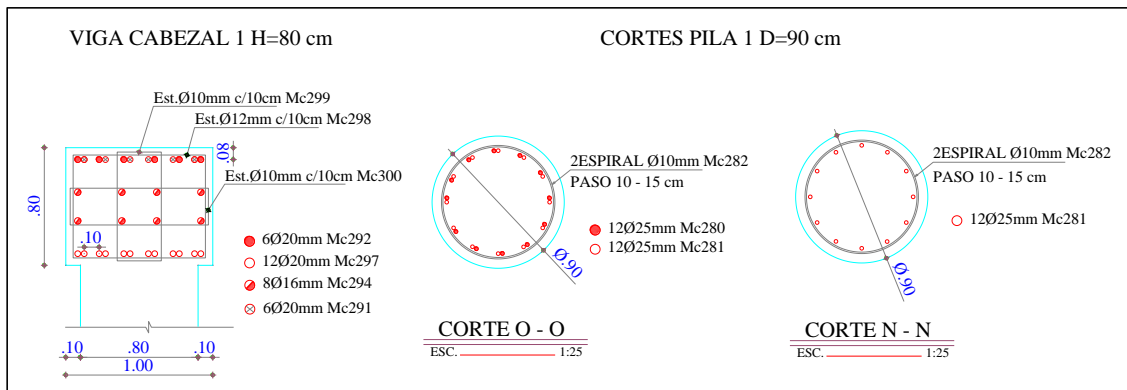


Figura 2

Viga cabezal y columnas de pila 2

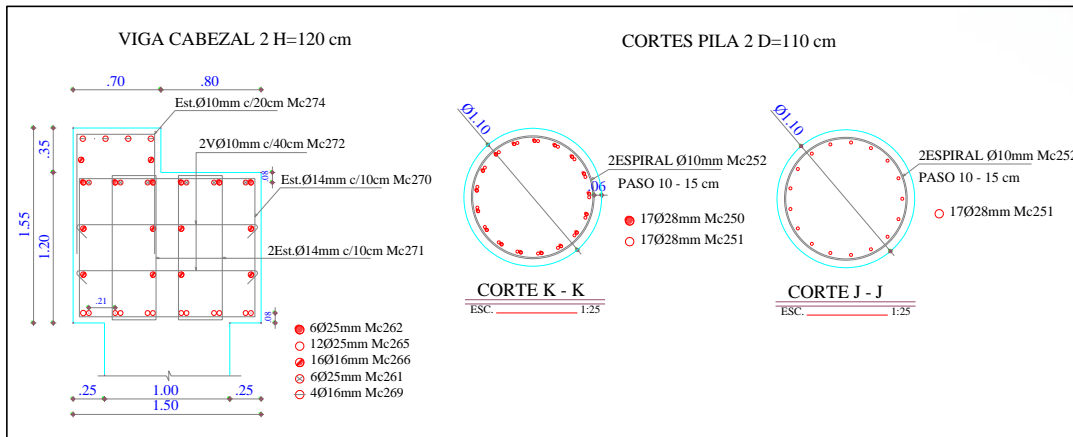


Figura 3

Cortes transversales pila 1 y 2 del Puente Puerto Real

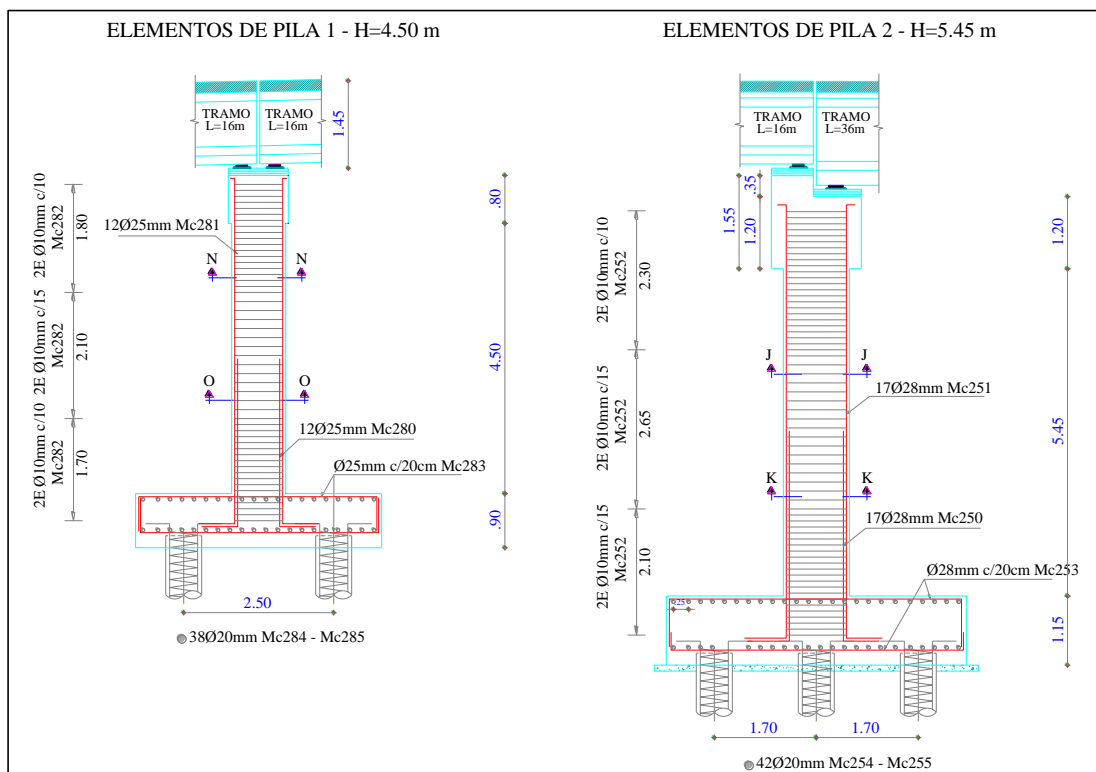
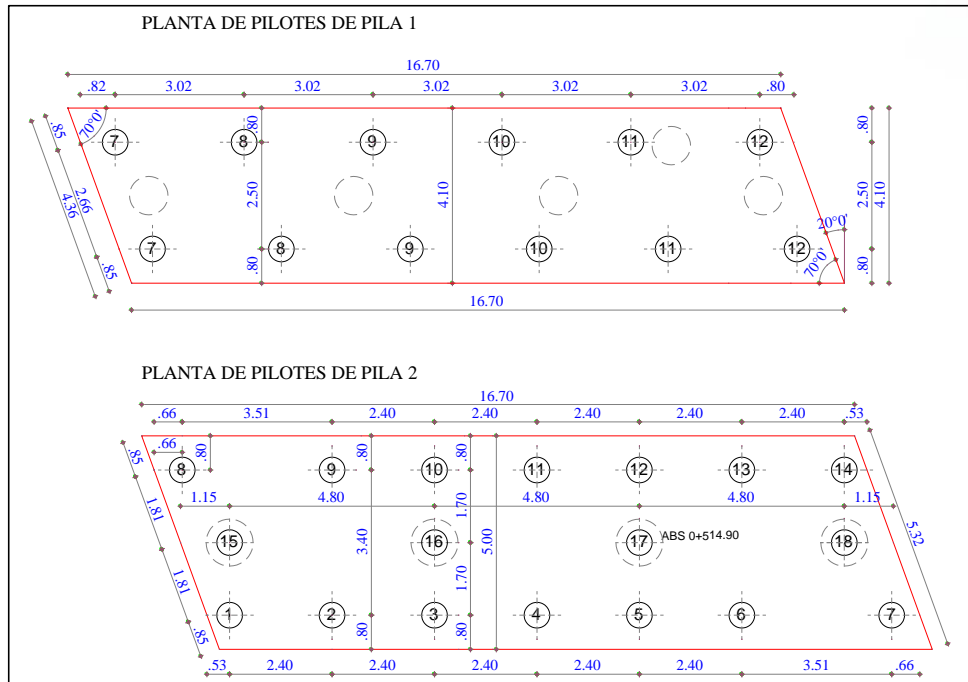


