

Comportamiento de un puente histórico de arco de albañilería ante cargas dinámicas

The behaviour of a historic masonry arch bridge regarding dynamic loads

Yesid Mauricio Ospina¹, Jairo Andrés Paredes López² y Jorge Galindo Díaz³

RESUMEN

En el presente artículo se describe el proceso de análisis al que fue sometido un puente histórico de arco de ladrillo construido en Colombia durante el siglo XVIII con el fin de predecir su comportamiento ante cargas producidas por sismos y determinar su vulnerabilidad. Dos estudios previos al análisis sísmico fueron realizados para obtener así información básica acerca del comportamiento global de la estructura: un análisis estático lineal y un análisis modal, ambos a partir de un modelo tridimensional que se elaboró haciendo uso del método de elementos finitos. Se simuló la excitación sísmica bajo las condiciones propuestas en la norma sismorresistente del año 1998 (NSR-98). Los resultados obtenidos fueron coherentes con la historia del puente y sus respuestas frente a terremotos; la comparación entre las cargas sísmicas y la capacidad resistente de los materiales que constituyen la estructura confirma la vulnerabilidad de este tipo de edificios frente a daños localizados y posibilidades de colapso. Finalmente, los resultados sugieren la aplicabilidad del procedimiento desarrollado a otras estructuras históricas en Colombia.

Palabras clave: puentes históricos, análisis dinámico, análisis sísmico.

ABSTRACT

This article describes the analysis of a historic brick arch bridge constructed in Colombia during the 18th century for predicting its behavior in response to loads produced by seismic activity and determining its vulnerability. Two studies were carried out prior to the seismic analysis to obtain basic information regarding the structure's overall behavior (modal analysis and linear static analysis), both stemming from a three-dimensional model constructed by the finite elements method. Seismic excitation was simulated in the conditions proposed by 1998 Colombian seismic-resistant norms (NSR-98). The results obtained agreed with the bridge's history and with its response to earthquakes; the comparison between seismic loads and the resistance capacity of the materials constituting the structure confirms the vulnerability of these types of constructions regarding localised damage and the possibility of collapse. The results suggest that this procedure can be applied to other historic structures in Colombia.

Keywords: historical bridge, dynamic analysis, seismic analysis.

Recibido: octubre 8 de 2008

Aceptado: noviembre 2 de 2009

Introducción

La preservación, reparación y mantenimiento de edificaciones históricas son acciones que exigen cada vez más una mayor comprensión acerca del comportamiento de este tipo de estructuras. Y a pesar de que el análisis y la predicción de su respuesta mecánica o dinámica no deberían ser diferentes de aquél que se realiza sobre otro tipo de construcciones (Augusti *et al.*, 2001), son varios los aspectos que en estos casos deben tenerse en cuenta: cada edificación histórica es una construcción única en cuanto a su configuración geométrica, sus materiales constitutivos y, por supuesto, en su contexto histórico, constituyendo un modelo que en realidad no puede ser conocido con exactitud sino (y en el mejor de los casos) a través de sofisticados procesos matemáticos de simulación.

Por lo general, es necesario llevar a cabo un conjunto de pruebas experimentales acerca de los materiales de construcción emplea-

dos en estructuras históricas como paso previo a su análisis estructural de tipo numérico (Galindo *et al.*, 2008), el que además llega a ser demasiado complejo para ser interpretado por modelos mecánicos simples ya que el análisis estructural en su forma global es sustancialmente diferente de aquellos hechos sobre estructuras modernas elaboradas básicamente en sistemas de armazones y pórticos (Le Pape *et al.*, 2001). Adicional a ello, es una tarea difícil la de evaluar cuantitativamente y con certeza la resistencia real de la estructura puesto que no siempre es fácil tomar un número representativo de muestras de esos mismos materiales constitutivos (Betti y Vignoli, 2007a y 2007b; Paredes *et al.*, 2007).

