

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 |

Experimental evaluation of haunched joints

Loureiro, Alfonso¹; López, Manuel²; Gutiérrez, Ruth³; Reinoso, J. Manuel⁴

ABSTRACT

In recent years, several researchers have been working hard for improving the knowledge with respect to the comportment of the steel joints, with special effort in obtaining the rigidity of the different components of the joints, with the aim of introducing this rigidity in the method of the components according with EC3. But the method of the components has important limitations for the type of joints analyzed in the present work and so, as a first step in the proposal of an alternative method of evaluating the stiffness of the joints, the authors show the results of 4 tests of haunched joints of facade with different typologies with regards to the stiffening of the column web.

In all cases, the specimens have been subjected to a pointed load at the end of the beam, and rotations and displacements have been measured.

Keywords: haunched joints stiffness, experimental evaluation.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha producido un importante avance en el conocimiento del comportamiento de las uniones de acero. Prueba de este progreso es la inclusión de un apartado específico para el análisis de uniones en el EUROCÓDIGO 3 [1] y [2]. El método elegido para la determinación de la rigidez de las uniones es el denominado método de los componentes. Como su nombre indica, este método requiere la división de la unión en varios componentes cuya rigidez individual se calcula de forma analítica, y posteriormente se ensamblan como un conjunto de muelles interconectados en serie y en paralelo, dando lugar a la obtención de la rigidez rotacional total de la unión. Evidentemente, la correcta caracterización de cada uno de los componentes es de vital importancia en este método, y por este motivo diversos autores han dedicado un gran esfuerzo al desarrollo de metodologías conducentes a la obtención de la rigidez de dichos componentes. Uno de los que presenta una mayor influencia en la rigidez de la unión, es el panel del pilar sometido a esfuerzo cortante. Así, Bayo et al. [3] y López et al. [4] han estado trabajando en el estudio del comportamiento a cortante del panel trapezoidal del pilar, para el caso de uniones asimétricas soldadas. Así mismo, Loureiro et al. [5] han estudiado el comportamiento a cortante del panel rectangular del alma del pilar con doble rígidozador,

¹ University of A Coruña (SPAIN). a.loureiro@udc.es (Corresponding author)

² University of A Coruña (SPAIN). m.lopez@udc.es

³ University of A Coruña (SPAIN). j.reinoso@udc.es

⁴ University of A Coruña (SPAIN). ruthut@udc.es

para uniones simétricas soldadas. Por otro lado, con respecto a otro tipo de componentes, Liang et al. [6] han realizado un estudio comparativo sobre el comportamiento a tracción de uniones soldadas T-stub para acero de alta resistencia atornilladas pretensadas. Para el caso de cargas fuera del plano, Gil et al. [7] presentan los resultados de un estudio para la caracterización de la rigidez y resistencia de uniones de acero con torsión en el eje mayor.

Por otra parte, una vez caracterizada la unión, es muy importante la introducción de su rigidez en el análisis general, como ya se ha demostrado por autores como Frye y Morris [8] que analizan el comportamiento de pórticos de acero con conexiones flexibles, Chen [9] con su análisis práctico para el diseño de pórticos semirrígidos y Faella et al. [10] que han estudiado conexiones semirrígidas de acero estructural. Igualmente, Elflah et al. [11] estudian el comportamiento estructural de seis especímenes de acero inoxidable a escala completa, incluyendo uniones de chapa de testa, uniones con angulares superior e inferior, y uniones con angular superior, inferior y de alma. También Szafran et al. [12] muestra los resultados del análisis de uniones estructurales a gran escala de una torre de celosía de 40 m de altura.

Sin embargo, a medida que se avanza en el estudio de este campo, se observa que el método de los componentes muestra dificultades significativas en su implementación en el cálculo general de la estructura. Alguno de sus inconvenientes son la incapacidad para captar la interacción entre los diferentes grados de libertad de la unión, la dificultad para determinar la rigidez de ciertos componentes, la imprecisión debida a la inclusión de la rigidez de la unión como un muelle rotacional, la imposibilidad de aplicar el método a la gran variedad de tipologías de uniones existentes, etc. Concretamente, en lo que se refiere al tipo de unión estudiado en este artículo, el método de los componentes es de difícil aplicación, ya que las uniones reforzadas con un cartabón inferior no están específicamente recogidas en la normativa.

