

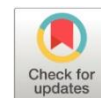


## Monitoreo de la salud estructural del Puente San José

### *Structural health monitoring of the San José Bridge*

- <sup>1</sup> William Fernando Cuesta Naranjo  <https://orcid.org/0000-0003-3714-0042>  
Maestría en Ingeniería Civil con mención en estructuras sismorresistentes, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador.  
[willianmcheo@gmail.com](mailto:willianmcheo@gmail.com)
- <sup>2</sup> Juan Sebastián Maldonado Noboa  <https://orcid.org/0000-0001-5329-2201>  
Maestría en Ingeniería Civil con mención en estructuras sismorresistentes, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador.  
[jmaldonadon@ucacue.edu.ec](mailto:jmaldonadon@ucacue.edu.ec)



#### Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 06/03/2022

Revisado: 15/04/2022

Aceptado: 17/05/2022

Publicado: 05/07/2022

DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v6i3.2157>

**Cítese:** Cuesta Naranjo, W. F., & Maldonado Noboa, J. S. (2022). Monitoreo de la salud estructural del Puente San José. *Ciencia Digital*, 6(3), 6-22.  
<https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v6i3.2157>

**Ciencia Digital**  
Editorial

**CIENCIA DIGITAL**, es una revista multidisciplinaria, **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://cienciadigital.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](http://www.celibro.org.ec)



Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Attribution Non Commercial No Derivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

**Palabras claves:**

puente, análisis,  
restauración,  
arcos,  
reforzamiento.

**Keywords:**

bridge, analysis,  
restoration, arches,  
reinforcement.

**Resumen**

**Introducción.** El puente San José ubicado en la ciudad de Azogues, provincia del Cañar tiene considerables daños en su estructura debido a diferentes eventos sísmológicos. Estos daños deben ser analizados para tomar una decisión de reparación o construir un reforzamiento estructural. **Objetivo.** Modelar el puente con software de análisis estructural y comparar resultados con la realidad de la estructura para determinar su gravedad de daño y tomar una decisión de reparación o refuerzo estructural. **Metodología.** Modelar la estructura y efectuar un análisis estático no lineal para observar los puntos críticos de la estructura y comparar si los daños reales del arco del puente están ubicados en las zonas críticas. **Resultados.** Los daños reales están ubicados en la zona crítica del puente obteniendo como resultado que la estructura entro en zona de prevención de colapso por lo que es capaz de soportar solo su peso estructural siendo este estado peligroso para los usuarios de este puente. **Conclusión.** Se tiene que diseñar un arco de hormigón armado para reforzar la estructura y que soporte el peso de la estructura actual más la carga viva para la cual va a ser usado el puente.

**Abstract**

**Introduction.** The San José bridge located in the city of Azogues, province of Cañar has considerable damage in your structure due to different seismological events. These damages must be analyzed to decide to repair or build a structural reinforcement. **Objective.** Model the bridge with structural analysis software and compare results with the reality of the structure to determine its severity of damage and decide to repair or structural reinforcement. **Methodology.** Model the structure and start a nonlinear static analysis to observe the critical points of the structure and compare if the real damages of the bridge arch are in the critical zones. **Results.** The real damage is in the critical area of the bridge, resulting in the structure entering the collapse prevention zone, which is why it can be supporting only its structural weight, this state being dangerous for the users of this bridge. **Conclusion.** A reinforced concrete arch must be designed to reinforce the structure and to support the weight of the current structure plus the live load for which the bridge will be used.

## Introducción

En la ciudad de Azogues, provincia de Cañar, se construyó en el año 1900 un puente de arco con piedra; el cual fue diseñado para soportar la carga de un ferrocarril que en aquella época fue la mejor manera de transportarse de un sitio a otro. Dicho puente, por falta de mantenimiento y eventos sísmicos considerables, ha tenido fisuras y pérdida de resistencia en su arco. Es tanto el daño, que se ha tenido que apuntalar con elementos estructurales de madera, obstaculizando el tránsito vial, para ayudar a soportar su peso. Mediante una visita técnica se ha podido observar graves daños del puente y la pregunta que surge es, cual sería realmente el daño que tiene la estructura, por lo que el objeto de esta investigación, es analizarla mediante métodos de análisis estructural y establecer la solución para que este puente pueda volver a su funcionamiento con su respectiva seguridad para la población.