En este artículo, a partir de un caso de estudio, se pretende comprender el proceso de modelación y análisis lineal de un puente de arco de ladrillo sometido a cargas sísmicas tomando como referencia las condiciones propias de un lugar en Colombia. Como paso previo se hace un reconocimiento del contexto histórico de la construcción del edificio y se describen las características dimensionales de la estructura, así como su estado de conservación.

¹ Ingeniero civil y M.Sc., en Automatización, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. ymospinad@unal.edu.co

² Ingeniero civil, Universidad del Cauca, Colombia. M.Sc., en Geotecnia, Universidad de los Andes, Colombia. Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. japaredesl@unal.edu.co

³ Arquitecto, Universidad del Valle, Colombia. Doctor Arquitecto, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, España. Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. jagalindod@unal.edu.co

El análisis previo comprende dos modalidades: un análisis estático lineal y un análisis modal. Posteriormente, se desarrolla el análisis sísmico lineal, cuyos resultados son objeto de discusión final, previos a las conclusiones.

Objeto de estudio

La región geográfica del Alto Cauca se ubica en el suroccidente del actual territorio de Colombia, siendo Popayán su principal ciudad (230 mil habitantes), y se caracteriza, entre otras cosas, por tener una intensa actividad sísmica: el más reciente temblor tuvo lugar en 1983, con una magnitud de 5.5 grados en la escala de Richter, que produjo daños materiales cuantiosos y pérdida de vidas humanas (Fuenzalida, Taboada y Dimaté, 1998).

El puente de arco de ladrillo, que aquí se estudia, cruza el río Cauca a la altura de la ciudad de Popayán: tiene 153 m de longitud y cuenta con un arco principal de medio punto de 19,06 m de diámetro. Consta además de 3 arcos de nivelación, también de medio punto, que dan la pendiente por el lado norte, mientras que por el lado sur el arco principal se apoya directamente sobre un estribo de roca natural que se encuentra empotrado verticalmente en el suelo (Figura 1).



Figura 1. Arco principal del puente de arco de ladrillo en Popayán, Colombia (1769-1775)

La estructura tiene 5,84 m de ancho constante en toda su longitud; es enteramente de ladrillo de arcilla macizo unido con mortero de cal, aunque bajo el arco principal se aprecian hiladas de piedra labrada, un material de construcción que en ocasiones aparece también en los tímpanos del puente y en las claves de las bóvedas. Un único tajamar con planta en forma de diamante se encuentra bajo el extremo norte del arco principal y también está enteramente construido en ladrillo.

Los trabajos de construcción del puente se iniciaron en 1769. Durante la primera fase de las obras la estructura colapsó en el momento de cerrar uno de los arcos de ladrillo por falta de dirección técnica; sin embargo, el puente fue terminado probablemente en 1775. Ya en servicio y durante décadas, la estructura fue siempre apreciada como una de las mejores de la región y del país, hasta cuando el terremoto de 1827, con una magnitud estimada mayor a 7 (Fuenzalida *et al.*, 1998), causó severos daños en el arco principal, a tal punto de dejarlo inutilizado. Se tiene constancia de que al menos en 2 ocasiones obreros locales intentaron su reconstrucción pero sin resultado satisfactorio, puesto que en ambos casos, al retirar las cerchas de madera colocadas bajo la bóveda, los materiales cayeron y fueron arrastrados por el río. Solo en 1840 llegaría al país el ingeniero polaco Estanislao Zawadsky, quien dirigió los trabajos definitivos de reconstrucción del puente.

Una inspección visual realizada en 2006 permitió verificar que el sistema estructural original del puente no ha sido alterado por intervenciones recientes menores, con la sola excepción de la restitución de la superficie de rodamiento, hecha en asfalto. Un revoque de la mampostería hecho con mortero de cemento tipo Portland en la primera mitad del siglo XX se encuentra en mal estado y sólo se mantiene en la parte superior de los tímpanos del puente. En la parte baja de las bóvedas se evidencia un acelerado proceso de degradación de los ladrillos por meteorización del material arcilloso a causa de la exposición prolongada a la humedad ambiental y a la presencia de vegetación propia de las regiones tropicales que contribuye a la concentración de diversos organismos vivos sobre las superficies del puente.

