

Envolventes de ruptura obtenidas para un estribo de puente en el Estado de Michoacán

*Luisa N. Equihua-Anguiano¹, J. Miguel López-Zepeda¹, Alain Conrado-Palafox¹
y Jaime Saavedra-Rosales¹*

¹Facultad de Ingeniería Civil, Maestría en Infraestructura del Transporte
en la Rama de las Vías Terrestres, UMSNH

Resumen

En este artículo se presenta el análisis numérico de un estribo para puente, modelado en un programa de Elementos Finitos (FEM). Para su dimensionamiento se usó el software HEC-RAS® con el que se determinaron los niveles de agua y con éstos se definió el gálibo vertical, revisándose las dimensiones propuestas a partir de éste por estabilidad. En el análisis se consideraron las cargas muertas y vivas actuantes, así como los empujes hidrostáticos. Finalmente se llevó a cabo un estudio usando el software RS3® en tres dimensiones (3D), para analizar y obtener envolventes de ruptura que consideren la interacción suelo-estribo así como el empuje del agua. Estas envolventes se usan generalmente en el diseño de cimentaciones Offshore (Equihua-Anguiano, 2008, Andersen y Jostad, 1999 entre otros), sin embargo se analiza su aplicabilidad para puentes en el estudio aquí presentado, encontrándose envolventes definidas y cercanas a las envolventes encontradas para cimentaciones marinas. A partir de los resultados presentados, es posible determinar las cargas máximas verticales y horizontales, así como los

momentos de diseño considerando la interacción suelo-estructura-agua, parámetros que en los métodos tradicionales de diseño de puentes no están considerados integralmente. Los parámetros de suelo usados corresponden a los obtenidos de un estudio geotécnico en la zona de estudio en Michoacán, México.

Palabras clave: estribo puente, elemento finito (FEM), envolventes de ruptura.

Abstract

Yield envelopes for a bridge abutment localized in Michoacan

This paper presents the numerical analysis of a bridge abutment with the goal to obtain yield envelopes to consider the soil -abutment interaction. Yield envelopes are useful in design for offshore foundations; however its applicability in bridges is analyzed in the present study. Vertical gauge of the bridge was designed from the water levels determined with a hydraulic study using HEC-RAS® software. In this way, a pre-dimensioning abutment was proposed which was revised for the general stability. Finally, a numerical study of finite elements (FEM) using the RS3® software in three dimensions (3D) is presented and analyzed under the application of different loads acting on the bridge. The soil parameters correspond to those obtained from a geotechnical study in the study area localized in Michoacán.

Keywords: bridge abutment, finite element (FEM), yield envelopes.

Introducción

Los puentes son una de las estructuras más importantes de las vías terrestres, por lo que un análisis y diseño adecuados son definitivos para evitar la interrupción de la comunicación, debido a eventos meteorológicos o debido a un mal diseño. Bajo este esquema el diseño de un puente debe considerar los efectos generados por las cargas vivas, las cargas muertas y por el efecto de la interacción suelo-estructura entre otros efectos a considerarse en el análisis. Mejorar los métodos actuales de diseño de puentes es primordial entre otras cosas, debido a que en un estudio realizado por la Federal Highway Administration, en 1973, se muestra que 383 puentes fallaron debido a inundaciones y el 75% involucra daños en estribos (Reza-Choudhury y Asnat, 2015) y por otra parte en el estudio realizado por Smith en 1976, se concluye que de las fallas de 143 puentes en el mundo, un 46% de las éstas se debieron a la socavación (Martin-Vide, 2003). Estos estudios, entre muchos otros, son un ejemplo que muestra que es importante el estudio de la interacción del

comportamiento de puentes considerando el efecto del suelo y el efecto del agua. Aunado a lo anterior, en la práctica común los métodos de análisis y diseño de puentes se realiza separadamente: por un lado el comportamiento de la estructura y por el otro el del suelo, así como el efecto del agua, por lo que no hay un método que considere la integración de todas las fuerzas actuantes.

Bajo este contexto en este trabajo se presentan envolventes de ruptura obtenidas a partir de un análisis numérico en Elementos Finitos (FEM) de un estribo de un puente real ubicado en el Estado de Michoacán, considerando la interacción del suelo, la estructura y del empuje del agua. Estas envolventes de ruptura, se aplican en la práctica para el diseño de cimentaciones construidas en aguas profundas Offshore para la explotación de hidrocarburos, permitiendo considerar en el diseño la interacción suelo-estructura. La modelación de la interacción entre el suelo y la estructura en elementos finitos, nos sirve para el diseño de estructuras ante condiciones de carga que no son posibles de visualizar con los métodos actualmente establecidos para el diseño de estribos. La importancia de las envolventes es la de conocer las cargas máximas, así como las combinaciones para las que el suelo presenta la falla, las que permiten encontrar soluciones que nos ayuden a evitarla considerándose la interacción de diversas cargas.