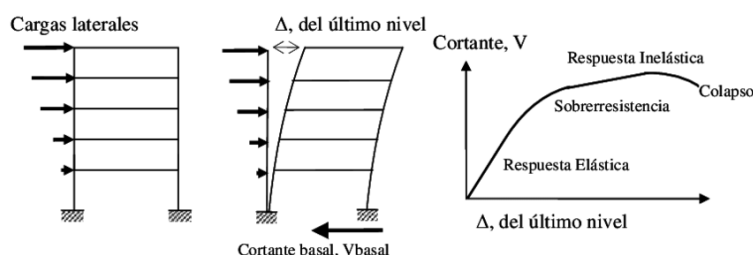
Los análisis constan de modelamientos del puente considerando su estado actual y al igual que el modelo al inicio de su periodo de diseño. Esto nos permitirá una visión amplia para poder determinar posibles soluciones al mismo. El análisis del puente con las patologías nos brinda la certeza de que la capacidad nos permitirá desapuntalar el puente para la construcción de un arco armado y sobre este proponer el uso de una ciclovía. Mediante los análisis se determinó que el puente desde el inicio de su fecha de diseño ha perdido el 30% de su resistencia. Las deflexiones con el modelo computacional y la medición en campo nos dan valores cercanos a 2cm.

## Metodología

Para el análisis estructural del puente, se pretende realizar un modelo computacional; y así, comprobar la capacidad resistente mediante un análisis estático no lineal. Este análisis consiste en modelar el arco del puente y aplicar una carga lateral progresiva (Krawinkler, 1996).

**Figura 1**

*Análisis estático no lineal*



### *Prueba de Resistencia a la Compresión de las piedras del arco del puente*

Para la creación del modelo estructural, primero se realizó una prueba no destructiva de una piedra que conforma el arco del puente, para obtener su resistencia a la compresión. Esta prueba no destructiva se realizó con un esclerómetro (Papanikolaou, 2005). Con este instrumento se puede obtener un valor aproximado de resistencia a compresión de las piedras de la estructura. La muestra que se tomó es un fragmento del arco que previamente se desprendió.

### **Figura 2**

*Muestra de la piedra para realizar el análisis no destructivo*



### **Figura 3**

*Prueba de resistencia a la compresión con esclerómetro*



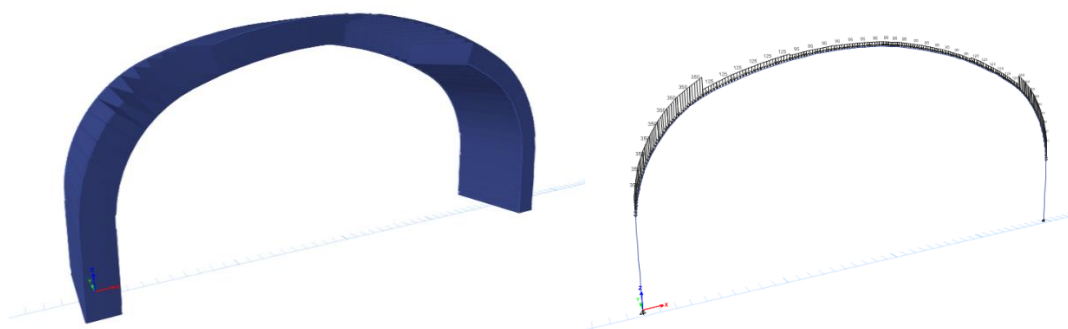
La piedra obtuvo una resistencia de 18 Mpa. Una vez obtenida la resistencia a la compresión de la piedra, se modeló el puente sin ninguna patología estructural, la finalidad de este modelo fue observar en donde puede realmente estar afectada la estructura y así, no solo tener una referencia visual de fisuras externas de la estructura, sino una modelación más cercana a la realidad.