La macroestructura está todavía en servicio para el tráfico vehicular de hasta 5 Tn de peso; sin embargo, es necesario hacer labores de mantenimiento y reemplazar las piezas cerámicas que han desaparecido, haciendo uso de nuevos materiales que posean características físico-mecánicas similares a los que se emplearon en su construcción.

Análisis estructural

Dos estudios previos al análisis sísmico fueron realizados con el fin de obtener información básica acerca del comportamiento global y del comportamiento dinámico fundamental del puente: el primero, un análisis estático lineal; el segundo, un análisis modal. En esta investigación se asumió que el material de mampostería presentaba un comportamiento elástico en virtud de la baja magnitud de los esfuerzos generados en la estructura.

Análisis estático lineal

Se hizo un modelo en 3D de acuerdo a la geometría del puente, empleando el software ANSYS v.8. (ANSYS, 1992). En el análisis sólo se consideró el valor de la carga muerta y se establecieron las siguientes condiciones de frontera: (a) en las caras verticales de los extremos del eje principal se apreció que los desplazamientos eran nulos en la dirección del eje principal por confinamiento longitudinal; (b) el desplazamiento a lo largo de la dirección transversal respecto al eje principal del puente era igual a cero, y (c) existía libertad de desplazamiento sobre el eje vertical del puente. En sus apoyos inferiores todos los desplazamientos fueron restringidos. Para los elementos de mampostería se adoptó igualmente la hipótesis de comportamiento lineal con propiedades homogéneas, es decir, se modeló como un continuo isótropo

Considerando el valor de la aceleración de la gravedad igual a 10 m/s^2 , los datos se ingresaron en unidades consistentes de SI (peso unitario de los materiales expresado en kN/m^3 , esfuerzos resultantes dados en kN/m^2 y fuerzas en kN). Para la modelización numérica se usaron dos tipos de materiales, uno por cada parte estructural que compone el puente: mampostería de ladrillo de arcilla y cal para los arcos y los muros de soporte, y tierra natural mezclada con cascajo para el relleno, siguiendo de esta forma el análisis hecho en estructuras similares (Paredes *et al.*, 2007). Los valores de las propiedades físicas del material de mampostería han sido precisados por pruebas hechas *in situ* que se encuentran explicadas con detalle en (Galindo *et al.*, 2008). Para los arcos y los tímpanos: módulo de Young (**E**) igual a 2.150,7 MPa, módulo de Poisson (ν) igual a 0,25 y peso unitario (γ) igual a $17,1 \text{ kN/m}^3$. Para el material de relleno: módulo de Young (**E**) igual a 8.500 kPa y módulo de Poisson (ν) igual a 0,33.

Los resultados principales del análisis del estado estático del puente dejan ver un predominio de esfuerzos de compresión cuyo va-

lor máximo es próximo a los 160,5 kPa situados a lo largo de toda su zona superior (Figura 2). En el área inferior del puente su valor a compresión alcanza valores cercanos a 1.300 kPa. Fenómenos de tensión se presentan en los arcos con magnitudes aproximadas a los 422 kPa. Como se aprecia en la Figura 3, a lo largo del eje longitudinal (eje X) se observa una distribución de esfuerzos con cierto grado de uniformidad: el área comprendida entre los arcos tiene un comportamiento a tensión con un valor de 30 kPa aproximadamente, mientras en esas mismas áreas y en su parte baja hay fenómenos de compresión con valores cercanos a 500 kPa. En el eje transversal del puente (eje Y) hay predominio de esfuerzos de compresión que oscilan entre 200 kPa y 400 kPa, llegando a valores cercanos a los 750 kPa bajo las bóvedas. Pequeños fenómenos de compresión se evidencian en la parte lateral del puente con valores situados entre 360–640 kPa (Figura 4).

