

CMMoST 2019

5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON

Mechanical Models in Structural Engineering

Alicante, SPAIN

23 - 25 October 2019

Escuela Politécnica Superior

Universidad de Alicante

Full Papers



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

CMMoST 2019

5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON

Mechanical Models in Structural Engineering

Polytechnic School of Alicante

23rd – 25th October 2019



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

COMITÉ DE EDICIÓN

Salvador Ivorra Chorro

Victor Compán Cardiel

Andrés Sáez Pérez

Enrique Hernández Montes

Luisa M^a Gil Martín

Margarita Cámara Pérez

COORDINADORES

Francisco Javier Baeza de los Santos

M. A. Yordhana Gómez Sánchez

Edita: Editorial Club Universitario
C/ Decano, n.º 4 – 03690 San Vicente (Alicante)
www.ecu.fm
original@ecu.fm

ISBN: 978–84–17924–58–4
ISBN papel: 978–84–17924–22–5

Printed in Spain

Organizan:



ugr



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Patrocinan:



PAVASAL

CONTENTS

KEYNOTE LECTURES

FROM REAL-TIME SIMULATION TO STRUCTURAL DYNAMICS HYBRID TWIN. <i>Francisco Chinesta</i>	17
LOS EDIFICIOS EN ALTURA DE LA CIUDAD DE BENIDORM. <i>Florentino Regalado Tesoro</i>	17
DISEÑO PARAMÉTRICO. SU APLICACIÓN AL PROYECTO DE PUENTES. <i>José Romo Martín</i>	17

EXTENDED ABSTRACTS

A METHODOLOGY TO DESIGN INERTIAL MASS CONTROLLERS FOR HUMAN-INDUCED VIBRATIONS. <i>I.M. Díaz, X. Wang, E. Pereira, J. García Palacios, J.M. Soria, C. Martín de la Concha Renedo y J.F. Jiménez-Alonso</i>	21
A STATISTICAL-BASED PROCEDURE FOR GENERATING EQUIVALENT VERTICAL GROUND REACTION FORCE-TIME HISTORIES. <i>J.M. García-Terán, Á. Magdaleno, J. Fernández y A. Lorenzana</i>	37
A TOPOLOGICAL ENTROPY-BASED APPROACH FOR DAMAGE DETECTION OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES. <i>J.F. Jiménez-Alonso, J. López-Martínez, J.L. Blanco-Claraco, R. González-Díaz y A. Sáez</i>	55
ALTERNATIVE SOLUTIONS FOR THE ENHANCEMENT OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE COLUMNS IN FIRE USING HIGH PERFORMANCE MATERIALS – A NUMERICAL STUDY. <i>A. Espinós, A. Lapuebla-Ferri, M.L. Romero, C. Ibáñez y V. Albero</i>	63
ANÁLISIS PARAMÉTRICO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DE LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO REFORZADAS FRENTE A PUNZONAMIENTO. <i>M. Navarro, S. Ivorra y F.B. Varona</i>	83
APLICACIÓN DE OPTIMIZACIÓN KRIGING PARA LA BÚSQUEDA DE ESTRUCTURAS ÓPTIMAS ROBUSTAS. <i>V. Yepes, V. Penadés-Plà y T. García-Segura</i>	101
APPLICATION OF THE COMPRESSION CHORD CAPACITY MODEL TO PREDICT THE FATIGUE SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS WITHOUT STIRRUPS. <i>A. Cladera Bohigas, C. Ribas González, E. Oller Ibars y A. Marí Bernat</i>	115
ASSESSMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE USING ELECTRIC ARC FURNACE DUST AS AN ADMIXTURE. <i>M.D. Rubio Cintas, M.E. Parrón Rubio, F. Pérez García, M.A. Fernández Ruiz y M. Oliveira</i>	123
CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DE UN DESLIZADOR ANTE TENSIONES NORMALES VARIABLES Y FRICCIÓN RATE AND STATE REGULARIZADA. <i>J.C. Mosquera, B. González Rodrigo, D. Santillán y L. Cueto-Felgueroso</i>	133
CHANGES IN STRENGTH AND DEFORMABILITY OF POROUS BUILDING STONES AFTER WATER SATURATION. <i>Á. Rabat, R. Tomás y M. Cano</i>	147
CHARACTERIZATION OF WELDED STEEL JOINTS USING MODAL SHAPES. <i>E. Bayo, J. Gracia y J. Jönsson</i>	157

COMPARATIVA NUMÉRICO EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS DE MAMPOSTERÍA A COMPRESIÓN DIAGONAL. <i>D. Bru, B. Torres, F.B. Varona, R. Reynau y S. Ivorra</i>	171
CONDUCTIVE CONCRETE, NANOADDITIONS AND FUNCTIONAL APPLICATIONS. <i>B. del Moral, O. Galao, F.J. Baeza, E. Zornoza y P. Garcés</i>	181
CONSTRUIR Y ROMPER ESTRUCTURAS UN CURSO PRÁCTICO DE INTRODUCCIÓN A LAS ESTRUCTURAS. <i>J. Antuña, M. Vázquez, V. Pascua y C. Olmedo</i>	191
CORRODED B-REGIONS RESIDUAL FLEXURE CAPACITY ASSESSMENT IN REINFORCED CONCRETE BEAMS. <i>J.F. Carbonell-Márquez, L.M. Gil-Martín y E. Hernández-Montes</i>	203
DISEÑO DE EXPERIMENTOS FACTORIAL COMPLETO APLICADO AL PROYECTO DE MUROS DE CONTENCIÓN. <i>D. Martínez-Muñoz, V. Yepes y J.V. Martí</i>	221
DYNAMIC MODEL UPDATING INCLUDING PEDESTRIAN LOADING APPLIED TO AN ARCHED TIMBER FOOTBRIDGE. <i>Á. Magdaleno, J.M. García-Terán, I.M. Díaz y A. Lorenzana</i>	235
DYNAPP: A MOBILE APPLICATION FOR VIBRATION SERVICEABILITY ASSESSMENT <i>J. García Palacios, I. Lacort, J.M. Soria, I.M. Díaz y C. Martín de la Concha Renedo</i>	247
EFFECT OF THE BOND-SLIP LAW ON THE BOND RESPONSE OF NSM FRP REINFORCED CONCRETE ELEMENTS. <i>J. Gómez, L. Torres y C. Barris</i>	257
EFFECTS OF TENSILE STRESSES ON PUNCHING SHEAR STRENGTH OF RC SLABS. <i>P.G. Fernández, A. Mari, E. Oller y M. Domingo Tarancón</i>	275
E-STUB STIFFNESS EVALUATION BY METAMODELS. <i>M. López, A. Loureiro, R. Gutiérrez y J.M. Reinosa</i>	291
ESTUDIO DE LOS DESPLAZAMIENTOS NECESARIOS PARA EL COLAPSO DE ARCOS DE FÁBRICA EN LA EDUCACIÓN. <i>J. Antuña, J.I. Hernado, F. Magdalena, A. Aznar, V. Pascual y A. Blasco</i>	297
EVALUACIÓN DEL DAÑO POR EXPLOSIONES EN PATRIMONIO HISTÓRICO. <i>S. Ivorra, R. Reynau, D. Bru y F.B. Varona</i>	307
EVALUACIÓN EXPERIMENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA FRENTE A CARGAS CÍCLICAS EN SU PLANO. <i>B. Torres, D. Bru, F.B. Varona, F.J. Baeza y S. Ivorra</i>	319
EVALUATION OF X42 STEEL PIPELINES BASED ON DEFORMATION MONITORING USING RESISTIVE STRAIN GAUGES. <i>H.F. Rojas-Suárez y Á.E. Rodríguez-Suesca</i>	331
EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON TRM REINFORCED MASONRY VAULTS SUBJECTED TO MONOTONICAL VERTICAL SETTLEMENTS. <i>E. Bertolesi, M. Buitrago, B. Torres, P.A. Calderón, J.M. Adam y J.J. Moragues</i>	341
EXPERIMENTAL EVALUATION OF 3D STEEL JOINT WITH LOADING IN BOTH AXIS. <i>A. Loureiro, M. López, J.M. Reinosa y R. Gutiérrez</i>	351