#### *Modelación Estructural*

El modelo se ha realizado en el programa SAP2000 y tiene las dimensiones exactas del puente actual según mediciones técnicas de campo.

#### **Figura 4**

##### *Modelo del arco de piedra del puente y representación de la carga muerta*



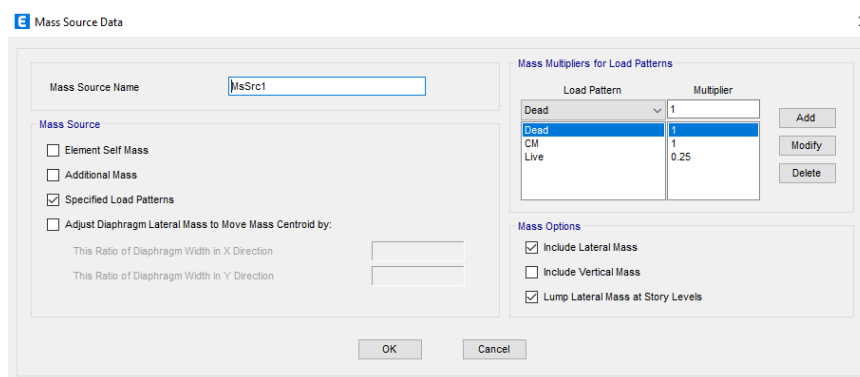
Este arco soporta todas las cargas de: cargas muertas y cargas vivas.

En la realidad, este puente no está soportando ninguna carga viva, solo la carga la carga muerta, que sería el peso de las piedras sobre el arco del puente. La Normativa Ecuatoriana de la Construcción propone un peso de 30KN/m<sup>3</sup> para las piedras (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014).

La masa que se considera para el análisis es el 100% del peso propio y la sobrecarga y el 25% de la carga viva; pero para el análisis estático no lineal la carga viva aplicada es 0, este peso no sería incluido.

**Figura 5**

*Masa considerada para el análisis*



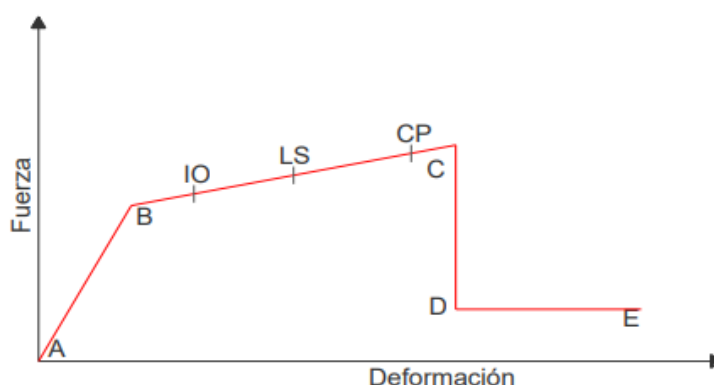
Load Pattern	Multiplier
Dead	1
CM	1
Live	0.25

*Método Estructural: Análisis estático no lineal*

Los resultados en un análisis estático no lineal se miden mediante una gráfica de fuerza-deformación (Krawinkler, 1996). Este análisis es la verificación de la zona plástica. Al pasar la fluencia, la carga aplicada va realizando deformaciones periódicas en esta zona.

**Figura 6**

*Representación gráfica de los estados límites del análisis estático no lineal*



IO: Ocupación Inmediata, es decir que, una vez que llega a este límite, la estructura tiene daños mínimos o nulos por lo que se puede ocupar inmediatamente la estructura sin preocupaciones o riesgo de pérdida de vidas; este está representado con puntos de color verde en la estructura.