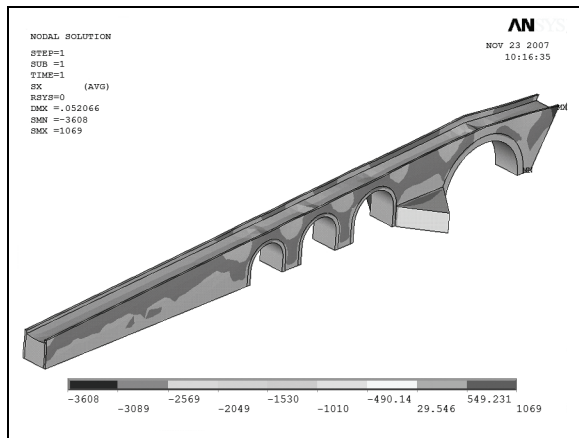


Figura 2. Esfuerzos en dirección del eje X en el puente de Popayán

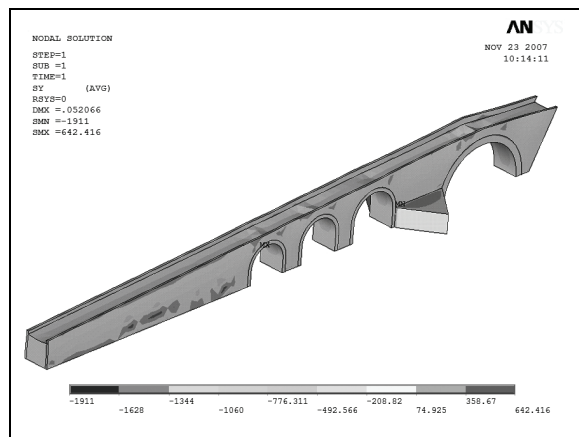


Figura 3. Esfuerzos en dirección del eje Y en el puente de Popayán

Finalmente, los mayores desplazamientos del puente, a causa de su peso, se encuentran en dirección vertical (eje Z), alcanzando un valor de 5,20 cm, situado en la zona de la bóveda principal. Los desplazamientos en los centros de las bóvedas restantes son de 2,8 cm aproximadamente (Figura 5).

Todos estos resultados están acordes al concepto de *pasividad* asociada al análisis de construcciones históricas: sistemas que frente al efecto causado por fuerzas externas a ellas contraponen la idea de masividad y solidez como garantía de seguridad, mientras que presentan diversos grados de incapacidad para adaptarse a cambios dinámicos externos.

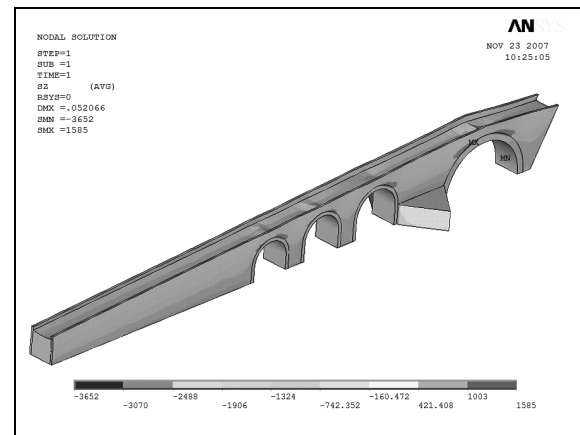


Figura 4. Esfuerzos en dirección del eje Z en el puente de Popayán

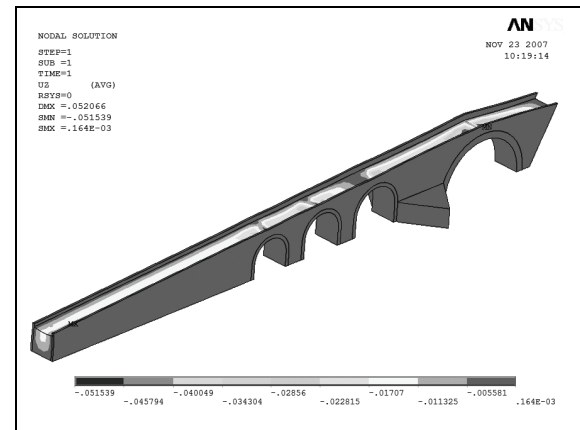


Figura 5. Desplazamientos en dirección del eje Z en el puente de Popayán.