Figura 4

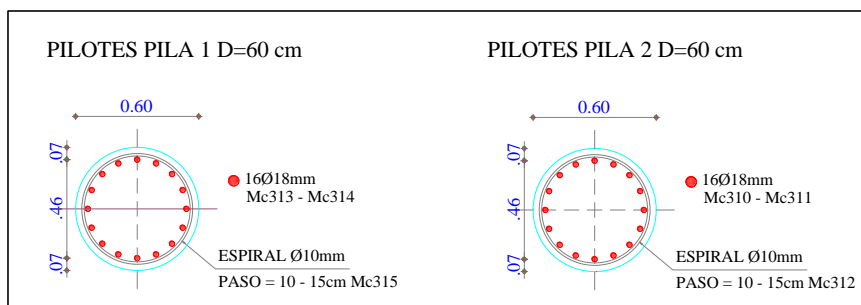
Planta de pilotes de pila 1 y 2



Por otra parte, las secciones de los pilotes para la pila 1 y 2 se muestran en la figura 5.

Figura 5

Sección de pilotes de pila 1 y 2



Materiales y resistencias utilizadas

Para el análisis del Puente Puerto Real se consideraron los materiales mostrados en la tabla 1.

Tabla 1

Materiales empleados

Elemento	Tipo	Resistencia
Losa ts=18 cm	Hormigón Armado	$f_c = 350 \text{ kgf/cm}^2$
Viga Longitudinales	Hormigón Presforzado	$f_c = 420 \text{ kgf/cm}^2$
Viga Cabezal, Pilas, Zapatas, Pilotes	Hormigón Armado	$f_c = 250 \text{ kgf/cm}^2$

Cargas muertas

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

Tabla 2

Cargas muertas

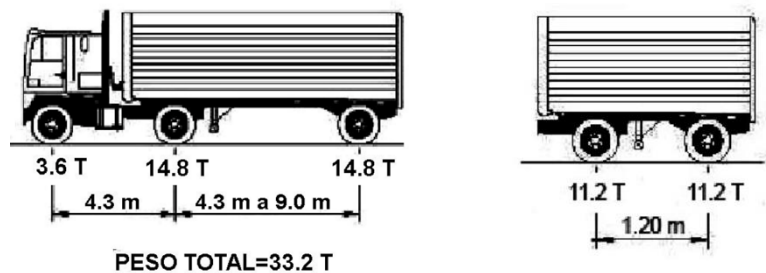
Elemento	Espesor (m)	P. Específico (ton/m ³)	Carga Uniforme (ton/m ²)	Tipo
Losa	0.2	2.4	0.48	DC
Aceras	0.2	2.4	0.48	DC
Asfalto	0.075	2.2	0.165	DW
Instalaciones	-	-	0.05	DW
Barandas	-	-	0.088	DC

Carga viva vehicular

Como se muestra en la figura 6, el vehículo de diseño considerado fue el HL-93. Además, se consideró una carga viva peatonal de 0.366 ton/m².

Figura 6

Camión de Diseño



Carga sísmica

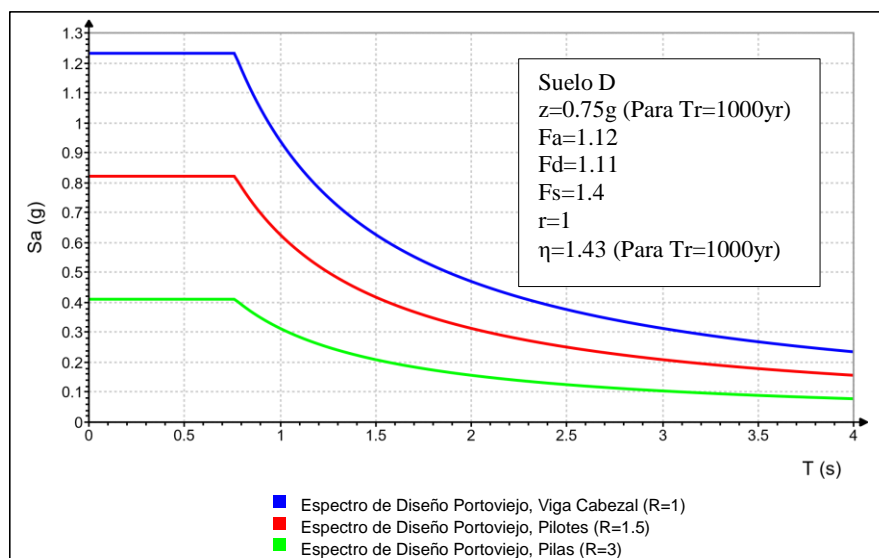
La carga sísmica fue definida como un espectro de diseño de aceleraciones para un período de retorno de $T_r=1000$ años con un factor $z=0.75g$, un suelo tipo D, tal como está establecido en la norma NEC-SE-DS (Norma Ecuatoriana de la Construcción [NEC]),

2014). Con respecto al factor de modificación de respuesta sísmica R , se consideró un $R=1$ para la viga cabezal, $R=3$ para las pilas y $R=1.5$ para pilotes de acuerdo con lo indicado en la norma (American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2020).