LS: Seguridad de vida, entrar en este rango da por sentado que la estructura presenta daños, pero para poder ocuparla se tienen que hacer reparaciones en sus elementos

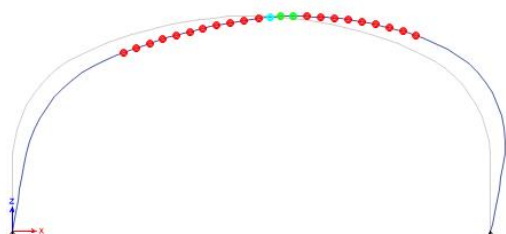
principalmente en sus elementos no estructurales. Este límite está representado con puntos de color azul en la estructura analizada.

CP: Prevención de colapso, en este rango la estructura tiene daños catastróficos (Kim, 2010), en los cuales la estructura no colapsa, pero no puede volverse a usar. Este límite está representado con puntos de color rojo en la estructura.

En la siguiente figura se observa las zonas donde el análisis estático no lineal (Elnashai, 2001), nos indica la plastificación de los elementos. Se compara el estado de la estructura actual con el modelo que se ha realizado con el programa SAP2000 y se observa que las zonas del modelo estructural, que están en prevención de colapso (puntos rojos) son las mismas zonas donde el puente tiene sus fisuras y ruptura del arco de piedra.

**Figura 7**

*Puntos críticos según la realidad y el análisis estático no lineal del modelo estructural*



Con eso se deduce que, si en estas zonas se ven fisuras y rupturas del arco de compresión del puente, es porque el puente entró en la zona de prevención de colapso, por lo que es inseguro volver a usarlo, sin saber si puede soportar su peso propio o alguna carga viva sobre su estructura.

Porcentaje de pérdida de volumen del arco de compresión del puente San José

Se ha medido el volumen del arco de piedra actual con el arco de piedra original obtenemos que se ha perdido un 13% de material. En las siguientes figuras observamos el puente actual y el puente hace años atrás sin ninguna pérdida del arco de compresión.

**Figura 8**

*Puente original, sin daños estructurales vs puente con daños estructurales*

*Solución propuesta*

El puente San José, al haber pasado el límite de prevención de colapso necesita una estructura que soporte su peso propio y las cargas vivas a las que se pretende usar por lo que la solución más segura es diseñar y construir un arco de hormigón armado, que soporte el peso propio actual del puente y las cargas vivas para la que el puente sea utilizado a futuro que pueden ser una ciclo-vía o un puente peatonal.

*Problemática presente*

Al tener demasiadas fisuras y rupturas en el arco de compresión del puente, es inseguro desapuntalar la estructura pensando que la misma puede colapsar en su totalidad arriesgando la vida de personas o trabajadores que estén cerca de esta zona, por lo que es de prioritario realizar un análisis estructural del arco del puente actual y ver si puede resistir su peso propio.

*Análisis estructural del puente deteriorado*

En Cusens (1975) nos recomienda modelar el puente disminuyendo el peralte del arco en las zonas deterioradas apeándose al modelo estructural de la realidad.

Las cargas que se aplican para el análisis de la estructura deteriorada son las del peso propio y la carga permanente que engloba el peso de las piedras que soporta el arco de compresión del puente (Chopra, 2002). Una vez aplicada las cargas al programa se utilizan las combinaciones de carga estipuladas en la NEC2015:

- Combinación de carga 1: 1.4D
- Combinación de carga 2: 1.2D + 1.6L



D: Cargas de peso propio y cargas permanentes.

L: Sobrecargas de uso o cargas vivas.