Análisis modal

El método más conocido para representar modelos estructurales bajo incidencias dinámicas es el modelo estructural de segundo orden, basado en ecuaciones diferenciales lineales, y cuyo planteamiento depende de la elección de las coordenadas (Gawronski, 2004). El análisis modal de sistemas mecánicos o estructurales lineales tiene las siguientes características (Hatch, 2001): (a) identifica las frecuencias resonantes y las formas modales, lo cual es útil por sí mismo en el entendimiento de la dinámica de la estructura básica, (b) permite la solución de n ecuaciones desacopladas en lugar de resolver n ecuaciones acopladas que describen la dinámica del sistema, y (c) calcula la contribución de cada forma modal a la respuesta local.

Para el caso de estudio que aquí se desarrolla, la Tabla 1 recoge los modos de vibración del puente sobre el río Cauca en la ciudad de Popayán, que fueron analizados.

A su vez, las frecuencias y formas modales del puente sobre el río Cauca en Popayán, son presentadas en las figuras 6, 7, 8 y 9. Las 2 primeras formas modales (figuras 6 y 7) involucran translación en la dirección del eje Z en los elementos del extremo izquierdo del puente. Una creciente bifurcación en la deformación se muestra en la 2ª, 4ª, 5ª y 8ª forma modal, con contribuciones modales similares al primer modo. La 3ª forma modal (Figura 8) es un modo netamente translacional en la dirección transversal del puente, con concentración en el área anterior del arco principal. La 7ª y 9ª forma modal presentan notorias contribuciones modales en el arco central. La 10ª forma modal (Figura 9) es una combinación de e-

fectos transversales y longitudinales con una concentración ubicada en el área circundante al arco principal.

Tabla 1: Listado de los modos de vibración del puente sobre el río Cauca

Modo de vibración No.	Frecuencia modal (Hz)	Periodo (seg)
1	1,8389	0,543803361
2	2,127	0,470145745
3	2,2482	0,444800285
4	2,3641	0,422993951
5	3,5769	0,388063177
6	2,7362	0,36547036
7	2,8457	0,351407387
8	2,8709	0,348322826
9	2,9168	0,34284147
10	3,1382	0,318654005

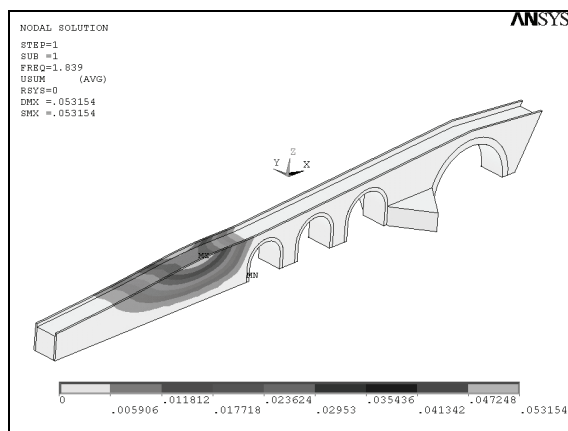


Figura 6. Primer modo de vibración (F1=1,839 Hz) del puente de Popayán

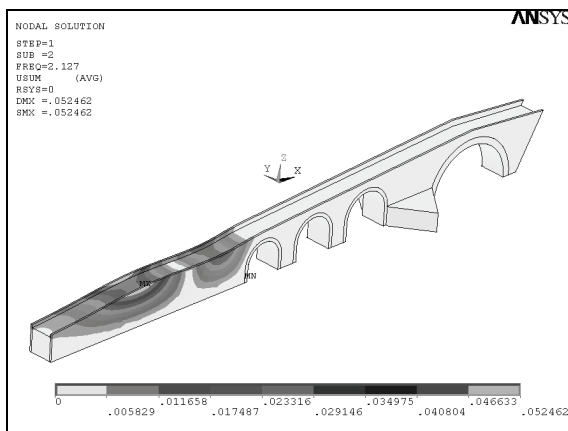


Figura 7. Segundo modo de vibración (F2=2,127 Hz) del puente de Popayán

La configuración exhibida por el análisis modal confirma que las cargas sísmicas afectan básicamente el tramo inicial del puente y su arco principal.