Metodología

En este artículo y en función de la importancia del estudio de los puentes, para caracterizar el estribo en Elementos Finitos (FEM) y en tres dimensiones (3D), se tomó primeramente un proyecto carretero real, el que se incluye en la sección de Características del Proyecto y Caracterización del Puente y en el que se describen los parámetros del suelo y la ubicación de la obra. A partir de la topografía y del trazo geométrico, se realizó un estudio hidráulico con el software Hec-Ras®, con el que se obtuvieron los datos de las elevaciones de la superficie del agua, así como la velocidad del flujo para obtener y dimensionar el gálibo del puente. A partir de estos datos hidráulicos, se realizó el dimensionamiento del estribo para hacer una revisión del mismo por estabilidad, obteniéndose la geometría final que cumpliera con los factores de seguridad (Fs) usados en la práctica común para el diseño de los estribos o muros de contención (Braja, 1999). Finalmente y como objetivo final, se presenta la modelación y el análisis numérico en RS3®, a partir de los que se obtuvieron las envolventes de ruptura que nos permiten determinar la combinación de las cargas horizontales y momentos a las que se puede someter este estribo de

puente y que a la vez representan una ayuda para el diseño de puentes, considerando la interacción suelo-estructura-agua.

Características del proyecto y caracterización del puente

En este trabajo se tomó como base un proyecto carretero para unir el municipio de Tepalcatepec y Apatzingán en el estado de Michoacán. La obra seleccionada fue de la subestructura tipo estribo para el puente vehicular denominado “Chiquihuitillo”, del que se tuvo acceso a los estudios topográficos, hidrológicos y geotécnicos de la zona (Jerónimo-Rodríguez, 2015). La zona de estudio se localiza al suroeste del Estado de Michoacán como se muestra en la Figura 1. Los parámetros geotécnicos utilizados en el estudio numérico se describen en la Tabla 1 y fueron obtenidos de un estudio realizado para el puente especificado (Jerónimo-Rodríguez, 2015). El material denominado “Compactable” en la Tabla 1, corresponde a las características del material producto de las excavaciones realizadas y que se considera será utilizado en la construcción del relleno requerido durante la construcción.



Figura 1. Localización de la zona de estudio.

Para la caracterización del puente se obtuvieron las cargas correspondientes a un puente carretero. Los modelos de cargas vehiculares establecidos en el reglamento para diseño estructural de puentes carreteros de la AASHTO, producen momentos flexionantes y fuerzas cortantes para diseños inferiores a los ocasionados por los grandes vehículos de carga (T3-S3 y T3-S2-R4) que transitan en las vías mexicanas (N-PRY-CAR-6-01-001/01, 2001). Para México el modelo para carreteras

Envoltantes de ruptura obtenidas para un estribo de puente en el Estado de Michoacán

principales se denomina IMT 66.5 (Rascón-Chávez, 2004), que partió de la hipótesis de que el momento flexionante y la fuerza cortante máximos que cada vehículo ocasiona a un puente, depende de las cargas totales de cada grupo de ejes y de la ubicación de sus líneas de acción. Esta hipótesis se comprobó para puentes simplemente apoyados con claros de 15 a 60m. En la Tabla 2 se describe el total de las cargas actuantes en el estribo, las que fueron obtenidas en función de las normas mexicanas y de acuerdo a Soto-Mérida (2003). Con estos parámetros se procedió al diseño de la geometría y al análisis de estabilidad del estribo.

TABLA 1

Parámetros de resistencia cortante y clasificación del suelo.