EXPERIMENTAL EVALUATION OF HAUNCHED JOINTS. <i>A. Loureiro, M. López, R. Gutiérrez y J.M. Reinoso</i>	359
EXPERIMENTAL NUMERICAL CORRELATION OF A PADEL RACKET SUBJECT TO IMPACT <i>A.A. Molí Díaz, C. López Taboada, G. Castillo López y F. García Sánchez</i>	371
FORM FINDING OF TENSEGRITY STRUCTURES BASED ON FAMILIES: THE OCTAHEDRON FAMILY. <i>M.A. Fernández Ruiz, L.M. Gil-Martín, J.F. Carbonell-Márquez y E. Hernández-Montes</i>	389
HEALTH MONITORING THROUGH A TUNED FE MODEL OF A MEDIEVAL TOWER PLACED IN A LANDSLIDE AREA. <i>M. Diaferio, D. Foti, N.I. Giannoccaro y S. Ivorra</i>	399
HIGH PERFORMANCE CONCRETE REINFORCED WITH CARBON FIBERS FOR MULTIFUNCTIONAL APPLICATIONS. <i>O. Galao, M.G. Alberti, F. Baeza, B. del Moral, F.J. Baeza, J. Gálvez y P. Garcés</i>	415
IN THE SEARCH OF MODAL PARAMETERS CONFIGURATION OF PASSIVE AND ACTIVE ISOLATION SYSTEMS, APPLIED TO MOMENT FRAMES. <i>C.A. Barrera Vargas, J.M. Soria, I.M. Díaz y J.H. García-Palacios</i>	429
INFLUENCE OF INFILL MASONRY WALLS IN RC BUILDING STRUCTURES UNDER CORNER-COLUMN FAILURE SCENARIOS. <i>M. Buitrago, E. Bertolesi, P.A. Calderón, J.J. Moragues y J.M. Adam</i>	441
LABORATORY DYNAMIC STRUCTURAL TESTING. METHODS AND APPLICATIONS. <i>J. Ramírez Senent, J.H. García Palacios, I.M. Díaz y J.M. Goicolea</i>	451
MECHANICAL AND DYNAMIC PROPERTIES OF TRM WITH DIFFERENT FIBERS <i>D. Bru, B. Torres, F.J. Baeza y S. Ivorra</i>	469
METODOLOGÍA PARA VALORAR LA SOSTENIBILIDAD CON BAJA INFLUENCIA DE LOS DECISORES. <i>V. Penadés-Plà, V. Yepes y T. García-Segura</i>	481
MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UN ACUEDUCTO DE MAMPOSTERÍA. <i>S. Ivorra, Y. Spariani, B. Torres y D.Bru</i>	495
MODELLING OF HIHGLY-DAMPED COMPOSITE FLOOR BEAMS WITH CONSTRAINED ELASTOMER LAYERS. <i>C. Martín de la Concha Renedo, I. Díaz Muñoz, J.H. García Palacios y S. Zivanovic</i>	507
MODELOS MULTI-VARIABLE NO-LINEALES PARA PREDECIR LA ADHERENCIA ACERO-HORMIGÓN A ALTA TEMPERATURA. <i>F.B. Varona-Moya, F.J. Baeza, D. Bru y S. Ivorra</i>	521
MODELOS NUMÉRICOS PARA PREDECIR LA ADHERENCIA RESIDUAL ENTRE ACERO Y HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS A ALTA TEMPERATURA. <i>F.B. Varona-Moya, Y. Villacampa, F.J. Navarro-González, D. Bru y F.J. Baeza</i>	539
MOTION-BASED DESIGN OF VISCOUS DAMPERS FOR CABLE-STAYED BRIDGES UNDER UNCERTAINTY CONDITIONS. <i>J. Naranjo-Pérez, J.F. Jiménez-Alonso, I.M. Díaz y A. Sáez</i>	553
NUMERICAL AND EXPERIMENTAL LATERAL VIBRATION ASSESSMENT OF AN IN-SERVICE FOOTBRIDGE.	567

<i>R. García Cuevas, J.F. Jiménez-Alonso, C. Martín de la Concha Renedo, F. Martínez y I.M Díaz</i>	
NUMERICAL MODEL OF VEGETAL FABRIC REINFORCED CEMENTITIOUS MATRIX COMPOSITES (FRCM) SUBJECTED TO TENSILE LOADS. <i>L. Mercedes, E. Bernat y L. Gil</i>	583
NUMERICAL MODELS FOR MAMMOPLASTY SIMULATIONS. <i>A. Lapuebla-Ferri, A. Pérez del Palomar, J. Cegoñino- y A.J. Jiménez-Mocholí</i>	597
ON THE VULNERABILITY OF AN IRREGULAR REINFORCED CONCRETE BELL TOWER. <i>M. Diaferio, D. Foti, N.I. Giannoccaro, S. Ivorra, G. Notarangelo y M. Vitti</i>	611
OPTIMIZACIÓN DE MUROS DE HORMIGÓN MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA. <i>V. Yepes, D. Martínez-Muñoz y J.V. Martí</i>	623
PIEZOELECTRIC LEAD-FREE NANOCOMPOSITES FOR SENSING APPLICATIONS: THE ROLE OF CNT REINFORCED MATRICES. <i>F. Buroni, J.A. Krishnaswamy, L. Rodríguez-Tembleque, E. García-Macías, F. García-Sánchez, R. Melnik y A. Sáez</i>	637
STRONG EQUILIBRIUM IN FEA - AN ALTERNATIVE PARADIGM? <i>E. Maunder y A. Ramsay</i>	651
STUDY OF ACTIVE VIBRATION ISOLATION SYSTEMS CONSIDERING ISOLATOR-STRUCTURE INTERACTION <i>J. Pérez Aracil, E. Pereira González, I. Muñoz Díaz y P. Reynolds</i>	665
THERMAL AND STRUCTURAL OPTIMIZATION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE MIXTURES TO MANUFACTURE COMPOSITE SLABS. <i>F.P. Álvarez Rabanal, J.J. del Coz Díaz, M. Alonso Martínez y J.E. Martínez-Martínez</i>	675
THROUGH-BOLTING EFFECT ON STIFFENED ANGLE JOINTS. <i>J.M. Reinoso, A. Loureiro, R. Gutiérrez y M. López</i>	689
VIBRATION TESTING BASED ON EVOLUTIONARY OPTIMIZATION TO IDENTIFY STRUCTURAL DAMAGES. <i>J. Peña-Lasso, R. Sancibrián, I. Lombillo, J. Setién, J.A. Polanco y Ó.R. Ramos</i>	699

MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UN ACUEDUCTO DE MAMPOSTERÍA

Ivorra, Salvador¹; Spairani, Yolanda²; Torres, Benjamín³; Bru, David⁴

ABSTRACT.