Los espectros para el puente del Puerto Real se muestran en la figura 7.

Figura 7

Espectros de Diseño Provincia de Portoviejo



Combinaciones de diseño

Las máximas fuerzas internas fueron analizadas para las combinaciones de la normativa AASHTO LRFD.

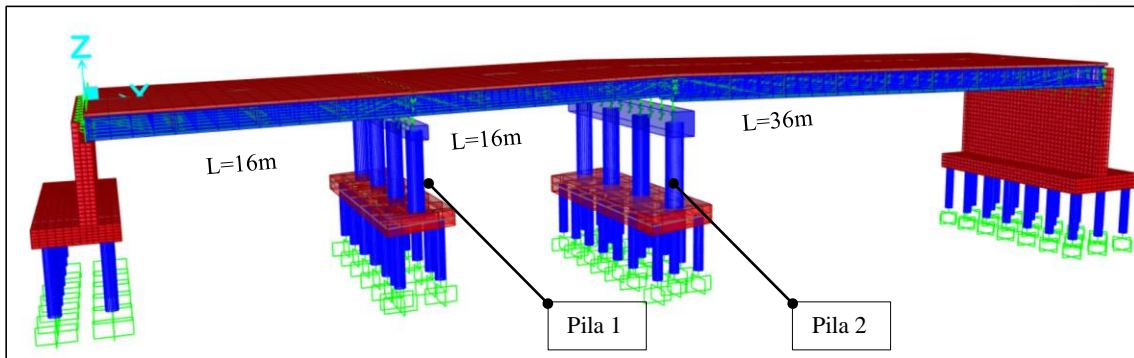
- Servicio 1: $DC + DW + LL + IM + PL$ (1)
- Resistencia 1: $1.25DC + 1.5DW + 1.75(LL+IM + PL)$ (2)
- Evento Extremo 1: $1.25DC + 1.5DW + 0.5(LL+IM+PL) + EQ$ (3)

Modelo matemático tridimensional del puente Puerto Real

El modelo matemático de la estructura realizado en el programa CSI Bridge permitió obtener el comportamiento más realista de la estructura. El modelo matemático está conformado por 3 tramos simplemente apoyados cuyas luces son de 16 m, 16 m, 36 m, se disponen de 10 vigas longitudinales y la separación de estas es de 1.55 m. El modelo matemático se puede visualizar en la figura 8.

Figura 8

Modelo numérico tridimensional del Puente Puerto Real



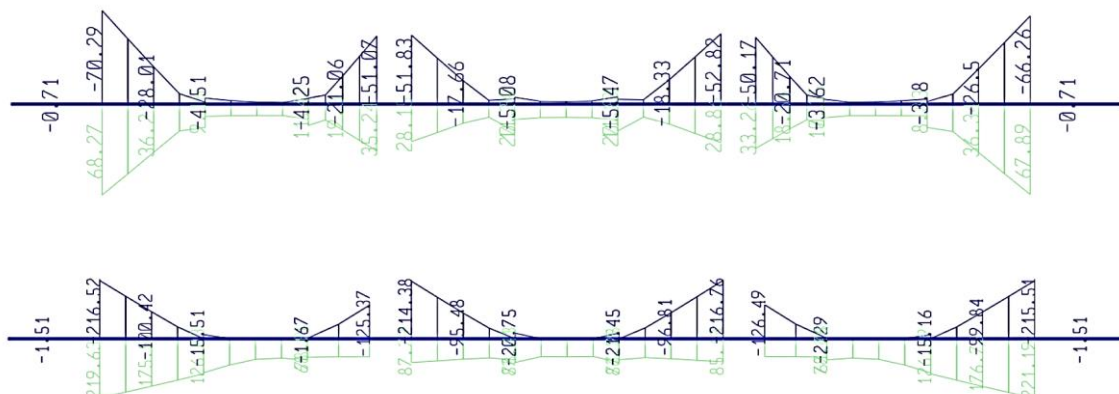
Relación demanda/capacidad en viga cabezal

La viga cabezal fue verificada para las distintas combinaciones de diseño de acuerdo con (AASHTO, 2020), siendo las más predominantes las siguientes, Servicio, Resistencia y Evento Extremo, dicho elemento fue verificado para que trabaje de manera elástica ($R=1$). Los momentos flexionantes deben ser menor a los momentos resistentes (Peña & Yunapanta, 2022).

A continuación en la figura 9 se muestran los máximos momentos flectores que se presentan en la viga cabezal 1 y 2:

Figura 9

Envolvente DMF – cabezal 1 y cabezal 2



Se utilizaron las siguientes expresiones matemáticas para obtener la capacidad de diseño a flexión de acuerdo con AASHTO LRFD 9th Ed.

M_{cr} : Momento de Agrietamiento, capítulo 5, sección 5.6.3.3.

fr: Módulo de Ruptura, capítulo 5, Sección 5.4.2.6.

Ø: Factor de Reducción, capítulo 5, Sección 5.5.4.2.