Tipo de material	Peso específico γ (kN/m ³)	Módulo de corte G (kPa)	Módulo de elasticidad E (kPa)	Relación de Poisson ν	Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción interna ϕ°
Compactable	18	196,133	20,000	0.3	14	30
Cg	20	196,133	490,332	0.25	98	25

*Cg Conglomerado

TABLA 2

Carga vertical total actuante en el puente de estudio

Carga	Magnitudes
Muerta	4,086.62 kN
Viva	1,006.16 kN
Impacto	0.2237
Carga para un estribo	2658.92 kN
Área total de afectación	7 m ²
Total	379.85 N/m ²

Análisis y obtención de los parámetros hidráulicos usando Hec-Ras®

Para obtener los niveles de la superficie de agua y por lo tanto la altura del estribo, se utilizó el software Hec-Ras®. Conforme a la norma N-PRY-CAR-1-06-004/00 se seleccionan dos gastos de diseño el relacionado con el periodo de retorno de 100 años (gasto teórico) y el gasto máximo para un periodo de retorno de 500 años (gastos complementarios). La Tabla 3 presenta las elevaciones de agua que se presentarán de acuerdo al análisis realizado. Con base al Nivel Máximo de Aguas

Envoltantes de ruptura obtenidas para un estribo de puente en el Estado de Michoacán

Extraordinarias (N.A.M.E.), se determinó el gálibo vertical y se añadieron 2.5m de altura máxima después del N.A.M.E., teniendo como resultado la altura del gálibo vertical de 5.8m. En la Figura 2 se presenta el perfil de las elevaciones obtenidas en el software Hec-Ras®.

Tabla 3
Elevaciones de la superficie de agua para cada Tasa de retorno (Tr).

Tr	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Superficie del agua (m)	Nivel agua máxima extraordinarias en campo (m)
Tr 100	146.40	2.18	245.70	245.739
Tr 500	263.80	1.89	247.86	

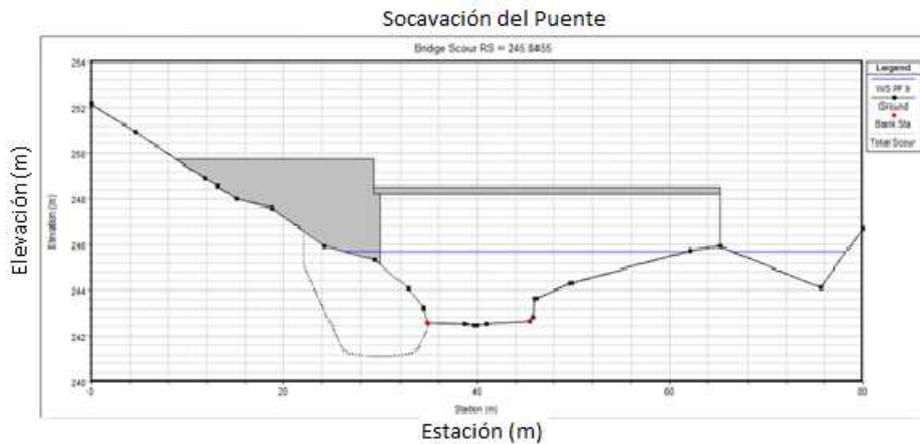


Figura 2. Determinación del gálibo vertical del puente con Tr=100 años en Hec-Ras®.

En la parte lateral del estribo a medida que se incrementa el tirante, el agua ejerce un empuje hidrostático, por lo que es preciso calcularlo para conocer su influencia sobre el estribo. El cálculo se hizo de acuerdo a la Norma N-PRY-CAR-6-01-003-01 y se muestra en la Tabla 4. Estos valores son los aplicados en RS3® como las fuerzas hidrostáticas actuantes en el cuerpo del estribo.

TABLA 4
Cálculo del empuje hidrostático E.

$y_1 = h$ (m)	γ_w (kN/m ³)	base (m)	Inclinación $2\text{sen}(\theta)$	E (kN)
0.42	9.81	10	1.99	8.70
0.67	9.81	10	1.99	22.12
1.11	9.81	10	1.99	60.66
1.46	9.81	10	1.99	104.92
1.78	9.81	10	1.99	156.82
2.42	9.81	10	1.99	223.18

Geometría y diseño del estribo

Como parte de la subestructura se supone un estribo tipo voladizo de concreto reforzado. Para realizar el dimensionamiento del cuerpo del estribo se inició el pre-diseño de acuerdo a las dimensiones mínimas sugeridas (Soto-Mérida, 2003). En la Figura 3a se describen los dimensionamientos mínimos de acuerdo al AASTHO LFRD-2010 y en la Figura 3b se describe el dimensionamiento del estribo. La altura del estribo se seleccionó con base a la cota del terreno considerando una socavación para un $Tr=100$ (241.12m) y la cota superior del gálibo vertical (248.24m), seleccionándose una altura de 8.35m.