En la actualidad, dentro del patrimonio formado por las infraestructuras de ingeniería civil históricas se pueden encontrar un gran número de estructuras de mampostería. En muchos casos, la falta de mantenimiento ha generado un gran deterioro de las mismas, lo que puede llegar a comprometer su estabilidad, especialmente si están situadas en zona sísmica. Las estructuras de mampostería resultan especialmente vulnerables frente a acciones sísmicas al presentar una reducida resistencia a tracción, y en mayor medida conforme la durabilidad de los materiales llega a comprometerse por el simple paso del tiempo. Los morteros reforzados con fibra (FRCM, Fiber Reinforced Cement Matrix) se presentan como una alternativa de intervención para mejorar el comportamiento de la mampostería frente a cargas dinámicas [3]. El FRCM se compone habitualmente de una malla bidireccional de fibra de vidrio, carbono o basalto, y una matriz cementicia. El empleo de los FRCM en las estructuras de mampostería incrementa su resistencia y mejora su ductilidad. La ventaja principal de su empleo en comparación con los FRP pegados con resina es la compatibilidad con la superficie reforzada y las buenas condiciones de adherencia, así como el control de los problemas de humedad relacionados con la permeabilidad. En el presente trabajo se ha realizado un análisis preliminar del comportamiento estructural de un acueducto situado en la localidad de Aspe (Alicante). Esta simulación se ha realizado como paso previo al cálculo de un posible refuerzo mediante FRCM si fuera necesario para asegurar la estabilidad sísmica de la estructura. Mediante un láser escáner se registró una nube de puntos que permitió el levantamiento tridimensional, a partir del cual se definió la geometría del modelo de elementos finitos. Además, el modelo se ha realizado con elementos tipo Shell layered que permiten definir una combinación de comportamientos lineales y no lineales en función del tipo de esfuerzo y su dirección.

Keywords: Comportamiento sísmico, patrimonio, análisis dinámico, construcción histórica, reparación.

1. INTRODUCCIÓN.

Las estructuras de fábrica de mampostería sin ningún tipo de refuerzo suelen ser especialmente sensibles frente a esfuerzos cortantes inducidos por acciones como el viento o el sismo [1]. Gran parte del patrimonio arquitectónico que se ha conservado hasta nuestros días está construido con este tipo de materiales. Y en muchos casos se encuentra expuesto a una serie de acciones dinámicas (como las mencionadas anteriormente) que no se tuvieron en cuenta en su diseño [2]. En el caso concreto del

¹ Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante. sivorra@ua.es (corresponding author)

² Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universidad de Alicante. yolanda.spairani@ua.es

³ Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante. benjamin.torres@ua.es

⁴ Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante. david.bru@ua.es

comportamiento sísmico, los sistemas estructurales de mampostería, bien sea de piedra o ladrillo, suelen presentar una alta vulnerabilidad, como pueden ser los casos de muros [3], o elementos más esbeltos como chimeneas [4] o campanarios [5]. Para mejorar la respuesta estructural frente a terremotos, hoy en día se pueden emplear sistemas de refuerzo basados en materiales compuestos, que en algún caso como los morteros reforzados con fibras presentan una mejor compatibilidad con el sustrato de mampostería [6]. A la hora de realizar el análisis de fiabilidad estructural, cobra especial importancia las técnicas de caracterización tanto de la geometría actual del elemento, como de la distribución de materiales, y por tanto de propiedades mecánicas a lo largo de la estructura. En el primer caso, como alternativas a las técnicas de topografía tradicionales, han aparecido diferentes opciones para obtener una restitución tridimensional del elemento estudiado, que acompañadas de unas adecuadas técnicas no destructivas pueden permitir la correcta caracterización de la estructura [7]. De esta manera, los datos de partida del modelo de cálculo se adecuarán lo máximo posible al estado real.



(a) acueducto de la Coca



(b) acueducto de Rabosero



(d) acueducto de Carboneras



(d) acueducto de los Cinco Ojos



(e) acueducto de los Cuatro Ojos

Figura 1. Vista general de los diferentes acueductos estudiados.

En el presente trabajo se han estudiado una serie de estructuras de mampostería correspondientes a unos acueductos construidos en el siglo XVIII entre las localidades de Aspe y Elche. La Figura 1 muestra los cinco acueductos objetos del presente estudio, en los que puede apreciarse diferencias tanto en la configuración estructural, como en el estado actual de conservación. El objetivo principal ha sido una evaluación preliminar del comportamiento sísmico de las estructuras. Para ello se ha presentado la metodología seguida para la obtención de la geometría del modelo, las características de los materiales empeladas en su definición y el análisis estructural considerando, además del peso propio de la mampostería, las acciones laterales de viento y sismo. Los modelos numéricos empleados se han diseñado de forma que permiten la implementación de forma sencilla de un posible refuerzo estructural mediante materiales compuestos, en caso de ser necesario.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

De forma general se va a plantear la metodología seguida en el análisis de las cinco estructuras mostradas anteriormente, aunque la discusión de resultados posterior se centrará en el análisis del modelo concreto del acueducto de los Cuatro Ojos.

2.1. Metodología para el análisis numérico.

Las diferentes fases para la definición del modelo numérico desde la toma de datos in-situ hasta el análisis de la respuesta sísmica de cada estructura incluyen:

- *Restitución tridimensional:* mediante el uso de un escáner láser se obtiene una nube de puntos que define la geometría del conjunto.
- *Toma de datos in-situ:* en esta fase se debe realizar una visita a la estructura para definir el estado actual de las diferentes partes de la mampostería, así como la distribución de elementos con diferentes características a lo largo de la estructura.
- *Definición del modelo:* a partir de la nube de puntos obtenida anteriormente se define la geometría real del modelo numérico. En este caso se han empleado elementos de área tipo *Shell*. En caso de existir problemas importantes de desplome, dichas irregularidades geométricas se podrían haber importado directamente al software de cálculo desde los modelos geométricos. Además en esta fase se debe reflejar la distribución de propiedades mecánicas en las diferentes partes de la estructura, y en su caso la minoración de las mismas en función de las patologías y degradación observadas in situ.
- *Análisis dinámico:* en este caso se optó por un análisis sísmico mediante espectros de respuesta. Además se define el empuje lateral de viento y las diferentes combinaciones entre ambas acciones y la componente de peso propio de la mampostería.