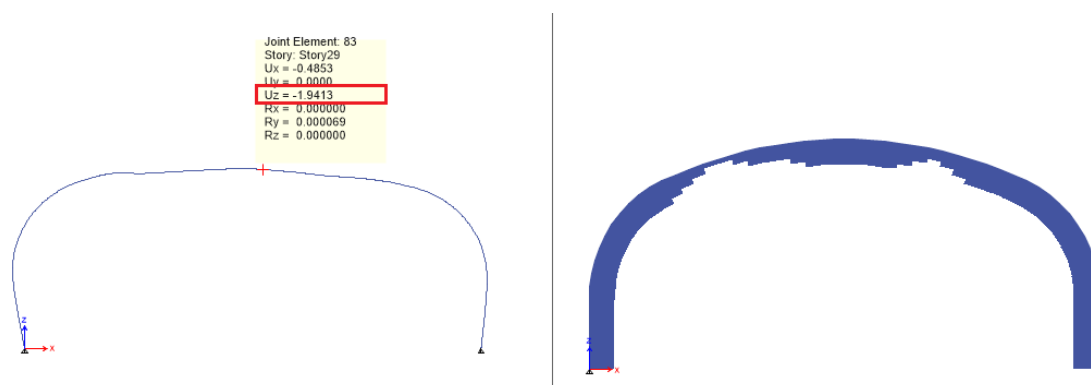
Para este análisis se toman, el peso propio y las cargas permanentes; ya que cuando se vaya a desapuntalar no se tendrá ninguna certeza de la sobrecarga de uso sobre el puente por la combinación de carga a analizar, que es la combinación 2 de la NEC 2015, la cual incrementa a un 120% las cargas permanentes y de peso (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014).

Cabe recalcar que las normativas exigen un análisis estructural de un elemento sometido a flexión. Este elemento debe disminuir su momento de inercia al 40% (Pyle, 1998).

Los resultados con las variaciones del modelo son:

### Figura 9

*Deformación del arco de puente deteriorado con la combinación de carga 2 de la NEC2015*



Fuente: NEC (2015)

Como se observa en la figura anterior el desplazamiento o deformación máximos con las cargas mayoradas según normativa es de 1.94cm en la dirección Uz (dirección de la gravedad).

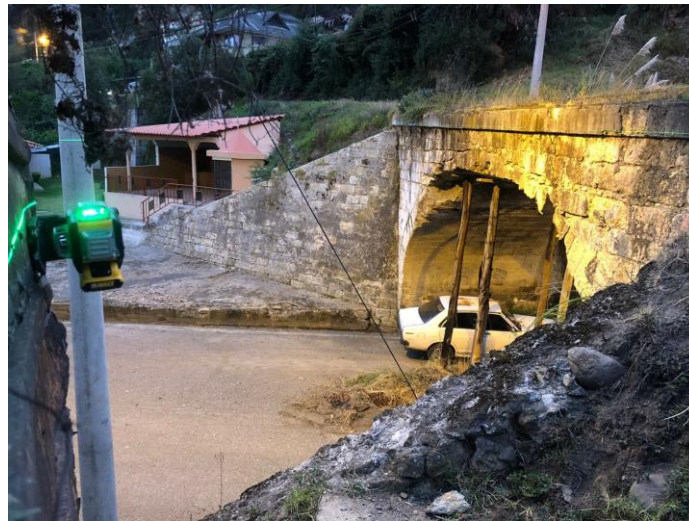
Como se sabe, la normativa ACI318 en su apartado 6.3.3.1.1. manifiesta que la deflexión máxima para un elemento que trabaja a flexión es de  $L/480$  siendo L la luz del elemento estructural a estudiar. La luz máxima del puente se puede considerar los 1000cm (10 metros), por lo que la máxima deflexión permitida es de 2.08cm (American Concrete Institute, 2002)

*Medidas reales de deflexión del puente*

Las medidas de deflexión del puente se tomaron con un nivel láser colocado en un punto fijo donde no se pueda mover la marca y así poder tomar medidas de la deformación del puente con el paso del tiempo.

**Figura 10**

*Nivel laser para toma de medidas reales de deflexión de la estructura*



El nivel laser fue colocado en un inicio en el borde inferior del lagrimero superior del puente y después se tomó las medidas de la deflexión real. Siendo la mayor deflexión obtenida de aproximadamente 2cm.

