

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA EXPERIMENTAL DE BÓVEDAS DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA CALIZA BAJO ASENTAMIENTOS VERTICALES INDUCIDOS



Isis Rodríguez Pérez

Candidato a Doctor
 ISISE, Universidad de Minho
 Azurém, Portugal
 Profesora asociada
 CAHAD, UADY, Mérida, México
 isis.rodriguez@correo.uady.mx



Graça Vasconcelos

Profesora Associada
 ISISE, Universidad de Minho
 Azurém, Portugal
 graca@civil.uminho.pt



Paulo Lourenço

Profesor Catedrático
 ISISE, Universidad de Minho
 Azurém, Portugal
 pbl@civil.uminho.pt

RESUMEN

Alrededor del mundo se observan monumentos y edificios históricos a base de mampostería no reforzada (URM) y formas arqueadas, que necesitan ser estudiadas y preservadas. A pesar de que existen suficientes investigaciones centradas en las bóvedas, aún existe un vacío de conocimiento sobre el comportamiento mecánico bajo los efectos de asentamientos. En esta investigación se estudiaron experimentalmente las bóvedas de mampostería de las iglesias de Yucatán en México de los siglos dieciséis al dieciocho, simulando un asentamiento diferencial como condición de carga. La caracterización mecánica se realizó en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Minho, mediante un ensayo cuasiestático sobre una bóveda de mampostería de piedra caliza no reforzada y escalada a un tercio. En este artículo, se presentan y discuten el procedimiento de prueba y los principales hallazgos experimentales.

Palabras clave: Dovelas estilo romano, iglesias mexicanas, mampostería no reforzada, caracterización geométrica, caracterización de mampostería de piedra.

1. INTRODUCCIÓN

La arquitectura monumental e histórica se caracteriza por mampostería no reforzada (URM) y formas arqueadas. La técnica del arco se empleó desde el año 4000 a.C. en Mesopotamia (hoy tierras de Irak), usando ladrillos de adobe (ladrillos de barro sin cocer). Mas tarde los romanos utilizaron masivamente el arco y la bóveda, convirtiéndolos en elementos estructurales representativos de su civilización. Hoy en día, el estudio de las construcciones históricas ha sido un gran desafío desde muchas perspectivas como: materiales y técnicas constructivas entre otros.

Aunque existen investigaciones centradas en las bóvedas, la mayoría se centran en aproximaciones numéricas y menos en trabajos experimentales, que en su mayoría son hechos de mampostería de ladrillo y no de piedra. Entre los temas menos abordados se encuentra las cimentaciones. Se sabe que, las edificaciones históricas se construyeron generalmente sobre cimentaciones superficiales con el mismo sistema constructivo utilizado para los muros, sin embargo, no se prestó mucha atención a las características del suelo ya que la ciencia de la mecánica del suelo fue desarrollada hasta 1925 por Terzaghi [1]. En la actualidad, las construcciones históricas muestran daños y patrones de grietas debido al asentamiento de los cimientos, ya sea por la limitada capacidad de resistencia de los suelos o por la presencia de oquedades, bóvedas o cavernas que se desconocían al momento de la construcción. Entender el origen de los daños y proponer una adecuada intervención es un fuerte desafío en ingeniería estructural, ya que pocos trabajos han abordado el problema del asentamiento de la cimentación y las configuraciones de las rótulas de las bóvedas y arcos, dependen principalmente del ángulo de asentamiento y de la esbeltez de las cimentaciones.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar, a través de ensayos experimentales, el comportamiento mecánico de las bóvedas de mampostería sometidas a asentamientos verticales. La investigación se desarrolló sobre Iglesias mexicanas del siglo XVI al XVIII ubicadas en Yucatán, al sur de México. Las iglesias fueron construidas por los Franciscanos a partir de 1537 sobre las principales construcciones Mayas. Debido a todo lo que representan, hoy en día, se reconocen como un legado arquitectónico histórico imprescindible de conservar.

Las iglesias de Yucatán son estructuras masivas a base de muros portantes y bóvedas, construidas a base de mampostería de piedra caliza y mortero de cal, asentados directamente sobre suelo firme o roca mediante cimentaciones superficiales de mampostería con el mismo sistema constructivo utilizado para los muros, pero utilizando en algunos casos, piedras de mayor dimensión.

Para el desarrollo de esta investigación, la tipología de bóveda, las características geométricas y las técnicas constructivas fueron seleccionadas de una extensa revisión sobre iglesias mexicanas ([2]). Las características físicas, mecánicas, mineralógicas y petrográficas de los materiales se definieron en una extensa campaña experimental [3]. En este trabajo se realiza la caracterización mecánica de una sección unitaria de bóveda mediante ensayo cuasi estático. El modelo se construyó a base de mampostería de piedra caliza no reforzada, escalado al 30%. Estos estudios experimentales se desarrollaron en el laboratorio de Estructuras de la Universidad de Minho. En este documento, se presentan y discuten el procedimiento de prueba y los principales hallazgos experimentales.

2. MODELO EXPERIMENTAL DE LA BÓVEDA DE CAÑÓN

Las iglesias de Yucatán si bien son de configuración sencilla, en términos generales pueden alcanzar dimensiones bastante considerables, como lo muestran las alturas interiores registradas entre los 12 y 15m. Por su parte, las bóvedas registran claros entre 9 y 11m con alturas entre 4 a 5.5m. Los muros registran alturas entre los 7 y 10m con espesores entre 1 y 3m. Debido a la escala de las iglesias de Yucatán, un gran desafío es definir un modelo experimental que sea representativo de los existentes. Además de la geometría, también es un problema el uso de materiales adecuados que representen a los existentes. Esta sección incluye información referente al diseño del modelo experimental tanto a nivel geométrico como de materiales. También, se proporciona y analiza la configuración de carga y la instrumentación.

La geometría y el tipo de bóveda utilizada en este experimento, se base en un estudio más amplio de todas las características físicas y geométricas que se puede encontrar en Rodríguez [2]. Con base en esta información se decide trabajar con bóvedas de cañón corrido semicircular apoyadas sobre muros y una sección transversal con las siguientes dimensiones: muros de 2.55m de espesor, espesor de bóveda 0.42m, claro de la bóveda 9.06m, claro reducido igual a 7.85m y altura de relleno en trasdós igual a 2.95m.