La figura 2 muestra dos vistas laterales correspondientes a los alzados del acueducto de los Cuatro Ojos obtenidos mediante un equipo de escáner láser tipo Leica ScanStation C10. Esta geometría se transforma en elementos de superficie tridimensionales en Autocad, para luego importarla directamente en el software de cálculo SAP2000, y así generar la geometría mostrada en la Figura 3. El mallado del modelo se realizó directamente en SAP2000, y para el caso mostrado en la Figura 3 el modelo estaba conformado por 2992 puntos y 2755 áreas, estando las dimensiones de malla entre 0.63 y 0.01 m² aproximadamente.

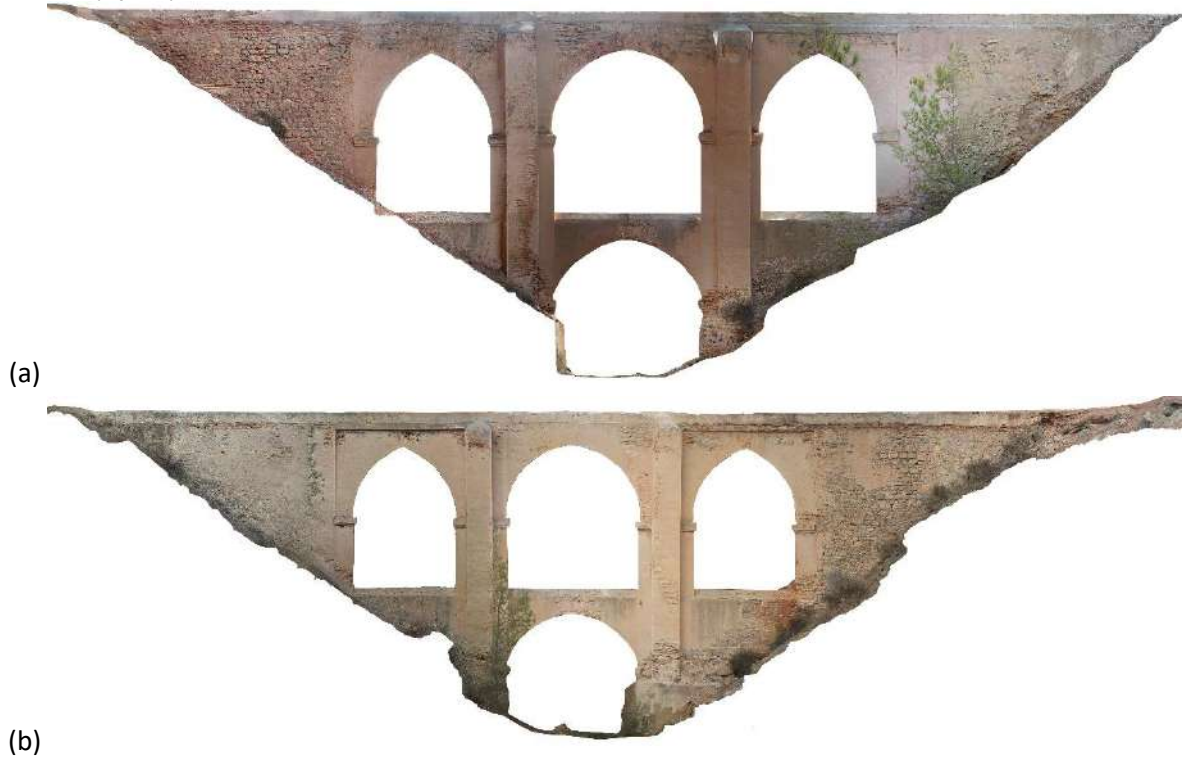


Figura 2. Modelo geométrico obtenido mediante escaneo tridimensional del acueducto de los Cuatro Ojos: (a) alzado aguas arriba y (b) alzado aguas abajo.

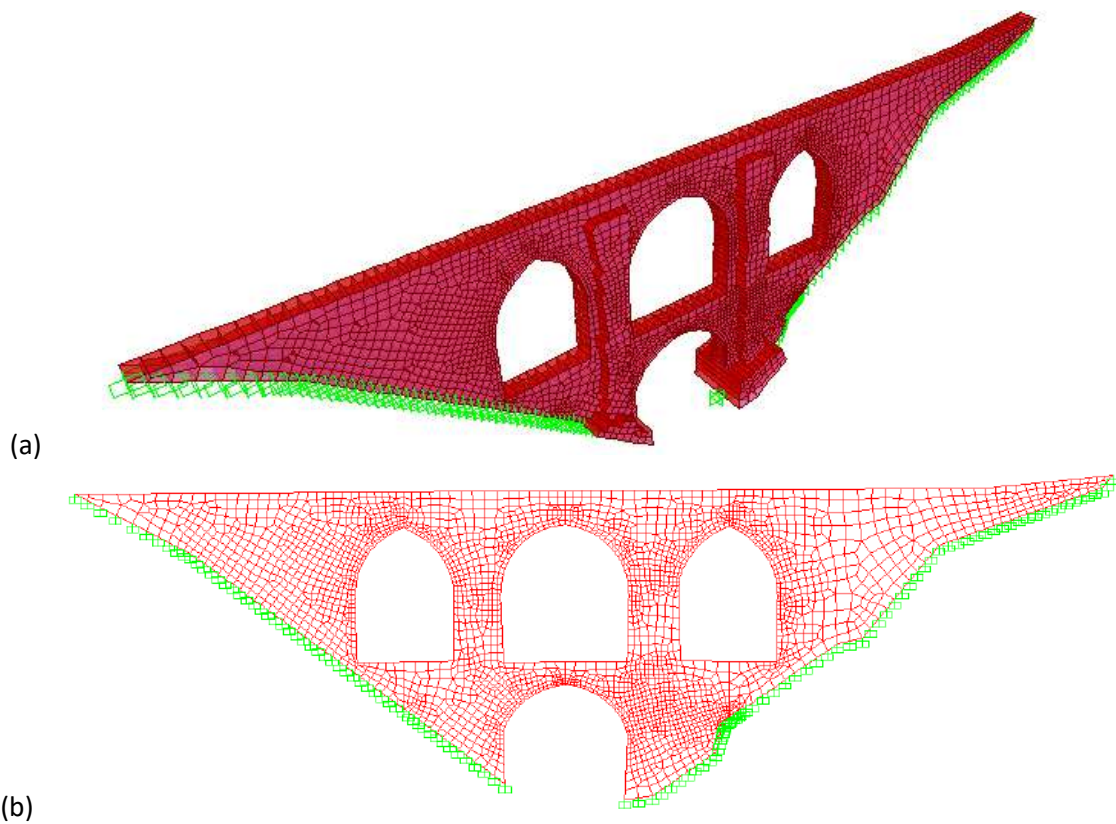


Figura 3. Modelo numérico del acueducto de los Cuatro Ojos: (a) vista extruida con shells de diferente espesor; (b) alzado aguas abajo.