**Figura 11**

*Deflexión actual del puente de 2cm aproximadamente*



El modelo matemático se acerca a la realidad, de manera que se obtiene una deflexión de 1.94cm y en la realidad una deflexión de 2cm. Con esto comprobamos que el puente entro en zona de prevención de colapso, es decir que tiene daños graves, pero no colapsó la estructura.

Existe la posibilidad de desapuntalar el puente para poder construir un arco de hormigón armado y entrar en funcionamiento nuevamente. En una visita técnica se visualizaron fisuras en la estructura del arco del puente, por lo que antes de desapuntalar la estructura se debe inyectar hormigón líquido de alta resistencia en estas fisuras para que la estructura trabaje de manera monolítica y soporte su peso propio mientras se construye el arco de hormigón armado. En la siguiente figura se observa las fisuras que presenta la estructura actual.

### **Figura 12**

*Fisuras que presenta actualmente el arco del puente*



Una de las fisuras más considerables en el arco es de casi 7cm.

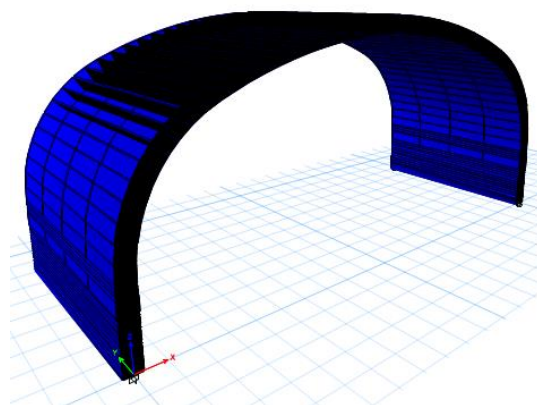
*Diseño del arco de refuerzo de hormigón armado*

*Modelo*

El modelo del arco de compresión para su análisis se realizó en SAP2000. El arco está modelado de hormigón armado el cual fue diseñado para soportar las cargas de peso propio, peso del arco de piedra existente del puente San José, las piedras sobre el arco existente y una sobrecarga de uso para una ciclo-vía.

**Figura 13**

*Modelo del arco de hormigón armado a diseñar para soportar la estructura del puente San José*

**Materiales**

Se diseñó un arco de puente de hormigón armado de resistencia a la compresión  $F_c=280\text{Kg/cm}^2$  y acero de refuerzo con una resistencia a la tracción de  $F_y=4200\text{Kg/cm}^2$ .

**Dimensión**

El peralte elegido del arco de compresión de hormigón armado para el refuerzo del puente es de 40cm de espesor.

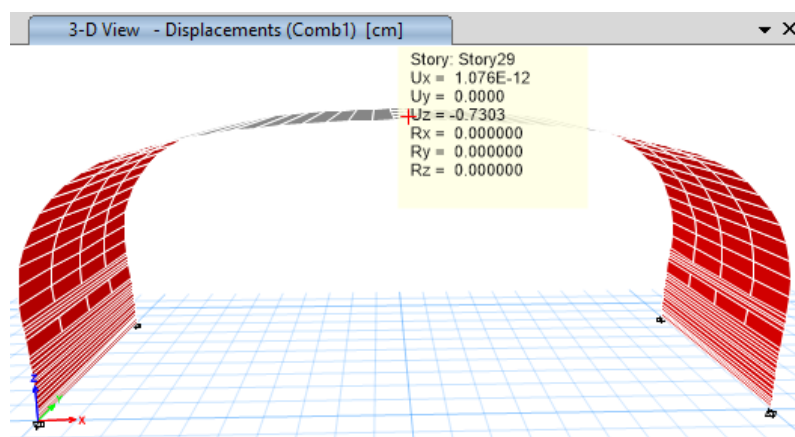
**Comprobación de la flecha**

Según la Normativa ACI318, en su punto 24.2.2. indica lo siguiente: el límite de deflexión que no debe pasar una estructura es de  $L/480$  siendo  $L$  la longitud del elemento estructural a analizar (American Concrete Institute, 2019). Siendo la longitud del arco de 10m (1000cm) el límite de la flecha es de 2.08cm.