Por su parte, la altura de los muros se redujo hasta 50 cm apoyados en la evaluación de los problemas mecánicos reales que pudiera presentar, si bien los muros ocasionalmente presentan inclinaciones, estos no se derivan de un problema mecánico ya que resulta geoméricamente improbables por la dimensión del espesor; si existen inclinaciones en los muros, probablemente se deban al antiguo sistema constructivo utilizado, a las diferentes etapas constructivas o la presencia de asentamientos diferenciales. Cualquier inclinación inicial sin importar el origen se agravará con el tiempo debido a la pérdida de resistencia de los materiales el envejecimiento o asentamientos por sobre carga. En consecuencia, como la inclinación no es un problema mecánico del muro, es la consecuencia de otras condiciones, es posible la reducción de su altura. La geometría seleccionada se escaló al 30% con base en las dimensiones y capacidades del laboratorio. El modelo experimental se construyó de acuerdo con las características geométricas y morfológicas que se muestran en la Figura 1. Los muros representan la morfología típica de muros compuestos por tres hojas: (i) las hojas exteriores con mayor tamaño de piedras y disposición más regular; (ii) hoja interior compuesta por piedras más irregulares, redondeadas y de menores dimensiones. La bóveda de cañón está compuesta por piedras laminares, dispuestas verticalmente, encajadas con mortero a base de cal y piedras de menor tamaño, adicionalmente en extradós tienen una capa de mortero a base de cal y piedras más pequeñas simulando una capa de compresión y finalmente se le coloca una capa de acabado, ver Figura 1b.

A escala real, las dimensiones promedio de las unidades de mampostería de piedra de los muros se definieron con una sección transversal irregular, con bordes redondeados, pero toscamente trabajados y una dimensión de 30cm por lado. Las dovelas de las bóvedas presentaban unas dimensiones medias de 12,5cm x 35cm x 50cm. Las dimensiones de las piedras se escalaron al 50%, un poco más que el modelo geométrico debido a la reducida dimensión real de las piedras y procurando la facilidad constructiva del modelo experimental.

Es decir, las dimensiones propuestas para el modelo fueron: 1) entre 10 y 30cm para muros y 2) alrededor de 6 x 17.5 x 25cm para las dovelas.

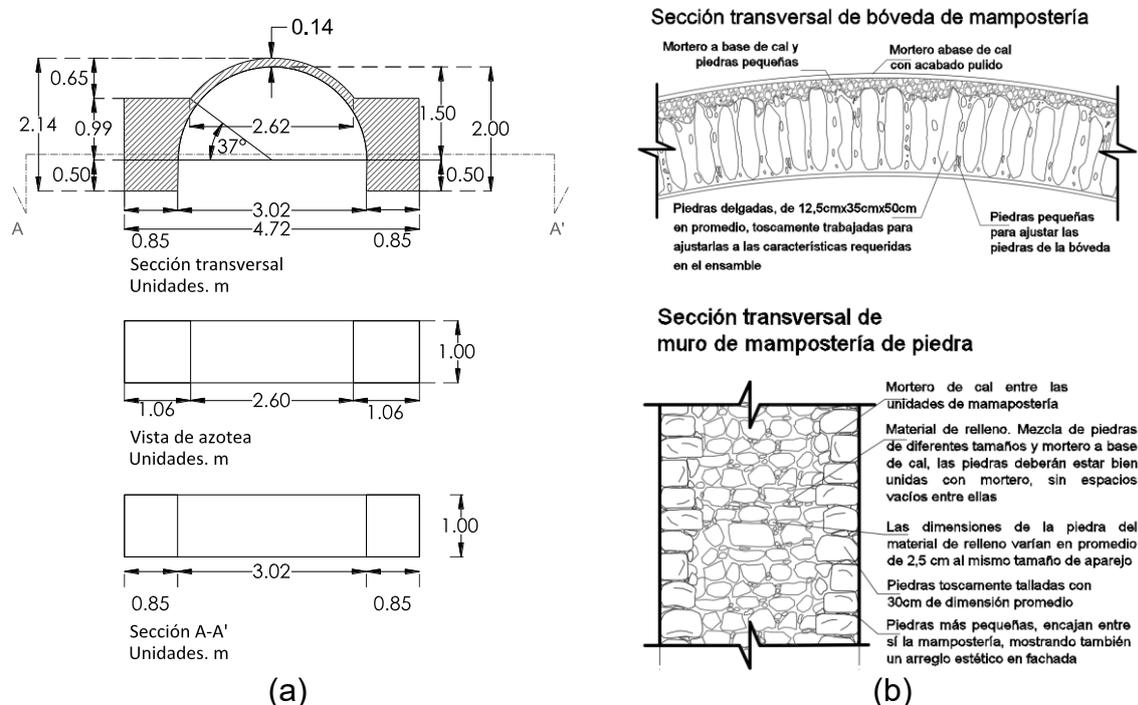


Figura 1. Sección transversal representativa. (a) sección transversal experimental, vista de azotea y sección de corte A (b)

En general, para hacer un modelo experimental representativo, las propiedades mecánicas de los materiales deben ser próximas a las existentes en los edificios prototipo. De esta manera, es factible reproducir mejor el comportamiento mecánico y los modos de falla que gobiernan [4]–[6].

Las piedras de las iglesias de Yucatán son principalmente roca sedimentaria compuesta por carbonato de calcio (CaCO_3) también llamado calizas o calcita con CaCO_3 al 90% o mayor, densidad aparente (ρ) entre 1963 y 2400kg/m³, porosidad abierta (η) entre 20 y 5.4%, capacidad de absorción de agua por inmersión (A_b) entre 10.4 y 2.3%, resistencia a la compresión uniaxial (f'_c) entre 33 y 72 MPa y módulo de elasticidad (E) entre 25335 y 55364 MPa. Con base en lo anterior nos fue suministrada una piedra caliza de Alcobaça y proveniente de la cantera Farpedra. Se realizaron estudios experimentales de control sobre el material de acuerdo con la ASTM C170 [7], la ASTM D 3148 [8] y la BS EN 14580 [9]. Las propiedades mecánicas de ambos estudios confirmaron Esfuerzo a compresión uniaxial (f'_c) de 91.6 MPa (SD 20.44) y Módulo de elasticidad por ciclos (E_c) de 36599 MPa (SD 5766), propiedades mecánicas cercanas a las observadas en piedras de Yucatán.

Por su parte el mortero para la mampostería debía simular un mortero histórico envejecido, con tal propósito se decide utilizar un mortero comercial con pobres propiedades mecánicas, clase CS II que equivalente a una resistencia a la compresión entre 1.5 y 5 N/mm² [10].

3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

La réplica de la antigua bóveda de mampostería se construyó sobre dos plataformas de acero y una cimbra curva con las dimensiones precisas de la bóveda a construir. Se puso especial atención en el desplazamiento vertical de la cumbrera de la bóveda y a los empujes horizontales en el arranque de esta. Para controlar ambos desplazamientos, la cumbrera se refuerza con tres puntales metálicos, mientras que el desplazamiento horizontal se restringe mediante barras horizontales de acero, soldadas en el arranque de la cimbra de la bóveda, ver Figura 2a.

La construcción del modelo se inicia con los muros, realizando la capa exterior de la mampostería a manera de muro perimetral con piezas grandes y mortero. Debido a la forma irregular de las piedras, no se observa un arreglo en la colocación de las piedras y los espacios vacíos entre ellas se llenaron con piedras más pequeñas a manera de cuña y mortero, hasta lograr una mampostería firme y compacta. El centro se realizó a base de concreto ciclópeo de piedras en diferentes dimensiones evitando dejar cualquier vacío que pudiera debilitar el sistema, ver Figura 2b.



