UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

**ESTUDIO DE LAS BÓVEDAS ENCAMONADAS EN MADRID CAPITAL Y ANÁLISIS DE SU
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL**

TESIS DOCTORAL

Marina Arce Blanco, Arquitecta

2017

DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS Y FÍSICA DE LA EDIFICACIÓN
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID

**ESTUDIO DE LAS BÓVEDAS ENCAMONADAS EN MADRID CAPITAL Y ANÁLISIS DE SU
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL**

Autora: Marina Arce Blanco, Arquitecta
Director: Francisco Arriaga Martitegui, Dr. Arquitecto
Codirector: Luis Alfonso Gil Sánchez, Dr. Ingeniero

2017

Tribunal nombrado por el Magfco. Y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ____ de _____ de 2017.

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día ____ de _____ de 2017, en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Calificación:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO:

*«We may use wood with intelligence
only if we understand wood»*

Frank Lloyd Wright, 1928

«La madera es un material tradicional que ha sido denostado a lo largo de los últimos siglos.

¡Devolvámosle lo que le pertenece!»

Agradecimientos:

A todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo, personal religioso, funcionarios e instituciones que me han permitido el acceso a sus edificios y archivos documentales, sin ellos no hubiese sido posible realizar este trabajo:

D. Jesús Romero Trillo (Iglesia Parroquial de San Justo Pastor), D. Domingo Guerrero Borrul (Ministerio de Asuntos Exteriores y Palacio de Viana), al párroco D. Carlos (Iglesia y convento del Sacramento), D. Antonio Pérez Aranda, D. Fernando de la Fuente y D. Francisco Cárcelos (Venerable Orden Tercera), al arquitecto D. Ignacio Moreno (Palacio del Senado, antiguo convento de Agustinos Calzados), D. Luis Aguilar Romanos, arquitecto del Colegio de Médicos y Dña. Victoria San Juan (Colegio Oficial de Médicos), D. Carlos López (Iglesia del Redentor), Dña. Ramona (Iglesia del Colegio de la Divina Pastora), D. Manuel (Colegio de las Maravillas), D. José Carlos Lanuza (Asilo y hospital del Niño Jesús), párroco D. Ricardo (Iglesia de San Pedro Ad Víncula), D. Susana Larias y Dña. Begoña González Velasco (Palacio del Marqués de Salamanca), D. Isidoro Eduardo Sanz y Dña. Eva María Corrales Gómez (Museo de Historia de Madrid), padre Miguel (Parroquia Santa María de Habla Alemana), Dña. Begoña Díaz-Urgorri (Palacio de Santoña), Dña. María Ángeles (Palacio de Bauer), Subteniente Llorente y al Brigada Luis Lorenzo (Palacio de Buenavista), Dña. Dolores Romero (Palacio de Zurbano), Dña. Inmaculada García (Palacio de Fernán Núñez), D. Miguel Ángel (Palacio de Godoy), Dña. María Luisa Conde Villaverde (Palacio del Marqués de Fontalba), Dña. María de Miguel (Palacio del Marqués de Cañete), D. Eduardo Navarro Pallares (Iglesia del Carmen), Dña. Carolina García Romeu (Fundación Carlos Amberes), D. Carlos Javier Irisarri y Dña. María Paz Malagón (Real Congregación de Arquitectos de Nuestra Señora de Belén en su huida a Egipto), al Marqués de Camarena la Real, primer Vocal de la iglesia y D. José María Anchisi de Góngora, segundo Vocal de la iglesia (Hermandad del Refugio), D. Carlos Cano (Iglesia Parroquial de Santiago), Dña. Mercedes Grandes (Iglesia de San Francisco el Grande), D. Javier Láinez López (Rector de la Basílica de San Miguel), Dña. Marta Arriero López (Jefe del servicio de obras del Museo del Prado. Casón de El Buen Retiro), D. José Antonio (Iglesia de la Santa Cruz), Dña. Andrea Valentín González, Patrimonio Nacional, Dirección de Inmuebles y Medio Natural, Departamento de Arquitectura (Monasterio de la Encarnación y Descalzas Reales), D. Luis Enrique Bertrán de Lis Hernández (Jefe del Departamento de Patrimonio Histórico Artístico y Adquisiciones del Congreso de los Diputados), D. Carlos Bofill (Teatro Calderón), Dña. Almudena Pedrero (Teatro de la Zarzuela), a Grupos Media y en especial a Dña. Cristina Redondo (Teatro Phillips Granvía, Cine Teatro Fígaro, Teatro Cofidis Alcázar, Cine Capitol), D. Ángel (Iglesia de San Pedro el Real), D. Concha Largo (Teatro María Guerrero), D. José Antonio Somoza (Teatro de la Comedia), D. Alfonso Magaz Robaín (Convento de las Salesas Nuevas), Dña. Isabel, Directora del I.E.S. San Isidro, D. Ignacio Jassa Haro (Palacio de Longoria), D. Miguel Ángel Fernández Calleja (Palacio de Godoy), D. Arturo Girón (Biblioteca Nacional de España), Dña. Susana Cid Martín (Casa de la Villa), al párroco D. Francisco (Iglesia de San Marcos), al prior de la congregación de Benedictinos (Iglesia de Nuestra Señora de Montserrat), al párroco D. Agapito y al encargado de mantenimiento D. José Luis.

