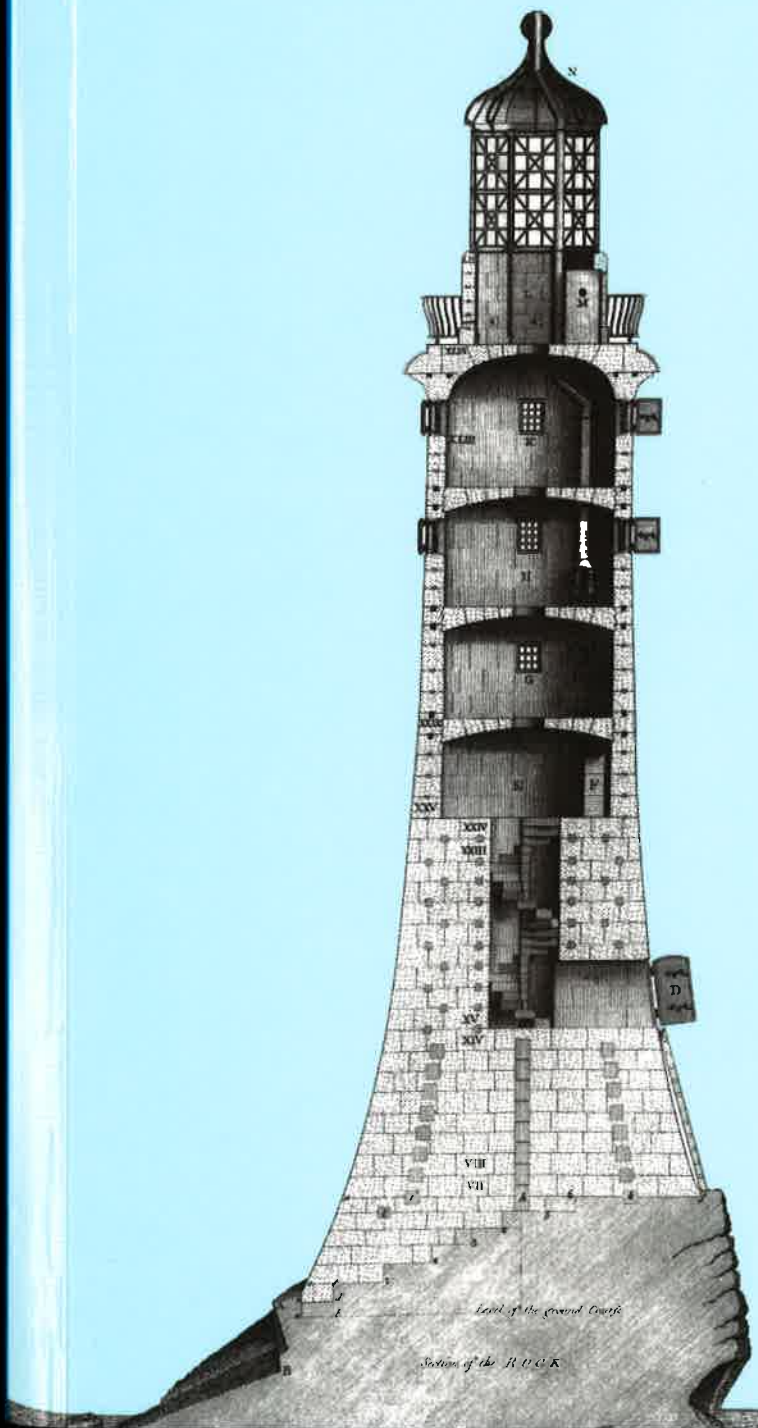
Actas del Décimo Congreso Nacional y Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano de

Historia de la construcción

Donostia-San Sebastián
3 a 7 de octubre de 2017

Volumen I



Instituto Juan de Herrera
Escuela Técnica Superior
de Arquitectura de Madrid

TEXTOS SOBRE TEORÍA E HISTORIA DE LAS CONSTRUCCIONES
Colección dirigida por Santiago Huerta

M. Arenillas et al. (Eds.). **Actas del V Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
F. Bores et al. (Eds.). **Actas del II Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
A. Buchanan et al. (Eds.). **Robert Willis. Science, Technology and Architecture in the Nineteenth Century**
A. Casas et al. (Eds.). **Actas del I Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
A. Choisy. **El arte de construir en Roma**
A. Choisy. **El arte de construir en Bizancio**
A. Choisy. **El arte de construir en Egipto**
A. Choisy. **Historia de la arquitectura** (en preparación)
I. J. Gil Crespo. (Ed.). **Historia, arquitectura y construcción fortificada**
I. J. Gil Crespo. **Actas de las Segundas Jornadas sobre Historia. Arquitectura y Construcción Fortificada**
J. Girón y S. Huerta. (Eds.) **Auguste Choisy (1841-1909). L'architecture et l'art de bâtir**
A. Graciani et al. (Eds.). **Actas del III Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
R. Guastavino. **Escritos sobre la construcción cohesiva y su función en la arquitectura**
J. Heyman. **Análisis de estructuras: un estudio histórico**
J. Heyman. **El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica**
J. Heyman. **Geometry and Mechanics of Historic Structures**
J. Heyman. **La ciencia de las estructuras**
J. Heyman. **Teoría básica de estructuras**
J. Heyman. **Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. 2 vols.**
J. Heyman. **Vigas y pórticos**
S. Huerta. **Arcos, bóvedas y cúpulas**
S. Huerta (Ed.). **Actas del IV Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
S. Huerta et al. (Eds.). **Actas del VI Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
S. Huerta et al. (Eds.). **Actas del VII Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
S. Huerta y F. López Ulloa (Eds.). **Actas del VIII Congreso Nacional de Historia de la Construcción**
S. Huerta y P. Fuentes (Eds.). **Actas del I Congreso Int. Hispanoamericano de Historia de la Construcción**
S. Huerta et al. (Eds.). **Actas del II Congreso Int. Hispanoamericano de Historia de la Construcción**
S. Huerta (Ed.). **Las bóvedas de Guastavino en América**
S. Huerta (Ed.). **Essays in the History of the Theory of Structures, in Honour of Jacques Heyman**
S. Huerta (Ed.). **Proceedings of the 1st International Congress on Construction History**
J. Monasterio. **Nueva teórica sobre el empuje de las bóvedas** (en preparación)
J. R. Perronet. **La construcción de puentes en el siglo XVIII**
H. Straub. **Historia de la ingeniería de la construcción** (en preparación)
G. E. Street. **La arquitectura gótica en España**
H. Thunnissen. **Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura**
A. Truñó. **Construcción de bóvedas tabicadas**
E. Viollet-le-Duc. **La construcción medieval**
R. Willis. **La construcción de las bóvedas en la Edad Media**

Actas del Décimo Congreso Nacional y
Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano de

Historia de la Construcción

Décimo Congreso Nacional y Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción. San Sebastián, 3 –7 octubre 2017

Organizado por
Sociedad Española de Historia de la Construcción
ETS de Arquitectura Donostia-San Sebastián (UPV/EHU)
Instituto Juan de Herrera

Colaboran
Máster Rehabilitación y Restauración (UPV/EHU)
Puertos del Estado. Ministerio de Fomento
Programa de Doctorado de Patrimonio (UPV/EHU)
Grupo de Investigación de Estructuras de Madera en la Arquitectura (UPV/EHU)
Centro de Estudios José Joaquín de Mora (Fundación Cárdenas)

Director
Santiago Sánchez Beitia

Presidente de la SEdHC
Santiago Huerta

Comité Organizador
Ana Azpiri Albistegui
Javier Barrallo
Alfredo Calosci
Maite Crespo de Antonio
Lauren Etxepare Igiñiz
Paula Fuentes
Ignacio Javier Gil Crespo
Daniel Luengas Carreño
Alba de Luis
David Ordóñez Castañon

Comité Científico

Nacional
Antonio Almagro Gorbea
Miguel Arenillas Parra
Ricardo Aroca Hernández-Ros
Javier Barrallo Calonge
Luis Alfonso Basterra Otero
José Calvo López
Pepa Cassinello
Manuel Durán Fuentes
Rafael García García
Ignacio Javier Gil Crespo
Francisco Javier Girón Sierra
José Luis González Moreno-Navarro
Amparo Graciani García
Santiago Huerta
Rafael Marín Sánchez
Gaspar Muñoz Cosme
Pedro Navascués Palacio
Enrique Nuere Matauco
Enrique Rabasa Díaz
Antonio Ruiz Hernando
Santiago Sánchez Beitia
Cristina Segura Graíño
Miguel Taín Guzmán
Fernando Vela Cossío
Arturo Zaragozá Catalán

Internacional
Bill Addis (Reino Unido)
Antonio Becchi (Italia)
Tamara Blanes (Cuba)
Dirk Bühler (Alemania)
Mónica Cejudo Collera (México)
Luis María Calvo (Argentina)
Antonio de las Casas Gómez (Chile)
Xavier Cortés de la Rocha (México)
Beatriz del Cueto (Puerto Rico)
Juan Ignacio del Cueto (México)
Milagros Flores Román (Puerto Rico)
Virginia Flores Sasso (Rep. Dominicana)
Benjamín Ibarra Sevilla (México, EE.UU.)
Ana Angélica López Ulloa (Ecuador)
Fabián López Ulloa (Ecuador)
Joao Mascarenhas Mateus (Portugal)
Mario Mendonça de Oliveira (Brasil)
Roberto Meli (México)
Sandra Negro Tua (Perú)
John Ochsendorf (EE.UU.)
Esteban Prieto Vicioso (Rep. Dominicana)
María Isabel Sardón de Taboada (Perú)
Margareth Da Silva Pereira (Brasil)
Daniel Taboada Espinella (Cuba)

Actas del Décimo Congreso Nacional y Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción

Donostia - San Sebastián, 3 – 7 de octubre de 2017

Edición a cargo de
Santiago Huerta
Paula Fuentes
Ignacio J. Gil Crespo

Prologo
Santiago Sánchez Beitia

Volumen I

Instituto Juan de Herrera
Escuela Técnica Superior
de Arquitectura de Madrid

Instituto Juan de Herrera
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID

© Instituto Juan de Herrera
ISBN:978-84-9728-561-2 (Obra completa); ISBN: 978-84-9728-562-9 (Vol. I)
Depósito legal: M-26942-2017
Portada: Faro de Eddystone. J. Smeaton. *Narrative of the building and construction of the Eddystone lighthouse with* stone. London: 1791.
Fotocomposición e impresión: GRACEL
Libros Juan de Herrera: librosjuandeherrera.wordpress.com

Índice

Volumen I

Prólogo. *Santiago Sánchez Beitia* xv

COMUNICACIONES

Almagro, Antonio. Algunos aspectos constructivos del palacio al-Badi' de Marrakech 1

Alonso de la Peña, Javier y Miguel Sobrino González. Notas sobre el cimborrio gótico de la Catedral de Santiago de Compostela 11

Álvarez Areces, Enrique; Galiana Núñez, Magdalena; Fernández Suárez, Jorge; Baltuille Martín, José Manuel y Javier Martínez-Martínez. Arquitectura nobiliaria de Trujillo (Cáceres) tras el descubrimiento de América. Canteras históricas y materiales pétreos empleados en su construcción 17

Aranda Alonso, María. La trompa de Montpellier. Origen, uso, desarrollo y evolución a partir del tratado de cantería de Alonso de Vandelvira 27

Ardanaz Ruiz, Cecilia. Arquitectura medieval defensiva: la casa-torre en Navarra. Poder, linajes y territorio 37

Arteaga Botero, Gustavo Adolfo. Antecedentes constructivos de las estructuras en madera, realizadas entre los siglos XVI y XVIII, en la zona centro de Colombia. Revisión a las Arquitecturas vernáculas y desarrollos constructivos influenciados por tradiciones europeas de los siglos XIII a XVI 47

Atienza Fuente, Javier. LAPIDES SIGNATI: Marcas, líneas y trazos de elaboración y colocación sobre elementos constructivos pétreos de las ciudades romanas de Ercavica, Segobriga y Valeria en la provincia de Cuenca 55

Awad Parada, Tamar. Celosías de ladrillo en los secaderos de tabaco 65

Azevedo Salomao, Eugenia María. Distribución de agua en la morfología urbana de Valladolid-Morelia siglos XVIII-XIX 75

Azpiri Albistegui, Ana. El Hormigón Armado en Eibar 85

Backof Timm, Caroline. Las fuentes documentales en la historia de la construcción de las reducciones jesuítico-guaraníes 95

Balaguer Dezcallar, María Josefa y Luis Vicén Banzo. Los espacios del faro de Peñíscola (Castellón), una visión del conjunto tras su restauración 105

Balsa de Pinho, Joana. Uma fabrica quinhentista: a capela-mor da igreja da Casa da Misericórdia de Porto 113

Bargón García, Marina y María del Mar Lozano Bartolozzi. El arquitecto provincial Ventura Vaca: la ejemplificación de su trayectoria profesional en Alburquerque (Badajoz) 123

Baró Zarzo, José Luis y Carme Villar Bosch. Técnicas de tierra en alquerías históricas de la huerta valenciana 133

Basterra, Luis Alfonso; Balmori, José Antonio y Milagros Casado. La armadura de cubierta de la nave central de la Iglesia del Convento de San Francisco en Medina de Rioseco (Valladolid) 143

Beldarrain-Calderón, Maider. Evolución del sistema constructivo de los hornos de calcinación de la minería de hierro en Bizkaia (1890-1970) 153

Bellido Pla, Rosa. Nuevos datos para el análisis constructivo de las torres campanario románicas de Valladolid. La intervención en 1758 de tres monjes arquitectos en la iglesia del Salvador de Simancas 163

Benincampi, Iacopo. Roman Baroque Models and Local Traditional Construction. The Sanctuary of St. Ignatius of Loyola and its dome 175

Benitez Hernández, Patricia y Mercedes Valiente López. Aportación de Tomás Vicente Tosca al estudio de la escalera de caracol con ojo 185

Benito Pradillo, Mª Angeles. Reglas empíricas tradicionales para el dimensionamiento de elementos estructurales de edificios de fábrica góticos y su aplicación a una catedral existente 193

Blasco Macías, Federico; Salguero Andujar, Francisco J.; Delgado Trujillo, Antonio y Marta Molina Huelva. La Casa de Plástico y la Casa del Futuro. Aportaciones de la arquitectura de mediados del siglo XX a la construcción con materiales compuestos 203

Bühler, Dirk. La constructora «Hermanos Rank» y la introducción de las bóvedas tabicadas en Múnich a partir de 1947 215

Bulfone Gransinigh, Federico y Francesco Amendolagine. Il cantiere della calce fra continuita' e rinnovamento 225

Cabrera Aceves, Juan. Tratadistas españoles en los sistemas de contrarresto para bóvedas novohispanas. Ensayo geométrico en 12 templos de la ciudad de Valladolid, hoy Morelia, México 235

Cacciavillani, Carlos Alberto. La tecnica costruttiva delle fortificazioni in Abruzzo (Italia) 247

Calosci, Alfredo. Las fuentes históricas para la historia de la construcción: entre investigación y divulgación 257

Camino Olea, María Soledad; Rodríguez Esteban, María Ascensión; Sáez Pérez, María Paz; Llorente Álvarez, Alfredo; Cabeza Prieto, Alejandro; Olivar Parra, José Mª y María Basterra García. Los aleros en la Arquitectura de ladrillo de tejar en la zona sur de Castilla y León: diseños y construcción 263

Cantos Cebrián, Flora María; Cebrián Davia, Damián y Asunción Martínez González. Geometría, simbología y arte en las cubiertas de madera. Armadura de par y nudillo con lacería del Convento de santo Domingo de Chinchilla de Montearagón, Albacete 273

Cárcamo Martínez, Joaquín. Los puentes españoles de palizadas metálicas sobre pilotes de rosca. El superviviente oculto de Zumaia / Zumaya (Gipuzkoa) 285

Castellano Román, Manuel; Murillo Fragero, José Ignacio y Francisco Pinto Puerto. Técnicas constructivas del Claustro Grande de la Cartuja de Nuestra Señora de la Defensión en Jerez de la Frontera (s. XVI). Aportaciones desde enfoques interdisciplinares y un modelado gráfico digital 295

Cejudo Collera, Mónica. Miguel Ángel de Quevedo: La incluyente profesión de ingeniero 305

Chamorro, Miquel Àngel y Elena Vilagran. Contratos y peritajes de los siglos XIV al XVI en la ciudad de Girona 317

Cobos Rodríguez, Luis M.; Mata Almonte, Esperanza y Ángel Muñoz Vicente. El grafito del Faro de Gades como fuente histórica para el estudio de su modelo constructivo 327

Cortés Rocha, Xavier. El Examen de Maestría para el Ejercicio de la Arquitectura en los siglos XVI al XVIII en la Nueva España 335

Costa Jover, Agustí y Sergio Coll Pla. Mecánica de bóvedas de obra de fábrica en las Iglesias del Valle de Arán 347

Crespo de Antonio, Maite. El lagar de viga, el motor del caserío vasco 357

Cruz López, Borja. Hacia una arquitectura de montaje: inicios del steel framing 367

Cueto, Beatriz del. Las Cabezas de San Juan: el diseño, construcción y restauración de un faro de tercer orden en Puerto Rico 377

Cursino dos Santos, Letícia; Lima Araújo, Camila y George Rembrandt Gutlich. Arte muratorio: alfarería del valle del Paraíba 389

Cusano, Concetta; Cennamo, Claudia y Maurizio Angelillo. Estabilidad en el neoclasico napolitano y vulnerabilidad sísmica de la cúpula de San Francisco de Paula en Nápoles 399

Díaz del Campo Martín Mantero, Ramón Vicente. El ladrillo como lenguaje de la modernidad en la obra de Miguel Fisac 407

Díaz Macías, Brenda Estefanía. Evaluación de la permeabilidad del tadelakt aplicado sobre diferentes materiales base 417

Díaz Parra, Sergio Juan y David Sanz Arauz. El Castillo de Overa. Simbiosis de cal y yeso 427

Díez Oronoz, Aritz. Un singular ejemplo de Bastión Artillado: el Puntone proyectado por Baldassarre Peruzzi para Roccasiniblanda 437

Domínguez Burrieza, Francisco Javier. Historia de la construcción de la armadura de hierro del Teatro Calderón de la Barca de Valladolid (1863-1864) 447

Domouso de Alba, Francisco José. Las primeras patentes depositadas en España que desarrollaron la prefabricación y la industralización en el hormigón armado 1886-1906 457

Durán Fuentes, Manuel. Los sistemas de iluminación de los faros de la Antigüedad. El faro helenístico de Alejandría 469

Escorial Esgueva, Juan. Arquitectura y edificación en la Ribera del Duero burgalesa (1544-1595): entre la tradición gótica y las formulaciones clasicistas 481

Estepa Rubio, Antonio y Jesús Estepa Rubio. El método de los conos como desarrollo gráfico-analítico de la forma y del trazado geométrico en las construcciones abovedadas de los Vandelvira. La capilla desigual por lados cuadrados como caso de estudio singular 491

Etxebarria Mallea, Matxalen. La influencia de las técnicas constructivas y compositivas del Barroco en la arquitectura tradicional del País Vasco. Caso de estudio del Valle del Lea 501

Etxepare, Lauren y Bill Addis. La impronta europea del norte en la construcción con hierro y acero durante la industrialización del País Vasco (1842-1914) 513