Figura 2. Construcción del modelo experimental. (a) cimbra constructiva, (b) muros, (c) bóveda y (d) modelo experimental concluido

Se puso especial atención en la conexión muro-bóveda; en el arranque de la bóveda, se cuidó el apoyo y disposición de las piedras aun cuando formaran parte del espesor del muro. La bóveda se construyó con piedras delgadas, con un arreglo tipo romano (verticales a manera de dovelas), con uniones prácticamente alineadas en ambos sentidos. Cualquier traslape observado se debe únicamente a las dimensiones irregulares de las dovelas y de ninguna manera es intencional. La construcción se realiza desde los arranques y hacia la cumbrera. La última pieza ubicada en la cumbrera se debe colocar cuidando que ajuste a presión en el espacio disponible. Debido a su importancia, a esta última pieza colocada, se le conoce también como pieza clave, ver Figura 2c.

Terminada la bóveda se procede a colocar la sobrecarga en el extradós. La extensión de los muros debía alcanzar un ángulo central de 37° , lo que equivale a una altura de 1m sobre el nivel del arranque de la bóveda, ver Figura 1. Finalmente, la parte correspondiente a la azotea es cubiertas con una capa delgada de mortero para lograr una superficie regular que permita la instrumentación y medición. El modelo se desmoldó después de 28 días, la Figura 2 presenta algunas imágenes del proceso de construcción y el modelo experimental listo para ser instrumentado y ensayado.

4. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL Y PROTOCOLO DE CARGA

Las iglesias de Yucatán están sujetas mayoritariamente a peso propio y a una carga viva insignificante. Se considera que parte de los daños y derrumbes observados en las bóvedas de cañón pueden ser resultado del envejecimiento de los materiales y del deterioro por penetración del agua de lluvia, pero también pueden estar asociados a movimientos de los muros de carga debido a asentamientos del suelo, colapso de oquedades o cavernas existentes en el subsuelo sedimentario de la península. Con base en esto, se decidió evaluar el comportamiento estructural de las bóvedas de cañón de mampostería ante una combinación del peso propio y desplazamientos verticales inducidos para simular los asentamientos del suelo.

El diseño de la prueba experimental se basó en un análisis numérico no lineal que permitió predecir la ubicación de los daños. El modelo numérico se construyó con elementos de deformación plana de 6 y 8 nodos en el paquete DIANA FE [11]. Para simular el comportamiento no lineal de la mampostería se realizó un análisis no lineal por pasos. La Figura 5 resume los resultados de los análisis, con tres grietas, que indican las posiciones de las bisagras. Las dos primeras grietas aparecen con 1mm y 2mm de desplazamiento inducido. La primera grieta aparece en el extradós de la conexión bóveda-muro correspondiente al apoyo donde se induce el desplazamiento. Mientras que la segunda grieta aparece en el intradós cerca del soporte fijo. La tercera fisura aparece a los 140 mm de desplazamiento inducido.

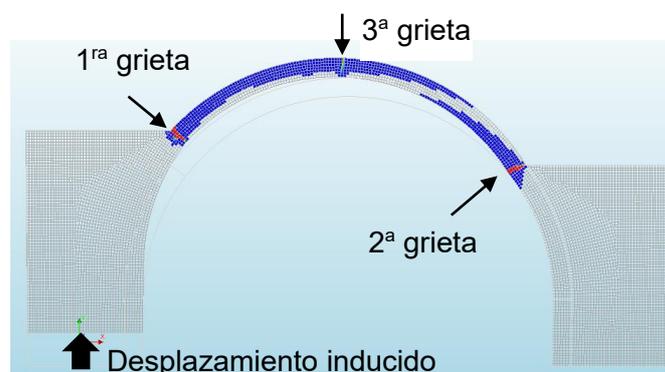


Figura 3. Predicción de grietas

En esta sección se explica: (a) las condiciones de carga, (b) el dispositivo de desplazamiento para inducir el asentamiento, (c) el programa de aplicación de carga, (d) el montaje de la instrumentación y (e) el diseño del registro fotográfico.

La prueba experimental se desarrolló, simulando un asentamiento bajo control de desplazamiento, ver Figura 4a. El daño en el modelo se indujo con la aplicación de un desplazamiento vertical en uno de los apoyos. La carga de daño se aplicó mediante el incremento de desplazamientos y se eliminó después del daño. Para lograrlo, se diseñó una plataforma de acero, suficientemente rígida que permitiera realizar desplazamientos verticales uniformes en uno de los apoyos del modelo experimental. La base rígida, compuesta por perfiles de acero HEB, se unió a dos perfiles de acero en forma de L a los que se conectaron simétricamente dos actuadores. Los actuadores se pusieron en contacto directo con la losa

de reacción, Figura 4b. El levantamiento de la base comienza cuando la reacción medida por los dos actuadores es aproximadamente igual a la mitad del peso del modelo. En cada uno de los actuadores se colocó una celda de carga que permitían registrar la fuerza de reacción, ver Figura 4b. La disposición de los actuadores es simétrica con respecto a la bóveda para evaluar la rotación del modelo fuera del plano. Para evitar la rotación en el plano de la pared, se recurre a un arreglo de perfiles, teflón y aceite, ver Figura 4c.

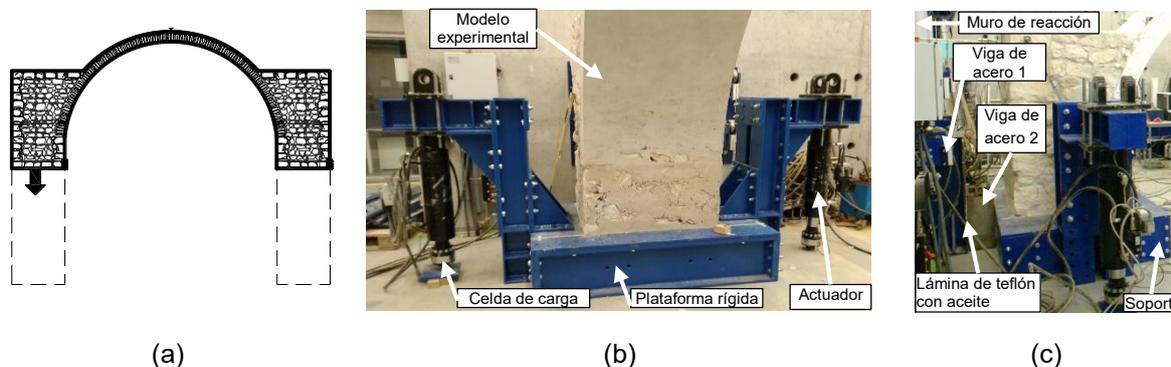


Figura 4. (a) modelo experimental sometido a peso propio y asentamiento diferencial, (b) dispositivo rígido de desplazamiento vertical, (c) dispositivo para evitar rotación de la base en el plano del modelo

El ensayo se realizó en control de desplazamiento. Para evitar cualquier rotación en la base se realizó un programa experimental que permitiera controlar los transductores internos de los actuadores de forma simultánea. Se aplicó un desplazamiento linealmente creciente y controlado, con una velocidad de 0,008 mm cada segundo. El desplazamiento se aplicó con rampa lineal hasta lograr las 3 articulaciones en el modelo experimental.