Análisis sísmico lineal

Debido a la naturaleza aleatoria de las cargas sísmicas, los efectos de los terremotos en las estructuras con frecuencia están basados en los espectros de respuesta de diseño de la región en la cual se presenta y en algunas simplificaciones del comportamiento de las edificaciones. Un número de acelerogramas artificiales se produce a partir del espectro de respuesta del diseño de la región para la respuesta estructural elástica. La respuesta espectral elástica de diseño puede ser vista como la curva envolvente de la respuesta es-

pectral de un oscilador simple dada una relación de amortiguamiento específica frente a diferentes probables terremotos ocurridos en la región. Desde la perspectiva del diseño y análisis estructural, la respuesta pico de un sistema es el dato más importante. Por esta razón, en la investigación llevada a cabo se adoptó el análisis de respuesta espectral (RSA) en reemplazo de un análisis de tiempo.

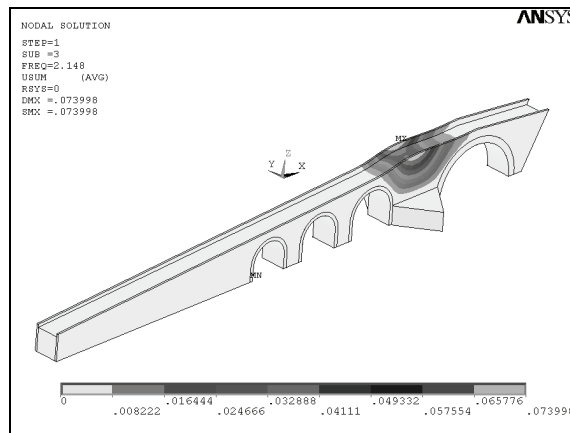


Figura 8. Tercer modo (F3=2,148 Hz) del puente de Popayán

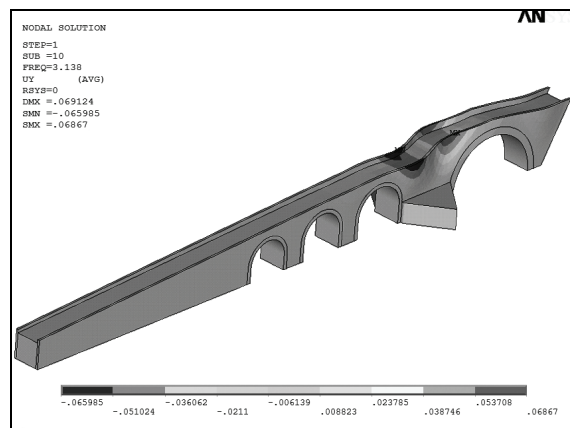


Figura 9. Décimo modo (T10=3,138 Hz) del puente de Popayán

Resultados y discusión

Respalándose en las ideas expuestas, se llevó a cabo la tarea de obtener la respuesta estructural del puente sobre el río Cauca, en Popayán, cuando un terremoto afecta de manera directa la estructura. Para simular dicha respuesta la estructura se consideró sujeta al espectro de diseño de acuerdo a la norma sismorresistente NSR-98 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1998), definida por:

S es el coeficiente de sitio, S_a es el valor del espectro de aceleraciones para un período de vibración dado, T es el período de vibración del sistema elástico (en segundos), g es el valor de la gravedad, A_p es el coeficiente que representa la aceleración pico efectiva e I es el coeficiente de importancia de la edificación definido también por la norma NSR-98.

Dado que los períodos están dentro del rango 0,54 - 0,31, se opta por el criterio (b) de la Ecuación (1). La excitación sísmica fue definida en tres componentes (X, Y, Z) cartesianos ponderados de la siguiente forma: 0,4 - 0,2 y 0,1, respectivamente. Los resultados de la respuesta estructural del puente sobre el río Cauca, en Popayán, sujeto a excitación sísmica, son visibles en las figuras 10 y 11.