A la memoria de D. José Luis Fernández Cabo, por darme la oportunidad de conocer las bóvedas encamionadas y transmitirme parte de sus conocimientos.

A todo el personal del Departamento de Estructuras de Edificación de la ETSAM por su ayuda y facilidades, en especial a Dña. Almudena Majano Majano, a D. Javier Rasines, D. José Carlos Méndez Díez y D. Juan Martín Melchor, por su ayuda y consejos.

A D. Carlos Iglesias, por empujarme al mundo de la madera.

A D. Rafael Díez Barra del INIA, por su ayuda y buen humor.

A D. Francisco Arriaga Martitegui, por ayudarme a continuar el estudio y por sus numerosas correcciones. Sin su ayuda, este trabajo no hubiese visto su fin.

A D. Luis Gil Sánchez por sus numerosas aportaciones y múltiples libros prestados.

A D. Daniel Fernández Llana, por acompañarme en la mayoría de las visitas y su ayuda en los bajocubierta.

A D. Ignacio Bobadilla Maldonado, por toda su ayuda, enseñanzas y consejos.

A Camino Arce, por sus maravillosos encabezados y saltos de página.

A mis padres, por todo.

A Ana y Eric, por saber sacarme tiempo libre y a Clarita, por quedarse a escuchar la presentación, en vez de ir al parque.

ESTUDIO DE LAS BÓVEDAS ENCAMONADAS EN MADRID CAPITAL Y ANÁLISIS DE SU COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL.

RESUMEN:

La *bóveda encamónada* es un sistema constructivo desarrollado en Europa entre los siglos XVII y XIX, para adecuar las construcciones existentes al nuevo estilo arquitectónico: el barroco. Dicho sistema está constituido por un armazón de piezas de directriz curva o recta, que se van contrapeando para alternar las juntas de empalme, eliminando la discontinuidad de los camones, con el que se forman bóvedas denominadas encamónadas o fingidas.

Las bóvedas encamónadas se construían de manera fácil, rápida y económica gracias a las especiales características del material usado. La madera tiene una elevada resistencia en relación a su peso, lo que permitía poder colgar dichas estructuras de las cerchas que conformaban la cubierta original a dos aguas o formar espacios abovedados autoportantes, que transmitían esfuerzos horizontales de menor magnitud que los generados por bóvedas realizadas en otros materiales, como la piedra o el ladrillo.

Para conocer en profundidad dicho sistema constructivo, se han estudiado y visitado, en Madrid capital, noventa y un edificios, construidos entre el siglo XVI y el siglo XIX, en los que se realizaron fotografías, mediciones de los elementos estructurales y análisis de la madera empleada.