Los factores de seguridad (F_s) obtenidos para el diseño de estabilidad del estribo de acuerdo a Braja (1999) son los siguientes: Factor de seguridad contra volteo ($F_{s\text{volteo}}$) de acuerdo a la ecuación (1), Factor de seguridad contra deslizamiento ($F_{s\text{deslizamiento}}$) de acuerdo a la ecuación (2), y el Factor de seguridad de capacidad de carga ($F_{s\text{capacidad de carga}}$) de acuerdo a la ecuación (3).

$$F_{s\text{volteo}} = \frac{M_r}{M_o} = \frac{1258.17 \text{ kN}\cdot\text{m}}{526.40 \text{ kN}\cdot\text{m}} = 2.39 > 2 \quad (1)$$

$$F_{s\text{deslizamiento}} = \frac{\Sigma F_{Rl}}{\Sigma F_d} = 9.56 > 1.53 \quad (2)$$

$$F_{s\text{capacidad de carga}} = \frac{q_u}{q_{\text{punta}}} = \frac{2,501.73}{28.63} = 87.38 > 3 \quad (3)$$

En donde M_r es el momento resistente de la estructura, M_o es el momento actuante, ΣF_{Rl} es la sumatoria de las fuerzas horizontales resistentes, ΣF_d es la sumatoria de

las fuerzas horizontales de empuje, q_u es la capacidad de carga última del suelo y el q_{punta} es la capacidad de talón.

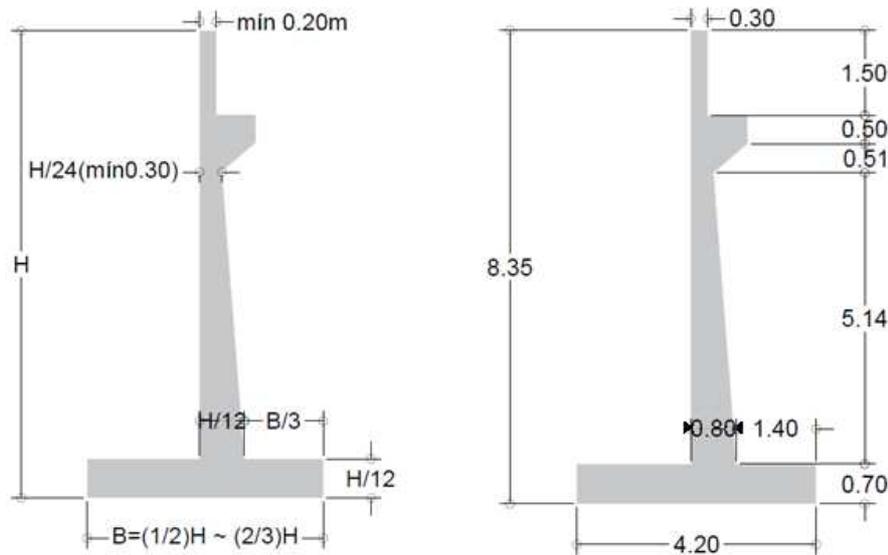


Figura 3. Dimensionamientos del estribo en voladizo. a) Dimensionamiento mínimo por AASHTO LFRD-2010. b) Dimensionamiento del estribo para este diseño y la división geométrica de las áreas del estribo.

El diseño obtenido es adecuado por los tres análisis de estabilidad realizados, por lo que el muro es capaz de resistir la presión vertical a la que estará sometida.

Modelación numérica en RS3®

Los parámetros anteriores son los usados para la modelación en elementos finitos (FEM) del estribo en 3D, en la que se realizó un modelo simplificado, debido a los problemas de convergencia matemática que puede generar un modelo más complejo. El suelo se simuló considerando el modelo constitutivo elasto-plástico perfecto de Mohr-Coulomb con los parámetros de la Tabla 1, mientras que el estribo se modeló usando “liners”, que son elementos de soporte bidimensional para definir concreto reforzado. Las propiedades que se le asignaron al estribo son las presentadas en la Tabla 5. Se colocaron 2 tipos de “liners” uno para definir el contorno del estribo y el otro para definir el relleno del mismo.

TABLA 5
Propiedades del estribo (liners RS3®)

Estribo	Módulo de elasticidad E (kPa)	Relación de Poisson ν	Espesor (m)	Tipo de material
Contorno	300,000,000	0.2	0.1	Elástico
Dentro	300,000,000	0.2	0.1	Elástico

Se restringieron los movimientos en los extremos del terreno o del modelo en las direcciones $-x$, $-y$ y $-z$, simulando así el confinamiento del mismo. Las paredes frontal y trasera del relleno se restringieron el eje z - y se realizó la discretización del continuo resultando con un total de 300 elementos finitos.

