

Caracterización del embaldosado de escoria de fundición para la intervención de un puente del siglo XVIII de la Nueva España

Miguel Angel Soto-Zamora, Rubén Alfonso López-Doncel, Isaías Edén Vizcaíno-Hernández, Andrea Maldonado-Arévalo

Resumen: La intervención realizada a principios del siglo XX en el puente "San Ignacio", modificó significativamente su funcionamiento, debido a la construcción de un embaldosado fabricado a partir del moldeo en baldosas prismáticas, del material incandescente de desecho de los procesos de la Gran Fundición Central. Mexicana de Salomón Guggenheim, las cuales fueron utilizadas para recuperar la calzada. Sin embargo, este sistema constructivo ha fallado debido al tráfico, por lo que el objetivo principal de este estudio se centró en la caracterización del sistema constructivo con base en la normatividad aplicable, evaluando su geometría, propiedades mecánicas y realizando una prospección eléctrica de los estratos. del sistema con la finalidad de evaluar la viabilidad de la conservación del embaldosado. Los resultados obtenidos llevaron a proponer su retiro debido al comportamiento frágil del material, su gran contribución al peso muerto y los problemas de drenaje de la calzada ocasionados por el sistema.

Palabras clave: puente, escoria de fundición, embaldosado, intervención

Characterization of the foundry slag tiling for the intervention of an 18th century bridge in New Spain

Abstract: The intervention carried out at the beginning of the 20th century in the "San Ignacio" bridge, significantly modified its operation, due to the construction of a tiling made from the molding in prismatic tiles, of the incandescent waste material from the processes of the Great Mexican Central Foundry of Salomon Guggenheim, which were used to cover the roadway. However, this construction system has failed due to traffic, so the main objective of this study focused on the characterization of the construction system based on the applicable regulations, evaluating its geometry, mechanical properties and performing an electrical survey of the system strata to assess the feasibility of preserving the tiling. The results obtained led to propose its removal due to the fragile behavior of the material, its great contribution to the dead weight and the drainage problems of the roadway caused by the system.

Keywords: bridge, slag, tiling, intervention

Caracterização do pavimento de escória de fundição para a intervenção numa ponte do século XVIII na Nova Espanha

Resumo: A intervenção realizada no início do século XX na ponte "San Ignacio" modificou significativamente o seu funcionamento, devido à construção de um pavimento fabricado a partir de moldes de ladrilhos prismáticos, do material incandescente de desperdício dos processos da Grande Fundição Central Mexicana de Salomón Guggenheim, que serviram para cobrir a estrada. No entanto, este sistema construtivo falhou devido ao tráfego, pelo que o objetivo principal deste estudo se centrou na caracterização do sistema construtivo com base na regulamentação aplicável, avaliando a sua geometria, propriedades mecânicas e realizando uma prospeção elétrica das camadas do sistema a fim de avaliar a viabilidade da conservação do revestimento. Os resultados obtidos levaram a propor a sua remoção devido ao comportamento frágil do material, à sua elevada contribuição para o peso morto e aos problemas de drenagem da estrada causados pelo sistema.

Palavras-chave: ponte, escória de fundição, pavimento, intervenção

Introducción

—Contexto histórico del puente “San Ignacio” 1767-1895

El puente “San Ignacio” inició su construcción a mediados del siglo XVIII sobre el río “San Pedro”, ubicado al poniente de la Villa de Nuestra Señora de la Asunción de las Aguas Calientes (la actual ciudad de Aguascalientes, México). De acuerdo con Gutiérrez, “con frecuencia, en tiempo de aguas, quedaba la villa incomunicada porque las crecientes del río San Pedro impedían su tránsito, como en el año 1753 en que las aguas no dieron vado en 43 días.” (Gutiérrez 1999:222). Existen en el puente evidencias físicas de la fecha en que las bóvedas originales fueron cerradas, en el grabado más conservado en A9 [Figura 1b] es posible leer “Se serro esta Bobbeda el dia 6 de Julio de 1747 a Juebes [sic]”, en la segunda en A8 [Figura 1c] solo es posible observar “se cerro esta bobeda el dia 12 de ... [sic]” de lo anterior se infiere que el inicio la construcción se dio antes de 1747, sin embargo no existe una fecha específica.

El puente fue inaugurado en 1758 de acuerdo con Gutiérrez, “faltaban a esta obra, pasamanos y empedrado, que no se han hecho por falta de dinero” (Gutiérrez 1999:223). Según Boils “Prácticamente estaba listo en 1759, y sólo restaba levantar los pretilos y el empedrado de la vía, cuando el 29 de septiembre de ese año lo derribó una creciente del río San Pedro, sobre el que se levanta la estructura. Se comenzó a reconstruir al año siguiente...”. Tras este colapso el puente tardó un tiempo considerable

en ser reconstruido, Boils afirma que su reconstrucción llegó hasta 1780 (Boils 2009:157). Existen evidencias físicas de un colapso parcial de las bóvedas A5, A6 y A7 del puente debido a una rotación en las pilas intermedias [Figura 1a].

Durante el siglo XIX, no existen menciones del puente, solo se sabe que debió seguir funcionando de manera adecuada, siendo durante este periodo que se construyó el empedrado original de piedra bola de río asentada con mortero de cal-arena. No es hasta inicios del siglo XX que se toman las primeras fotografías del puente en donde es posible apreciar su existencia sobre la calzada [Figura 2].

— La Gran Fundición Central Mexicana en Aguascalientes 1895-1925

Los Guggenheim firmaron en 1892 un contrato para la construcción en Aguascalientes de una fundidora, para ello se dispuso de 350 hectáreas del rancho “El Sillero”, una altiplanicie a medio kilómetro del puente “San Ignacio” [Figura 3], el terreno colindaba con el río “San Pedro” y estaba limitado por un barranco profundo, el cual se empleó como depósito de la escoria producto de la fundición y fue conocido como el “Cerro de la Grasa” (Gómez 1988:102-105). Para 1895 ya se encontraban trabajando dos hornos en lo que pasó a denominarse la Gran Fundición Central Mexicana (ASARCO, American Smelting and Refining Company), la cual producía grandes cantidades de plomo y cobre que tenía una producción marginal de oro y plata. Tras varias huelgas de trabajadores



Figura 1.- a) Perfil del puente “San Ignacio” b) y c) grabados en estuco de cal (A8, A9), indicando la fecha de cierre de las bóvedas de los arcos del puente. Elaboración propia.

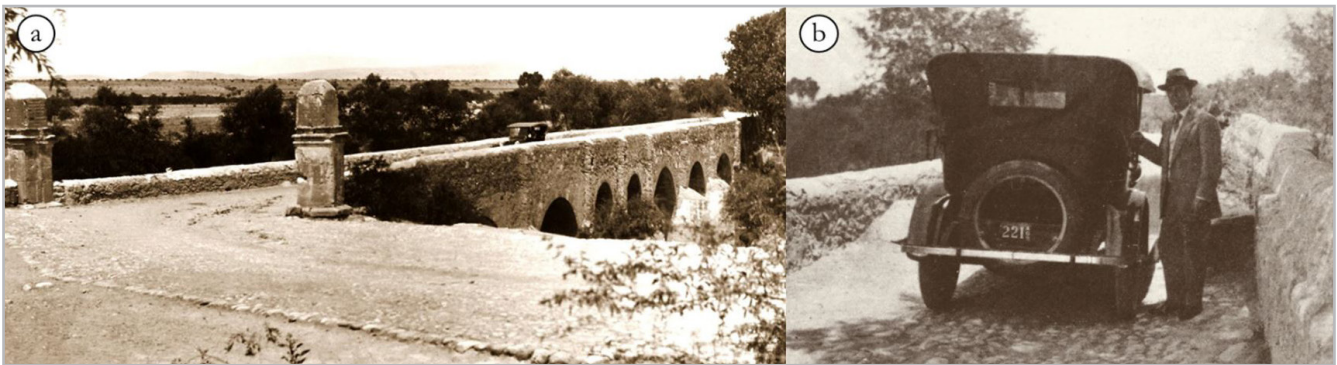


Figura 2.- a) y b) Fotografías de inicios del siglo XX del puente "San Ignacio" donde es posible apreciar el empedrado original (Fondo Archivo General Municipal).