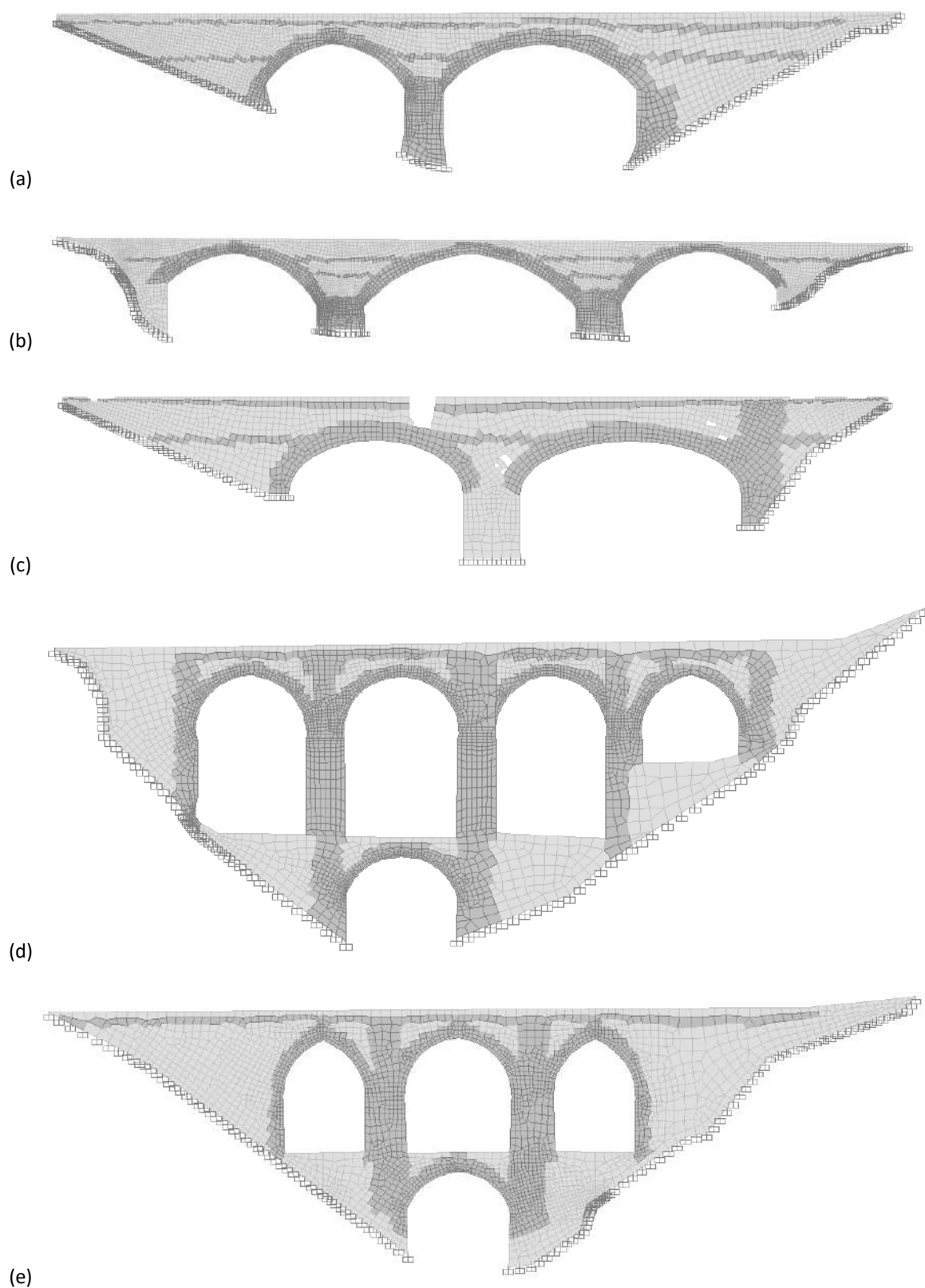


Figura 4. Distribución de materiales en las diferentes estructuras: (a) acueducto de la Coca, (b) acueducto de Rabosero, (c) acueducto de Carboneras, (d) acueducto de los Cinco Ojos y (e) acueducto de los Cuatro Ojos. En color oscuro se muestran las mamposterías de mejor calidad.

En la Figura 4 se han representado las diferentes distribuciones de materiales en las cinco estructuras estudiadas. Como puede verse, es habitual la combinación de un material de mejor calidad, bien mampostería de ladrillo o piedras de forma regular, dispuesta a lo largo de los arcos o en zonas de pilas, con otro material, generalmente mampostería hecha con piedras irregulares en las zonas de relleno. Respecto a las propiedades concretas de cada material se han considerado tres tipos diferentes de mampostería según se realizase con ladrillos cerámicos, rocas regulares, o rocas irregulares. Las propiedades físico-mecánicas de cada una de ellas se han resumido en la Tabla 1. Al tratarse de un análisis preliminar, y no disponer de datos experimentales (in situ o con ensayos de laboratorio de los materiales reales), se han adoptado directamente los valores de resistencias medios de los rangos recomendados en una recomendaciones del gobierno italiano para reducir la vulnerabilidad sísmica del patrimonio construido [8].

Tabla 1: Propiedades físico-mecánicas de los diferentes tipos de mampostería considerados.

Material	f_{ck} (N/mm ²)	τ (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	γ (kN/mm ³)
Ladrillo	3.2	0.2	1500	600	18
Mampostería irregular	1.4	0.2	870	350	19
Mampostería buena calidad	3.2	0.2	1740	660	21

En los casos que presentaban notable degradación de los materiales, con cambios relevantes de la sección resistente en algunas zonas concretas de la estructura, la distribución de propiedades del material (presentada anteriormente en la Figura 4) se modificó para penalizar la capacidad mecánica de dichas secciones, tal y como se ilustra en la Figura 5. La detección y caracterización de estas discontinuidades en la rigidez estructural cobran mayor importancia a la hora de abordar el análisis sísmico de la estructura.

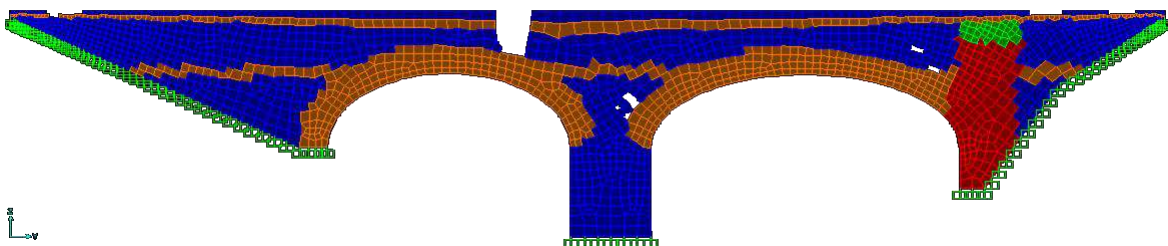


Figura 5. Zonas con propiedades minoradas en el apoyo derecho del acueducto de Rabosero.