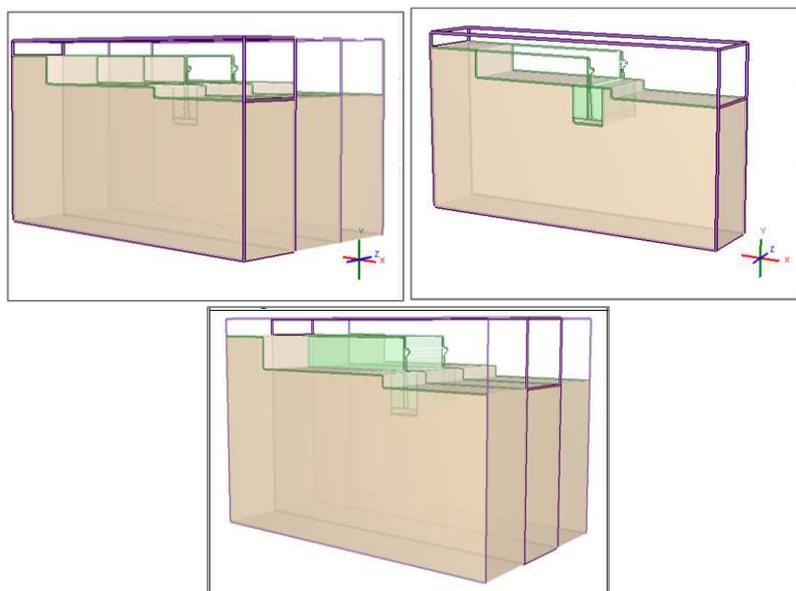


Figura 4. Primeras etapas de la modelación numérica del estribo. a) Etapa 1 “in situ”.
b) Etapa 2 Colocación del estribo. c) Etapa 3 Relleno del estribo.

La modelación numérica se llevó a cabo en varias etapas, las tres primeras corresponden al estado “*in situ*” del suelo; después se simuló el proceso de colocación del estribo y la colocación del relleno (terraplén), las que están representadas en la Figura 4. En la figura 4a se ilustra la sección tridimensional modelada en RS3® del terreno natural (*in situ*), en la figura 4b se considera el

Envolventes de ruptura obtenidas para un estribo de puente en el Estado de Michoacán

estribo con un relleno parcial considerado hasta la profundidad de desplante y en la figura 4c, se observa el relleno en la parte trasera del estribo, el cual servirá para darle continuidad al eje del camino. El terreno se simuló para obtener resultados en términos de esfuerzos efectivos.

Posterior a estas tres etapas, se generó el proceso de la aplicación de las diferentes cargas actuantes considerándose tres: Carga Vertical, Momento y Empuje Hidrostático actuando sobre la estructura y de acuerdo a lo establecido en la Figura 5. A partir de estas tres cargas simuladas, se obtuvieron inicialmente los valores máximos que soporta el estribo. Posteriormente se aplicaron diferentes combinaciones de cargas para generar las envolventes de ruptura, las que son el objetivo final de este artículo.