Fernández Correas, Lorena. La iconografía medieval como fuente de primer orden para el estudio de los medios constructivos: el caso de las grúas 523

Ferrer Forés, Jaime J. Sverre Fehn y la construcción de la tradición 533

Figueroa Viruega, Edmundo Arturo. Los Templos Filipinos Novohispanos 545

Flores Román, Milagros. Bautista Antonelli y su legado en el Caribe Fortificado 553

Flores Sasso, Virginia. Impacto y origen de la arquitectura prefabricada de madera en República Dominicana (Siglo XIX-XX) 559

Fonseca de la Torre, Héctor Juan y Jose Antonio Rodríguez Marcos. Las técnicas constructivas de la prehistoria reciente en el Valle del Duero 569

Font Arellano, Juana. Algunas fuentes escritas sobre la construcción precolombina 577

Volumen II

Freire-Tellado, Manuel J. y Santiago B. Tarrío Carrodeguas. Enjarjes y plementos en las bóvedas pétreas gallegas 591

Fuente, Ander de la; Benedet, Verónica y Agustín Azkarate. Cien años de construcción con estructura modulada: desde la Weissenhofsiedlung de Gropius y los módulos de Christoph & Unmack a los sistemas ecolólogicos en madera MATRYOSHKA© 601

Fuentes, Paula y Anke Wunderwald. La construcción de las bóvedas de la catedral de Mallorca: una revisión bibliográfica 611

Galeno-Ibaceta, Claudio y Nelson Arellano Escudero. El viaducto de Conchi: una obra de la Revolución Industrial en el desierto de Atacama, 1887-1888 625

Galindo Díaz, Jorge y Ricardo Tolosa Correa. Cáscaras de hormigón en la arquitectura colombiana del siglo XX: un caso de hibridación y asimilación tecnológica 635

Gallego Blázquez, Rocío. Revestimientos de mármol romanos. Análisis e interpretación 645

Gallego Valle, David y Jesús Manuel Molero García. El proceso constructivo de una fortaleza medieval: el castillo de la Estrella de Montiel (Ciudad Real, España) 657

García García, Rafael. Láminas cilíndricas en España. El reinicio de la construcción laminar en los años de posguerra 669

García Moreno, Leticia. La asimilación de las estructuras de hormigón como fundamento de una nueva arquitectura. El caso de Luis Tolosa 1927-1956 679

García Muñoz, Julián y Carlos Martín Jiménez. Las bóvedas del claustro del monasterio de Santa María de Valdeiglesias 689

Gil Crespo, Ignacio. El sistema fortificado de la isla Terceira (Azores, Portugal): notas sobre poliorcética y construcción 697

Gilabert Sansalvador, Laura. La cabaña como arquetipo de la arquitectura maya 711

González Gozalo, Elvira. La aplicación de vasijas de cerámica como materiales de construcción en los rellenos de bóvedas de edificios góticos de Palma. Estado de la cuestión 721

González Manich, Clara; González-Longo, Cristina y Filippo Monari. La fábrica de piedra durante los siglos XVII y XVIII en Escocia: estudio preliminar 731

Gutiérrez Hernández, Alexandra M. Monteas, trazas y rasguños. Una muestra del «Cuaderno de Cantería» localizado en los muros de la antigua iglesia del Colegio de los Jesuitas (La Clerecía) de Salamanca 741

Huchim Herrera, José y Lourdes Toscano Hernández. Los Reservorios de Uxmal, Yucatán, México 751

Huerta, Santiago. Las bóvedas tabicadas en Alemania: la larga migración de una técnica constructiva 759

Hurtado-Valdez, Pedro. Torres de tierra: Los campanarios exentos de las iglesias rurales centro andinas de Perú 773

Ibarra-Sevilla, Benjamín. Las bóvedas tabicadas de Guastavino para el edificio municipal de Nueva York, soluciones de planta irregular y flecha limitada 783

Iborra Bernad, Federico. Forjados rebajados de bóveda tabicada en la Valencia de los siglos XIV al XVI 795

Infante Limón, Enrique y Elena Merino Gómez. Sistemas constructivos de alminares almohades con machón central cuadrado del suroeste peninsular 805

Izaga Reiner, José María. Las presas de arcos y contrafuertes de Villareal de Berriz. Una innovación tecnológica en el País Vasco en el siglo XVIII 815

Jiménez Vaca, Alejandro y Arturo España Caballero. Puentes Novohispanos en la Ciudad de México 829

Jufre Garcia, Xavier. Los Artificios de Juanelo. La principal infraestructura hidráulica del Renacimiento europeo 837

La Spina, Vincenzina y Carles Jordi Grau Giménez. La evolución de la producción del yeso tradicional hasta los años 70 del siglo XX en Gestalgar, Valencia (España) 849

Llano Castresana, Urtzi y Enara Mendizabal Samper. Consideraciones previas y estudio para la intervención en el patrimonio industrial arquitectónico e ingeniería civil: Faro de Zumaia 859

Lluis i Ginovart, Josep; López Piquer, Mónica y Judith Urbano Lorente. Catenarias y parábolas en el proyecto de la cooperativa modernista de Pinell de Brai en Tarragona (España) 869

López Bernal, Vicente y Rafael Caso Amador. La casa maestral de Llerena. Evolución y modelo de arquitectura mudejar 881

López Mozo, Ana; Alonso Rodríguez, Miguel Ángel y Alberto Sanjurjo Álvarez. Bóvedas de terceletes con rombo diagonal. Transmisión de conocimiento técnico en el tardogótico europeo 893

López Romero, María. Frente escénico del Teatro de Augusta Emerita. Interpretación de la construcción romana mediante hormigón y acero en la primera mitad del siglo XX 905

López Ulloa, Fabián Santiago y Ana Angélica López Ulloa. La isla de Santa Clara y los primeros faros de la República del Ecuador 917

Luengas - Carreño, Daniel. La Casa-palacio de Fagoagoa, en Oiartzun (Gipuzkoa): Análisis del sistema constructivo y elementos arquitectónicos originales de una Residencia Señorial Bajomedieval 925

Maira Vidal, Rocío. Bóvedas de crucería en el Monasterio de las Huelgas Reales: diferentes soluciones estereotómicas 935

Malavassi Aguilar, Rosa Elena. Arquitectura conventual de León de Nicaragua y Cartago de Costa Rica, siglos XVI a XVIII 945

Mancera Sánchez, Raquel. Sistemas constructivos del exconvento dominico de Cuilapan de Guerrero, Oaxaca 957

Marín Palma, Ana Mª. Eladio Dieste y la tecnología de la cerámica armada 965

Marrero Cordero, Alain. Los acueductos de La Habana Colonial, de la Zanja Real al Canal de Isabel II. S. XVI-XIX 975

Martín Domínguez, Beatriz y Miguel Sancho Mir. El análisis arquitectónico de las masías fortificadas del Maestrazgo como documento histórico 985

Martín Sánchez, Julio. El «Castillejo general de andamiaje» en las obras de la Bolsa de Madrid (1886-1893) 997

Martínez Martínez, Mónica. K.W. Johansen y el origen del cálculo plástico en las cáscaras cilíndricas largas de cubierta 1007

Martínez Rodríguez, María Angélica. Transformaciones técnicas y constructivas en modelos clásicos: una Estación de Ferrocarril en México 1017

Mateos Valiente, Amaia. La dignificación del hormigón en las iglesias modernas: el caso de las parroquias vascas 1029

Mazzanti, Claudio. I cambiamenti delle tecniche costruttive negli edifici religiosi della Diocesi di Chieti dopo il terremoto del 1706 1041

Mileto, Camila; Vegas López-Manzanares, Fernando; García Soriano, Lidia; Villacampa Crespo, Laura y F. Javier Gómez Patrocinio. Primera aproximación a la variedad constructiva de la arquitectura vernácula de tierra en la Península Ibérica 1051

Molina Sánchez de Castro, Vicente Emilio. El Puente de Hierro sobre el río Tajo a su paso por Talavera de la Reina. Un ejemplo de elemento configurador del espacio urbano 1063

Monteros Cueva, Karina y Katherine Soto Toledo. El proceso constructivo en tierra en comunidades de ascendencia Indígena en zona fría 1075

Moreno Blanco, Raimundo. Historia, evolución constructiva y decoración del Convento de San Antonio de Ávila 1085

Moreno Megias, Roger y Joan Lluís Zamora i Mestre. La normativa técnica y el coste derivado de su aplicación. Estudio del coste de construcción de la vivienda social tras la aplicación de nueva normativa técnica durante la segunda mitad del siglo XX en Barcelona 1095

Moreno Muñoz, Pablo y José Fernández-Llebrez Muñoz. Aportaciones de los modelos físicos al desarrollo y construcción de las estructuras laminares en el s. XX 1103

Muñoz Fernández, Francisco Javier. El registro de la propiedad: una fuente para la historia de la construcción. La arquitectura contemporánea en Bilbao como estudio de caso 1113

Muñoz Muñoz, Jose. Afectaciones en edificios históricos expuestos al fenómeno de subsidencia; Museo de la insurgencia, Aguascalientes, México 1123

Muñoz Rebollo, Gabriel. Puente-arco atirantado de 1903, batido por aguas bravas en el Balneario de Sobrón, Álava 1131

Natividad Vivó, Pau. Las baídas de hiladas en cruz de El Escorial 1141

Negro, Sandra y Samuel Amorós. La arquitectura encamonada del siglo XVIII en el colegio menor de la Compañía de Jesús en Ica, Perú 1149

Niar, Sanaa. Ejemplos de la evolución planimétrica de la fortificación moderna de Oran 1159

Ocerin Ibáñez, Olatz. La formación reglada de los arquitectos en España desde el siglo XVIII hasta el siglo XX. Puntos de inflexión e influencia en el ámbito de la profesión arquitectónica. 1169