Una vez definida la distribución de materiales en la estructura, el modelo numérico se diseñó empleando elementos tipo *Shell*, en concreto la opción *Shell- Layered/Nonlinear*, que permite la superposición de dos capas en el mismo elemento, que modelizan de forma independiente leyes de comportamiento diferentes frente a tensiones normales y tangenciales, respectivamente. En la Figura 6 se incluyen las tres curvas de comportamiento correspondientes a la respuesta de cada tipo de mampostería a tensiones normales. En todas ellas se ha supuesto una resistencia nula de la

mampostería a tracción. De esta forma el fallo del material viene controlado por la curva de comportamiento del material bajo tensiones tangenciales, incluida en la Figura 7.

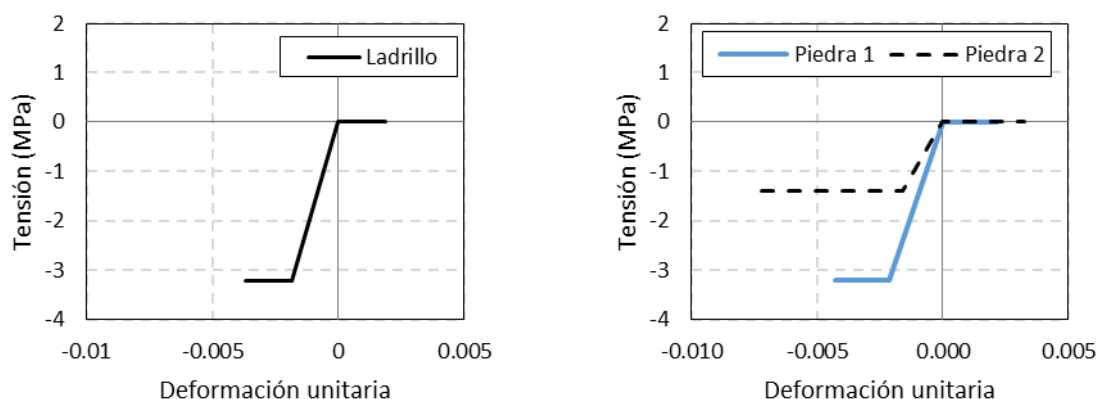


Figura 6. Comportamiento frente a tensiones normales, curvas tensión-deformación de diferentes tipos de mampostería de ladrillo o piedra de diferente calidad.

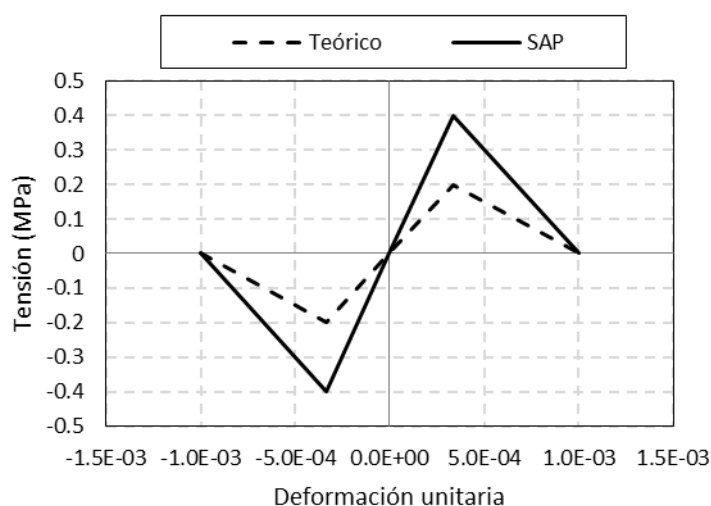


Figura 7. Zona B de disparo sobre la cubierta del museo arqueológico, cohetes aéreos.

Por tanto, las propiedades de los materiales seleccionados en cada una de las estructuras, tal y como se mostró en la Figura 4 han sido las siguientes:

- *Acueducto de la Coca*, Figura 5(a), combinación de mampostería de ladrillo en arcos y pila, con anchos de 0.79 m y 1.74 m respectivamente, y mampostería de piedras de baja calidad (tipo 2 en Figura 6) con 0.79 m de ancho en el resto.
- *Acueducto de Rabosero*, Figura 5(b), combinación de mampostería de ladrillo en arcos y pilas, con mampostería de piedras irregulares (tipo 2 en Figura 6) en el resto. Espesor principal de 0.79 m en arcos y muro, aumentado hasta 1.29 m en las pilas de ladrillo y 1.79 en los estribos de piedra.

- Acueducto de Carboneras, Figura 5(c), combinación de mampostería de ladrillo en arcos, con mampostería de piedras irregulares en el resto. Espesores variables entre 2m y 0.84 m en función de la erosión del material.
- Acueducto de los Cinco Ojos, Figura 5(d), mampostería de ladrillos en pilas y arcos, con un espesor de 2.71 m en pilas centrales, 1.80 m en pilas laterales y 1.10 m en arcos. El resto de la estructura es de mampostería de piedra de buena calidad (tipo 1 en Figura 6) con el mismo espesor de los arcos, 1.10 m.
- Acueducto de los Cuatro Ojos, Figura 5(e), mampostería de ladrillos en pilas con un espesor de 2.58 m, que se ensancha hasta 4 m en la base, y de 1.20m de espesor en los arcos. El resto de la estructura es de mampostería de piedra de buena calidad (tipo 1 en Figura 6) con espesor 1.20 m.

El cálculo de la acción sísmica se ha hecho mediante el espectro de respuesta elástico de la normativa española NCSE-02. Se ha asumido una aceleración básica de 0.13g, correspondiente al municipio de Aspe, un terreno tipo III característico del cauce que salvan las estructuras, y un coeficiente de importancia especial, dado el carácter patrimonial de los acueductos. Una vez considerados estos factores, el valor de la aceleración de cálculo correspondiente fue de 2.015 m/s², generándose el espectro de aceleraciones mostrado en la Figura 8, para un coeficiente de amortiguamiento del 5%.