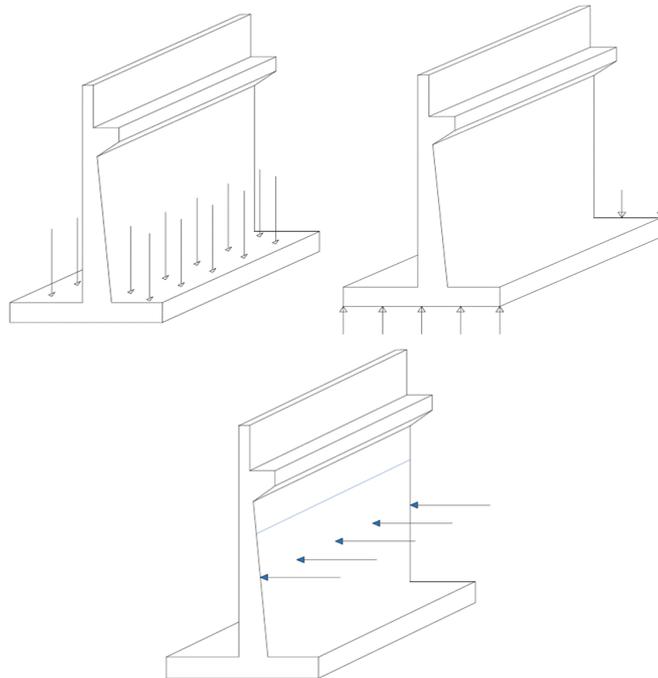


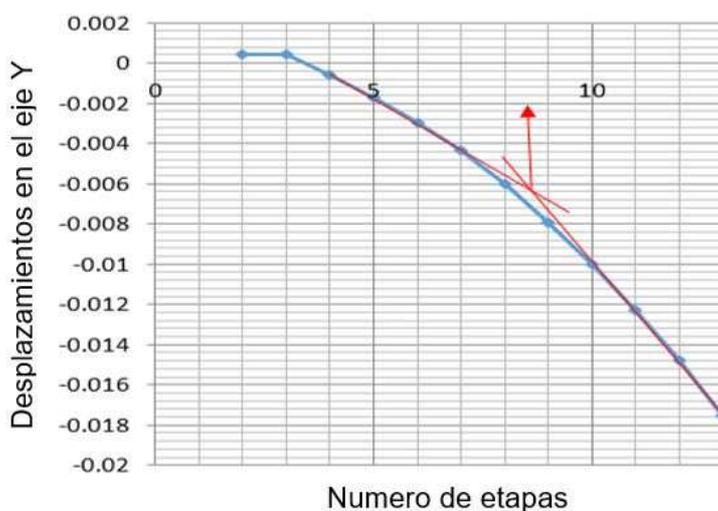
Figura 5. Aplicación de carga vertical, momento y empuje en el estribo.
a) Vertical (V), b) Momento (M), c) Empuje (H)

Las tres cargas básicamente consideradas representan: (Figura 5a) Cargas verticales debidas a las cargas vivas y muertas, (Figura 5c) los empujes horizontales correspondientes al empuje del agua y (Figura 5b) los momentos por las acciones

de volteo del empuje del agua en el sentido transversal y por el efecto de las cargas dinámicas efecto de la dirección del flujo de agua entre otras.

Envolventes de ruptura para diseño

Para obtener las envolventes de ruptura se obtuvieron numéricamente en primera instancia la carga vertical máxima (V), el momento máximo (M) y el empuje hidrostático máximo (E) que soporta el estribo. Para obtener las cargas máximas, a partir de las tres etapas previas del modelo, en cada etapa se fue incrementando la carga tomando como valor de partida los valores de la carga muerta y la carga viva calculadas en la primera parte del estudio (Tabla 2); y se fueron incrementando hasta 8 etapas más para obtener los valores máximos resistentes.



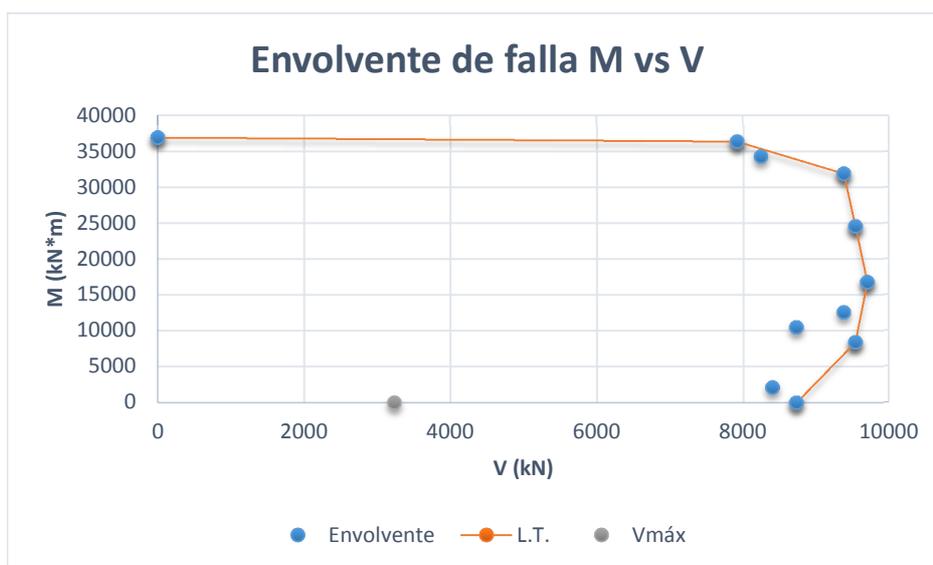
Gráfica 1. Obtención de la carga de falla en las diferentes etapas de modelado.

El criterio de falla adoptado en este artículo fue de acuerdo a un análisis de desplazamientos verticales contra las etapas modeladas (ver Gráfica 1), donde la curva representa el comportamiento del estribo en el suelo al actuar las cargas y la falla se consideró en la intersección del cambio de pendientes de la curva, considerándose este punto la carga máxima permitida para el estribo. Este criterio también se tomó debido a que además la variación en las pendientes de las curvas representa un cambio en el comportamiento del suelo delimitando el efecto de la interacción de las cargas con el estribo. Este criterio se aplicó para todas las

combinaciones de carga simuladas, así como para la obtención de las cargas máximas.