Ordóñez Castañón, David. Materiales y técnicas empleados en la construcción de antiguas trampas para la caza de fieras en la Montaña Central de Asturias 1177

Ortueta Hilberath, Elena de. El faro del dique de levante en el puerto de Tarragona 1187

Volumen III

Otamendi-Irizar, Irati. La Fábrica de papel Echezarreta en Legorreta como ejemplo de la evolución constructiva y arquitectónica de la arquitectura industrial guipuzcoana 1201

Palacios Gonzalo, Jose Carlos; Arnanz Ayuso, Marcos; Escalada Marco-Gardoqui, María y Diego Martínez Moreno. La bóveda de la Puerta de los Leones de la Catedral de Toledo 1211

Palenzuela Navarro, Antonio. Canteros vascos en la catedral de Almería 1219

Pastor Villa, Rosa. El Faro de El Cabanyal (Valencia) 1229

Pastrana Salcedo, Tarsicio. Ingeniería constructiva carmelita para el manejo y aislamiento hídrico, en el Santo Desierto de Santa Fe, México 1239

Peiró Vitoria, Andrea y Rosana Martínez Vanaclocha. Sistemas constructivos de relleno de subestructuras en la arquitectura Maya. Las acrópolis de La Blanca y Chilonché (Petén, Guatemala) 1249

Pinilla Melo, Javier; Lasheras Salgado, Raquel; Moreno Fernández, Esther; González Yunta, Francisco y Félix Lasheras Merino. El chapitel de Pedro Ribera en la Iglesia de Nuestra Señora de Monserrat, en Madrid 1259

Piñuela García, Mila. Sobre la traza de los mocárabes: adarajas, medinas y la pieza "grullillo" de López de Arenas 1267

Plasencia-Lozano, Pedro. El proyecto no construido del ferrocarril entre Talavera de la Reina y Cáceres por Trujillo de Eusebio Page, y la modificación de Ángel Arribas 1279

Pons Poblet, Josep Maria. El Tratado Práctico de Edificación de Étienne Barberot, un referente constructivo del siglo XX 1291

Prieto Vicioso, Esteban. Faros metálicos del siglo XIX en República Dominicana 1301

Puente Martínez, José. La iluminación natural del espacio eclesial hispano en la Alta Edad Media 1309

Putzu, Maria Giovanna y Fabrizio Oddi. Las torres costeras españolas en Cerdeña. Caracteres tipológicos y constructivos 1323

Rabasa Díaz, Enrique; Calvo López, José y Rafael Martín Talaverano. Bóvedas de crucería que se proyectan en planta según una matriz de estrellas. Transmisión de conocimiento técnico en el tardogótico europeo 1335

Ramírez Sánchez, Enrique. Sistemas antisismo en la arquitectura histórica de fábrica 1345

Rangel Cobos, Sandra Catherine. El ladrillo prensado y su uso en la construcción de las fachadas de ladrillo a la vista en Bogotá desde finales del siglo XIX hasta la tercera década del siglo XX 1355

Redondo Martínez, Esther. El proyecto de bóvedas tabicadas siguiendo reglas de proporción 1367

Reséndiz Vázquez, Aleyda. La trayectoria tecnológica de la prefabricación en la construcción escolar en Francia (1951-1973) 1381

Rigau, Jorge y René Jean. Construir para iterar. La arquitectura de prototipos en la Isla de Puerto Rico a lo largo de dos siglos 1391

Rinaldi, Simona y Michele Severini. Analisi delle tecniche costruttive nelle fortificazioni in Abruzzo (Italia): S. Eusanio Forconese 1401

Rincón Millán, María Dolores y Amparo Graciani García. La problemática de la construcción del murallón de la ribera en Córdoba. El proyecto de Ignacio de Tomás (1791) 1411

Rodrigues Secco, Gustavo; Arantes da Silva, Ana Lúcia y Larissa Lie Nagase. Iglesia Anglicana de Paranapiacaba 1419

Rodríguez García, Ana y Rafael Hernando de la Cuerda. Coderch y las bóvedas de Espolla 1429

Rodríguez Licea, Minerva. Análisis de la tipología y los sistemas constructivos en la arquitectura tradicional a base de tierra cruda en Colima, México 1441

Rodríguez Méndez, F. Javier. El puente del Cismone en 1820 sobre un arco del puente de Zamora 1449

Román Alvarado, Abe Yillah. La tradición constructiva de la región orizabeña durante el Porfiriato [1876-1910] 1459

Romero Medina, Raúl y Manuel Romero Bejarano. Aprender a construir. La formación de los maestros durante el siglo XVI. El caso de Jerez de la Frontera 1469

Rotaeche Gallano, Miguel. Los dos puentes basculantes sobre la ría del Nervión en Bilbao 1479

Sagarna, Maialen; Lizundia, Iñigo; Uranga, Eneko Jokin y Juan Pedro Otaduy. Mecanismos de construcción de los falsos techos de hormigón armado de principios del siglo XX. La resolución de una incógnita 1489

Salcedo Galera, Macarena. Evolución de las técnicas constructivas en el Palacio de Carlos V de Granada: los lunetos de los zaguanes occidental y meridional 1497

Sánchez Núñez, Giordano. Enseñanza de la restauración y las técnicas antiguas a alumnos de la Escuela Taller de la Habana vieja 1507

Sancho Pereg, Enrique y Francisco González Quintial. Impresión 3D y videomapping. Aplicación de la fabricación y diseño digitales a la representación del patrimonio arquitectónico 1517

Secomandi, Elciio Rogerio. Educación patrimonial: Fuertes y Fortalezas. Fortaleza de Santo Amaro: una mirada de España en el Brasil 1523

Segú Alonso, Juan José. La iglesia románica del Santo Sepulcro de Torres del Río. Navarra 1.533

Segurola Soler, Patricia y María Isabel Rosselló Nicolau. Los edificios de vivienda plurifamiliar en la arquitectura de Pere Benavent de Barberà 1543

Serafini, Lucia y Chiara Sasso. Otras lámparas para la restauración. Historia, Evolución, Tecnologías, con notas sobre los faros de Puglia (Italia) 1553

Sola Alonso, José Ramón. Una hoja de ladrillo construye un ábside medieval y franciscano 1563

Soler Busquets, Jordi y Joan Llorens Sulivera. Paralelismos entre la construcción de la iglesia de San Félix y la catedral de Girona en el siglo XIV 1573

Soler Verdú, Rafael; Soler Estrela, Alba y Luis Cortés Meseguer. Tipología de cúpulas. Estudio de los proyectos académicos de la Real Academia de BB. AA. de San Carlos de Valencia. España. 1768-1846 1583

Soto Zamora, Miguel Ángel. El puente «San Ignacio»: testigo vivo del auge y caída de la Compañía de Jesús en la Nueva España 1593

Souto-Blázquez, Gonzalo y Vittoria Bianco. Implantación y desarrollo de las fachadas de doble piel en España, 1970-1989 1602

Tellia, Fabio y Miquel Bibiloni Terrasa. Características geométrico-constructivas de los capiteles pinjantes en Cataluña 1613

Tello Peón, Berta Esperanza. Contra viento y marea, un custodio del siglo XX que sigue en pie. El Faro del Progreso en Yucatán, México 1625

Terán Bonilla, José Antonio. Procedimiento de construcción de un corral de comedias 1633

Torres Garibay, Luis Alberto. Estereotomía de la cubierta de la Basílica de la Salud de Pátzcuaro, Michoacán, México 1643

Torres Santiago, Jerry. Una cubierta Polonceau en el Caribe: el mercado de Ponce, Puerto Rico 1655

Valderrama, Fernando; Guadalupe, Rafael; Carolina Ramírez. Garaje Catasús de José Antonio Coderch: reconstrucción de una planificación 1667

Vale, Clara Pimenta do. El proceso de construcción del centro cívico de Porto en el período entre guerras: la introducción de nuevos materiales, sistemas constructivos y vocabularios arquitectónicos 1675

Valiñas Varela, María Guadalupe y José Antonio Espinosa Martínez. Ex Convento franciscano del siglo XVI, en Atlihuetzía, Tlaxcala, México 1685

Van Nievelt Nicoreanu, Hendik. Creatividad mesopotámica arcaica: uso de fibras vegetales como material de construcción 1695

Velo Gala, Almudena y Antonia Merino Aranda. La curia de Torreparedones: un nuevo modelo de restitución a partir del estudio de otros materiales 1707

Verazzo, Clara. Las fabricas de albañilería en Abruzzo Citeriore: características tipológicas técnico-constructivas 1717

Villamayor Fernández, Roberto y Marte Mujika Urteaga. JAI TEK: anonimato o autoría en la difusión del qanāt a Al-Andalus 1727

Villate Matiz, Camilo. El puente Doménico Parma (Colombia): adaptación de innovaciones en procesos constructivos de estructuras de cables 1737

Yuguero Suso, Begoña y Mikel Enparantza Agirre. Investigación arqueológico-arquitectónica del castillo de Latsaga. Historia del Edificio por medio de su Evolución Constructiva Histórica 1747

Zaragozá Catalán, Arturo y Rafael Marín Sánchez. El uso del hierro y del plomo en la arquitectura medieval valenciana 1759

Zayas Rubio, Lynne. El túnel bajo La Rada: 500 metros que unen La Habana 1771

Lista de autores 1785

Índice de autores 1791

Prólogo

La disciplina de la Historia de la Construcción se ha consolidado como una línea académica independiente en los últimos dos decenios. El X Congreso Nacional de Historia de la Construcción y el II Congreso Hispanoamericano de misma temática, que se celebran conjuntamente en Donostia-San Sebastián, constituyen un paso más en este camino. Como Responsable del Máster de «Rehabilitación, Restauración y Gestión Integral del Patrimonio Construido y de las Construcciones Existentes» y del Programa de Doctorado de «Patrimonio Arquitectónico, Civil, Urbanístico y Rehabilitación de las Construcciones Existentes», he adquirido una profunda consciencia de la necesidad de un conocimiento profundo de la construcción de los edificios antes de ni siquiera plantear cualquier tipo de intervención. Cuatro son los pasos que un profesional debe contemplar cuando actúa sobre un elemento a preservar: la comprensión del elemento, el acto proyectual, ejecutar lo proyectado y conservar lo ejecutado. Desde la coherencia, no es posible obviar a ninguno de ellos. El acto proyectual debe de estar fundamentado en la comprensión del monumento y lo ejecutado, según lo proyectado, debe de tener un plan de conservación, o cuando menos debe de tener previsto un plan de seguimiento, quedando fehacientemente documentados los nuevos elementos introducidos. Cualquier alteración de esta cadena lleva al desastre. El primer paso de los mencionados, conduce a conocer el elemento (la construcción) desde todo punto de vista que incluye la identificación de su estado, su funcionamiento, tipología estilística y constructiva, sus alteraciones temporales y su engarce con el entorno. Se precisa, por tanto, de una disciplina independiente y organizada, la Historia de la Construcción, que aporte este conocimiento.