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot f'_c \cdot b} & c &= \frac{a}{\beta_1} & \varepsilon_t &= \varepsilon_c \cdot \left(\frac{d-c}{c} \right) & \phi &= \begin{cases} \text{if } \varepsilon_t \leq 0.002 \\ \parallel \\ 0.65 \\ \text{else if } 0.002 < \varepsilon_t \leq 0.005 \\ \parallel \\ 0.65 + (\varepsilon_t - 0.002) \cdot \frac{150}{3} \\ \text{else} \\ \parallel \\ 0.9 \end{cases} & & (4) \\
 f_r &= 2.01 \cdot \sqrt{f'_c} & & & & & & & \\
 M_{cr} &= \gamma_3 \cdot (\gamma_1 \cdot f_r \cdot S_{nc}) & S_{nc} &= \frac{b \cdot h^2}{6} & & & & & \\
 M_{u,min} &= \min(1.33 M_u, M_{cr}) & & & & & & & \\
 \phi M_n &= \phi \cdot A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) & & \phi M_n \geq M_{u,min} & & & & &
 \end{aligned}$$

Se compararon los máximos momentos con la capacidad a flexión de las vigas cabezales, obteniendo así las relaciones demanda/capacidad a flexión, los mismos que se muestran en la tabla 3, verificando así el buen comportamiento a flexión de estos elementos, tal como menciona Lombeida (2023), estas vigas deben tener un comportamiento elástico.

Tabla 3

Ratios a flexión - vigas cabezales

Elemento	Dimensiones	Momento	Mu (ton-m)	Armado	φMn (ton-m)	Mu/φMn
Viga Cabezal 1	100x80	(+)	68.27	12φ20	97.29	0.70
Viga Cabezal 1	100x80	(-)	70.29	12φ20	97.29	0.72
Viga Cabezal 2	150x120	(+)	221.19	12φ25	301.42	0.73
Viga Cabezal 2	150x120	(-)	216.76	12φ25	301.42	0.72

Se utilizaron las siguientes expresiones para obtener la capacidad de diseño a cortante para vigas de acuerdo con la norma AASHTO LRFD 9th Ed.

Vn = Vc+Vn: Resistencia nominal a corte, capítulo 5, sección 5.7.3.3.

Vc: Resistencia nominal del concreto a corte, capítulo 5, sección 5.7.3.4.1 proceso simplificado.

dv: Altura efectiva de corte, capítulo 5, sección 5.7.2.8.

Smax: Refuerzo transversal, capítulo 5, Sección 5.7.2.5.

$$d = h - r_{eje} \quad d_v = \max\left(\left(d - \frac{a}{2}\right), (0.9 d), (0.72 h)\right) \quad V_c = 0.0632 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d_v \quad (ksi)$$

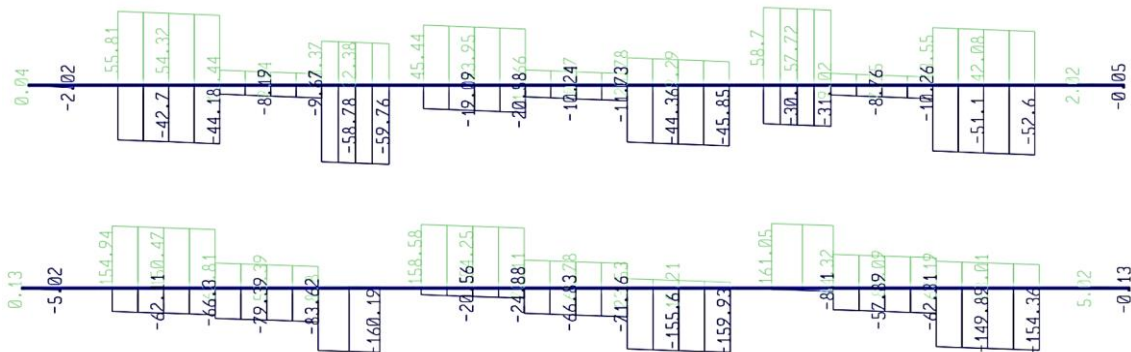
$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad S = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d_v}{V_s} \quad S_{max,1} = \frac{A_v \cdot f_y}{0.0316 \cdot b \cdot \sqrt{f'_c}} \quad (ksi) \quad v_u = \frac{V_u}{\phi \cdot b \cdot d_v} \quad (5)$$

$$S_{max,2} = \begin{cases} \text{if } v_u < 0.125 f'_c \\ \quad \min(0.8 d_v, 24 \text{ in}) \\ \text{else} \\ \quad \min(0.4 d_v, 12 \text{ in}) \end{cases} \quad S_{max} = \min(S_{max,1}, S_{max,2})$$

A continuación en la figura 10 se muestran los cortantes que se presentan en la viga cabezal 1 y 2:

Figura 10

Envolvente DFC – Cabezal 1 y 2



Se compararon los máximos cortantes con la capacidad a cortante de las vigas cabezales, obteniendo así las relaciones demanda/capacidad a cortante, mismos que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4

Ratios a Cortante - Vigas Cabezales

Elemento	Dimensiones	Vu (ton)	Armado	ϕV_n (ton)	$V_u/\phi V_n$
Viga Cabezal 1	100x80	58.78	4 Ramales $\phi 10/c10cm$	145	0.41
Viga Cabezal 2	150x120	161.05	6 Ramales $\phi 14/c10cm$	592.23	0.30

Relación Demanda/Capacidad a flexo compresión en Pilas

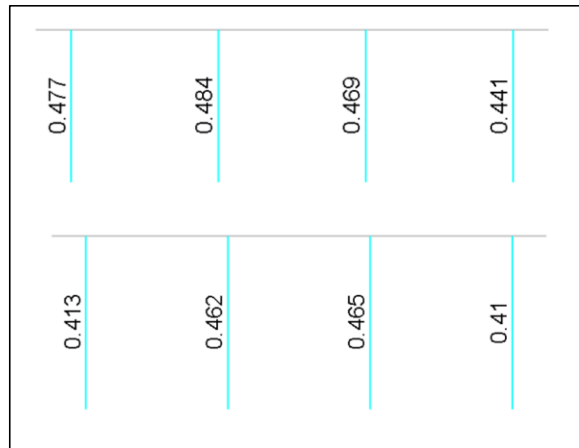
Las demandas para las columnas circulares fueron obtenidas a partir de la raíz de la suma de los cuadrados de sus solicitaciones en las dos direcciones (Bravo, 2021).

$$M_u = \sqrt{(M_{22})^2 + (M_{33})^2} \quad (6)$$

En la figura 11 se muestran estas relaciones demanda/capacidad para las pilas 1 y 2, siendo estos resultados satisfactorios para el análisis del puente puerto real.