Envolventes de ruptura

El procedimiento para obtener la envolvente de ruptura Momento vs Carga Vertical (Gráfica 2), se definió a partir de la obtención de la carga vertical máxima (V) que corresponde al punto máximo en el eje -x y de igual forma se obtuvo el momento máximo (M) soportado por el estribo, el que está graficado en el eje de las -y. Las cargas máximas se obtuvieron de acuerdo al criterio de falla descrito anteriormente. Posteriormente se aplicaron combinaciones de cargas verticales con momentos obteniéndose los diferentes puntos que se presentan en la Gráfica 2 y considerando el criterio de ruptura definido en la Gráfica 1 para cada punto obtenido. Estos puntos permitieron proponer y delimitar la superficie de ruptura objeto de este estudio.



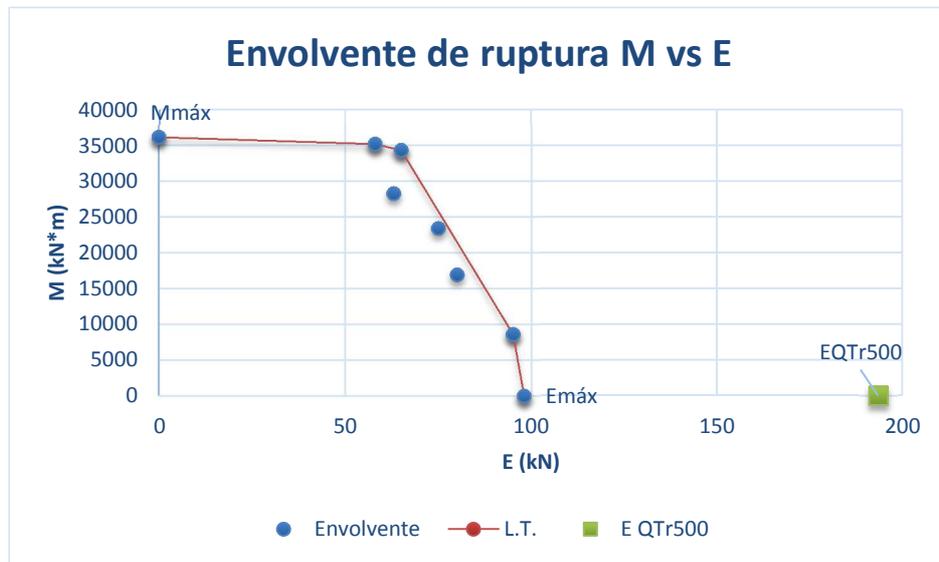
Gráfica 2. Envolvente de falla Momento (M) vs. Carga Vertical (V).

En la envolvente de ruptura resultante se puede observar el punto, el cual representa la carga vertical ($V_{máx}$) de diseño (Tabla 2). El punto $V_{máx}$ está dentro de la combinación de puntos (Envolverte) que creó la línea de tendencia (L.T.) de esta envolvente, con lo que se concluye que el estribo resistirá la acción combinada de carga viva más la carga muerta obtenida. En la envolvente se observan de igual

Envoltentes de ruptura obtenidas para un estribo de puente en el Estado de Michoacán

manera el momento máximo y la carga vertical máxima a la que puede estar sometido este estribo. Se puede observar igualmente que al incrementar el momento hasta la mitad del $M_{m\acute{a}x} = 36960 \text{ kN}\cdot\text{m}$, la carga vertical aumenta con respecto a la $V_{m\acute{a}x}$, es decir hasta este punto el momento le da más estabilidad al estribo ante la acción de una carga vertical.

En la Gráfica 3, se observa la envolvente resultante al aplicar el momento, M (momento es constante en cada simulación) y el empuje hidrostático, E (Tabla 4) a un costado del estribo. El empuje que resiste la envolvente de ruptura es menor al empuje que se presentará para un empuje hidrostático con Tr 500 años (Punto E QTr500). Es decir, el estribo soporta aproximadamente la mitad del empuje que se produce en ese periodo de retorno considerando la interacción suelo-estructura. Al incrementarse el momento de volteo, disminuye la resistencia al empuje hidrostático. Cabe recalcar que no se realizó el gasto con Tr 100 años debido a que el nivel de agua para ese periodo de retorno en la zona no alcanza a impactar en el estribo.