Dentro de estos dos Congresos que se celebran conjuntamente, se ha programado una sesión especial sobre los faros históricos españoles lo que constituye una gran satisfacción personal. Con motivo de la elaboración, bajo mi dirección y por encargo del Ministerio de Cultura, Educación y Deportes, del Catálogo de faros con valor patrimonial de España se ha elaborado un primer listado de los Faros Históricos de las costas españolas. Asociada a la sesión especial, se desarrolla una Mesa Redonda bajo el título de «Estrategias de conservación de los faros históricos en España». La contribución de mi equipo de investigación está basada en la disciplina de la Historia de la Construcción. De ninguna otra manera se puede abordar nuestra obligación de preservar estas auténticas «fábricas de señalización».

Fernández, Martha. 1990. *Artificios del Barroco México y Puebla en el siglo XVII*. México: UNAM.

López Castellano, Fernando. 2012. Las Cortes de Cádiz y la implantación del buen orden económico (1810–1814). *Historia Constitucional*, 13: 233–256. http://www.historiaconstitucional.com.

López Quintero, José. 2006. «Maestros mayores de arquitectura en la Ciudad de México siglo XVIII». Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.

Mignot, Stéphanie. 2002. «Los pleitos legales entre arquitectos como testimonio de la mentalidad gremial, siglos XVII y XVIII». En *El mundo de las catedrales novohispanas*, coordinado por Montserrat Galí Boadella, 49–67. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Museo del Prado. 1999. *Los siglos de oro en los virreinatos de América 1550–1700*. Madrid: Museo de América.

Olvera Calvo, María del Carmen. 2011. «Los sistemas constructivos en las Ordenanzas de Albañiles de la ciudad de México en 1599, un acercamiento». *Boletín de Monumentos Históricos INAH*. 22, 3ª época: 7–43.

Reyes y Cabañas, Ana Eugenia. 2004. «Las ordenanzas de arquitectura de la Ciudad de México de 1735». *Boletín de Monumentos Históricos*. 1:41–49.

Romero de Terreros, Manuel. 1947. «La carta de examen de Lorenzo Rodríguez». *Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas*. 15: 105–108.

Sagredo, Diego de. [1526] 1986. *Medidas del Romano*. Toledo: ed. Madrid: Akal.

Shuentz, Merdith K. 1987. *Architectural Practice in Mexico City: a Manual for Journeyman Architects of the Eighteen Century*. Tucson: The University of Arizona Press.

Terán Bonilla, José Antonio. 1993. «La formación del gremio de albañiles de la ciudad de Puebla». *Cuadernos de Arquitectura y Docencia*. 11:13–17.

Terán Bonilla, José Antonio. 2002. «La Catedral Angelopolitana: Algunos aspectos de la organización del trabajo durante su construcción» En *El mundo de las catedrales novohispanas*, coordinado por Montserrat Galí Boadella, 69–89. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Tosca, Tomás Vicente. 1757. *Compendio mathematico: en que se contienen todas las materias mas principales de las ciencias que tratan de la cantidad*. Vol.V, 2ª impresión. Madrid: Imprenta de Antonio Marín.

San Nicolás, Fray Lorenzo. [1639–1664] 1989. *Arte y uso de la architectura*. Valencia: Albatros.

Uvolfio o Wolff, Christian. 1740–1741. *Elemenia matheseos universae*. Genevae: Apud Henricum Albertum Gosse.

Zengotita Vengoa, Pedro (Atribuído a Juan de Villanueva). [1827] 2016. *Arte de Albañilería o Instrucciones para los jóvenes que se dediquen a él*. Facs. México: Miguel Ángel Porrúa.

Mecánica de bóvedas de obra de fábrica en las Iglesias del Valle de Arán

Agustí Costa Jover
Sergio Coll Pla

Las construcciones de obra de fábrica cubiertas con arcos y bóvedas, deben su estabilidad al equilibrio de fuerzas entre los elementos que producen empujes, y aquellos que los soportan y transmiten las cargas hasta el suelo.

En el Valle de Aran existe un conjunto de iglesias románicas construidas entre los siglos XI y XII, cuya estructura está trabajando al límite de la estabilidad debido a importantes deformaciones geométricas. El desplome de los elementos de contrarresto junto con la formación de articulaciones en las bóvedas, ha provocado la aparición de convexidades en la superficie de éstos elementos, que principalmente deben trabajar a compresión.

La investigación plantea el análisis de estas grandes deformaciones a través de dos casos de estudio, las iglesias de Santa María de Arties y de Santa Eularia de Unha (figura 1). Ambas construcciones responden a la misma tipología de planta basilical de tres naves y un ábside con dos absidiolas. A partir de un levantamiento topográfico con técnicas de captura masiva de datos, es posible analizar geométricamente las deformaciones de la estructura y localizar con precisión los tramos de bóveda donde han aparecido formas funiculares. El análisis por estática gráfica permitirá entender las condiciones de equilibrio de estas zonas.

Diversos autores han apuntado el interés de las construcciones románicas del Valle de Aran. Emmanuel Viollet-le-Duc (1814–1879) visita Bossost en (1883) (Español 2013), y posteriormente la Escuela de Arquitectura de Barcelona realiza una expedición al Valle (1905) con Lluís Domènech i Montaner (1850–1923) (Granell and Ramon 2006). Dos años más tarde (1907), *l'Institut d'Estudis Catalans* visita el Valle de Aran y la Ribagorça en una expedición dirigida por Josep Puig i Cadafalch (1867–1956) (Alcolea 2008), quien plantea la hipótesis de que inicialmente las iglesias del Valle de Aran fueron cubiertas con estructura de madera y posteriormente transformadas en bóvedas de cañón, conservando los pilares de sección circular no monolítica. Más recientemente, Joan Bassegoda i Nonell (1930–2012) establece que las anomalías formales constituyen una de las características de la arquitectura románica que se produce en Catalunya (Bassegoda i Nonell 1974).

En el caso de la iglesia de Santa María de Arties (figura 2), sus grandes deformaciones llamaron la atención en los años setenta de autores como Joan Bassegoda y Nonell (Bassegoda i Nonell 1972), Luis Villanueva y Bartrina (Villanueva 1974) o Guillermo Sáez y Aragonés (Saez 1976). Más recientemente, Joan Josep Polo y Berroy (Polo and Cots 2009), también analizan la estructura como parte de los trabajos previos a su restauración (2009).

La investigación parte de los primeros estudios realizados en Santa María de Arties (Costa et al. 2014) y en Santa Eularia d'Unha (Costa et al. 2015). El objetivo de estos trabajos era analizar las condiciones de equilibrio de la estructura y el origen de sus grandes deformaciones. Los estudios partieron de la base topográfica realizada en el contexto docente

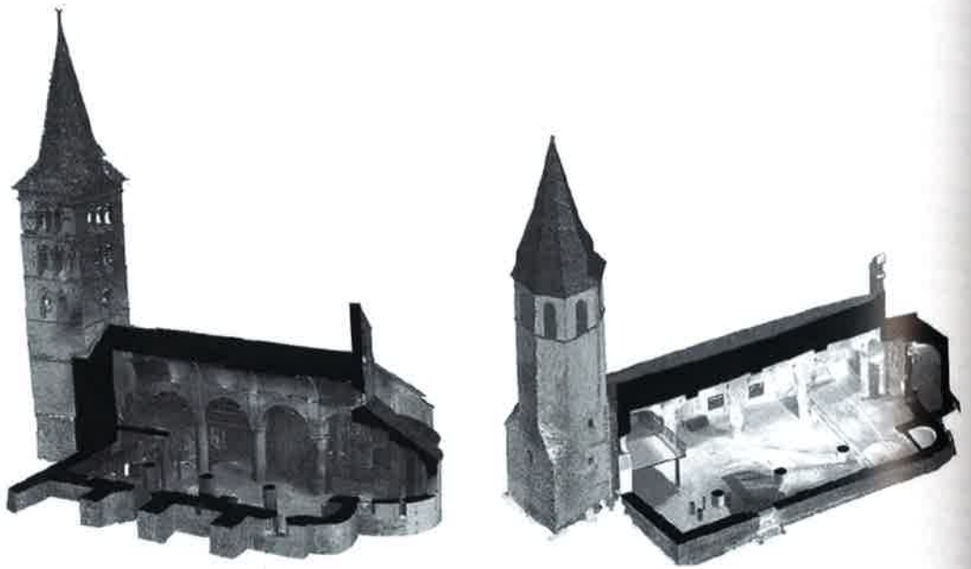


Figura 1
Vista axonométrica seccionada de las iglesias de Santa María de Arties y Santa Eularia de Unha, a partir de una nube de puntos

de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSA) de la Universidad Rovira i Virgili (URV) (Lluis i Ginovart, Costa Jover, and Coll Pla 2016)[1]. La metodología de los levantamientos combinó técnicas manuales de medida directa con de técnicas de medida indirecta por medio de una estación topográfica[2].