Por todo ello, con el afán de arrojar luz sobre el comportamiento de este tipo de uniones, y también con el fin de tener una base empírica cuyos resultados sirvan para un posterior calibrado de modelos de elementos finitos, este artículo presenta los resultados de cuatro ensayos de diferentes uniones de fachada rigidizadas con un cartabón inferior. Estas uniones están formadas por columnas HEA 200 y vigas IPE 300 con diferentes configuraciones en lo que respecta al número y disposición de los rigidizadores del alma del pilar.

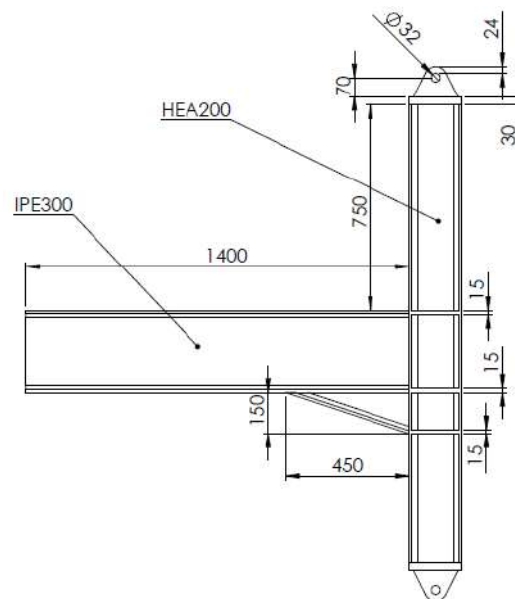
2. PLANTEAMIENTO DE LOS ENSAYOS

Tal y como se ha indicado anteriormente, se han llevado a cabo 4 ensayos diferentes, con el fin de barrer las configuraciones más representativas y comunes de uniones soldadas de acero con cartabón inferior de refuerzo. En todos los casos el cartabón está fabricado a partir del mismo perfil IPE 300 de la viga. En la Tabla 1 se indican las diferentes configuraciones de las uniones ensayadas. Como se puede apreciar, la diferencia entre unas y otras radica en la cantidad y en la configuración de los rigidizadores de alma del pilar.

Tabla 1. Configuración de los ensayos

| Ensayo | Columna | Viga | Rigidizador inclinado | Rigidizadores Horizontales |
|---------|---------|---------|-----------------------|----------------------------|
| Test_01 | HEA 200 | IPE 300 | 0 | 3 |
| Test_02 | HEA 200 | IPE 300 | 1 | 2 |
| Test_03 | HEA 200 | IPE 300 | 0 | 2 |
| Test_04 | HEA 200 | IPE 300 | 0 | 0 |

Las Figuras 1 a 4 muestran los croquis con los detalles correspondientes a los 4 ensayos realizados. En dichos croquis se pueden ver las medidas que definen la configuración del nudo, como dimensiones del cartabón, espesores de rigidizadores, etc.

**Figura 1.** Croquis del Test_01.

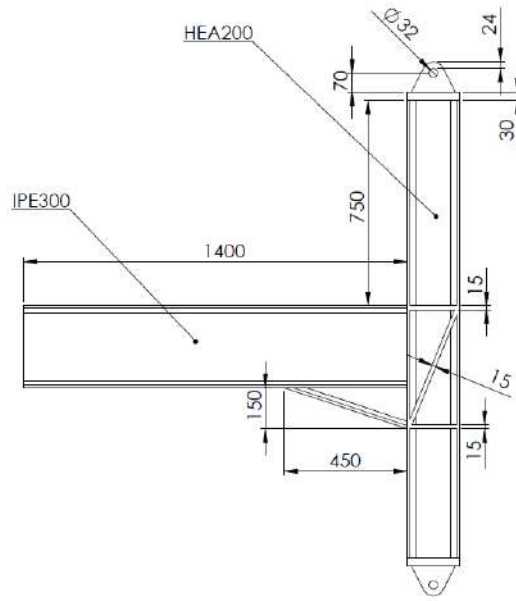


Figura 2. Croquis del Test_02.

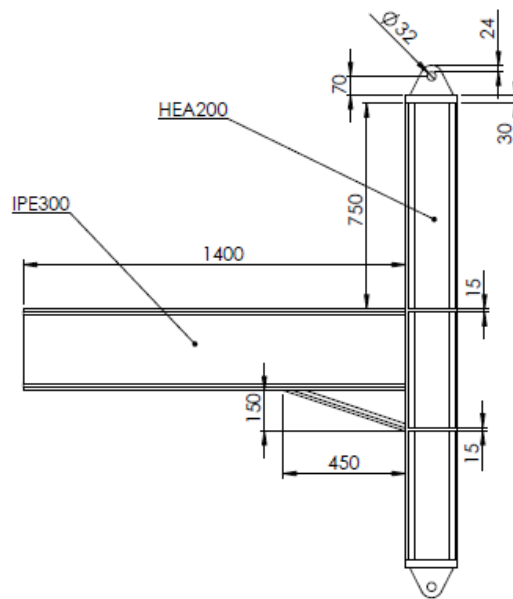


Figura 3. Croquis del Test_03.