El puente ha mostrado un comportamiento básicamente a tensión bajo cargas sísmicas: esfuerzos de tensión se presentan en cercanía al arco principal y en el extremo izquierdo de la estructura con valores de 4.540 kPa y 9.500 kPa, respectivamente (Álvarez y Aparicio, 2003; Álvarez *et al.*, 2006). El máximo valor de tensión ocurre en el arco principal, con valores que alcanzan los 13.620 kPa. Es este punto, por lo tanto, el de mayor vulnerabilidad debido a cargas sísmicas. Un fuerte efecto de torsión ocurre en la misma zona (Figura 10).

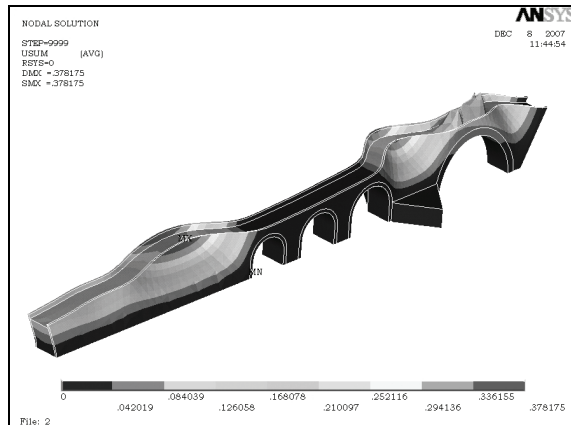


Figura 10. Desplazamientos causados por efectos sísmicos en el puente de Popayán

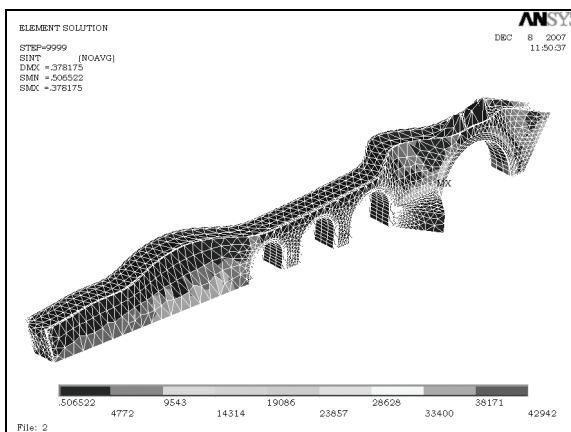


Figura 11. Tensiones causadas por efectos sísmicos en el puente de Popayán

La figura 10 muestra el desplazamiento estructural del puente: aunque en el extremo izquierdo se presenta el máximo desplazamiento, el arco principal continúa mostrando importantes desplazamientos a causa de las torsiones. Estos valores son del orden de 29,5 cm a 37,8 cm.

De modo general, el análisis de los resultados obtenidos permite deducir que en cada modo de vibración se mueve una parte distinta del puente, encontrándose los mayores desplazamientos en los lugares donde existe mayor concentración de masa (estribos del puente). Tales movimientos se presentan con frecuencias y amplitudes diversas, probablemente a causa de las diferencias en el tamaño de las bóvedas y los estribos, principalmente. La consecuencia más grave de este fenómeno para la estabilidad de la estructura es que en las zonas de las claves y los riñones se generan fuertes tensiones, convirtiéndose en áreas vulnerables frente a eventos sísmicos.

Observaciones llevadas a cabo en ruinas de puentes similares al de Popayán, afectados por terremotos, dejan ver que en la mayoría de los casos se conservan en pie las pilas intermedias entre bóvedas, mientras que las áreas situadas entre los riñones y las claves han desaparecido (Ural *et al.*, 2008). De manera casi idéntica, los testimonios históricos relativos al puente de Popayán dan cuenta de daños en la clave de la bóveda principal y plena conservación de las pilas y estribos.