Figura 2
Bóveda deformada en Santa María de Arties

La documentación planimétrica generada permitió formular una hipótesis sobre la geometría de la fábrica sin deformar, asumiendo la imposibilidad de determinar el estado inicial. El modelo permitía realizar una primera aproximación a la estabilidad de la estructura. Se utilizó una metodología combinada a partir del análisis límite por medio de estática gráfica, y un análisis por medio de elementos finitos (FEM).

El estudio concluyó que los modelos analizados no tenían problemas de equilibrio, según la teoría del análisis límite, y que por lo tanto las deformaciones sufridas por el edificio no se debían a un problema de diseño (figura 3). Tampoco el tipo de movimientos identificados indicaban problemas de cimentaciones, por lo que se concluyó que se debían a las pobres propiedades mecánicas del mortero, y a una fábrica de mampostería heterogénea, de piezas de pequeño tamaño y a veces muy irregular. Se identificó

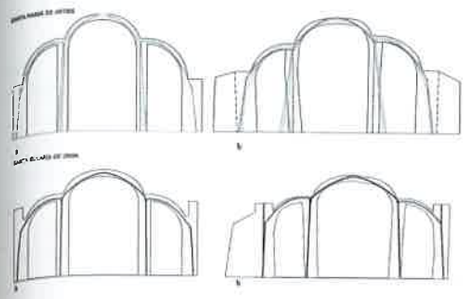


Figura 3
Resultados del análisis por estática gráfica de Santa María de Arties y Santa Eularia de Unha. a) Sección teórica inicial, b) Sección estado actual

así que se trataba de un problema de rigidez, y no de estabilidad.

Entre diciembre de 2014 y agosto de 2015 se realiza una nueva campaña de levantamiento con un Escáner Laser Terrestre (*Terrestrial Laser Scanner*, TLS)[3]. La nueva base topográfica obtenida tiene una precisión infinitamente superior a la obtenida en los levantamientos precedentes. Así, se ha podido corregir la geometría analizada inicialmente, y ampliar las zonas de estudio. Los dispositivos TLS permiten topografiar objetos de forma rápida y con gran precisión, obteniendo una nube de puntos en un sistema de coordenadas (x,y,z). Por ello, se trata de una técnica de captura masiva de datos cada vez más habitual en el ámbito del patrimonio construido.

A partir de la nueva base planimétrica, la presente investigación amplia las conclusiones obtenidas previamente, centrando la atención en el caso específico de los tramos de bóveda donde han aparecido formas funiculares. La metodología será el análisis límite a partir de estática gráfica, utilizando el conocido método de los cortes, el cual supone una simplificación importante del problema, pero que permite una operativa ágil para realizar una aproximación analítica a las condiciones de equilibrio de la estructura.

Descripción de los casos de estudio

Ambas construcciones responden a la tipología de planta basilical de tres naves y cuatro vanos estructurales (V1,... V4). El espacio interior se cierra con una bóveda de cañón en la parte central, y con bóvedas de medio cañón en los laterales. Cada vano estructural se define con un arco de resalto o fajón, en algunos casos de gran grosor. Las bóvedas apoyan sobre los arcos formeros situados entre las naves, los cuales apoyan a su vez sobre pilares no monolíticos de sección circular.

Los edificios se rematan en su lado Oeste con un campanario, construido posteriormente, y en su cara Este con un ábside central y dos absidiolas colaterales, los tres cerrados con una semi-cúpula. En el caso de Arties, el ábside fue reconstruido en las obras de restauración realizadas en 2009.

En cuanto a las fachadas longitudinales, Arties presenta un acceso en cada lado, y los muros están reforzados con contrafuertes, cuatro situados en la fachada Sur, y una gran masa de mampostería en la fachada Norte. En Unha, el acceso se produce sólo por la fachada Sur, donde el muro se mantiene en equilibrio sin ayuda de contrafuertes, mientras en la fachada Norte encontramos tres contrafuertes de refuerzo. En todos los casos, los contrafuertes han sido construidos con posterioridad a la estructura inicial.

Marco teórico

Actualmente, el análisis límite es una metodología de solvencia contrastada para el estudio de las condiciones de equilibrio en estructuras de obra de fábrica. El origen del estudio del equilibrio por medio de métodos gráficos lo encontramos en Simon Stevin (1548–1602) quien introduce la regla del paralelogramo, a través de la cual se podía describir gráficamente el equilibrio de un sistema de fuerzas por medio de vectores de fuerza y polígonos de fuerzas cerrados (Stevin 1586). Sin embargo, la base teórica de referencia tiene por origen la teoría de la cadena planteada inicialmente por Robert Hooke (1635–1703) (Hooke 1676).

El desarrollo matemático de la teoría a lo largo del siglo XVIII y la definición de las primeras aproximaciones analíticas al equilibrio de arcos y bóvedas, permite la formulación del concepto de línea de empujes en el siglo XIX de la mano de Claude-Louis-Marie-Henri Navier (1785–1836) (Navier 1826), Canon Henry Moseley (1801–1872) (Moseley 1833), E. Méry (Méry 1840) o Carl Culmann (1821–1881) (Culmann 1866). Se trata de una línea teórica que re-

presenta el lugar geométrico de las fuerzas de compresión que pasan a través de la estructura.

Estos principios son la base de la teoría moderna para evaluar las estructuras de obra de fábrica. Jackes Heyman, sintetiza las teorías desarrolladas entre los siglos XVIII y XIX, e introduce la primera formulación de los teoremas de plasticidad aplicados a fábrica. Heyman enuncia los principios del Análisis Límite para evaluar la seguridad de éstas estructuras (Heyman 1995). Parte de las hipótesis de que la fábrica tiene infinita resistencia a compresión, nula resistencia a tracción y que el fallo por deslizamiento de las piezas es imposible.

En base a estas hipótesis, el teorema del límite inferior enuncia que, si es posible encontrar una situación de equilibrio compatible con las cargas que no viole la condición de límite del material, que no aparezcan tracciones, la estructura no colapsará. Así, si es posible dibujar una línea de empujes contenida en la sección del arco o bóveda de fábrica, el elemento será estable. La teoría ha seguido siendo desarrollada por otros autores, como O'Dwyer (O'Dwyer 1999), Boothby (Boothby 2001), Huerta (Huerta 2005), John Ochendorf (Ochsendorf 2002) o Philippe Block et al. (Block, Ciblac, and Ochsendorf 2006), entre otros. Podemos encontrar una revisión más exhaustiva del contexto histórico y teórico en las obras de Huerta (Huerta 2004), Roca et al. (Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., Pelà 2010) y Theodossopoulos y Sinha (Theodossopoulos and Sinha 2013).

Metodología

La metodología plantea, en primer lugar, el análisis topográfico del estado actual de las estructuras, con el objetivo de localizar y caracterizar las secciones con curvatura convexa de las bóvedas. Una vez identificadas, se realiza la comprobación de las condiciones de equilibrio por medio de la estática gráfica en aquellas secciones que se considere oportuno.

El estudio parte del modelo tridimensional obtenido con un Escáner Láser Terrestre (TLS) La nube de puntos obtenida con una precisión de posición de 6 mm a 50 m se procesa con el programa Cyclone, con el que se sitúan todas las nubes de puntos en un mismo sistema de coordenadas. A continuación, con el programa 3DReshaper se genera una malla tridimensional, con una distancia promedio de puntos de 5 cm y un tamaño de triángulo para la detección de orificios de 10 cm.

El modelo tridimensional permite analizar, tanto de forma cualitativa como cuantitativa, la totalidad de la geometría de la fábrica. El análisis se ha realizado a partir de planos de corte, lo que permite obtener infinitas secciones en un periodo corto de tiempo. Así, se han detectado ciertas anomalías formales en las bóvedas, algunas observables a simple vista.

Para analizar las bóvedas se han utilizado 3 familias de planos de corte (figura 4). Por una parte, se han realizado un total de 8 secciones transversales, 3 por el eje de los pilares (Tp1, Tp2, Tp3), y 4 por el centro del vano (Tv1,... Tv4). En el sentido longitudinal de la estructura, se ha realizado una sección por la clave de la bóveda central (Lc1). Este proceso permitirá identificar los tramos de bóveda más deformados, y el análisis por estática gráfica se realizará sobre las secciones donde aparezcan formas convexas.

Para realizar el cálculo hay que diferenciar, en primer lugar, los elementos que provocan empujes de los que los reciben, y por otra parte los elementos soportados. Como es habitual en edificios de éstas características, la mayor parte de los elementos son portantes, y solo consideraremos como elemento soportado la cubierta, la cual apoya sobre los muros y los pilares centrales. En cuanto a los elementos con responsabilidad estructural, tenemos por una parte, las bóvedas (con sus respectivos arcos de resalto) y los arcos formeros como elementos que provocan empujes. Por otra, los elementos verticales (muros, pilares y contrafuertes) que constituyen el sistema contrarresto que reciben los empujes. Dado que la estabilidad general ya se analizó, los modelos de cálculo se centraran en el caso específico las bóvedas donde se identifiquen formas funiculares.

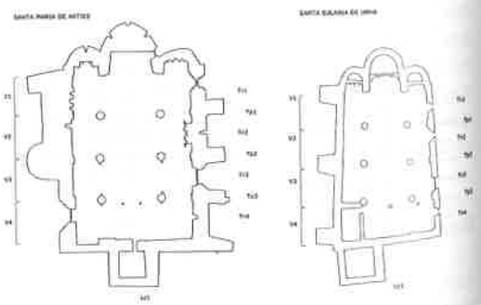


Figura 4
Planta y nomenclatura de las iglesias analizadas.