El diseño de adquisición de datos fue realizado por 21 Transductores de Desplazamiento Lineal Variable (LVDT), 2 computadoras, 2 actuadores con 300kN y elementos complementarios como cables, barras de aluminio y otros. Los LVDT tenía diferentes rangos de desplazamiento, los cuales fueron seleccionados en función del desplazamiento esperado. El sistema de control se realizó utilizando el programa Dyna testerV3 y NI LabVIEW FPGA Xilinx 10.1, ver Figura 5a.

La instrumentación del modelo se realizó considerando los puntos relevantes a controlar y evaluar según los estudios numéricos previos, estos son: (1) el desplazamiento vertical inducido, (2) la rotación del modelo en el plano, (3) el comportamiento de los muros y (4) el comportamiento de la bóveda. Con ese propósito, los LVDT se agruparon según la tarea a realizar y se les asignó una nomenclatura conformada por números y letras, siguiendo el formato MAYÚSCULA+número+minúscula. Las letras mayúsculas relacionaban al transductor con el objetivo de la medición donde R indica el control de la rotación o desplazamiento en el plano de la pared, S controla el desplazamiento inducido, V controla los desplazamientos en la bóveda y W controla el comportamiento de los muros de apoyo. El número, es consecutivo y relaciona los transductores con el mismo objetivo de medición y la minúscula indicaba la posición del transductor, cara A, Cara B o al centro del espesor unitario de la bóveda, ver Figura 5b.

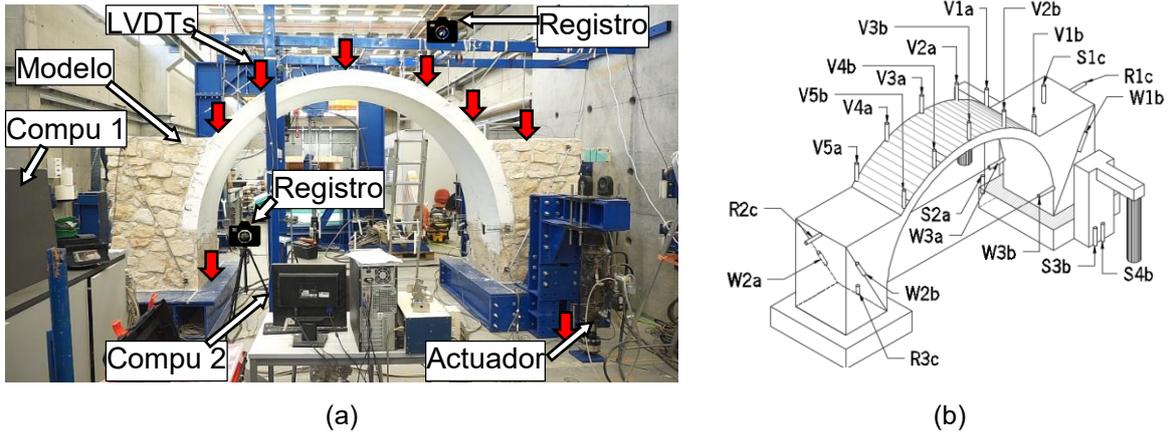


Figura 5. Modelo experimental. (a) configuración experimental y (b) ubicación de LVDTs

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 Validación del experimento.

El experimento tuvo una duración de 58 minutos, el desplazamiento vertical máximo inducido fue de 25.99mm. Se realizó la validación del sistema experimental con la revisión del comportamiento de los actuadores, graficando fuerza y desplazamiento. La Figura 6a muestra un incremento de la carga desde cero y hasta alcanzar aproximadamente 31 kN donde se mantiene constante, esta carga máxima alcanzada se identifica como la mitad del peso de la bóveda la cual se tenía que superar para iniciar con el desplazamiento vertical inducido, es decir, este punto indica el inicio del experimento; además, se observa que el levantamiento se realiza en simultaneo hasta los 8mm. Por su parte la Figura 6b muestra la relación entre el promedio de las cargas aplicadas por los actuadores y los desplazamientos de los transductores de control S2a, S3b, S4b (en la base) y S1c (en el muro). analizando el transductor sobre el muro (S1c) claramente se puede corroborar que el experimento inicia una vez superado el peso de la estructura en el apoyo (31kN) y registrando en ese momento 0.95mm de desplazamiento inducido.

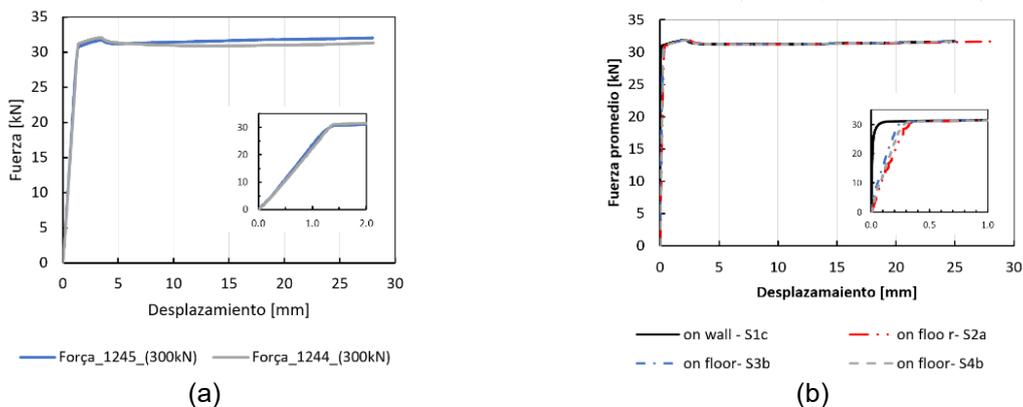


Figura 6. Validación del sistema experimental. (a) comportamiento de los actuadores, (b) inicio del experimento

La rotación de la plataforma fuera del plano se revisó mediante los transductores de control en la base S2a, S3b y S4b, en función del tiempo. Donde S2a se ubica en la cara A mientras S3b y S4b se ubican en la cara B. Se concluye que la plataforma se levantó horizontalmente los primeros 500 segundos que equivalen a 3mm de desplazamiento vertical, posterior a los cuales se registra una pequeña inclinación de la plataforma con un ángulo de 0.00134 grados al final del experimento, lo que se considera muy pequeño, prácticamente despreciable para la escala y movimientos que se están induciendo en el experimento.