Figura 11

Ratios P-M-M, Pilas 1 y 2



Los diagramas de interacción de estas pilas circulares se muestran en la figura 12 y 13.

Figura 12

Diagrama de Interacción Pila 1 – D=90cm

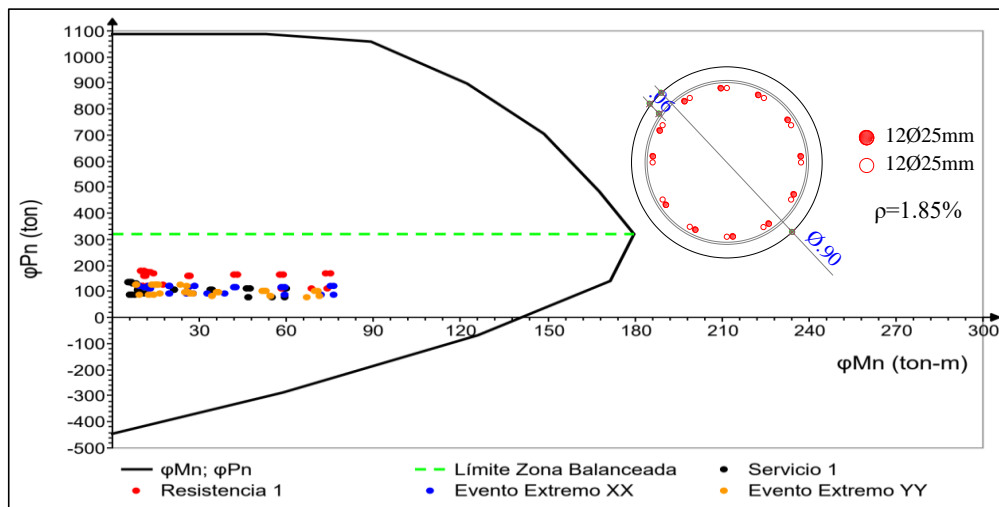
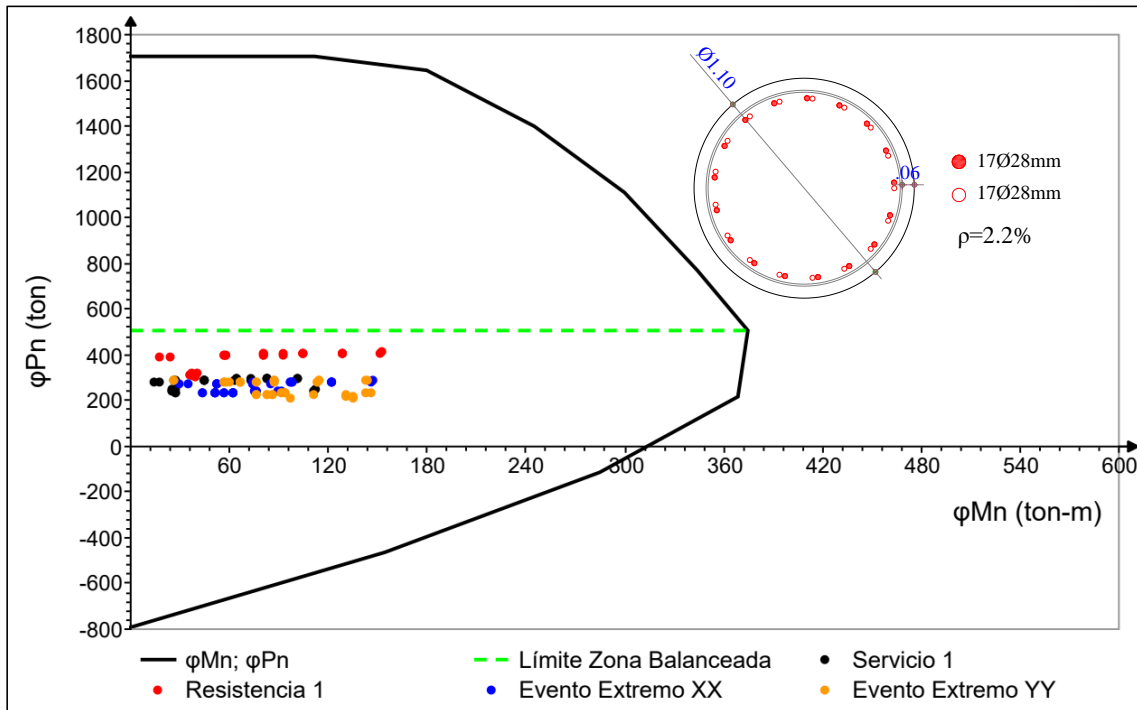


Figura 13

Diagrama de Interacción Pila 2 – D=110cm



Estos diagramas de interacción permitieron verificar el comportamiento a flexo compresión de las columnas de las pilas y los resultados muestran que las demandas están por debajo del punto de balance, demostrando así el comportamiento dúctil de las mismas (Huerta, 2022). Y tal como menciona Quispe, J. (2023) las pilas resultan en ser los principales elementos en disipar la energía en puentes.

Por otra parte, también se verificó el cortante de las columnas de las pilas 1 y 2 para el cortante elástico utilizando $R=1$, de tal manera que se garantiza el confinamiento en la incursión al rango inelástico (Salcedo, 2021). En la tabla 5 se muestran las relaciones demanda/capacidad a cortante de las pilas.