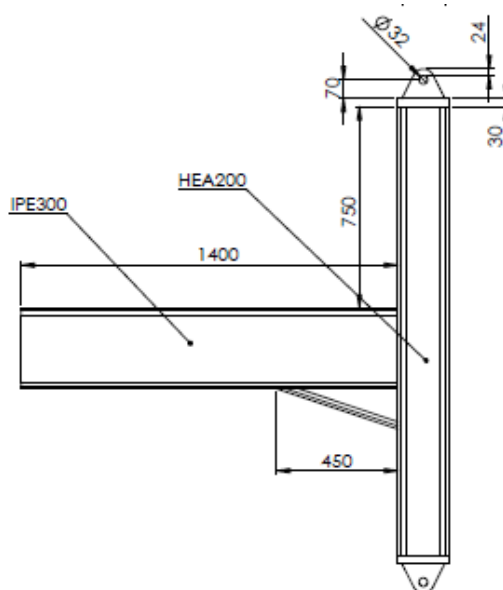


Figura 4. Croquis del Test_04.

Como se ha señalado anteriormente, en todos los casos las columnas están formadas por perfiles laminados en caliente HEA 200 y para las vigas se han escogido perfiles IPE 300 con cartabón inferior de refuerzo. El modelo 1 se ha reforzado con 3 rigidizadores horizontales, uno a la altura del ala superior de la viga, otro a la altura del ala inferior y, finalmente, un tercer rigidizador a la altura del ala del cartabón. De este modo, el alma del pilar está dividido en 2 paneles rectangulares entre los diferentes rigidizadores. El segundo modelo ensayado tiene un rigidizador inclinado en el alma del pilar y dos rigidizadores horizontales, uno de ellos en la parte superior y el otro en la parte inferior de la unión. La tercera unión ensayada consta de dos rigidizadores horizontales, uno de ellos a la altura del ala superior de la viga y el otro a la altura del ala inferior del cartabón. Finalmente, la unión 4 no utiliza ningún tipo de rigidizador en el alma del pilar. En todos los casos, el espesor de los rigidizadores es de 15 mm. El material utilizado es un acero S275 tanto para las vigas como para los rigidizadores, cuyas características, extraídas de la información proporcionada por el fabricante, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características mecánicas de los materiales

| Elemento | f_y (MPa) | f_u (MPa) |
|-------------------------|-------------|-------------|
| <i>Pilares</i> | 326 | 467 |
| <i>Vigas/cartabones</i> | 321 | 457 |
| <i>Rigidizadores</i> | 318 | 462 |

3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Como se puede observar, se ha cubierto una amplia gama de posibilidades para determinar la influencia de los rigidizadores en el comportamiento de este tipo de uniones. En todos los casos, la longitud total de la columna es de 1870 mm, y la longitud total de la viga es de 1400 mm, tal y como se puede apreciar en las Figuras 1 a 4. Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de Análisis Estructural de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de A Coruña. Para ello se ha utilizado un pórtico autoportante con capacidad para la aplicación de carga a través de 4 cilindros hidráulicos individuales, aunque en este caso sólo ha sido preciso utilizar un único pistón. Las Figuras 5 a 8 muestran las fotografías correspondientes a los cuatro ensayos realizados.



Figura 5. *Ensayo de la unión 1.*



Figura 6. *Ensayo de la unión 2.*



Figura 7. *Ensayo de la unión 3.*



Figura 8. *Ensayo de la unión 4.*

La realización de los ensayos tiene como finalidad última la obtención de las curvas momento rotación de las uniones. Para ello se ha llevado a cabo la medición de las rotaciones de la unión mediante la utilización de 3 inclinómetros: dos inclinómetros horizontales ubicados en la columna y un inclinómetro vertical situado en la viga, como se muestra en la Figura 9. Los inclinómetros superior e inferior colocados en la columna miden la rotación del pilar debido a su giro como sólido rígido

adicionado a la rotación por flexión. El inclinómetro vertical situado en la viga mide su rotación en esa sección. El giro de la unión se obtiene restando a la lectura del inclinómetro vertical de la viga, el promedio de las lecturas de los dos inclinómetros horizontales del pilar. El proceso de carga se ha llevado a cabo mediante un cilindro hidráulico situado a una distancia de 1 m medida desde el ala del pilar. La intensidad de la carga aplicada se mide por medio de una célula de carga situada entre el cilindro hidráulico y la parte superior del pórtico.