Una vez analizada la estructura, considerando las cargas de peso propio, peso del arco de piedra, peso de las piedras sobre el arco existente, la carga que generaría una ciclovía como sobrecarga de uso y el espectro de diseño generado para la ciudad de Azogues, se observa que la mayor deflexión está dada por la combinación de carga 1, que considera las cargas permanentes y el peso propio multiplicado por un factor de 1.4 (COMB1: 1.4D), siendo esta deflexión 0.73cm por lo que se aprueba el peralte del arco de hormigón armado diseñado y se procede a diseñar el armado longitudinal y transversal.

**Figura 14**

*Deflexión del arco de hormigón armado con la combinación 1 de la NEC2015*

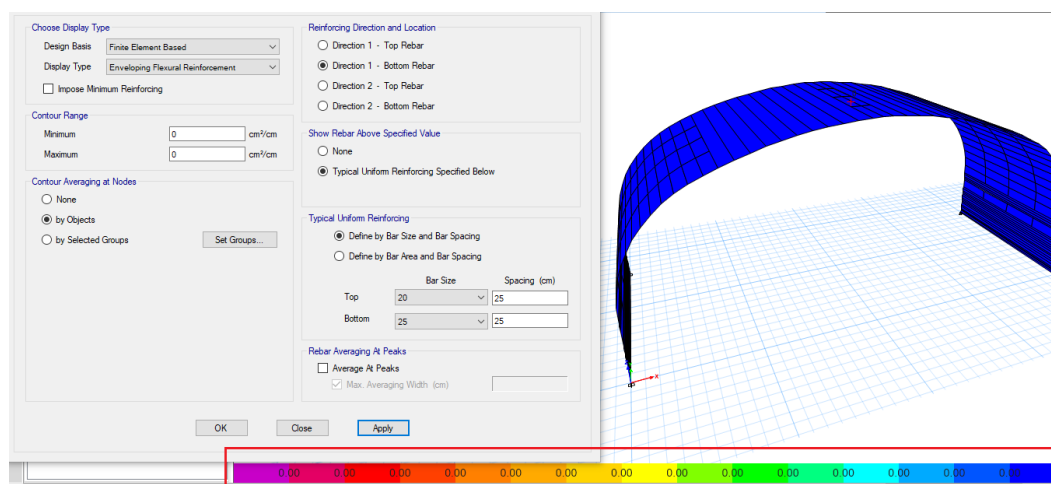


*Diseño del armado longitudinal y transversal del arco de hormigón armado*

El código de diseño del arco de hormigón armado, es el (ACI 318-19, 2019); en el cual se obtiene el armado de las varillas longitudinales y transversales de la parte superior e inferior del arco.

**Figura 15**

*Armado longitudinal y transversal superior e inferior del arco de hormigón armado*



El armado longitudinal y transversal del arco de hormigón armado necesario para resistir las solicitaciones esperadas son:

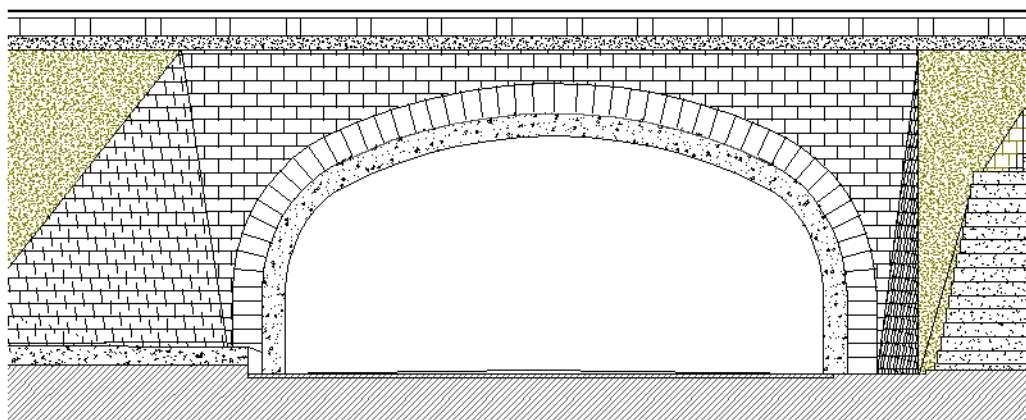
- Armado longitudinal inferior (en la dirección X): una varilla de 25mm cada 25cm.