Gráfica 3. Envoltente de falla Momento (M) vs. Empuje hidrostático (E).

Conclusiones

La resistencia del suelo ante cargas verticales (cargas muertas y vivas actuantes) obtenidas para un diseño ordinario y de acuerdo a la normativa actual que actúan en el estribo, es aceptable debido a que cae dentro de las envolventes de ruptura.

La geometría obtenida de las envolventes que involucran cargas verticales y momentos, es parecida a la que se encuentra en la literatura especializada para los diseños de cimentaciones Offshore (Equihua-Anguiano, 2008, Andersen y Jostad, 1999 entre otros), lo que permite concluir que es factible llevar a cabo más estudios y establecer una ecuación que permita generalizar una envolvente de diseño para puentes. Este resultado es alentador, considerando que la aplicación del concepto inicial (cimentaciones offshore), corresponde a desempeños de estructuras diferentes a los de estribos de puentes, por el tipo de cargas a las que se ven sometidas cada tipo de estructura.

En los empujes hidrostáticos que se presentan al tener los niveles máximos de niveles de agua para las diferentes tasas de retorno, los empujes salen de su respectiva envolvente, con lo que se concluye que el suelo falló en esas condiciones. Para solventar el resultado obtenido se debe cambiar el diseño del estribo, a un estribo con contrafuertes como una alternativa, para que la estructura resista el empuje hidrostático actuante.

Las envolventes que resultaron de la modelación de empuje hidrostático tienen una forma aproximadamente rectangular, lo que implica que aunque el empuje hidrostático se ve incrementado o disminuido en una proporción baja y manteniendo un valor muy parecido entre sí, el incremento del momento es significativamente alto. En otras palabras, para empujes hidrostáticos con variaciones pequeñas se genera un momento grande que impacta la estabilidad del estribo.

Con base a las conclusiones previas se presenta la posibilidad de usar esta metodología para el diseño de estribos de puentes, con la que es posible determinar las cargas horizontales y momentos máximos a los que puede estar sometido el estribo debido a la combinación del efecto suelo-estructura con el empuje hidrostático.

Finalmente, es necesario realizar más estudios que permitan uniformar resultados para emitir conclusiones definitivas para el caso del diseño de puentes.

Referencias

- Andersen, K. H., and Jostad, H. P. (1999). "Foundation design of skirted foundations and anchors in clay." Offshore Technology Conf., Society OTC, Houston, 10824.
- ASSTHO (2010), ASSTHO LRFD Bridge Design, Specifications, 7th Edition, U.S.
- Braja M. D. (1999). "Principios de ingeniería de cimentaciones". Traducción del libro Principles of Foundation Engineering, 4th, PWS Publishing © 1999 ISBN 0-534-95-403-0.
- Equihua-Anguiano, L. N. (2008). "Modélisation des ancrages de structures offshore flottantes dans les grands fonds marines." Ph.D. thesis, INPGrenoble, Grenoble, France.
- Hec-Ras, (2010). "Hydrologyc Engineering Center-River Analysis System User's" Manual Version 4.1.
- Jerónimo-Rodríguez, F. de J. (2015). "Informe del estudio geotécnico conclusiones y recomendaciones generales". Puente vehicular Chiquihuitillo, Michoacán.
- N-PRY-CAR-1-06-004/00 (2000). "Análisis Hidrológicos", Normativa para la infraestructura del Transporte, NIT, SCT.
- N-PRY-CAR-6-01-001/01 (2001), Proyecto, Carreteras, Proyectos de Nuevos Puentes y Estructuras Similares, Normativa para la infraestructura del Transporte, NIT-SCT.
- Martin-Vide, J. P. (2006). "Ingeniería de Ríos". 2^{da} Edición. Ediciones UPC, S. L. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Ráscon-Chavéz, O. A. (2004). "Formulación de la Norma SCT de cargas vehiculares para diseño estructural de puentes carreteros", Publicación Técnica No. 243 Sanfandila, Querétaro.
- Reza-Choudhury, J., y Hasnat, A. (2015). "Bridge Collapse around the world: Causes and Mechanisms", LABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering III, August 21-22, 2015, Dhaka, Bangladesh, ISBN 978-984-33-9313-5
- RS3 ® (2013-2015). Version 1.017 64-bit, Copyright © Rocscience Inc., Toronto, Ontario Canada.
- Soto-Mérida, K. (2003). "Tesis criterio de análisis y diseño de un estribo de concreto armado. Apuntes para clase de puentes". México.