Tabla 5

Relación demanda/capacidad a Cortante - Pilas

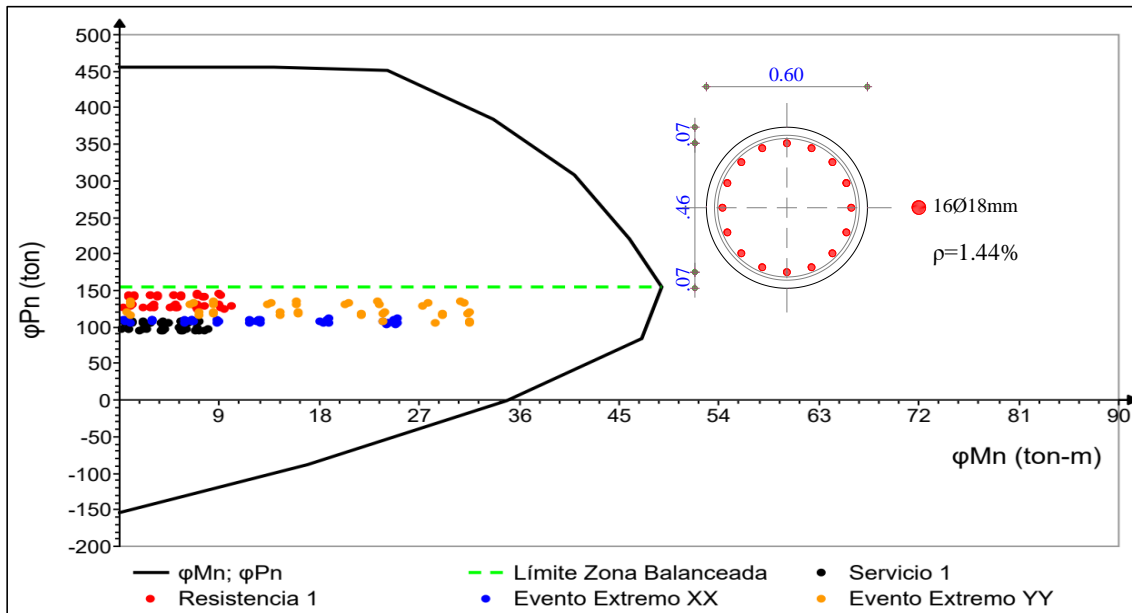
Elemento	Dimensiones	V_u (R=1) (ton)	Zuncho	ϕV_n (ton)	$V_u/\phi V_n$
Pila 1	D=90 cm	41.96	2Ø10 c/10	81.22	0.52
Pila 2	D=110 cm	90.51	2Ø10 c/10	192.82	0.47

Capacidad en pilotes

Los diagramas de interacción de los pilotes 1 y 2 se muestran en la figura 14. Los resultados demuestran un comportamiento satisfactorio.

Figura 14

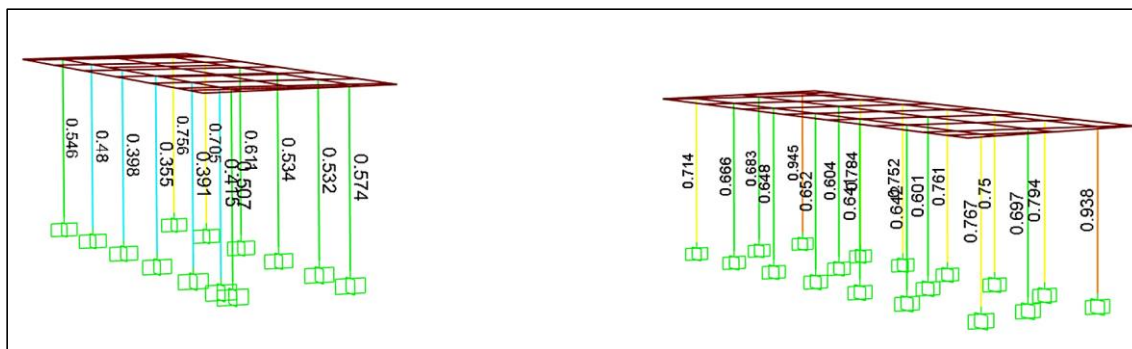
Diagrama de interacción pilote de pila 1 y 2 – D=60cm



Los ratios P-M-M de los pilotes se muestran en la figura 15.

Figura 15

Ratios P-M-M, pilotes de pilas 1 y 2



A su vez se verificó el confinamiento de los pilotes de las pilas 1 y 2, en la tabla 6 se muestran los ratios a cortante de los pilotes.

Tabla 6
Ratios a cortante - pilotes

Elemento	Dimensiones	Vu (R=1) (ton)	Zuncho (cm)	ϕV_n (ton)	$V_u/\phi V_n$
Pilote de Pila 1	D=60 cm	31.02	1Ø10 c/10	25.19	1.23
Pilote de Pila 2	D=60 cm	23.04	1Ø10 c/10	25.19	0.91

Nivel de desempeño sísmico

Se realizó un análisis estático no lineal en el software Sap2000, de acuerdo con el Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency (2005), este procedimiento es un análisis inelástico que permite timar la respuesta de la estructura ante un sismo Blas & Sosa (2019), por otra parte, los niveles de desempeño se obtuvieron de acuerdo con el proyecto europeo RISK-UE (Milutinovic & Trendafiloski, 2003).

Tal como menciona Aguiar (2003), este es uno de los métodos no lineales más prácticos y eficientes para la obtención de niveles de desempeño. Evaluar la capacidad de una estructura ante un sismo es crucial para garantizar las vidas de las personas (Zambrano, 2023).

Se analizó el sentido longitudinal de las pilas (Y-Y) y el sentido transversal (X-X), el análisis de los dos sentidos es crucial tal como lo menciona Vargas (2017), debido a que tienen comportamientos distintos.

Como menciona Pierre & Hidayat (2020), en este tipo de análisis es importante representar la carga sísmica monotónica que hará que la estructura incurriere al rango inelástico y obteniendo un nivel de desempeño para cada elemento.

Los resultados son presentados en las figuras 16, 17, 18 y 19.