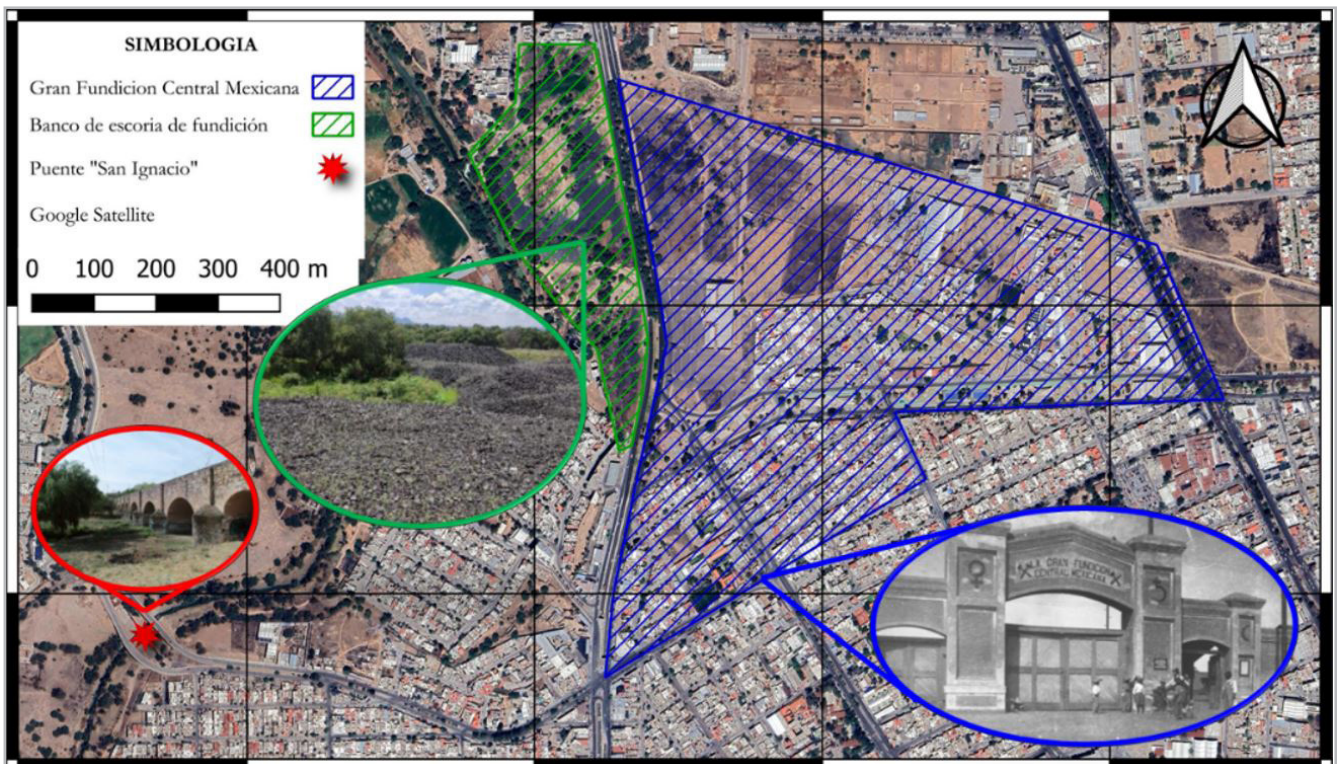


Figura 3.- Zonificación de la planta de la ASARCO en Aguascalientes (1894-1925), es posible observar la cercanía del puente "San Ignacio" con las instalaciones de la antigua fundidora. Elaboración propia.

y con la problemática económica que trajo la Revolución mexicana (1910-1921), los Guggenheim anuncian en 1925 el traslado de la fundidora al estado de San Luis Potosí (Gómez 1988:118).

— *El uso de la escoria como material de restauración en el puente "San Ignacio"*

Durante el periodo de funcionamiento de la ASARCO se da la primera intervención moderna en el puente de "San Ignacio", construyendo un nuevo empedrado en la calzada y reparando secciones de los parapetos [Figura 4a], para esta intervención se empleó un material poco común y del cual se tienen pocos registros de su fabricación y utilización como material de construcción: baldosas de escoria de fundición [Figura 4a]. No existen

registros documentales del proceso exacto de fabricación de las baldosas, sin embargo, por sus características, es posible inferir que durante los procesos de fundición de la ASARCO, se utilizaron moldes metálicos capaces de soportar la temperatura del material incandescente, en los cuales se vertió la escoria fundida, con la finalidad de moldear piezas prismáticas rectangulares [Figura 4d], las cuales fueron posteriormente desmoldadas y empleadas en diferentes aplicaciones dentro de las instalaciones de la fundidora, principalmente como sillares para la construcción de algunos edificios [Figura 4c] y como baldosas en los patios de maniobras y almacenes de las instalaciones de la fundidora [Figura 4b].

Las baldosas no siempre se fabricaron con dimensiones estandarizadas, en el puente se emplearon dimensiones de aproximadamente 26cm de largo, 16cm de ancho

y un espesor variable de 10 a 13cm [Figura 5a, 5b y 5c], con pesos cercanos a los 15 kg por pieza, la diferencia en el espesor de las piezas [Figura 5a y 5b] se debe probablemente a la dificultad para verter una cantidad exacta de material fundido en cada molde. Su fabricación no debió ser sencilla, ya que fundir la roca para extraer el cobre, requiere temperaturas superiores a los 1250°C (Norgate 2013:218), por lo que trabajar con el material a alta temperatura y verterlo en moldes pequeños rápidamente antes de que se enfriara, representaba un desafío significativo. Si bien el uso de escorias de fundición ha sido común en la dosificación de mezclas de concreto y asfaltos debido al incremento significativo que estas producen en la durabilidad y propiedades mecánicas de las mezclas (Meshram 2023:5826-5827), su aplicación se ha realizado triturada o pulverizada, por lo que la utilización de baldosas de escoria de fundición moldeadas a partir de material incandescente, en un proceso de intervención de principios del siglo XX, tiene una relevancia significativa en términos de la complejidad de su fabricación, la cual se comprueba observando la enorme cantidad de escoria que no fue aprovechada para la producción de baldosas y que se acumuló en el depósito aledaño a la planta el cual aún existe [Figura 3].