Solamente, en dieciséis de ellos se ha podido verificar que su estructura corresponde a bóvedas encamónadas, habiéndose encontrado dos bóvedas en un mismo edificio, de las cuales, siete son suspendidas y diez autoportantes. Para desechar la incertidumbre sobre los edificios que no se pudieron visitar o no se obtuvo permiso de acceso, se analizaron los planos de dichas obras en los archivos históricos de Madrid. De aquellos que no tenían acceso al espacio bajocubierto, se localizaron seis edificios que podrían contener bóvedas encamónadas, de los cuales sólo en tres de ellos se ha podido corroborar gracias a la consulta de documentos históricos y los otros tres se considera que la probabilidad de que contengan el sistema encamonado es muy probable, en función de lo observado en el extradós de la bóveda o en habitaciones contiguas. Lo que significa que el 17,6% inicial, correspondiente a las obras inspeccionadas en el bajocubierto que contienen el sistema constructivo en estudio, ascendería hasta el 24,2%.

Asimismo, se ha realizado un estudio del comportamiento estructural de las bóvedas encamónadas, fundamentado en una campaña de ensayos mecánicos en laboratorio. Se han llevado a cabo ensayos a pequeña escala para poder caracterizar las uniones, determinando el módulo de deslizamiento de la clavija, K_{ser} , paralelo y perpendicular a la fibra y la rigidez a la rotación, K_{rot} , de un par de clavijas y de una junta entre camones. Con respecto a los ensayos a escala real, se han construido dos estructuras de arcos encamónados, que fueron ensayados a carga constante de duración media y hasta el agotamiento de la estructura, para conocer su comportamiento global.

Finalmente, se incluye una propuesta de modelos teóricos, basados en los resultados obtenidos en los ensayos realizados, para simular el comportamiento estructural y poderlos aplicar en rehabilitaciones. La principal característica de estos modelos es la definición de uniones semirrígidas entre camones. En uno de los modelos planteados, se ha conseguido una buena concordancia en el rango elástico, aunque es un 30% más rígido en el rango plástico. Se considera que es necesario un estudio más minucioso para conseguir una mayor correlación.

PLANK TIMBER ARCHES STUDY IN MADRID CAPITAL AND ANALYSIS STRUCTURAL BEHAVIOR.

ABSTRACT:

The plank timber arch is a constructive system developed in Europe between the seventeenth and nineteenth centuries to adapt existing buildings to new architectural style: the Baroque. This system consists of a timber frame with curved or straight members, that are countersunk to alternate the joints, eliminating the discontinuity of the pieces. This plank timber vaults are denominated rooted or feigned.

These vaults were constructed in an easy, fast and economic way thanks to the special characteristics of the material used. Wood has high strength in relation to its weight, which allowed these structures to be hung from the trusses that conformed the original roof structure or to form self-supporting vaulted spaces that transmitted horizontal forces of smaller magnitude than those generated by vaults made of other materials, such as stone or brick.

In order to know more about this construction system, ninety-one buildings constructed between the sixteenth and nineteenth century were visited and studied. Thanks to the photographs taken, measurements of the structural elements and analyses of the wood used were carried out.

The structure was verified to correspond to this constructive system in just sixteen of them. There were two vaults in the same building, seven of which are suspended and ten self-supporting. To discard the uncertainty about the buildings that could not be visited, the plants of these buildings were analysed in several historical archives of Madrid. Among the buildings without access to the under-roofing space, six could contain vaulted vaults. Only two of them have been corroborated thanks to the information found in historical documents. This means that 19% of the works analysed contain the construction system under study, although this percentage could increase to 24,5% if the unverified buildings are added to the current results.

Also, a study of the structural behaviour of the plank timber arches has been carried out, based on a campaign of mechanical tests in laboratory. Small scale tests have been carried out to characterize the joints, determining the slip modulus of a dowel type fastener, K_{ser} , parallel and perpendicular to the fiber, the rigidity of the rotation, K_{rot} , of a pair of dowel type fastener and a joint between planks. In regards to the real-scale tests, two structures of plank timber arches have been constructed, which were tested at a constant load of medium duration and until the failure of the structure, to understand their overall mechanical behaviour.