El desarrollo del experimento se analizó revisando el comportamiento de los desplazamientos en función del tiempo. Para ello se definieron los signos a considerar en las gráficas de análisis en función de los movimientos sufridos por el modelo experimental. Primeramente, se define el frente del experimento como cara A, donde la plataforma de desplazamiento vertical inducido se ubica a la izquierda de la cara A y como cara B, la cara posterior del modelo experimental. Con base en ello y viendo de frente la cara A, la definición de los signos utilizados en los análisis y gráficas de resultados se realizó basados en un plano cartesiano donde los signos positivos se encuentran a la derecha y hacia arriba y los signos negativos a la izquierda y hacia abajo.

5.2 Análisis de las deformaciones

El comportamiento del modelo se revisó analizando tres movimientos importantes: (1) la deformación del modelo en el plano, (2) las deformaciones de la bóveda y (3) las deformaciones de los muros.

La Figura 7a muestra los desplazamientos registrados por los LVDT R1c, R2c y R3c, su ubicación se puede observar en la Figura 5b. Estos transductores se colocaron con el propósito de registrar las deformaciones del modelo en el plano.

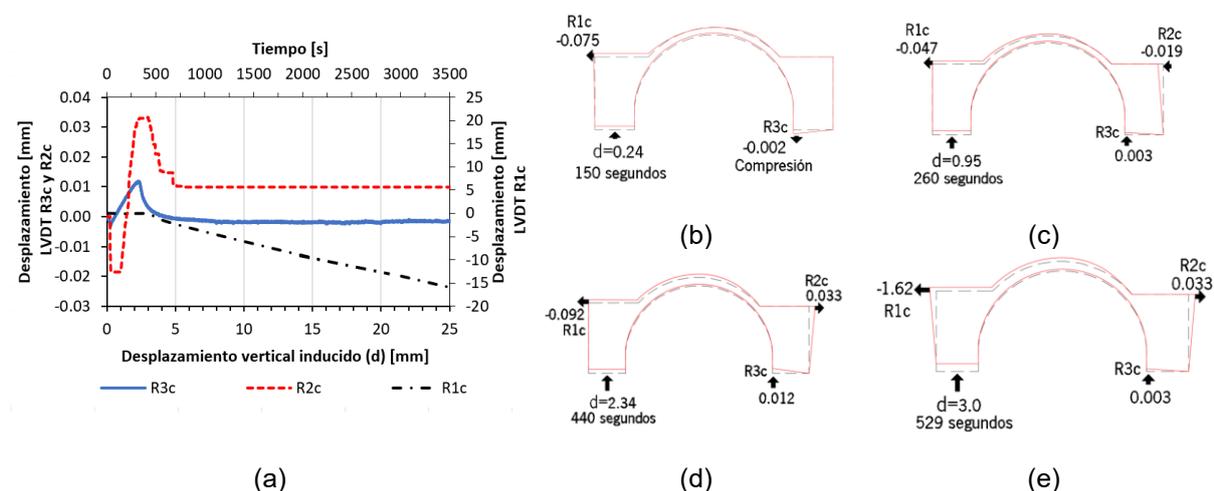


Figura 7. Análisis de las deformaciones del modelo en el plano (mm)

Las deformaciones en el modelo comienzan a registrarse a 150 segundos de iniciado el experimento con 0.24mm de desplazamiento vertical y una estructura que comienza a sentir los efectos del movimiento inducido al registrar ligeras compresiones en el apoyo fijo (ver Figura 7b), también es posible notar un desplazamiento horizontal hacia la izquierda de 0.075 mm (R1c). La compresión observada en R3c se puede atribuir a la redistribución de las cargas

en los apoyos, producto del levantamiento de la plataforma y al proceso de superar los 31kN de carga en el apoyo. La carga en el apoyo se supera, al aplicar 0.95mm de desplazamiento vertical inducido (aproximadamente los 260s) el lado derecho de la estructura (el apoyo fijo) registra movimientos hacia arriba y hacia la izquierda; R2c se desplaza 0.019mm y R3c se levanta 3 micras, (ver Figura 7c). Dado que no existen fisuras, probablemente la adherencia entre materiales hace que todo el sistema funcione monolíticamente produciendo el desplazamiento en el muro derecho.

Al aplicar 2.34mm (440s y Figura 7c) de desplazamiento inducido, se observa que ambos muros de apoyo se desplazan horizontalmente en sentidos opuestos, por lo que se estima la ocurrencia de algún daño, además, los tres transductores R1c, R2c y R3c muestran puntos de inflexión (Figura 7a). Este comportamiento continúa a hasta los 3mm de desplazamiento (529s) donde aparentemente la estructura se divide en dos grandes bloques, observándose que la parte izquierda continúa rotando hacia la izquierda, mientras la parte derecha del modelo comienza a regresar a su posición inicial, (ver Figura 7d).

Esta tendencia de comportamiento como dos grandes bloques rígidos, donde la pared izquierda rota hacia afuera y la pared derecha regresa a su posición inicial, se extiende todo lo que resta del experimento. El experimento se detiene cuando el desplazamiento inducido alcanza 26mm. En ese punto la pared derecha en R2c, muestra una deformación residual de 10 micras, mientras R3c comenzaba a registrar nuevamente compresiones de 0.001mm. Por su parte la pared izquierda (R1c) alcanza un desplazamiento máximo de 16 mm que indica que la bóveda se continúa abriendo.

Las deformaciones registradas en la bóveda se monitorearon en 10 puntos del extradós (ver Figura 5b). Los transductores registraron 2 rangos de desplazamiento, los V1, V2 y V3 registraron desplazamientos en mm, mientras que los V4 y V5 registrados desplazamientos en micras, esto se le atribuye a su localización. Los LVDT V1, V2 y V3 se localizaban del lado izquierdo, más próximos al apoyo con desplazamiento inducido, mientras que los transductores V4 y V5 se ubicaban más próximos al apoyo fijo o lado derecho.