Con carácter general, el románico se construye con bóvedas de medio punto o de cuarto de circunferencia. Cuando estas bóvedas tienen una geometría regular, y su construcción es suficientemente monolítica por el trabado de la mampostería, se determina que el empuje es perpendicular a su directriz. En el caso de que las paredes no sean paralelas, como es el caso sobretodo de Santa Eularia de Unha, la bóveda es troncocónica, de forma que la resultante de los empujes no sería perpendicular a la directriz de la bóveda. A pesar de ésta consideración, se asume la simplificación que supone el método de los cortes, de acuerdo con el objetivo del análisis.

Los parámetros para caracterizar las condiciones de equilibrio son la geometría y el peso de los elementos constructivos. En cuanto a la geometría, la cara visible está perfectamente definida a partir del levantamiento láser, pero no disponemos de datos del extradós de las bóvedas. Por tanto, se establece un grosor teórico en función de la luz que salvan las bóvedas (Lancater 2005). En cuanto al peso específico, tampoco se dispone de datos tomados in situ de la fábrica, por lo que se utilizan valores habituales en este tipo de construcciones: fábrica de piedra 21 kN/m^3, cubierta de pizarra y estructura de madera 2 kN/m^2.

Resultados

La comparativa entre los levantamientos realizados con técnicas manuales en las campañas (2012–13) y (2013–14), y los obtenidos con el láser ha revelado ciertas discrepancias formales, tal y como cabía esperar. A pesar de ello, cualitativamente las diferencias encontradas no alteran las conclusiones de los primeros estudios sobre las condiciones de equilibrio.

Las secciones realizadas sobre los modelos 3D tienen por objetivo analizar los movimientos que han sufrido las bóvedas. En los dos casos de estudio encontramos mecanismos de deformación similares, aunque los movimientos en cada tramo no son coincidentes entre ellos.

Se han identificado diversas formas convexas o funiculares en los dos casos, aunque sus magnitudes son pequeñas en relación a la escala de las construcciones. La sección longitudinal (Lc) ha dado resultados similares en ambas iglesias. La bóveda central está dividida por arcos de resalto que producen un efecto rigidizador (figura 5). Como consecuencia, la parte central de cada vano, que es menos rígida, tiende a deformarse y bajar, mientras la zona de los arcos se deforma menos. Esto provoca en cada vano el efecto de que la bóveda «cuelga» como si fuera un funicular entre arco y arco.

Además, la sección (Lc) ha revelado que la clave de bóveda de cada tramo está a una altura distinta. La línea horizontal de referencia (Lhr) se sitúa en el punto más alto de la bóveda, que en ambos casos coincide en la boca del ábside. Así, en Arties el punto más bajo respecto (Lhr) se sitúa a una distancia de (28,1 cm) en la zona central del vano (V2), y el mayor descenso dentro de un mismo vano se encuentra en (V1), con un valor de (15,2 cm) en el encuentro con el arco fajón entre (V1–V2). Por su parte, en Unha el punto más bajo en relación a (Lhr) se encuentra en (V3), a una distancia de (39,8 cm), y el mayor descenso relativo en un mismo vano, se produce como en Arties en el vano (V1), con un valor de (17,5 cm). No se desarrollará el cálculo de ésta sección ya que los empujes se producen principalmente en sentido perpendicular.

En cuanto a las deformaciones de las bóvedas identificadas en las secciones transversales, en el caso de Arties, las observaciones iniciales realizadas

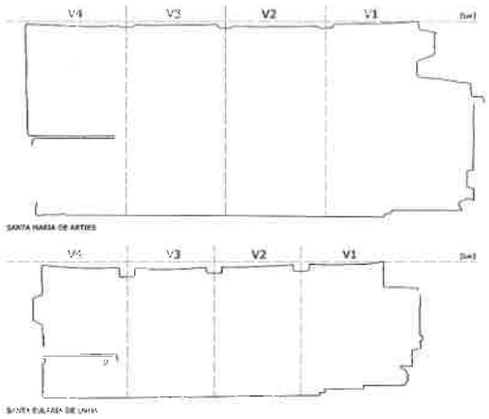


Figura 5
Secciones longitudinales (Lc) Santa Maria de Arties y Santa Eularia de Unha.

in situ indicaban que la bóveda más deformada debía ser la de la nave lateral norte del vano (V2), y las secciones transversales así lo confirmaron. En Unha, las deformaciones no eran tan evidentes a simple vista, y fue posible identificar que la bóveda más deformada era la de la nave lateral norte del vano (V1).

Para determinar la sección del modelo de análisis, se realizan cortes cada 50 cm en el tramo comprendido entre los dos arcos de resalto de los vanos seleccionados. Se obtienen un total de 9 secciones en Arties y 8 en Unha (figura 6). Para seleccionar la sección de cálculo, se tienen en cuenta las secciones que presentan curvaturas convexas y se calcula el área del espacio inferior de la bóveda, estableciendo una luz y una cota de arranque común a todas las secciones.

Una vez identificada la sección con la deformación más desfavorable, el objetivo es determinar si, a pesar de la forma convexa que ha adoptado la bóveda, es posible encontrar una línea de presión que quede contenida en la sección, de manera que la fábrica siga trabajando a compresión (figura 7). Cabe mencionar que no se han detectado grietas en las bóvedas analizadas. La (tabla 1) recoge los cubicajes y pesos considerados en el cálculo.

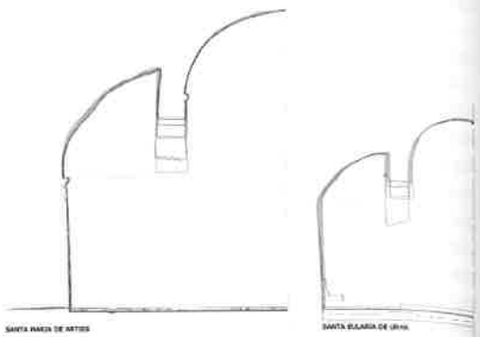


Figura 6
Superposición de las secciones transversales (Si) en Santa María de Arties (V2) y Santa Eularia de Unha (V1).

SANTA MARIA DE ARTIES
Grosor 50 cm

Dovela	Área m2	Profund. m	Vol. m3	Peso esp. kN/m3	Peso kN
1	0,324	1	0,324	21	6,80
2	0,334	1	0,334	21	7,01
3	0,335	1	0,335	21	7,04
4	0,335	1	0,335	21	7,04
5	0,334	1	0,334	21	7,01
6	0,344	1	0,344	21	7,22
7	0,346	1	0,346	21	7,27
TOTAL					49,39

Grosor 25 cm

Dovela	Área m2	Profund. m	Vol. m3	Peso esp. kN/m3	Peso kN
1	0,162	1	0,162	21	3,40
2	0,167	1	0,167	21	3,51
3	0,168	1	0,1675	21	3,52
4	0,168	1	0,1675	21	3,52
5	0,167	1	0,167	21	3,51
6	0,172	1	0,172	21	3,61
7	0,173	1	0,173	21	3,63
TOTAL					24,70

SANTA EULARIA DE UNHA
Grosor 40 cm

Dovela	Área m2	Profund. m	Vol. m3	Peso esp. kN/m3	Peso kN
1	0,162	1	0,162	21	3,40
2	0,162	1	0,162	21	3,40
3	0,161	1	0,161	21	3,38
4	0,161	1	0,161	21	3,38
5	0,162	1	0,162	21	3,40
6	0,158	1	0,158	21	3,32
7	0,160	1	0,16	21	3,36
TOTAL					23,65

Grosor 20 cm

Dovela	Área m2	Profund. m	Vol. m3	Peso esp. kN/m3	Peso kN
1	0,081	1	0,081	21	1,70
2	0,081	1	0,081	21	1,70
3	0,081	1	0,081	21	1,69
4	0,081	1	0,081	21	1,69
5	0,081	1	0,081	21	1,70
6	0,079	1	0,079	21	1,66
7	0,080	1	0,080	21	1,68
TOTAL					11,82

Tabla 1
Cubicajes y pesos considerados.

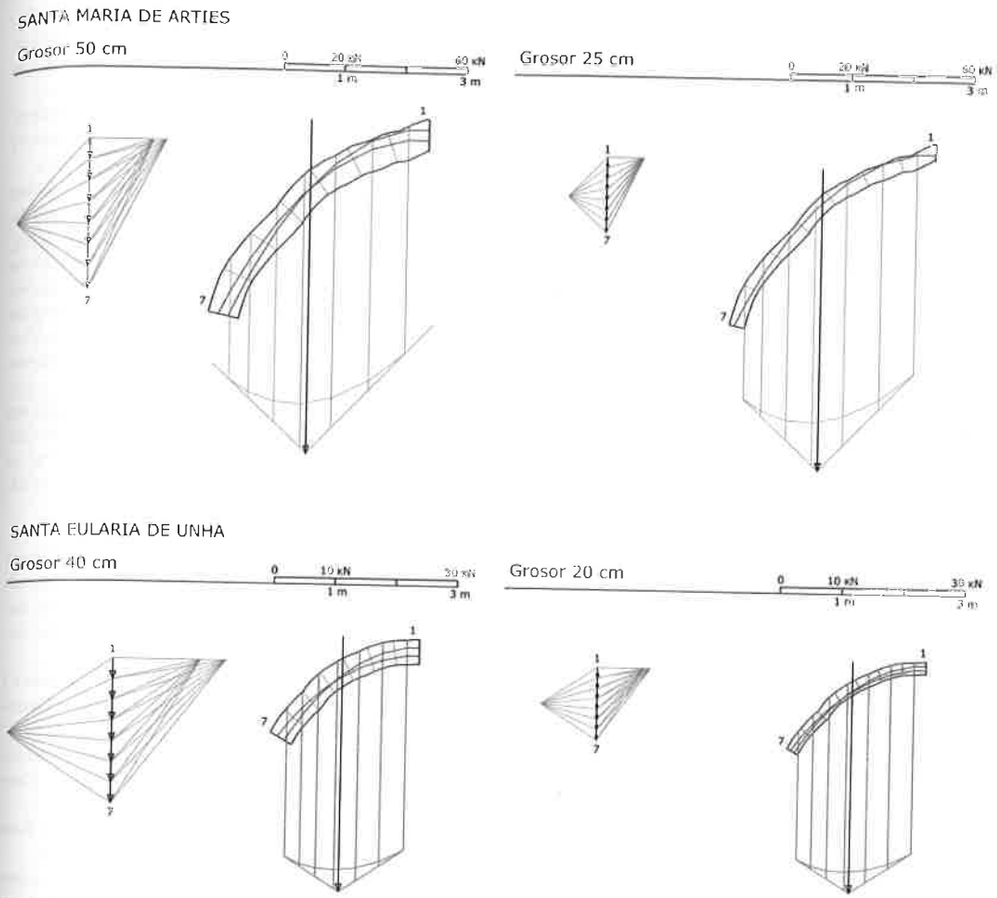


Figura 7
Resultados del análisis por estática gráfica.