- Armado longitudinal superior (en la dirección X): una varilla de 20mm cada 25cm.
- Armado transversal inferior (en la dirección Y): una varilla de 25mm cada 25cm.
- Armado transversal superior (en la dirección Y): una varilla de 20mm cada 25cm.

## Resultados

### Figura 16

*Plano arquitectónico del puente San José soportado por un arco de hormigón armado diseñado*



Al observar el mal estado de la estructura actual, se ha tomado la mejor decisión de construir un arco de hormigón armado que soporte el peso y las cargas del puente. Este diseño y resultados han sido favorables ya que la estructura a construir soporta todas las sollicitaciones que presenta actualmente el puente y también soportará una ciclovía que podría funcionar en un futuro sobre esta estructura.

## Discusión

La mano de obra a trabajar en este futuro proyecto tiene que ser calificada y con una alta experiencia en reestructuración de obras patrimoniales, guiado por una dirección especializada con conocimientos estructurales y en obras civiles. Es notorio que el puente tiene graves daños estructurales por lo que el trabajo a realizar para salvar esta obra patrimonial y de gran impacto arquitectónico tiene un procedimiento de mucho cuidado, un mínimo error puede causar el colapso de la estructura haciendo a la misma irrecuperable.

### Conclusiones

- Con el Análisis estático no lineal se determinó que el puente se encuentra en la zona de prevención al colapso según su deriva.
- El puente tiene una pérdida de volumen del 13% desde su construcción.
- La deformación del puente es 1.94cm en su punto más crítico según el modelo en SAP 2000. La deformación en campo se representa con 2cm aproximadamente. Estas deformaciones se encuentran dentro de los parámetros de servicio con nos exige la norma.
- La pérdida de la capacidad del puente representa al 30% con las combinaciones antes descritas.

Para construir este arco de hormigón armado se debe inyectar en las grietas existentes hormigón líquido para que la estructura actual soporte su peso mientras se trabaja bajo el arco del puente construyendo la nueva estructura diseñada que es capaz de resistir todas las solicitaciones con un peralte de 40cm de espesor y un mallado de varillas de acero especificado anteriormente.

### Referencias Bibliográficas

- American Concrete Institute. (2002). *ACI CODE-318-02: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*.
- American Concrete Institute. (2019). *ACI CODE-318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*.
- Chopra, A. K. (2002). *A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.
- Cusens, A. R. (1975). *Bridge deck analysis*.
- Elnashai, A. S. (2001). *Advanced inelastic static analysis for earthquake applications. Structural Engineering and Mechanics*.
- Kim, S. E. (2010). *Nonlinear inelastic dynamic analysis of suspension bridges*.
- Krawinkler, H. (1996). *Pushover analysis: why, how, when, and when not to use it. Proceedings of the 65th Annual Convention of the Structural Engineers Association of California*.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). *Normativa Ecuatoriana de la Construcción*. Dirección de Comunicación Social.
- Papanikolaou, V. K. (2005). *Evaluation of conventional and adaptive pushover analysis*.

Pyle, A. H. (1998). Practical Three-Dimensional Nonlinear Static Pushover Analysis.  
*Structure Magazine*.

### **Conflicto de intereses**

No existe conflicto de intereses alguno.



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



## Indexaciones