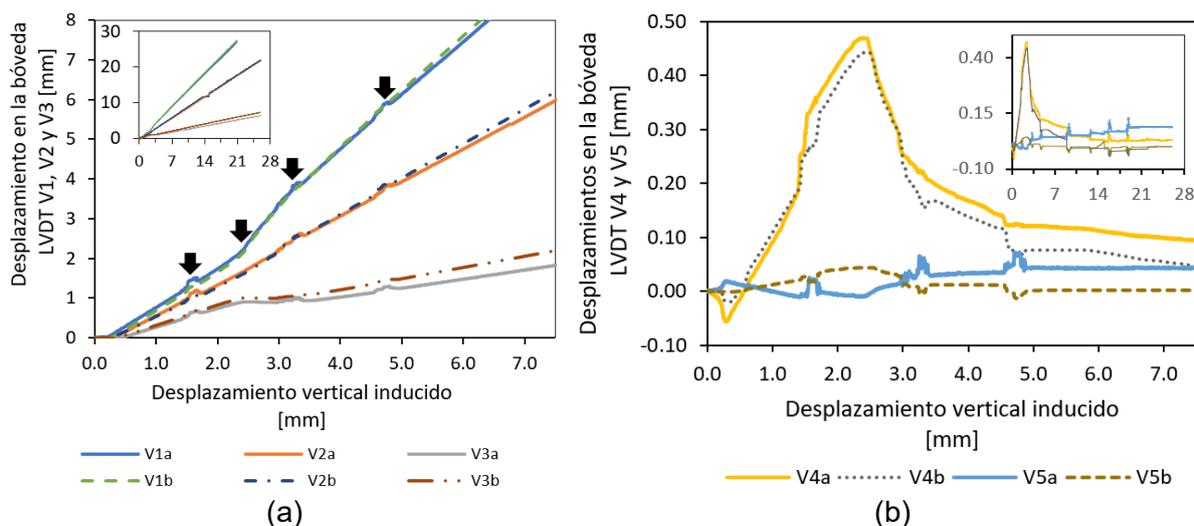


Figura 8. Desplazamientos en la bóveda (a) LVDT V1, V2 y V3, (b) LVDT V4 y V5

En términos generales el lado izquierdo del modelo (V1, V2 y V3) registró movimientos y cambio de pendiente durante todo el experimento (Figura 8a). Estos movimientos en la gráfica probablemente se deban a la aparición de las grietas, el registro de algún daño o a la redistribución de esfuerzos. Por su parte el lado derecho solo registra un pequeño movimiento al alcanza un desplazamiento vertical inducido de 2.34mm, luego del cual regresa a su posición inicial con una deformación residual menor a 0.10 mm, Figura 8b.

En un análisis más detallado de los movimientos en V1, V2 y V3, se observan que al inducirse 1.5mm, 3mm y 4.86mm de desplazamiento, las gráficas registran pequeñas curvas, lo que se interpretan como ajustes, movimientos o daños en el modelo experimental.

Entre los 2.34mm a 3mm de desplazamiento inducido (Figura 8a), se observan cambios importantes en el comportamiento de la bóveda: (1) los LVDT V1 registran mayores desplazamientos, lo que se traduce en gráficas con pendiente más pronunciadas, (2) los LVDT V2 no registra cambios y (3) los LVDT V3 que se encuentra en la cumbre, comienza a registrar desplazamientos aún más pequeños. Este cambio importante en las magnitudes de los desplazamientos de la bóveda induce a pensar que al aplicar 2.34mm ocurrió algún agrietamiento en el modelo, que dividió su comportamiento en dos grandes bloques donde los LVDT V1 y V2 trabajan en un sentido y proporción, mientras que los LVDT V3 por otro.

En el tramo contenido entre los 3mm y 4.86mm de desplazamiento (Figura 8b), los LVDT V1 registran menores desplazamientos reflejándose una disminución de la pendiente, los LVDT V2 continúan con la misma pendiente y los LVDT V3 comienzan a registrar deformaciones diferentes entre los lados A y B, lo que se podría interpretar como una rotación del modelo fuera del plano. Esta misma rotación, se logra observar en los LVDT V1 y V2 a partir de los 4.86mm de desplazamiento inducido y continua hasta los 26mm de desplazamiento inducidos aplicados a lo largo del experimento. Si bien los transductores pares (A y B) en cada punto de control registran diferencias en los desplazamientos que se traducen en rotaciones fuera del plano, también es importante mencionar que dichas rotaciones son muy pequeñas y sólo fue posible detectarlas durante el análisis de los resultados.

El registro de daños en los muros se realizó en ambas caras A y B en las posiciones W1, W2 y W3 (ver Figura 5). Las lecturas registradas por los LVDT W1 y W2 estuvieron en el orden de las micras y no se observó la presencia de grietas o daño alguno en los muros. Los LVDT W3 registraron un incremento horizontal en el vano de la bóveda, que inicia en el segundo 440 con un desplazamiento vertical inducido de aproximadamente 2.34mm y se mantiene constante hasta la conclusión del experimento. La distancia horizontal entre los apoyos aumentó un total de 7mm.

5.3 Análisis de los patrones de agrietamiento

Partiendo de los análisis previos (Figura 7 y Figura 8), se observa que, al aplicar un desplazamiento vertical inducido de alrededor de los 2.34mm, se registran en simultaneo, cambios abruptos en prácticamente todos los puntos de control, por lo que se intuye que con ese desplazamiento inducido apareció la primera grieta.

Una revisión en el registro fotográfico confirma que la primera fisura aparece, en la conexión muro-bóveda del lado izquierdo, es decir, en el apoyo donde se inducen el desplazamiento

(ver Figura 9a y c). La posición de esta fisura está en concordancia con la predicción hecha por el modelo numérico para la fisura 1 (Figura 3), sin embargo, los mm de desplazamiento inducido no corresponden a la predicción inicial de 1mm, esto se puede atribuir a las características mecánicas consideradas en el modelo numérico.

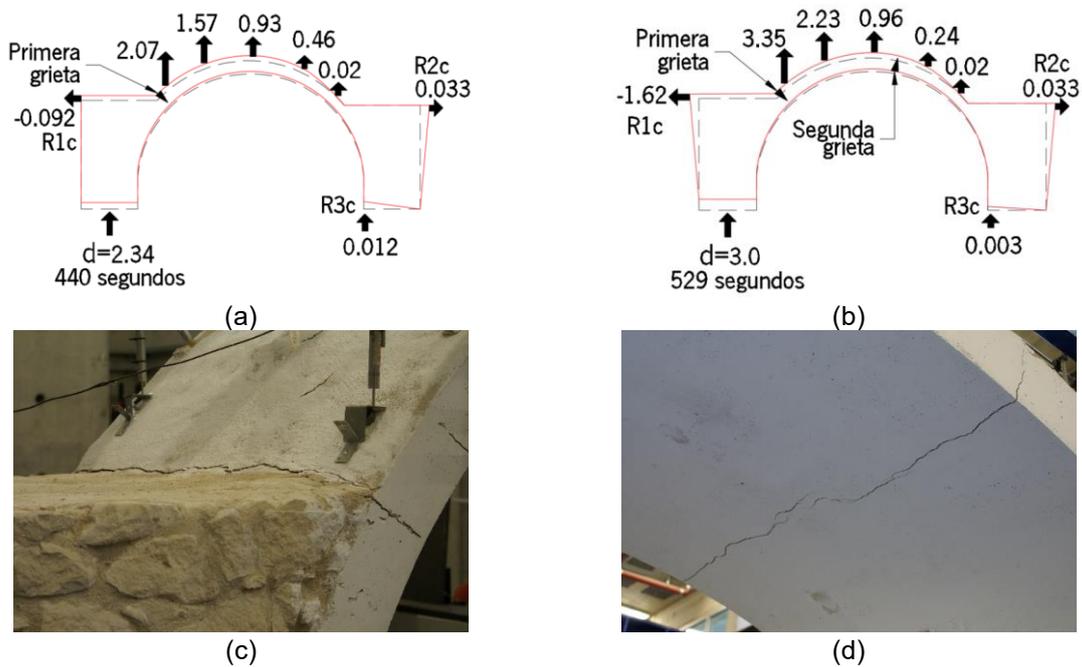


Figura 9. Rotulas en el modelo experimental. (a) primera grieta, en extradós de la conexión muro bóveda, (b) segunda grieta, en intradós de la bóveda