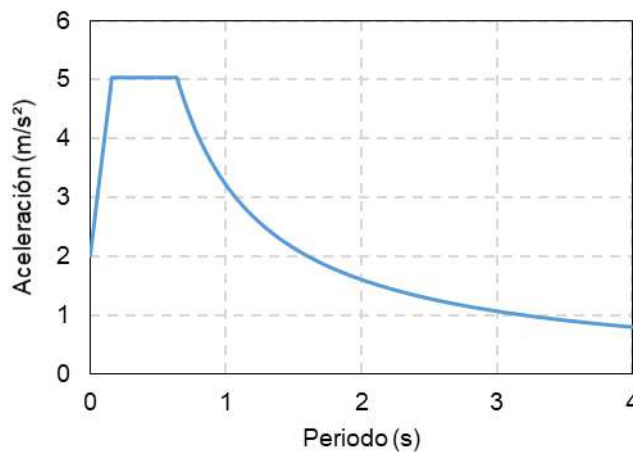


Figura 8. Espectro de respuesta para un terreno tipo III en Aspe, y un factor de amortiguamiento de 5%.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

En primer lugar se realizó un análisis no lineal, considerando las propiedades de los materiales indicadas anteriormente, para obtener el estado de tensiones y deformaciones de la estructura bajo la acción exclusiva del peso propio de los distintos elementos de mampostería que lo conforman. En la Figura 9 se han incluido los resultados de tensiones obtenidos para dicho análisis no lineal de la hipótesis de peso propio de la estructura. Se han representado tanto las tensiones normales en dirección vertical como las tensiones tangenciales en el plano de la estructura. Las máximas compresiones registradas en la base de la estructura fueron del orden de 0.54 MPa, por debajo de la resistencia considerada para la

fábrica de mampostería (3.2 MPa). Mientras que las tensiones tangenciales llegaron hasta valores máximos de ± 0.16 MPa, bastante próximos a la resistencia al corte del material (0.2 MPa).

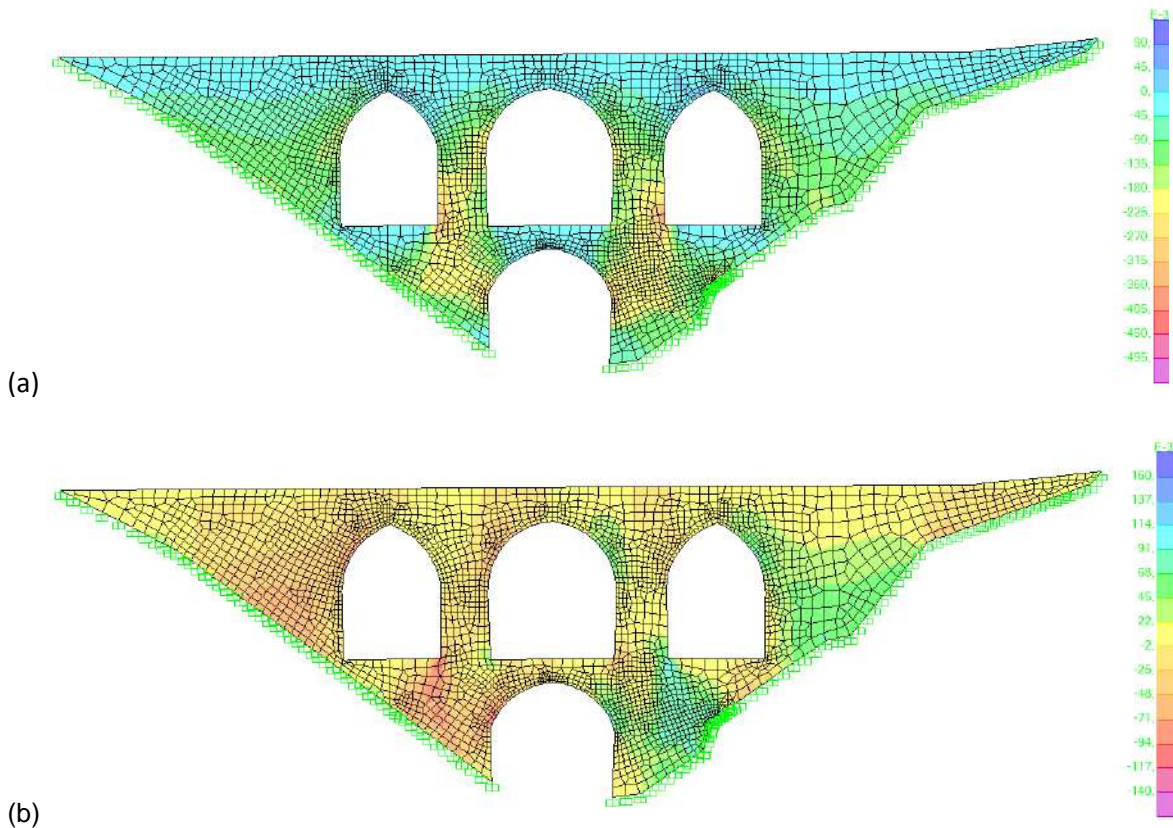


Figura 9. Tensiones obtenidas en el análisis numérico (MPa). Supuesto de peso propio, (a) tensiones normales verticales y (b) tensiones tangenciales.

Posteriormente, los resultados del caso no lineal de peso propio se emplearon como condición inicial para los posteriores análisis de viento y sismo (y el correspondiente análisis modal previo). En ambos casos se consideró la dirección más desfavorable de sendas acciones, orientada perpendicularmente al plano del acueducto. En la Figura 10 se representa una imagen de la estructura deformada bajo la acción combinada del peso propio y el empuje de viento. El máximo desplazamiento vertical fue de 1.5 mm aproximadamente, y el desplome calculado a partir del movimiento de la parte superior del acueducto alcanzó un valor de 1.4 mm.

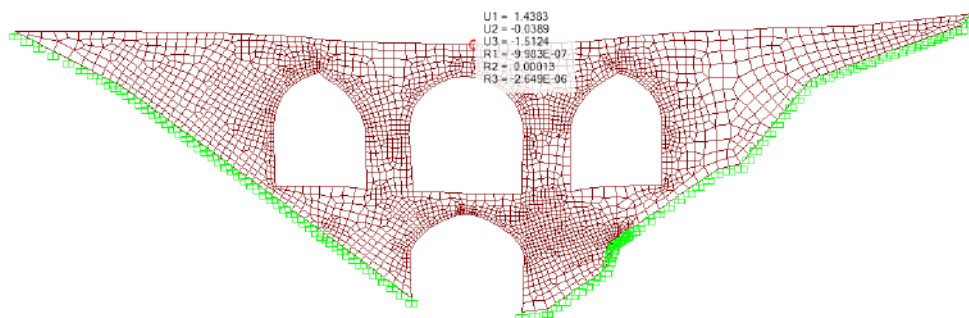


Figura 10. Movimientos de la estructura en la combinación de acciones gravitatorias y empuje de viento perpendicular al plano del acueducto.

Por último, la situación más desfavorable de las consideradas, sería la acción de un sismo de forma transversal a la estructura. Las correspondientes distribuciones de tensiones se han incluido en la Figura 11. La representación de tensiones normales en dirección vertical, Figura 11(a), se limita a las tensiones de tracción, que llegaron hasta valores de 1.65 MPa, concentrados en algunos puntos de las pilas centrales del acueducto, superando la capacidad a tracción estimada. Por otra parte se representan las tensiones tangenciales asociadas a la dirección del sismo, Figura 11(b), con valores máximos de 0.14 MPa, en el entorno del encuentro de los arcos laterales y las pilas, pudiendo relacionarse con el cambio de rigidez entre ambos elementos.