El uso de este material para mejorar las condiciones de la calzada probablemente estuvo relacionado con su

disponibilidad en las cercanías del puente, lo que pudo significar un bajo costo del material y su traslado a obra, puesto que resulta difícil explicar el empleo de un material tan complejo de fabricar, con un peso tan elevado y un comportamiento quebradizo, lo cual quedó manifiesto en las pruebas experimentales llevadas a cabo en este estudio. Así mismo el acabado liso [Figura 4d y 5c] obtenido del proceso de fabricación de las baldosas proporcionó una superficie de rodamiento menos accidentada que el empedrado existente [Figura 2].

El paso del tiempo ha evidenciado una incompatibilidad significativa del sistema constructivo empleado con los materiales originales del puente, ocasionando una alteración significativa (Silva 2021:1). En 2016 inician los esfuerzos para intervenir el puente debido a las patologías que presentaba, la principal consistía en la pérdida de las juntas constructivas en el intradós de las bóvedas [Figura 6c]. El fenómeno de la pérdida de las juntas puede ser atribuido a la migración de humedad desde la calzada del puente hacia los rellenos granulares, generando la cristalización de sales y dañando los materiales porosos (Sheng 2024:3), resultaba evidente que el pavimento de la calzada, se encontraba fracturado [Figura 6b], ocasionando la pérdida de baldosas y provocando el estancamiento del agua en algunas zonas [Figura 6a], lo cual en conjunto con el pobre drenaje de la calzada



Figura 4.- a) Embaldosado y sustitución del parapeto con baldosas de escoria de fundición. b) Embaldosado en patio de maniobras de la ASARCO. c) Edificio administrativo de la ASARCO, construido con el material. d) Baldosas de escoria rescatadas de la ASARCO. Elaboración propia.

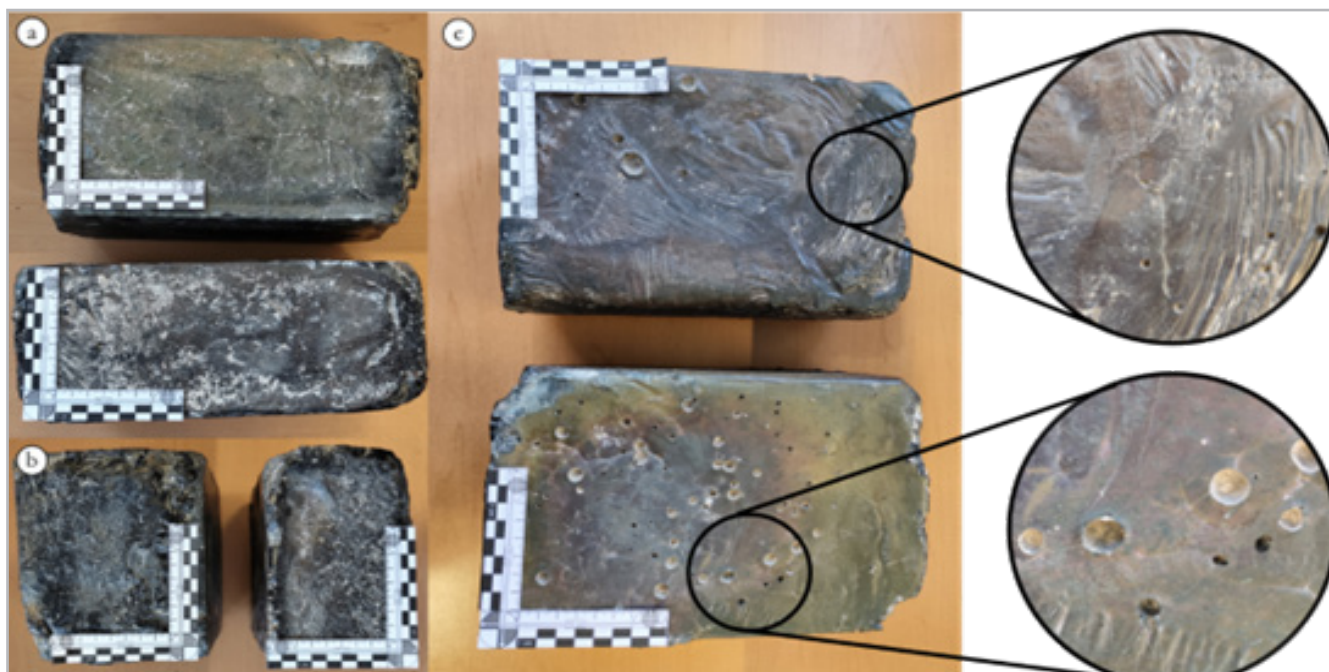


Figura 5.- a) Vista lateral de las baldosas. b) Vista frontal de las baldosas. c) Vista superior de las baldosas, correspondiente con la posición utilizada en el embaldosado del puente San Ignacio. Elaboración propia.

ocasionaba la migración de humedad hacia el interior del puente.

A partir de lo anterior se planteó la hipótesis de que la preservación del embaldosado supondría un riesgo significativo para la conservación general del estado de servicio del puente, sin embargo, su particularidad y valor histórico generaban dudas respecto a su retiro, por lo que previo al inicio cualquier proceso de intervención resultaba indispensable evaluar los riesgos asociados a su presencia.

El objetivo principal del estudio consistió en la caracterización del sistema constructivo del embaldosado construido a principios del siglo XX, determinando su geometría, composición constructiva y el grado de compatibilidad con los materiales y sistemas constructivos originales, así como el efecto de su presencia en el correcto

funcionamiento estructural y de drenaje del puente, con la finalidad de recomendar su conservación o retiro durante los procesos de restauración del puente de “San Ignacio” llevados a cabo durante el año 2021.

Materiales y métodos

— Levantamiento topográfico

Se realizó un levantamiento topográfico de la calzada del puente, empleando una estación total Sokkia® SET 630RK, realizando un seccionamiento con la finalidad de obtener la configuración geométrica de la calzada para verificar las condiciones de drenaje y las zonas dañadas del pavimento. Además, se realizó un modelo fotogramétrico empleando fotografías digitales capturadas con un drone DJI® Mini 3. El modelo fue procesado utilizando Agisoft Metashape® a partir de lo cual se construyó un modelo tridimensional del puente y ortofotografías [Figura 10].

— Tomografía eléctrica y determinación de la resistividad del material

Se realizaron sondeos con tomografía de Resistividad Eléctrica de forma transversal a la calzada del puente, mediante la implementación de un resistímetro marca Syscal® R1 Plus de 24 electrodos, fijando los electrodos a la calzada mediante el uso de arcilla para garantizar la correcta transmisión eléctrica al material de la calzada. A partir de la información obtenida se realizaron mapas de contornos identificando zonas con diferentes rangos de resistividad eléctrica (Maldonado 2021:69).



Figura 6.- a) y b) Daños y pérdidas de piezas en el embaldosado de escoria del puente “San Ignacio”. c) y d) Pérdida de juntas y daño en dovelas en el intradós de las bóvedas. Elaboración propia.

Utilizando el resistímetro Syscal® R1 Plus, se midió la resistividad de uno de los especímenes de escoria, de conformidad con la norma NMX-C-514-ONNCCE-2019. La medición se realizó en dos estados, saturado tras 24 horas de inmersión en agua bidestilada y secado al horno a una temperatura de $110\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ durante 24 horas, a partir de lo cual se inyectó electricidad en ambos estados para obtener un rango de valores para el material (Maldonado 2021:69).