Adicionalmente se ha colocado un sensor de hilo para la medición del desplazamiento en la parte inferior de la viga, en la vertical al punto de aplicación de la fuerza, como medida redundante para verificación de los resultados. La Figura 10 muestra un detalle de la colocación del pistón, la célula de carga y el sensor de hilo.

En todos los ensayos se ha llevado a cabo un primer paso consistente en un proceso de precarga y descarga, y a continuación se comienza el ensayo en sí, hasta alcanzar la carga final.

La toma de datos ha sido llevada a cabo por medio de un equipo de adquisición de datos System 7000 de VISHAY, controlado mediante el software StrainSmart®.

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo de estos ensayos es la determinación de las curvas momento-rotación de las diferentes uniones, y su comparación. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 11.

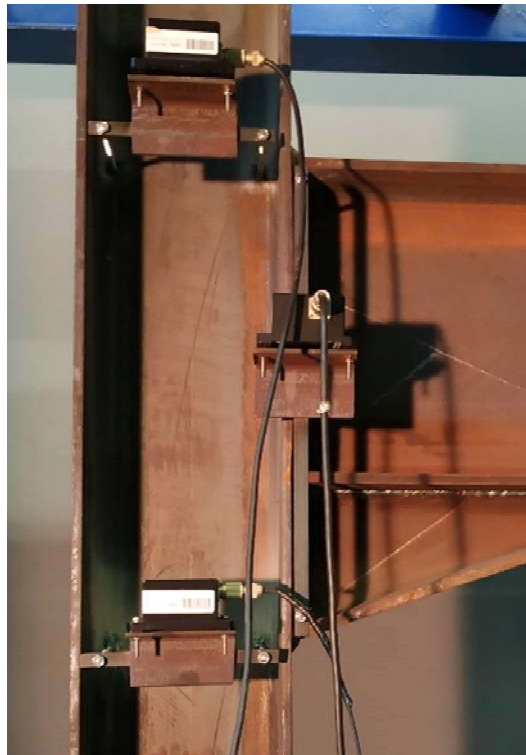


Figura 9. Detalle de los inclinómetros en el ensayo de la unión 1.



Figura 10. Detalle mostrando la posición del sensor de hilo y el conjunto del pistón y la célula de carga.

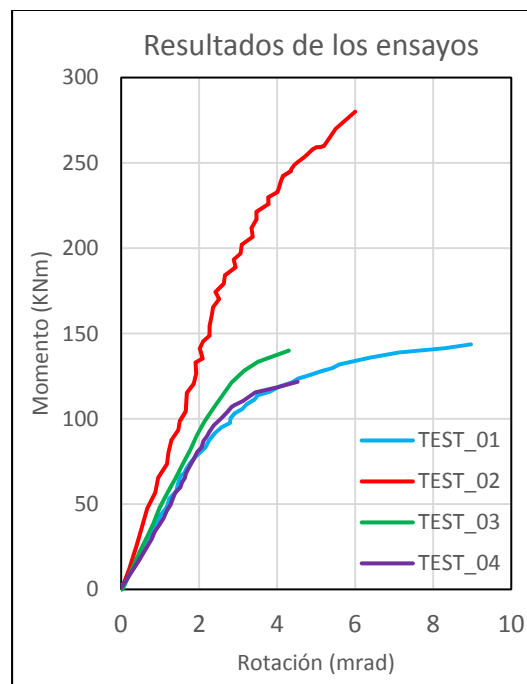


Figura 11. Gráficas Momento-Rotación para los diferentes ensayos.

Como se puede ver a la luz de las gráficas de la Figura 11, los rigidizadores horizontales apenas modifican la rigidez de la unión. Sin embargo, la adición del rigidizador inclinado en el alma del pilar incrementa sustancialmente dicha rigidez, tal y como era de esperar. Ello muestra la gran importancia que tiene el panel del alma del pilar a cortante en la caracterización de este tipo de uniones, tal y como ya ha sido puesto de manifiesto en trabajos como [3] [4] y [5]. Se aprecia como en todos los