Inducidos 3mm desplazamiento (529s), el modelo se comporta como dos enormes bloques rígidos, con direcciones opuestas (ver Figura 9b). El bloque que corresponde al apoyo izquierdo (R1, V1 V2 y V3) continúa su desplazamiento hacia arriba y hacia la izquierda, mientras que el bloque que corresponde al apoyo fijo (R2, R3, V4 y V5) comienza su retorno a la posición inicial, registrando desplazamientos más pequeños. Esta tendencia se confirma con los registros en 3.89mm y 4.86mm (Figura 10a), debido a lo anterior, se estima que la segunda grieta aparece al aplicar 3mm de desplazamiento inducido. El registro fotográfico ubica la segunda grieta entre los LVDT de control V3 y V4 (ver Figura 9d) lo que concuerda con el comportamiento por bloques. La posición de la segunda grieta se encuentra muy próxima a las predicciones hechas en el modelo numérico (Figura 3).

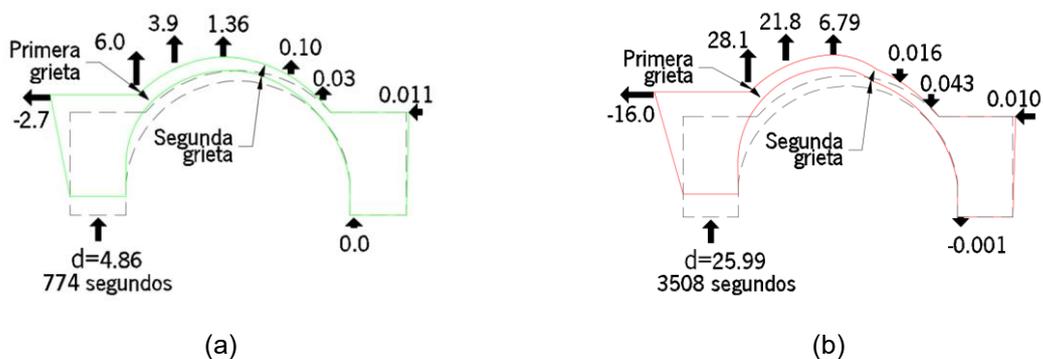


Figura 10. Comportamiento del modelo experimental

El experimento se detiene cuando el desplazamiento inducido alcanza los 26mm (Figura 10c), el lado derecho (R2c) muestra una deformación residual de 10 micras. El lado izquierdo (R1c) registra un desplazamiento horizontal máximo de 16mm que resulta de la rotación del modelo en el apoyo. No se identificó ninguna otra grieta en la bóveda. Sin embargo, las rotaciones indujeron movimientos visiblemente observados en los apoyos en las diferentes etapas.

Con base en todo lo anterior, se estima que, al término del experimento, el modelo contenía dos rótulas en el arco claramente identificadas por las grietas y una tercera rótula en el apoyo de la pared desplazada. Considerando que la plataforma de desplazamiento no registró rotaciones importantes en el plano gracias al dispositivo descrito en Figura 4c, se predice que la tercera rótula se generó en la unión entre el muro y la plataforma de desplazamiento, generando el mecanismo de colapso indicado en la Figura 11a, desafortunadamente la posición de la rótula no puede ser claramente identificada debido a la ausencia de transductores en dicha zona.

Analizando el mecanismo propuesto, se identifica que las dos primeras rótulas observadas en el experimento están muy próximas a las predicciones del modelo numérico y a los mecanismos de colapso propuestos por otros autores [12]–[17], ver Figura 11a. Por su parte, la rótula número 3 se atribuye a la línea de fuerzas de la bóveda, la cual ejerce un empuje lateral en la pared, produce los desplazamientos en R1c y con ellos la rotación en el apoyo.

Desafortunadamente, en el modelo numérico, no se consideró la rotación del muro y este se levanta perfectamente vertical hasta la aparición de las tres rótulas, motivo por el cual la rótula experimental numero 3 no concuerda con las predicciones (Figura 3). Por su parte, los trabajos desarrollados por otros autores, no contemplan la interacción de la bóveda con el muro, en ellos generalmente se contemplan apoyos infinitamente rígidos capaces de evitar cualquier rotación, lo que produce que la rótula se genere en la sección débil, la conexión entre la bóveda y el apoyo [12], [13], [16], [17], aunque esto no siempre se consigue [12]. En este trabajo se analiza el comportamiento del muro en conjunto con la bóveda, para ello se cuidó a detalle la construcción de la conexión entre el muro, la bóveda y la sobrecarga en el trasdós. Bajo estas condiciones se estima que la formación de una tercera rótula ocurrirá en el muro, aunque, debido a las características del modelo, no es posible identificar si será en la base o a una altura determinada en el muro.

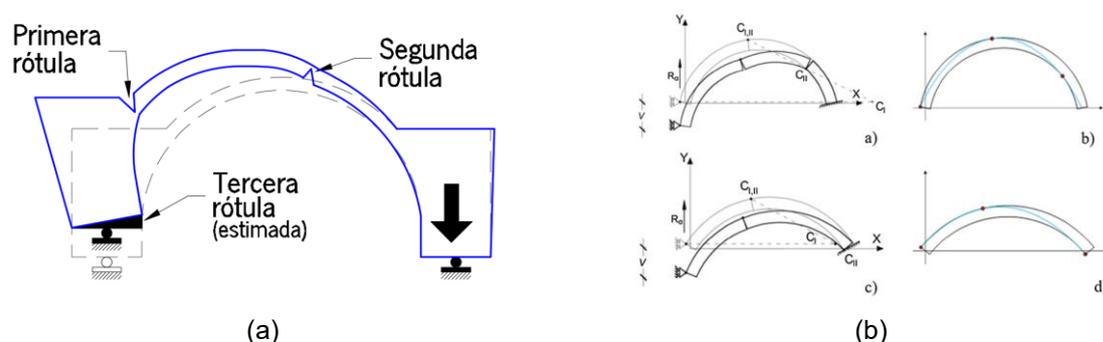


Figura 11. Mecanismos de colapsos (a) de este experimento y (b) Mecanismo III de Zampieri [13]

Con base en las observaciones realizadas, se considera que probablemente el uso de los contrafuertes y la continuidad de los muros contribuyen a contrarrestar el desplazamiento lateral registrado en R1c y en consecuencia la rotación del muro.