A partir de la resistencia obtenida se calculó la resistividad mediante la fórmula (Feijoo 2020:63):

$$\rho = R \cdot A / L \quad (1)$$

Dónde:

- ρ = resistividad en ohm-metro (Ωm)
- R = resistencia que presenta la roca en ohmios (Ω)
- A = sección de la probeta en metros cuadrados (m^2)
- L = longitud de la probeta en metros (m)

— *Caracterización de las baldosas de escoria de fundición*

Se obtuvieron muestras en los alrededores del puente, donde fue posible localizar dos baldosas incompletas, las cuales fueron retiradas de la calzada durante alguno de los procesos de intervención o reparación a lo largo de los años. Así mismo se visitó el banco de escoria de fundición [Figura 3], donde se obtuvieron muestras de las rocas existentes en el banco, que si bien fueron producidas a partir del mismo material que las baldosas, tuvieron un proceso de enfriamiento y formación distinto, por lo que se requerirían pruebas de laboratorio de ambos grupos de muestras que permitieran la determinación de sus características físico-mecánicas.

— *Determinación de la densidad, porcentaje de absorción y porosidad (ASTM C127)*

Se realizó la determinación de las características del material a partir de seis fragmentos de escoria rescatados de la zona del puente de “San Ignacio” (SI) y nueve piezas obtenidas del banco “Cerro de la Grasa” (CG), Estas pruebas se realizaron de conformidad con la normativa ASTM C 127-04 Método de prueba estándar para la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregados gruesos.

Este método consiste en determinar el volumen y el peso de los especímenes. Se pesaron las piezas para obtener su peso inicial en estado natural P_i , se utilizó una balanza electrónica con precisión de un gramo, las piezas fueron secadas en el horno a una temperatura de $110\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ durante 24 horas; las probetas se dejaron enfriar y fueron pesadas nuevamente para obtener su peso final P_f , a partir de lo cual se determinó su porcentaje de humedad actual mediante la expresión (Navarrete 2013:137):

$$\% \text{ Humedad Actual} = (P_i - P_f) / P_f * 100 \quad (2)$$

Dónde:

- P_i = Peso inicial de la muestra, en gr.
- P_f = Peso final de la muestra, en gr.

Una vez determinado el peso seco P_s de las muestras, estas se saturaron con agua bidestilada por 24 horas, las muestras fueron retiradas del agua y secadas superficialmente mediante la implementación de un paño absorbente, y fueron pesadas para determinar su peso húmedo superficialmente seco P_h , determinando su porcentaje de absorción mediante la ecuación (Navarrete 2013:138):

$$\% \text{ Humedad de absorción} = (P_h - P_s) / P_s * 100 \quad (3)$$

Dónde:

- P_h = Peso saturado superficialmente seco, en gr.
- P_s = Peso seco al salir del horno, en gr.

A partir de lo anterior, se determinó la densidad de las probetas mediante el cálculo de su volumen empleando un picnómetro. Las rocas saturadas fueron sumergidas en el agua dentro del picnómetro, y a continuación se determinó el volumen de agua desplazado por cada una de las muestras (V), midiendo dicho volumen con una probeta graduada y calculando la densidad del material mediante la expresión (Navarrete 2013:138) (ASTM C127 2001:3):

$$\rho = W / V = (P_h - (P_h - P_s)) / V \quad (4)$$

Dónde:

- ρ = Densidad, en gr/cm^3 .
- W = Peso de la muestra seca, g.
- P_h = Peso húmedo superficialmente seco, en gr.
- P_s = Peso seco al salir del horno, en gr.
- V = Volumen de la probeta, en cm^3 .

Finalmente se calculó la porosidad efectiva con el método de inmersión (Benavente 2004:64) calculando el volumen de los poros del material en función a la diferencia de masas registrada entre la probeta saturada y superficialmente seca P_h y la probeta secada al horno P_s , dicha diferencia se divide entre la densidad del agua a la temperatura ambiental para este caso se consideró la densidad del agua ρ_{H_2O} de $1.0\text{ gr}/\text{cm}^3$, el cálculo se realizó de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P_{AI} = ((P_h - P_s) / \rho_{H_2O}) / V * 100 \quad (5)$$

Dónde:

- ρ_{H_2O} = Densidad del agua, en gr/cm^3 .
- P_h = Peso húmedo superficialmente seco, en gr.
- P_s = Peso seco al salir del horno, en gr.
- V = Volumen de la probeta, en cm^3 .

— *Determinación de la resistencia a la compresión (ASTM C170)*

En el método ASTM C170 se permiten probetas cúbicas con una relación altura-diámetro comprendida entre 0.9:1.0

y 1.1:1.0 (ASTM C170, 2009:1). Las superficies portantes deben tener un diámetro superior a 2 pulgadas y estar rectificadas para entrar en contacto adecuadamente con los platos de la máquina de ensaye. Se fabricaron probetas cúbicas de 5.00cm por lado, tanto de los fragmentos de baldosas rescatados del puente como de las rocas del banco. Las probetas fueron cortadas con una cortadora de disco diamantado enfriado por agua, mediante este procedimiento se obtuvieron un total de nueve probetas cúbicas viables, cuatro a partir de las muestras obtenidas del puente y cinco del material del banco del “Cerro de la Grasa”, perdiendo varias debido a las fracturas internas del material. Las probetas viables fueron medidas, pesadas y rotuladas para posteriores ensayos.

Se entiende por compresión simple o uniaxial (RCS) el esfuerzo máximo que puede soportar la roca antes de la fractura (Feijoo 2020:62). Para esta prueba la matriz rocosa se ensaya sin confinamiento lateral. El ensayo a compresión simple se realizó en una prensa automática digital CONTROLS® Pilot 4, con capacidad de 500 kN, la cual aplica presión por medio de un actuador hidráulico durante la duración de la prueba y hasta la falla. La prueba se realizó de conformidad con el método ASTM C170 Método de ensayo estándar para la resistencia a la compresión de la piedra de dimensiones normalizadas (ASTM C170 2009:1-3). Dicha prueba consiste en someter una probeta a una carga de compresión uniaxial hasta que se produce el fallo, y la resistencia a la compresión se calcula en función de la carga en el momento del fallo y del área de la sección transversal de la probeta mediante la ecuación (ASTM C170 2009:2):

$$\sigma_c = p/A \quad (6)$$

Dónde:

σ_c = resistencia a compresión simple, en MPa.

p =carga máxima en la probeta antes de la falla, en N.

A = Área de las caras de contacto de la probeta, en mm².

Resultados y discusión

A partir del levantamiento topográfico fue posible observar que el pavimento de la calzada del puente formada por baldosas de escoria de fundición tiene una pendiente transversal a dos aguas, ya que se colocó un bloque de canto al centro de la calzada como puede observarse en la imagen [Figura 4a y 7d], el cual es el punto más alto y de ahí nace la pendiente transversal hacia aguas abajo y aguas arriba, la cual es variable entre el 2% y el 3%. Sin embargo, no existen drenajes adecuados hacia ninguno de los dos lados, a pesar de que en el lado aguas abajo es posible observar restos de las canaletas y sus orificios de desagüe, pero estas se encontraban ocluidas, rotas y sin funcionamiento aparente. En algunos sitios del puente se practicaron orificios en el parapeto para ayudar en el desagüe de la calzada, sin embargo, existen evidencias físicas de que el agua escurre sobre los

muros, contrafuertes y pilastras del puente generando daños.