Figura 16

Nivel de desempeño pórtico Y-Y (pila 1)

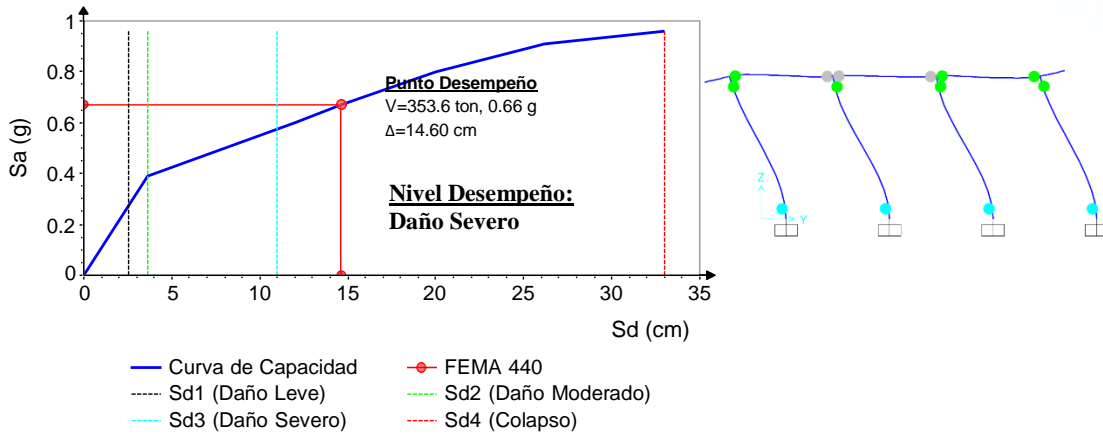


Figura 17

Nivel de desempeño pórtico X-X (pila 1)

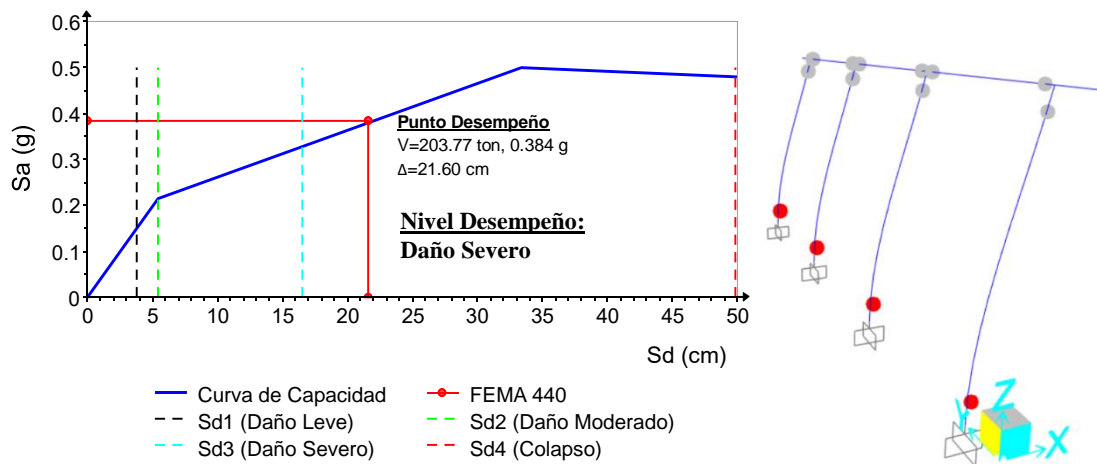


Figura 18

Nivel de desempeño pórtico Y-Y (pila 2)

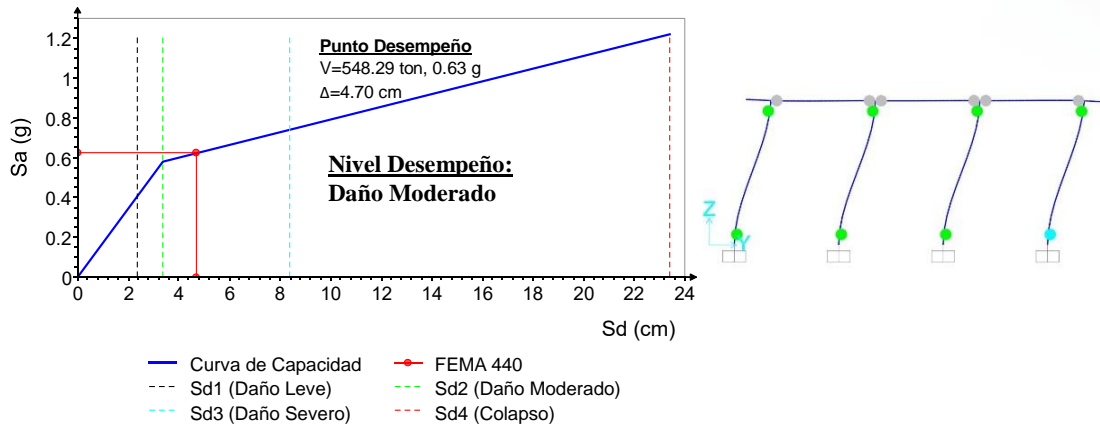
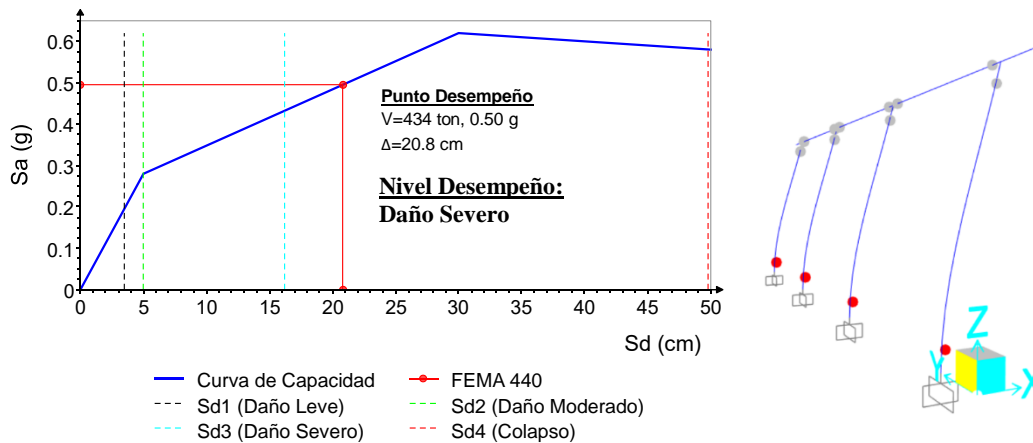


Figura 19

Nivel de desempeño pórtico X-X (pila 2)



3. Conclusiones

- Se determinó los fundamentos teórico-conceptuales de las pilas lo cual permitió el análisis de dicho elemento y obtener resultados consistentes.
- Con la definición de las cargas actuantes se estableció la condición más crítica para cargas gravitatorias considerando los pesos muertos y carga sísmica considerando su efecto como un espectro de aceleración de acuerdo con NEC-15.
- Se elaboró el modelo matemático del puente Puerto Real en el programa CSI Bridge, esto permitió obtener el comportamiento más realista del puente, el Análisis Estructural permitió obtener las máximas demandas para los cabezales, pilas y pilotes, los cabezales trabajan de manera elástica ($R=1$).