6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Con base en todos los análisis y revisiones realizadas se puede concluir que:

- A pesar de que el comportamiento experimental no describió con exactitud la predicción en el modelo numérico, se alcanzaron los objetivos del experimento, ya que se lograron al menos tres bisagras y todos los dispositivos funcionaron y registraron buena información, lo que resulta sumamente difícil cuando manejas en simultáneo dos actuadores y 21 transductores.
- Al analizar la interacción entre la bóveda y los muros se observarán tres rótulas ubicadas de forma alternada en trasdós-intradós-trasdós. Ubicadas en la bóveda a la altura del riñón, en la conexión muro-bóveda y en el apoyo o muro.
- El modelo se comportará monolíticamente hasta antes de la formación de la primera grieta en la conexión muro-bóveda, posterior a la cual, se comporta como dos cuerpos rígidos con movimientos directamente relacionados, es decir, el desplazamiento del primero provoca empujes en el segundo.
- Después de la formación de la segunda rótula, el modelo se comporta como tres cuerpos rígidos con movimientos independientes. El muro fijo tiende a regresar a su posición inicial, el muro desplazado continua en franca rotación y la sección de bóveda que une las dos primeras partes, intenta mantener el equilibrio entre ambas rótulas mientras continúa desplazándose hacia arriba.
- Se estima que las bóvedas apoyadas sobre muro, con características similares a las del modelo experimental, no son capaces de soportar grandes asentamientos sin revelar algún daño, ya que, como se observó en el experimento, con desplazamientos verticales menores de 2.5mm, se presenta la primera rótula en el sistema.
- Contrario a lo observado en este experimento, en una situación real, la rótula que se observa en el apoyo del modelo experimental probablemente no ocurriría, si se considera la continuidad en los muros y la existencia de contrafuertes.
- En un experimento similar, resulta recomendable monitorear con detalle la conexión de los muros y la superficie del apoyo, para identificar cualquier rotación en el plano de la pared.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado en parte por FCT/MCTES a través de fondos nacionales (PIDDAC) dependientes de la Unidad de I+D Instituto para la Sostenibilidad e Innovación en Ingeniería Estructural (ISISE), bajo referencia UIDB/04029/2020. Se agradece ampliamente la asistencia técnica del Ing. António Matos. Se agradece a la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) y al Programa de Desarrollo Profesional Docente, por todas las facilidades y apoyo brindado a uno de los autores, que reconoce como su centro de adscripción laboral, la FAUADY.

REFERENCIAS

- [1] Nash, K. – “K. Terzaghi: Founder of the Science of Soil Mechanics,” *Nature*, Jul. 1961, vol. 191, no. 4785, p. 210–210. doi: 10.1038/191210a0.
- [2] Rodríguez, I.; Vasconcelos, G. and Lourenço, P. B. – “Morphological and Geometrical Characterization of Historical Churches of Yucatan, Mexico,” *Int. J. Archit. Herit.*, Sep. 2021, p. 1–32. doi: 10.1080/15583058.2021.1887966.
- [3] Rodríguez Pérez, I.; Vasconcelos, G.; Lourenço, P. B.; Quintana, P.; García, C. and Dionísio, A. – “Physical-mechanical characterization of limestones from Yucatan churches, Mexico,” *J. Build. Eng.*, Dec. 2021, vol. 44, p. 102895. doi: 10.1016/j.job.2021.102895.
- [4] Chávez, M. and Meli, R. – “Shaking table testing of a typical Mexican colonial temple,” *Struct. Anal. Hist. Constr. Preserv. Saf. significance Proc. Sixth Int. Conf. Struct. Anal. Hist. Constr. 2-4 July 2008, Bath, United Kingdom*, 2008, p. 825–832.
- [5] Krstevska, L. et al., – “Shaking table tests on the large scale model of Mustafa Pasha Mosque without and with FRP,” *Struct. Anal. Hist. Constr. Preserv. Saf. significance Proc. Sixth Int. Conf. Struct. Anal. Hist. Constr. 2-4 July 2008, 2008Bath, United Kingdom*, p. 383–391.
- [6] De Canio, G. and Ranieri, N. – “La sperimentazione dinamica delle strutture,” Italy, 2009. Accessed: Sep. 17, 2018. [Online]. Available: http://old.enea.it/produzione_scientifica/pdf_EAI/2009/3/SperimentazioneDinamica.pdf.
- [7] S. ASTM C170 – “Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone,” no. Reapproved. 1999.
- [8] S. ASTM D 3148 – “Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression. Standard ASTM International,” 2002, Accessed: Jun. 29, 2018. [Online]. Available: http://www.dres.ir/fanni/khak/DocLib4/D_3148_02_RDMXNDG_.pdf.
- [9] S. BS EN 14580 – “Natural stone test methods. Determination of static elastic modulus,” vol. 44, no. 0, 2005.
- [10] EN 998-1 – “Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar Definitions,” *CEN (Comité Eur. Norm.)*, pp. 1–23, 2010.
- [11] B. and C. R. TNO, – “DIANA Finite Element Analysis BV.” DIANA FEA bv, Netherlands, 2020.
- [12] Zampieri, P.; Simoncelo, N.; Tetougueni, C. D. and Pellegrino, C. – “A review of methods for strengthening of masonry arches with composite materials,” *Eng. Struct.*, 2018, vol. 171, no. May, pp. 154–169. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.05.070.
- [13] Zampieri, P.; Faleschini, F.; Zanini, M. A.; Simocello, N. and Simoncello, N. – “Collapse mechanisms of masonry arches with settled springing,” *Eng. Struct.*, 2018, vol. 156, no. November 2017, p. 363–374. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.11.048.
- [14] D’Altri, A. M.; De Miranda, S.; Castellazzi, G.; Sarhosis, V.; Hudson, J. and Theodossopoulos, D. – “Historic Barrel Vaults Undergoing Differential Settlements,” *Int. J. Archit. Herit.*, 2020, vol. 14, no. 8, p. 1196–1209. doi: 10.1080/15583058.2019.1596332.
- [15] De Guglielmo, F.; Ribera, F.; Angelillo, M.; De De Guglielmo, F.; Ribera, F. and Angelillo, M. – “Analysis and consolidation of masonry vaults in the restoration of historical constructions,” *Rehab 2015 - 2nd Int. Conf. Preserv. Maint. Rehabil. Hist. Build. Struct.*, no. February 2016, 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.3900.1842.
- [16] Ferrero, C.; Calderini, C. and Roca, P. – “Experimental response of a scaled dry-joint masonry arch subject to inclined support displacements,” vol. 253, no. November 2021, 2022.
- [17] Ferrero, C.; Calderini, C.; Portioli, F. and Roca, P. – “Large displacement analysis of dry-joint masonry arches subject to inclined support movements,” *Eng. Struct.*, vol. 238, no. November 2020, p. 112244, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112244.