Lo anterior, en conjunto con la clara diferencia de alturas entre el parapeto actual [Figura 3] y el parapeto de principios del siglo XX [Figura 2b], configuró dos opciones posibles. La primera consistía en que se hubiese rellenado la calzada para empatar con los niveles del camino a principio del siglo XX, o bien que el empedrado se construyó sin retirar el empedrado original, lo que redujo la altura de los parapetos y ocasionó que los drenajes originales quedaran por debajo del nivel de rasante de la calzada, lo que llevó a plantear la realización de estudios prospectivos de tomografía eléctrica a fin de verificar lo anterior.

Los estudios de tomografía eléctrica realizados en la calzada del puente demostraron dos puntos importantes:

A- Fue posible observar zonas de baja resistividad en color azul claro [Figura 7a], dichos valores de resistividad son congruentes con materiales granulares saturados de agua. Los rellenos granulares encima de las bóvedas del puente tenían una humedad significativa a pesar de que no era temporada de lluvia, lo cual favorecía la pérdida de las juntas de la mampostería y daños en las dovelas [Figura 6c y 6d], generando el principal problema estructural del puente, esta humedad entraba por diferentes puntos favorecida por el pobre drenaje y el empedrado afectado por la pérdida de baldosas fracturadas y reparaciones mal ejecutadas en la superficie de rodamiento, debido a la falta de un sistema adecuado para evacuar las aguas pluviales.

B-La tomografía eléctrica transversal a la calzada [Figura 7b] permitía definir claramente la existencia de tres estratos en la calzada, primero en azul uno de altísima resistividad consistente con las baldosas de escoria de fundición, luego en verde un estrato de una resistividad más baja que pudo inferirse como el empedrado original del puente ya que contrasta con la zona de relleno granular con presencia de humedad en color amarillo de baja resistividad. Lo anterior permitió realizar sondeos en los cuales se comprobó la presencia del empedrado original bajo las baldosas de escoria de fundición [Figura 7c]. Se encontró que las baldosas de escoria se habían asentado sobre el empedrado original del puente, utilizando un mortero pobre de cal-arena con el cual se generaron las pendientes transversales descritas anteriormente [Figura 7d], sin embargo, en su mayoría las baldosas no tenían una adherencia con el empedrado y pudieron ser retiradas fácilmente, lo que demostró una falla significativa en el sistema constructivo. Además, se reveló un rejuntado con una pasta de arena cribada con cal entre las baldosas existentes.

A partir del ensayo de resistividad en una probeta de escoria se obtuvieron valores muy altos de resistividad y resistencia [Tabla 1], aun comparados con rocas de alta densidad. Si bien “Las rocas ígneas y metamórficas suelen tener valores altos de resistividad” (Feijoo 2020:63), en gran

medida su resistividad depende del contenido de vacíos en la roca, los cuales pueden ser debidos a la porosidad o a las fracturas presentes en la roca, si bien el material analizado disminuye su resistencia al estar saturado en agua bidestilada, la reducción no es tan significativa como en otros materiales de alta porosidad como las piedras utilizadas en el puente, lo que demostraba una incompatibilidad con los materiales originales más porosos y susceptibles a la transpiración (Young 2008:10).

A partir de los resultados obtenidos [Tabla 2] podemos afirmar que las baldosas de escoria de fundición, tienen una altísima densidad promedio de alrededor de 3334kg/m³. Este valor es superior al de la mayoría de las rocas [Figura 8], considerando dicha densidad y un espesor promedio de la capa de baldosas de 13 cm, [Figura 6c] el puente recibe una carga muerta adicional de 450 kg/m² lo cual resulta sumamente desfavorable, considerando las condiciones estructurales actuales de las bóvedas. Por otro lado, si bien los valores de porosidad y porcentaje de humedad absorbida son relativamente bajos [Tabla 2], esto no resulta precisamente favorable para el sistema estructural, puesto que crea una capa impermeable con

fracturas que permiten el paso de la humedad [Figura 6a], pero dificultan su evaporación al medio ambiente, generando condiciones de humedad altas en los rellenos granulares que se ubican sobre las bóvedas del puente, generando daños a las juntas debido a los fenómenos de cristalización descritos por Young (Young 2008:10). La preparación de las probetas cúbicas para el ensayo a compresión, reveló la presencia de fracturas internas en la probeta de escoria, por lo cual solo pudieron ser cortadas y rectificadas nueve piezas, cuatro de la zona del puente (SI) y cinco del banco de escorias de la fundidora (CG), las piezas fueron medidas y pesadas en conformidad con la normatividad aplicable. Estas nueve probetas fueron sometidas a un ensayo por compresión simple y llevadas a la falla [Figura 9a], registrándose la carga total antes de la falla del espécimen y la resistencia a compresión simple determinada por la prensa [Figura 9b]. Los resultados del ensayo fueron calculados también de manera independiente y transformados a MPa, de conformidad con la normativa descrita (ASTM C170 2009:1-3) [Tabla 3].

Los ensayos a compresión mostraron que el material posee alta resistencia a la compresión (Singh 2011:46).