- La relación demanda/capacidad crítica a flexión en la viga cabezal 1 y 2 para momento negativo es de 0.72, la relación demanda/capacidad a cortante es 0.41 para la viga cabezal 1 y 0.30 para la viga cabezal 2. Comportamiento satisfactorio.
- Las columnas de las pilas tienen demandas P-M-M por debajo de la zona balanceada lo cual es un indicativo de la ductilidad de estos elementos, de esta forma se verificó que el diseño es satisfactorio.
- La relación demanda/capacidad crítica P-M-M para la pila 1 es de 0.484 y en la pila 2 es de 0.465, la relación demanda/capacidad a cortante crítica es de 0.52 en la pila 1 y 0.47 en la pila 2, esto es un indicativo de que el confinamiento es el adecuado para que las pilas incurrieren al rango inelástico.
- Mientras que los pilotes de la pila 1 tienen una relación demanda/capacidad crítica P-M-M de 0.756 y en los pilotes de la pila 2 es de 0.945, además de una relación demanda/capacidad a cortante de 1.23 para los pilotes de la pila 1 y 0.91 para los pilotes de la pila 2.
- Se realizó el Análisis estático no lineal a ambas pilas y se obtuvo el punto de desempeño bajo la metodología FEMA-440, la pila 1 en sentido longitudinal y en sentido transversal desarrollan un punto de desempeño por encima del Daño Severo (Sd3), para la pila 2 en sentido transversal desarrolla un punto de desempeño por encima del Daño Moderado (Sd2) y en el sentido longitudinal por encima del Daño Severo (Sd3).

4. Conflicto de intereses

El autor declara que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

5. Declaración de contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron significativamente en la elaboración del artículo.

6. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad con fondos propios de los autores

7. Referencias Bibliográficas

American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (2020). *LRFD Bridge Design Specifications* (Novena ed.). <https://aportesingecivil.com/aashto-lrfd-bridge-design-specifications-9th-edition-2020/>

Aguiar Falconi, R. (2003). *Análisis sísmico por desempeño (1ra edición)*. Publisher: Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. Editor: EDIESPE.

https://www.researchgate.net/publication/280627456_Analisis_Sismico_por_De_sempeno

Blas Francia, J. M., & Sosa Altamiza E. P. (2019). *Evaluación del desempeño sísmico bajo el método de análisis estático no lineal pushover, caso Puente Riecito ubicado en el distrito de Bellavista – Piura* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma, Lima, Peru]. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/2634>

Bravo Caba, F. A. (2021). *Desempeño sísmico del Puente Águila Norte ante diferentes niveles de demanda sísmica* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180039>

Chuquipoma Azañero, G. (2020). *Diseño estructural de un puente peatonal en la avenida José Gabriel Condorcanqui sector Wichanza, La Esperanza, 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo, Trujillo, Peru] <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/51285>

Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency. (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA440*. <https://mitigation.eeri.org/wp-content/uploads/fema-440.pdf>

Huerta Guzman, C. R. (2022). *Comparación del desempeño sísmico del puente Quilca sin sistemas de protección sísmica y aplicando sistemas de aislamiento y disipación de energía* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/23160>

Jiménez Ruiz, R. C., & Carreño Loor, J. A. (2023). *Análisis y diseño sismorresistente de una pila tipo pórtico transversal con pilotes hincados mediante CSI Bridge para el puente bypass 3, provincia del Guayas* [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador]. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/6329600>

Lombeida Cuenca, H. A. (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 Sede Quito, Quito, Ecuador]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25260>

Mañueco Navarro, I. A. (2018). *Evaluación de 4 puentes vehiculares tipo viga sobre el río Rimac utilizando el manual de inspección del MTC y software csibridge* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo, Lima, Perú]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/35482>

Milutinovic, Z., & Trendafiloski, G. (2003). *Vulnerability of current buildings. RISK-UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to*

different European towns. Contract No. EVK4-CT-2000-00014.

http://www.civil.ist.utl.pt/~mlopes/conteudos/DamageStates/Risk%20UE%20WP04_Vulnerability.pdf

Moran Macay, A. A. (2023). *Análisis comparativo del comportamiento estructural y del desempeño sísmico de las pilas de puentes continuos entre sistemas conformados por pilas tradicionales tipo pórtico transversal y pilas conformadas por sistemas pilotes columnas* [Tesis de maestría, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador].

<https://www.studocu.com/ec/document/universidad-de-guayaquil/analisis-estructural/pilotes/97609543>

Norma Ecuatoriana de la Construcción [NEC]. (2014). *Peligro sísmico diseño sismo resistente - Código NEC-SE-DS*. <https://online.portoviejo.gov.ec/docs/nec4.pdf>

Peña Jordán, F. A., & Yunapanta Velasteguí, J. L. (2022). *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>

Pierre, A. J., & Hidayat, I. (2020). Seismic performance of reinforced concrete structures with pushover analysis. *IOP Conference Series Earth And Environmental Science*, 426(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012045>

Quispe, J. (2023). *Evaluación del método de análisis Pushover y tiempo - historia en el desempeño sísmico de los pilares del puente Independencia, Puno -*. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/133379/Quispe_QJN-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rodríguez Serquén, A. (2022). *Puentes con AASHTO LRFD 2020* (Novena ed.). <https://aportesingecivil.com/puentes-con-aashto-lrfd-2020-9th-edition-arturo-rodriguez-serquen/>

Salcedo Chahud, C. A. (2021). *Evaluación del comportamiento sísmico del Puente Villena construido en 1967 usando un método basado en el desempeño* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/22733>

Vargas Bejarano, C. I. (2017). *Evaluación del desempeño sísmico de puentes continuos* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9369>

Zambrano de la Cruz, O. (2023). *Vulnerabilidad Sísmica del Puente Malcas-Condebamba-Cajabamba-Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú]. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/5570>

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