casos, las curvas presentan un comportamiento lineal inicial, de cuya pendiente se ha obtenido la rigidez inicial de la unión. La intensidad de la carga aplicada en los ensayos ha sido llevada más allá de la rama lineal, sobrepasando la rodilla elasto-plástica en todos los casos excepto en el ensayo 2, debido a la gran resistencia que presenta esta unión. Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos, la Tabla 3 muestra de un modo cuantitativo la rigidez inicial de todas las uniones ensayadas, así como el incremento de rigidez de cada una de ellas con respecto a la unión 4 sin rigidizadores. Se puede observar que la adición de rigidizadores horizontales apenas incrementa la rigidez de las uniones 3 y 1. Sin embargo, la unión 2, que posee un rigidizador inclinado, incrementa su rigidez un 75.8 %, y según se aprecia en la Figura 11, en el ensayo correspondiente se habían alcanzado ya los 280 KNm, y todavía no se había llegado al final de la rodilla elasto-plástica. Ello significa que la resistencia de la unión también se incrementa considerablemente. De tal modo, que aunque no es objeto de este estudio el análisis de la resistencia, sí se puede comentar que fácilmente dicho incremento ronda el 100 %.

Tabla 3. Rigidez inicial de los ensayos

| Modelo | $K_{i,Test}$ (KN/mrad) | Incremento de rigidez (%) |
|---------------|------------------------------------------|----------------------------------|
| Test 1 | 43.40 | 5.3 |
| Test 2 | 72.09 | 75.8 |
| Test 3 | 42.64 | 3.4 |
| Test 4 | 41.23 | --- |

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han diseñado y ensayado cuatro uniones de acero soldadas, correspondientes a una configuración de unión de fachada con vigas reforzadas mediante cartabón inferior. Las cuatro uniones han sido sometidas a cargas controladas, y se ha medido la rotación de las mismas con el fin de determinar las curvas Momento-Rotación de las uniones, cuyas gráficas y características se han indicado en el texto precedente.

Los resultados obtenidos muestran que los rigidizadores horizontales en el alma del pilar no proporcionan apenas incremento de rigidez a la unión. Sin embargo, el refuerzo inclinado del alma del pilar incrementa considerablemente tanto la rigidez como la resistencia de la unión.

La información obtenida servirá de base para la calibración de modelos de elementos finitos, con el fin de llevar a cabo estudios paramétricos de cara a la caracterización de este tipo de uniones. Un trabajo exhaustivo y extenso en este sentido, permitirá la creación de una amplia base de datos para la posterior utilización de modelos de meta-modelado, como el método de Kriging, para la obtención automática de la rigidez de la unión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el soporte financiero recibido del Ministerio de Economía y Competitividad y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional bajo el contrato BIA2016-80358-C2-2-P MINECO/FEDER, UE.

REFERENCIAS

- [1] CEN. Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings (EN 1993-1-1), 2005.
- [2] CEN. Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1.8: Design of Joints (EN 1993-1-8), 2005.
- [3] Bayo E, Loureiro A, Lopez M, Shear behaviour of trapezoidal column panels. I: Experiments and finite element modelling. *Journal of Constructional Steel Research* 2015; 108: 60-69
- [4] Lopez M., Loureiro A., Bayo E. Shear behaviour of trapezoidal column panels. II: Parametric study and cruciform element. *Journal of Constructional Steel Research* 2015; 108: 70-81
- [5] Loureiro A., Lopez M, Bayo E. Shear behaviour of stiffened double rectangular column panels: Characterization and cruciform element. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016; 117: 126–138
- [6] Liang, G., Guo, H., Liu, Y., Yang, D., Li, S. A comparative study on tensile behavior of welded T-stub joints using Q345 normal steel and Q690 high strength steel under bolt preloading cases. *Thin-Walled Structures* 2019; 137, pp. 271-283
- [7] Gil, B., Goñi, R., Bijlaard, F., Bayo, E. Major axis steel joint under torsion: Stiffness and strength characterization. *Engineering Structures* 2019; 180, pp. 586-602
- [8] Frye MJ, Morris GA. Analysis of flexible connected steel frames. *Canadian Journal of Civil Engineers*, 1975; 2: 119-136
- [9] Chen WF. Practical analysis for semi-rigid frame design. World Scientific Publishing Company; 2000.
- [10] Faella C., Piluso V., Rizzano G. *Structural Steel Semirigid Connections: Theory, Design and Software*. CRC Publishers, 2000
- [11] Elflah, M., Theofanous, M., Dirar, S., Yuan, H. Structural behaviour of stainless steel beam-to-tubular column joints. *Engineering Structures* 2019; 184, pp. 158-175
- [12] Szafran, J., Juszczak, K., Kamiński, M. Experiment-based reliability analysis of structural joints in a steel lattice tower. *Journal of Constructional Steel Research* 2019; 154, pp. 278-29