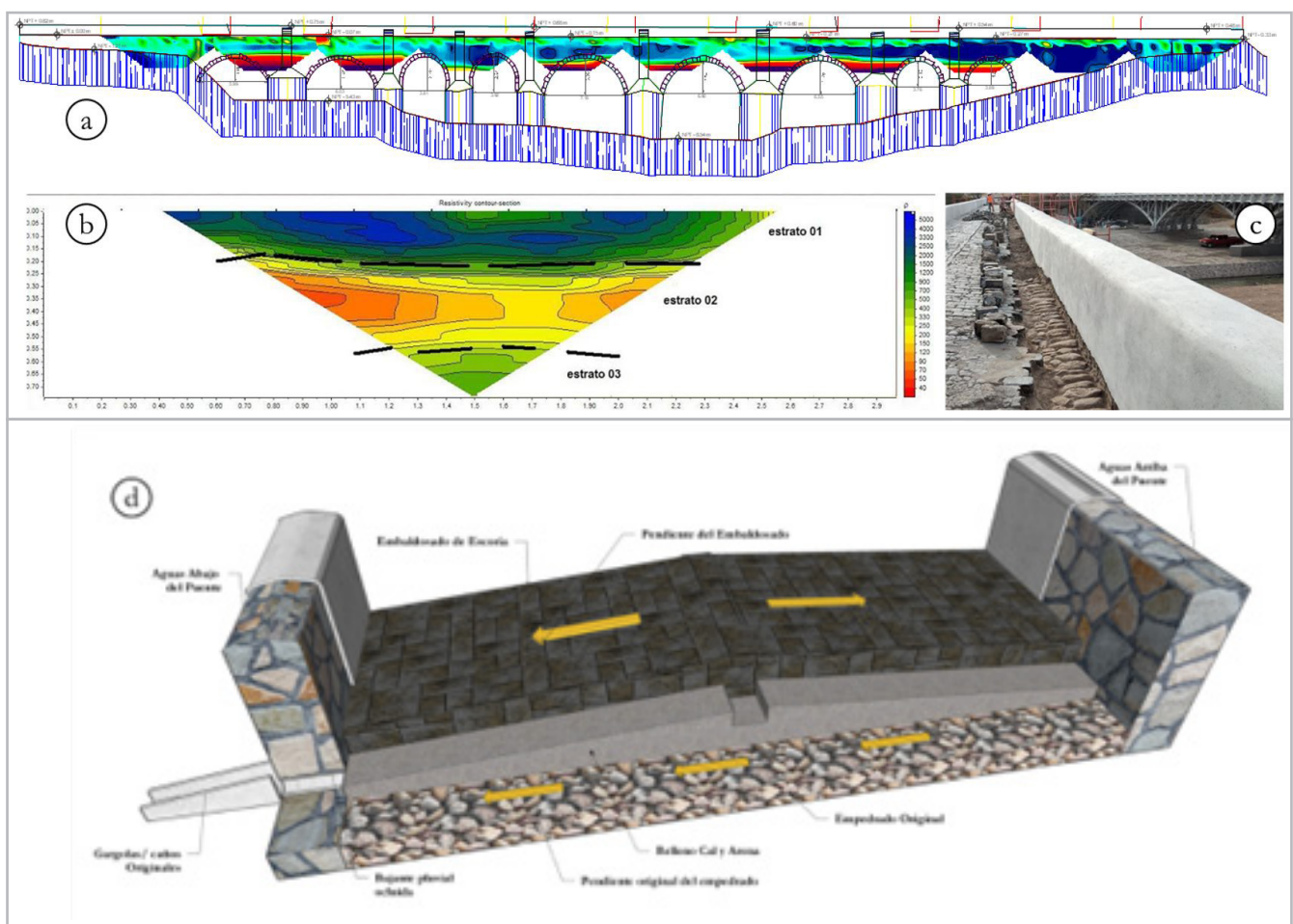


Figura 7.- a) Diagrama longitudinal de Resistividades en el puente “San Ignacio” Modificada a partir de Maldonado (Maldonado 2021:124), b) Diagrama transversal de resistividades en la calzada del puente. Elaboración propia. c) Retiro de la primera capa de baldosas de fundición a los costados de la calzada. Modificada a partir de Maldonado (Maldonado 2021:61). d) Diagrama de la sección transversal existente, Elaboración propia.

Estado Seco		Estado Saturado	
Resistencia Eléctrica (Ohmios)	Resistividad (Ohmios-metro)	Resistencia Eléctrica (Ohmios)	Resistividad (Ohmios-metro)
69,265.83	4610.33	32,945.00	2192.82

Tabla 1.- Valores de resistividad y resistencia para la probeta de escoria de fundición. Modificada a partir de Maldonado (Maldonado 2021:80).

PROBETA	P _i (gr)	P _s (gr)	P _h (gr)	V (cm ³)	% h	%h _{abs}	σ (gr/cm ³)	Porosidad
SI-1	4571	4570	4585	1432	0.022%	0.328%	3.191	1.047%
SI-2	1151	1150	1157	360	0.087%	0.609%	3.194	1.944%
SI-3	575	573	575	173	0.349%	0.349%	3.312	1.156%
SI-4	2013	2012	2022	620	0.050%	0.497%	3.245	1.613%
SI-5	345	345	345	105	0.000%	0.000%	3.286	0.000%
SI-6	267	267	268	71	0.000%	0.375%	3.761	1.408%
CG-1	1523	1522	1527	459	0.066%	0.329%	3.316	1.089%
CG-2	654	652	656	205	0.307%	0.613%	3.180	1.951%
CG-3	905	903	908	267	0.221%	0.554%	3.382	1.873%
CG-4	360	360	361	95	0.000%	0.278%	3.789	1.053%
CG-5	523	522	523	163	0.192%	0.192%	3.202	0.613%
CG-6	506	505	507	149	0.198%	0.396%	3.389	1.342%
CG-7	564	562	565	173	0.356%	0.534%	3.249	1.734%
CG-8	201	200	202	65	0.500%	1.000%	3.077	3.077%
CG-9	461	460	461	134	0.217%	0.217%	3.433	0.746%
PROMEDIO					0.171%	0.418%	3.334	1.377%

Tabla 2.- Propiedades físicas de la escoria de fundición. Elaboración propia.

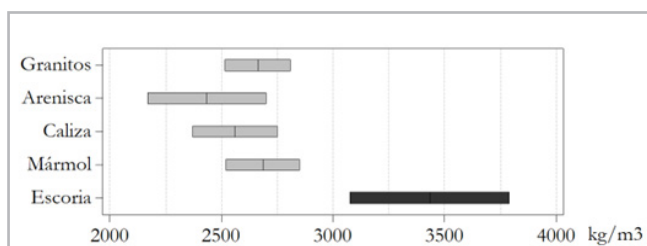


Figura 8.- Comparación de la densidad promedio de otras rocas conocidas con respecto a la escoria de fundición, modificada a partir de Zhang (Zhang 2017:52).

Sin embargo, al compararla con otras rocas [Figura 9c] la resistencia relativa no es tan alta, además, los resultados mostraron una varianza alta, posiblemente ocasionada por las microfisuras preexistentes en el material (Hajiabdolmajid 2002:1). El tipo de falla observado durante los ensayos puede clasificarse como una falla frágil, puesto que las probetas de escoria fallaron de manera súbita sin mostrar una deformación plástica significativa, a pesar de tener una alta resistencia a la compresión, lo cual se corresponde con el mecanismo del comportamiento frágil, el cual se da por la propagación de grietas, que pueden producirse a cualquier escala (Scholz 2019:1).

Este comportamiento frágil mostrado por las probetas analizadas, se puede extrapolar al comportamiento de las baldosas de escoria colocadas en la intervención de principios del siglo XX al puente “San Ignacio”, ya que, conforme la frecuencia y el peso de los vehículos que circulaban sobre el puente fue avanzando, las baldosas de escoria se fueron fracturando al flexionarse [Figura 6b] por efecto de las cargas dinámicas asociadas con el tráfico. A pesar de la alta resistencia a compresión de las piezas, su baja capacidad para deformarse ante las cargas aplicadas y la falla del mortero con que fueron asentadas, originó fracturas significativas en las baldosas [Figura 6b], aunque también es muy posible que el efecto de la fatiga por efecto de los ciclos de carga y descarga, como los esperados en el tráfico del puente sobre los materiales, facilitará la fragilidad de las baldosas (Liu 2021:1225).

A partir de todo lo anterior, es posible afirmar que la presencia del embaldosado significa un riesgo importante a mediano plazo para la conservación del puente, puesto que altera su funcionamiento estructural e hidráulico y no existe compatibilidad con los materiales originales.

Conclusiones

El sistema constructivo empleado en el embaldosado de la intervención del puente “San Ignacio” de principios del siglo