Conclusiones

Con el fin de valorar el comportamiento estructural y valorar la vulnerabilidad sísmica de un puente de arco de ladrillo asumido como caso de estudio, éste se ha analizado bajo el efecto de cargas sísmicas. Para cumplir con este propósito se ha construido un modelo numérico lineal en 3D del puente situado sobre el río Cauca en la ciudad de Popayán (Colombia). Dos estudios previos al análisis sísmico fueron realizados con el fin de obtener información básica acerca del comportamiento global y del comportamiento dinámico fundamental del puente: un análisis estático lineal y un análisis modal. El análisis sísmico es coherente además con la historia del puente y sus respuestas frente a terremotos. Adicionalmente, la comparación entre las cargas sísmicas y la capacidad resistente de los materiales que constituyen la estructura confirma la vulnerabilidad de este tipo de edificios frente a daños localizados y posibilidades de colapso.

La simulación del comportamiento dinámico de la estructura estudiada puede llevar a resultados confiables que a su vez han de servir en la toma de decisiones acerca de la valoración estructural en trabajos futuros de intervención sobre el edificio estudiado. Mediciones *in situ* y pruebas a los materiales constitutivos son, además, pasos previos y necesarios. Se espera que los resultados y conclusiones obtenidas con relación al análisis sísmico obtenido a partir de este caso de estudio puedan ser extrapolados para otras estructuras similares existentes aun en muchas regiones de Colombia

Bibliografía

- Álvarez, J. J., Aparicio, A. C., Comportamiento sísmico de puentes de arco. Un panorama del estado del conocimiento., Revista de ingeniería sísmica, No. 68, 2003, pp. 21-53.
- Álvarez, J. J., Jara, M., Hernández, H., Aparicio, A. C., Evaluación de la respuesta de grandes puentes en arco ante movimientos sísmicos fuertes., Revista de ingeniería sísmica, No. 75, 2006, pp. 23-46.
- ANSYS. Users's Manual for revision 5.0, Vol. 4., Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, 1992.
- Asociación colombiana de ingeniería sísmica., Normas de diseño y construcción sismo resistente, NSR-98., ACIS, Bogotá, 1998.
- Augusti, G., Ciampoli, M., Giovenale, P. Seismic vulnerability of monumental buildings., Structural Safety, Vol. 3, No. 23, 2001, pp. 253-274.
- Betti, M., Vignoli, A., Modelling and analysis of a Romanesque church under earthquake loading: Assessment of seismic resistance., Engineering Structures, Vol. 30, No. 2, 2007a, pp. 352-367.
- Betti, M., Vignoli, A., Assessment of seismic resistance of a basilica-type church under earthquake loading: modelling and analysis., Advances in Engineering Software, Vol. 39, No. 4, 2007b, pp. 258-283.

- Fuenzalida, A., Taboada, A., Dimaté, C., Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y sub-ducción., Física de la Tierra, No. 10, 1998, pp. 111-147.
- Galindo, J., Muñoz, A. M., Caicedo, M., Caracterización de los ladrillos constitutivos de un puente histórico en Popayán (Colombia)., Ingeniería e Investigación, Vol. 28, No. 2, 2008, pp. 15-21.
- Gawronski, W. K., Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures., Springer, New York, 2004.
- Hatch, M. R., Vibration Simulation Using Matlab and Ansys., CRC Press, 2001.
- Le Pape, Y., Anthoine, A., Pegon, P., Seismic assessment of masonry structures - Multi-scale numerical modelling., Historical Constructions, Universidad de Minho, Guimaraes, 2001, pp. 963-972.
- Paredes, J. A., Galindo, J., Mora, D. F., Brick arch bridges in the High Cauca region of Colombia (1718-1919)., Arch'07. 5th International Conference on Arch Bridges, Universidad de Minho, Guimaraes, 2007, pp. 193-202.
- Ural, A., Oruc, S., Dogangun, A., Tuluk, O. I., Turkish historical arch bridges and their deteriorations and failures., Engineering Failure Analysis, Vol. 15, No. 1-2, 2008, pp. 45-53.