Discusión y conclusiones

El estudio geométrico ha permitido identificar las bóvedas en las que han aparecido formas funiculares, a causa de los movimientos de la estructura. Destaca el efecto rigidizador de los arcos de resalto, los cuales determinan el modo en que se deforma cada vano, y evidencian la gran deformabilidad de éstas construcciones.

Desde el punto de vista mecánico, si únicamente consideramos los empujes en el sentido transversal, los tramos de bóveda analizados están en equilibrio, de acuerdo a la teoría del análisis límite en obra de fábrica. Esto es así si entendemos la bóveda como una serie de arcos (método de los cortes) en la que los arcos paralelos no interaccionan entre ellos. Esta aproximación implica una simplificación, ya que cada tramo de bóveda considerado está interconectado con los contiguos.

Así, el análisis de las bóvedas laterales ha demostrado que, a pesar de las formas funiculares identificadas, sigue siendo posible trazar una línea de presiones contenida en la sección. Esto es así aun considerando un grosor inferior al que probablemen-

te tiene la fábrica real. Por lo tanto, la fábrica sigue trabajando a compresión, a pesar de la existencia de formas funiculares.

La capacidad para deformarse de estos edificios pone de manifiesto la importancia que tiene considerar la rigidez para entender determinadas estructuras de obra de fábrica. Tanto la iglesia de Santa maría de Arties como Santa Eularia de Unha, están construidas con una fábrica de piedra que se caracteriza por un tamaño pequeño de las piezas y un mortero con propiedades mecánicas muy pobres. Así, tanto los resultados de los estudios iniciales como los desarrollados en el presente artículo, evidencian la enorme deformabilidad que puede llegar a tener una estructura de fábrica sin llegar al colapso.

Notas

1. Los trabajos se realizaron en el contexto de la asignatura Construcción VI, cursos (2013–14) y (2014–15), con la participación de los siguientes estudiantes: Maria Cartanyà, Antoni Escarré, Teresa Jacas, Josep Martí, Aitana Montero, Xavi Padró y Damián Rodríguez en Santa María de Arties, y Jaume Fabregat Gonzàlez y Anna Royo Bareng en Santa Eulária de Unha.
2. Se utilizó una estación total Topcon IS-203 y una cámara Nikon D7000, con la que se realizaron algunas reconstrucciones parciales en 3D de las bóvedas por medio de fotogrametría.
3. Escáner modelo Scan Station P20 de Leica, cuyas características técnicas son: el tipo de laser es de tiempo de vuelo de alta velocidad mejorado con la tecnología Waveform Digitising (WFD). El ancho de banda es de 808nm (invisible)/658 (visible) y esta es de clase 1 (de acuerdo con IEC60825:2014). La ratio del escaneo es de 1000000 puntos y el ruido es a 100metros de 9,0 mm en colores negros, 4,30mm en colores grises, 1,5mm en colores blancos. El campo de visión es de 360° en horizontal y 270°en vertical. El Scaner toma datos tanto de distancia como de color de los paramentos estudiados.

Lista de referencias

Alcolea, Santiago. 2008. *La Missió Arqueològica Del 1907 Als Pirineus. Catálogo de La Exposición*. Barcelona.

Bassegoda i Nonell, Joan. 1972. «La Iglesia de Santa María de Arties, Barroca Y Racionalista. Un Templo Sin Cimientos.» *La Vanguardia Española*, no. 28/septiembre: 51.

——. 1974. «Estética Expresionista de La Arquitectura Románica Lombarda En Catalunya Como Consecuencia de Las Deformaciones Formales Y Estructurales de Las Iglesias.» *De Re Restauratoria* 2: 51.

Block, Philippe, Thierry Ciblac, and John Ochsendorf. 2006. «Real-Time Limit Analysis of Vaulted Masonry Buildings.» *Computers and Structures* 84: 1841–52.

Boothby, Thomas E. 2001. «Analysis of Masonry Arches and Vaults.» *Progress in Structural Engineering and Materials* 3 (3): 246–56. doi:10.1002/pse.84.

Costa, Agustí, Gerard Fortuny, Jaume Fabregat, and Anna Royo. 2015. «FEM Assessments on Roofing Constructive Solutions Applied to a XIIth Century Romanesque Church at Vall d'Aran (Spain).» In *Stremah 2015. Proceedings of the Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XIV*, 457–68.

Costa, Agustí, Josep Lluis i Ginovart, Gerard Fortuny, and Sergio Coll. 2014. «Large Deformations on a XIIth Century Romanic Church at Val d'Aran (Spain).» In *Proc. of the 9th International Masonry Conference. Book of Abstracts*, 221.

Culmann, K. 1866. *Die Graphische Statik*. Zürich.

Español, Francesca. 2013. «El Pirineu Desvetllat: Viatges I Descoberta Del Patrimoni Medieval El Pirineu Desvetllat: Viatges I Descoberta Del Patrimoni Medieval. Annals Del Centre d'Estudis Comarcals Del Ripollès, Annals 2010–2011.» *IBIX* 7 (.): 13–36.

Granell, Enric, and Antoni Ramon. 2006. *Lluis Domènech I Montaner: Viatges per L'arquitectura Romànica Catalana*. Barcelona: Colegio de Arquitectos de Cataluña.

Heyman, Jacques. 1995. *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture*. Edited by C. e: Cambridge University Press.

Hooke, R. 1676. *A Description of Helioscopes, and Some Other Instruments*. Edited by R.T. Gunther. London.

Huerta, Santiago. 2004. *Arcos, Bóvedas Y Cúpulas. Geometría Y Equilibrio En El Cálculo Tradicional de Estructuras de Fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

——. 2005. «Mecánica de Las Bóvedas de Fábrica: El Enfoque Del Equilibrio.» *Informes de La Construcción* Vol. 56, n: 73–89. doi:g cen. 1994.1172.

Lancater. 2005. *Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome: Innovations in Cotext*. Cambridge: Cambride Universitu Press.

Lluis i Ginovart, Josep, Agustí Costa Jover, and Sergio Coll Pla. 2016. *Tranhntem Lapides MMXVI. Treball Dels Alumnes de l'Escola Tècnica Superior d'Arquitectura Universitat Rovira I Virgili*. Edited by Josep Lluis i Ginovart. Reus.

Méry, E. 1840. *Mémoire Sur L'equilibre Des Voûtes En Berceau. Annales Des Ponts et Chaussées*.

Moseley, Henry. 1833. «On a New Principle in Statics, Called the Principle of Least Pressure.» *Philosophical Magazine* 3: 285–88.

Navier, M. 1826. *Resumé Des Leçons Donnés À l'Ecole Des Ponts et Chaussés Sur l'Application de La Mécanique À l'Etablissement Des Constructions et Des Machines*. Paris: Firmin Didot.

O'Dwyer, Dermot. 1999. «Funicular Analysis of Masonry Vaults.» *Computers & Structures* 73 (1–5): 187–97. doi:10.1016/S0045-7949(98)00279-X.

Ochsendorf, John. 2002. «Collapse of Masonry Structures.» PhD thesis. University of Cambridge.

Polo, and Cots. 2009. «Santa Maria d'Arties (Naut Aran, Val d'Aran): Un Exemple Integrau a Nivèu de Restauracion D'un Monument a Compdar Des Entresenhes Arqueologiques.» In *Ciele de Conferències Patrimoni Arqueològic I Arquitectònic a Les Terres de Lleida 2009*, 75–103.

Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., Pelà, L. 2010. «Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches.» *Archives of Computational Methods in Engineering. 17. No. 3*, 299–325.

Saez. 1976. «Primera Fase Del Proyecto de Restauración de La Iglesia de Santa María de Arties En El Valle de Arán (Lérida).» *Cuadernos de Arquitectura Y Urbanismo* 116: 63–71.

Stevin, Simon. 1586. *De Beghinselen Der Weegheonst*. Edited by Christophe Plantin. Leiden.

Theodossopoulos, Dimitris, and Braj Sinha. 2013. «A Review of Analytical Methods in the Current Design Processes and Assessment of Performance of Masonry Structures.» *Construction and Building Materials* 41. Elsevier Ltd: 990–1001. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.095.

Villanueva. 1974. «Las Bóvedas de Cañon.» *De Re Restauratoria* 2: 145–58.

ISBN 978-84-9728-562-9

ISBN 978-84-9728-563-6
9 788497 285636