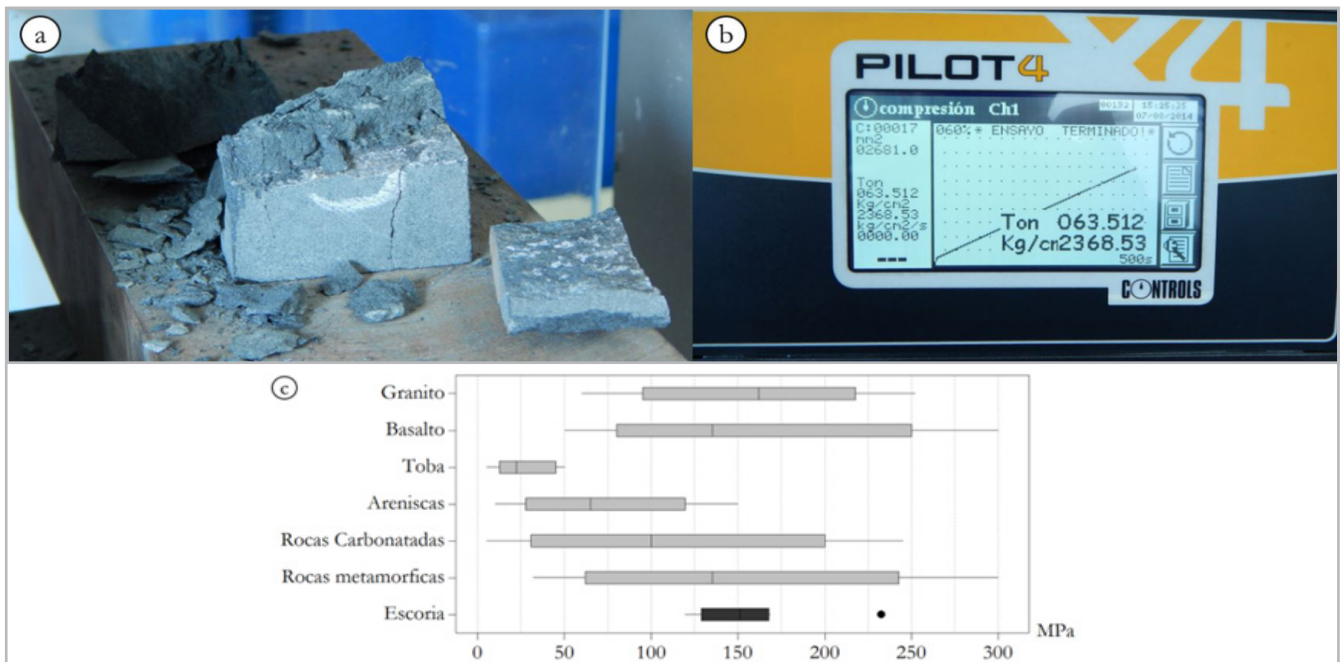


Figura 9.- a) Falla frágil de las muestras ensayadas a compresión simple, b) Altas resistencias alcanzadas por las probetas de escoria (Probeta 9). Elaboración propia. c) Comparación de la resistencia a compresión simple de la escoria de fundición con otras rocas comunes. Modificada a partir de Siegesmund (Siegesmund 2011:172).

Probeta	σ_c MPa
Probeta 1 (SI)	146.48
Probeta 2 (SI)	126.15
Probeta 3 (SI)	131.40
Probeta 4 (SI)	151.05
Probeta 5 (CG)	166.76
Probeta 6 (CG)	160.56
Probeta 7 (CG)	119.48
Probeta 8 (CG)	168.51
Probeta 9 (CG)	232.32
Promedio	155.86

Tabla 3.- Tabla 3 Resultados de ensayos a compresión simple de las muestras de escoria del puente “San Ignacio” (SI) y “Cerro de la Grasa” (CG). Elaboración propia

XX, construido a partir de baldosas de escoria subproducto de la industria de la fundición en Aguascalientes, presentó fallos significativos desde su concepción, lo cual generó diversas problemáticas en el funcionamiento del puente, que repercutieron en su salud estructural, por lo cual se recomendó al Instituto Nacional de Antropología e Historia su retiro durante los procesos de intervención que tuvieron lugar en el año 2021.

La decisión de construir el embaldosado encima del empedrado original sin respetar las pendientes transversales originales (hacia aguas abajo del puente), las cuales fueron cambiadas por una pendiente doble [Figura 7d], elevando el nivel de la calzada y ocluyendo el sistema de drenaje original, siendo este sustituido por orificios en el parapeto, generó un

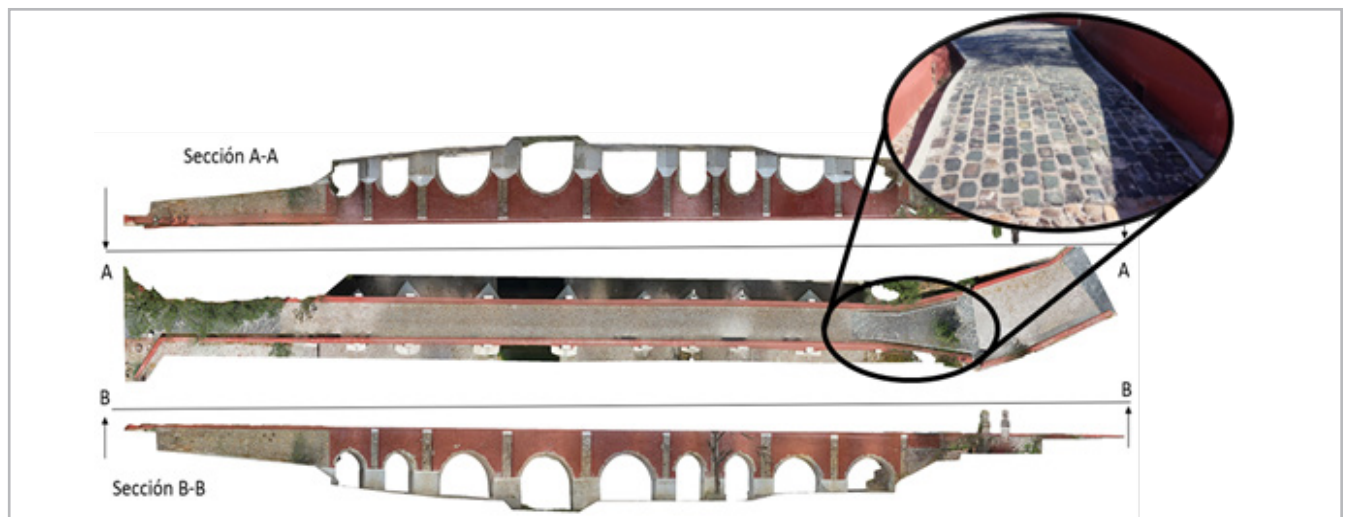


Figura 10.-Ortofotos de planta y fachadas, puente San Ignacio tras su restauración y la rampa de acceso al puente “San Ignacio” tras la peatonalización, construida con las baldosas de escoria de fundición. Modificada a partir de Valdez (Valdez 2023:98).

mal drenaje de la calzada y daños por escurrimiento en los muros del puente, lo cual facilitó la entrada de humedad en los rellenos granulares ubicados sobre las bóvedas del puente.

El sistema constructivo aplicado en la intervención fue planteado considerando las cargas de la época, las cuales se han incrementado a través de los años, ocasionando la falla del mortero pobre sobre el cual fueron asentadas las baldosas de escoria, propiciando una mala distribución de esfuerzos en las piezas, lo cual en conjunto con las características litológicas de baja deformación plástica del material, generó fallas de tipo frágil, concluyendo en la fractura de la mayoría de las baldosas, debido a los esfuerzos de flexión y la fatiga a la que fueron sometidas por efectos del tráfico a través de las décadas. Además de lo anterior la alta densidad del material significaba una carga muerta innecesaria de más de 500 kg/m², por lo que su retiro aliviaría las cargas de la calzada.

Las fracturas en las baldosas y la pérdida de piezas por la falla del mortero, en conjunto con el pobre drenaje de la calzada, propiciaron la entrada de humedad a los rellenos del puente y su persistencia en el tiempo, debido a la falta de transpiración del empedrado, ocasionada por la baja porosidad efectiva del material, demostrada por una alta resistividad eléctrica y las pruebas de laboratorio realizadas. Esto constituía un problema de compatibilidad entre los materiales originales y los empleados en la intervención anterior. Esta presencia de agua sostenida en el tiempo intensificaba los daños por cristalización de sales en las juntas y dovelas del intradós de las bóvedas, lo cual significaba un riesgo fuerte de colapso a mediano plazo.