Cabe recordar, que el análisis realizado se basa en unos parámetros mecánicos correlacionados a partir de la calidad de la mampostería, y el estado actual observado durante las visitas a la misma. Y por tanto, a falta de ensayos específicos que pudieran esclarecer la resistencia actual de la fábrica, los resultados presentados deben considerarse como un análisis preliminar, a la hora de plantear la necesidad de una reparación de la estructura y su posible refuerzo estructural para soportar el efecto de los sismos que deberían considerarse según la normativa sísmica vigente actualmente.

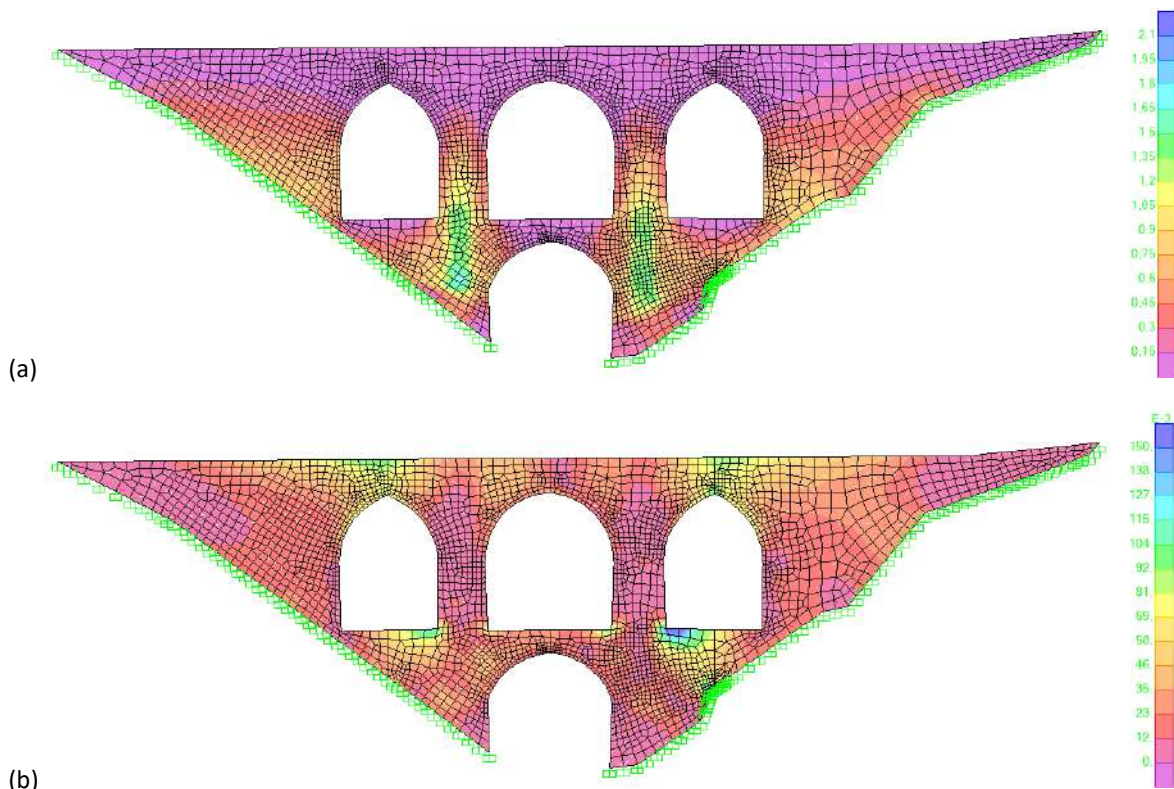


Figura 11. Tensiones obtenidas en el análisis numérico (MPa). Combinación de sismo transversal y peso propio, (a) tensiones normales verticales y (b) tensiones tangenciales.

4. CONCLUSIONES.

Se ha realizado un estudio del comportamiento estructural de varios acueductos situados en la localidad de Aspe. A partir de técnicas de restitución tridimensional se ha caracterizado su geometría, y se han supuesto unas propiedades mecánicas a partir de la inspección visual realizada en cada estructura. Además de la metodología de trabajo y definición de las propiedades mecánicas que posibilitan el

análisis no lineal del comportamiento del material, se han presentado en mayor detalle los resultados obtenidos para el Acueducto de los Cuatro Ojos bajo el efecto de acciones transversales como el viento y el sismo. A pesar del carácter preliminar del análisis, dada la incertidumbre en los parámetros mecánicos asumidos, se han observado los siguientes aspectos relacionados con la seguridad estructural y la vulnerabilidad sísmica del acueducto.

En primer lugar, las estructuras son estables bajo la acción única de su peso propio, aunque el nivel de tensiones tangenciales en algunos puntos se aproxime a la cohesión esperada de la mampostería, y aun considerando la degradación presentada en algunas zonas de la misma. Sin embargo, durante el cálculo sísmico se obtuvieron niveles de tensiones superiores a la resistencia del material, que pueden comprometer la integridad estructural. Para mejorar la respuesta sísmica podrían plantearse sistemas de refuerzo mediante morteros reforzados con mallas de fibras, que mejorarían tanto la durabilidad del material, como su resistencia y ductilidad en caso de sismo.

REFERENCIAS.

- [1] S. Ivorra, F.J. Baeza, D. Bru, F.B. Varona, Seismic Behavior of a Masonry Chimney with Severe Cracking Condition: Preliminary Study, *Key Eng. Mater.*, vol. 628, pp. 117–122, 2014. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.628.117.
- [2] Y. Endo, L. Pelà, P. Roca, F. da Porto, C. Modena. Comparison of seismic analysis methods applied to a historical church struck by 2009 L'Aquila earthquake. *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 13, pp. 3749–3778, 2015. doi:10.1007/s10518-015-9796-0.
- [3] Reboul N, Mesticou Z, Si Larbi A, Ferrier E. Experimental study of the in-plane cyclic behaviour of masonry walls strengthened by composite materials. *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 70–78, 2018.
- [4] D. Bru, S. Ivorra, F.J. Baeza, Seismic behavior of a masonry chimney retrofitted with composite materials: A preliminary approach, *Int. J. Saf. Secur. Eng.* 7 (2017) 486–497. doi:10.2495/SAFE-V7-N4-486-497.
- [5] M. Diaferio, D. Foti, F. Potenza, Prediction of the fundamental frequencies and modal shapes of historic masonry towers by empirical equations based on experimental data, *Eng. Struct.*, vol. 156, pp. 433–442, 2018. doi:10.1016/j.engstruct.2017.11.061.
- [6] S.A. Babatunde, Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers, *Compos. Struct.*, vol. 161, pp. 246–255, 2017. doi:10.1016/j.compstruct.2016.10.132.
- [7] F.J. Baeza, S. Ivorra, D. Bru, F.B. Varona, Structural Health Monitoring Systems for Smart Heritage and Infrastructures in Spain, in E. Ottaviano et al. (eds.), *Mechatronics for Cultural Heritage and Civil Engineering, Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering*, vol. 92, pp. 271–294, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68646-2_12.
- [8] Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008. http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/LineeGuida_BBCC_2010_11_26_1.pdf.