A partir de lo antes mencionado, el proceso de restauración del puente emprendido por el INAH incluyó el retiro total del empedrado conforme a las recomendaciones, lo cual permitió liberar el empedrado original detectado por el estudio geofísico y los sondeos, el cual fue intervenido para garantizar su funcionalidad. Esta liberación permitió también el funcionamiento del sistema de drenaje original, para lo cual fueron sustituidas las gárgolas rotas en el lado aguas abajo del puente, recuperando plenamente su funcionalidad. Sin embargo, dado que el nivel de la calzada al retirar el empedrado, no se correspondía con los niveles actuales de la vialidad, se decidió construir rampas en los accesos al puente [Figura 10] utilizando las piezas mejor conservadas seleccionadas durante el desmantelamiento del empedrado, con la finalidad de poner en valor el proceso de fabricación de estas sin comprometer el funcionamiento del puente ahora peatonalizado.

Agradecimientos

Agradecemos las facilidades prestadas en el uso de laboratorios y equipos a la Universidad Autónoma de Aguascalientes y el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, así como al Centro INAH Aguascalientes por el acompañamiento realizado y al Dr. Francisco Mercado por su apoyo.

Referencias

- ASTM STANDARD C 127–88 (2001). Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. Pennsylvania: *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/C0127-88R01>
- ASTM STANDARD C170/C170M–09 (2009). Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone. Pennsylvania: *ASTM International*. https://doi.org/10.1520/C0170_C0170M-09
- BENAVENTE, D. *et al.* (2004). "Estudio de propiedades físicas de las rocas", *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 12.1: 62-68.
- BOILS MORALES, G. (2009). "Los puentes de la Independencia" *Boletín De Monumentos Históricos*, 16: 155–167.
- GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ, J. A. (1999). *Historia de la Iglesia Católica en Aguascalientes*. Volumen I. Parroquia de la Asunción de Aguascalientes. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- HAJIABDOLMAJID, V., *et al.* (2002) "Modelling brittle failure of rock". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39: 731-741. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00051-5](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00051-5).
- LIU, Y., DAI, F. (2021). "A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13.5: 1203-1230. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.03.012>.
- MALDONADO ARÉVALO, A. (2021). "Caracterización de rellenos granulares en puentes patrimoniales en Aguascalientes mediante métodos no invasivos". *Universidad Autónoma de Aguascalientes*. <https://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/2177>
- MESHAM, S., *et al.* (2023). "Waste slags as sustainable construction materials: a compressive review on physico mechanical properties". *Journal of Materials Research and Technology*, 23: 5821-5845, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.176>.
- NAVARRATE, M. *et al.* (2013). "Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura" *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, 3.2:133-143.
- NORGATE, T. *et al.* (2013). "Rock Smelting of Copper Ores with Waste Heat Recovery". *REWAS 2013*: 217-218. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48763-2_23
- SCHOLZ, C. H. (2019). "Brittle fracture of rock". En *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Scholz, C. H. (coord.). Cambridge: Cambridge University Press:1-42. <https://doi.org/10.1017/9781316681473>.
- SHENG, Y., *et al.* (2024). "Experimental study of sulfate crystallization damage to glutenite rock in the Majjishan Grottoes". *Heritage Science* 12, 98: 1-15. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01214-4>
- SIEGSMUND, S., DÜRRAST, H. (2011). "Chapter 3 Physical and Mechanical Properties of Rocks". En *Stone in Architecture 4th ed.*, Siegsmund, S., Snethlage, R. (coord.). Berlin Heidelberg: Springer-

Verla, 97-225. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2>.

SILVA LEÓN, I., REYES TRUJQUE, J., y ESCALANTE DÍAZ, C. (2021). "Establecimiento del grado de alteración en muros de edificios históricos de San Francisco de Campeche, México, empleando análisis de imágenes y el sistema de estadificación UAS". *Ge-Conservación* 19(1): 126-40. <https://doi.org/10.37558/gec.v19i1.861>.

SINGH B., GOEL R. K. (2011). "Chapter 6 - Rock Mass Rating", En *Engineering Rock Mass Classification*, Singh B., Goel R.K. (coord.), Roorkee: Butterworth-Heinemann, 45-62, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385878-8.00006-9>.

VALDEZ A., J. (2023). "Aplicación de la fotogrametría aérea para la elaboración de modelos 3D de edificios patrimoniales del estado de Aguascalientes" en *repositorio de tesis de la biblioteca digital de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/2818> [consulta: 01/05/2024].

YOUNG, D. (2008). *Salt attack and rising damp A guide to salt damp in historic and older buildings*, New South Wales: Heritage Victoria, Department of Planning and Community Development ISBN 978-0-9805126-5-6

ZHANG, L. (2017). *Engineering Properties of Rocks* (Second Edition), Tucson: Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802833-9.00007>

Autor/es



Miguel Angel Soto-Zamora
miguel.soto@edu.uaa.mx
Universidad Autónoma de Aguascalientes.
México
<https://orcid.org/0000-0003-1399-8001>

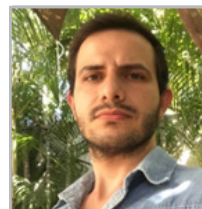
Ingeniero Civil, Maestro en Ingeniería Civil y Doctor en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos por la Universidad Autónoma de Aguascalientes, Profesor Investigador del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Aguascalientes con 14 años de antigüedad, Miembro de la Sociedad Española de Historia de la Construcción de 2015 a 2019, Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil 2017 a 2019, con 4 tesis y tesinas de Licenciatura Maestría y Doctorado dirigidas.



Rubén Alfonso López-Doncel
rlopez@uaslp.mx
Instituto de Geología Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México
<https://orcid.org/0000-0002-7596-8505>

Ingeniero Geólogo por la Universidad Autónoma de Nuevo León en Linares, Maestría y Doctorado en la Universidad Técnica de Clausthal, Alemania, con la especialidad en Geología Petrolera. Investigador de Tiempo Completo adscrito al Instituto de Geología de la UASLP. Director del Instituto de

Geología de la UASLP. Ha participado en diversos proyectos nacionales e internacionales, entre los que destacan proyectos en Alemania, Turquía, Sudáfrica, Armenia, Cuba, República Dominicana, Albania, Omán, Jordania entre otros. Docencia y asesoría posee al 2023: 38 artículos científicos arbitrados. Asesor de 23 tesis de Licenciatura, 19 tesis de Maestría y 3 de Doctorado; es Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 2 (SNI2).



Isaías Edén Vizcaíno-Hernández
edenv15@gmail.com
Universidad Autónoma de Aguascalientes.
México
<https://orcid.org/0000-0003-1477-4384>

Arquitecto por el Instituto Tecnológico Superior de El Grullo, y Maestría en Ingeniería Civil y Doctorado en Ciencias de los ámbitos antrópicos por la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Estancia de investigación en Universidad Autónoma de San Luis Potosí en 2017.



Andrea Maldonado-Arévalo
ama.ic@outlook.com
Universidad Autónoma de Aguascalientes.
México

Ingeniera Civil y Maestra en Ingeniería Civil por la Universidad Autónoma de Aguascalientes con la tesis: Caracterización de rellenos granulares en puentes patrimoniales en Aguascalientes mediante métodos no invasivos.

Artículo enviado 05/03/2024
Artículo aceptado el 06/05/2024



<https://doi.org/10.37558/gec.v24i1.1302>