Finally, a proposal of theoretical models has been included, based on the results obtained in the tests carried out to simulate the structural behaviour and to be able to apply them in rehabilitations. The main characteristic of these models is the definition of semi-rigid joints between planks. One of them has achieved a good concordance in the elastic range, although it is 30% more rigid in the plastic range. It is considered that a more detailed study is necessary to obtain a greater correlation.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	11
3. ANTECEDENTES.....	17
3.1. Las bóvedas encamonadas en la tratadística y publicaciones históricas	25
3.1.1. Precedentes y origen en el siglo XVI	25
3.1.2. Siglo XVII	34
3.1.3. Siglo XVIII	45
3.1.4. Siglo XIX.....	55
3.2. Estudios recientes sobre las bóvedas encamonadas.....	79
3.2.1. Estudio histórico-constructivo	79
3.2.2. Intervención en estructuras antiguas	85
3.2.3. Estudio del comportamiento estructural	91
4. MATERIAL Y EQUIPOS	97
4.1. Material de ensayo	101
4.1.1. Madera:.....	101
4.1.2. Acero: Uniones.....	101
4.2. Medios y equipos.....	102
4.2.1. Máquinas de ensayos mecánicos:	103
4.2.2. Equipos de ensayos no destructivos:.....	106
4.2.3. Material auxiliar:.....	109
4.2.4. Programas informáticos:.....	110
5. MÉTODOS	111
5.1. Estudio de la presencia de las bóvedas encamonadas en Madrid	115
5.1.1. Plano de Teixeira.....	115
5.1.2. Plano geométrico de Madrid de 1800	117
5.1.3. Paseo por Madrid o Guía del forastero de Mesoneros Romanos	118
5.1.4. Guía de Elías Tormo	119
5.1.5. Guía de edificios emblemáticos realizada por el COAM.....	120
5.1.6. Lista de edificios de Madrid capital a visitar.....	120

5.2. Análisis muestras de madera obtenidas en las visitas realizadas.....	123
5.3. Caracterización experimental	127
5.3.1. Preparación de las piezas de madera	127
5.3.2. Caracterización de la madera	129
5.3.3. Ensayos para la caracterización de las uniones	133
5.3.4. Construcción de los modelos de arcos encamonados.....	145
5.3.5. Ensayos mecánicos del modelo de la estructura encamonada	148
5.3.6. Análisis dinámico. Frecuencias propias de vibración.....	151
5.4. Modelos teóricos de comportamiento	157
5.4.1. Modelo de comportamiento lineal.....	160
5.4.2. Modelos de comportamiento no lineal	161
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	169
6.1. Inventario en Madrid	173
6.2. Identificación de la especie de madera	190
6.3. Caracterización experimental	205
6.3.1. Caracterización de la madera	205
6.3.2. Caracterización de las uniones	213
6.3.3. Ensayos mecánicos del modelo de una estructura encamonada.....	227
6.3.4. Análisis dinámico. Frecuencias propias de vibración.....	233
6.3.5. Comparación de los resultados obtenidos de los ensayos de agotamiento y los modelos teóricos realizados en SAP2000®	247
7. CONCLUSIONES.....	269
7.1. Conclusiones histórico-constructivas	273
7.2. Conclusiones sobre el comportamiento estructural	275
8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	281
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	285
ARTÍCULOS.....	301

ANEXOS.....	305
A. Tabla cronológica de los antecedentes históricos.....	307
B. Listado de edificios	309
C. Justificación matemática del modelo de las conexiones.....	319
D. Fichas de las obras visitadas.....	323
E. Planos históricos	509
F. Datos resultados ensayos	523

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Armadura de lazo de la Parroquia San Esteban Proto Mártir, Mocejón, Toledo, actualmente oculta por una cúpula encamonada.	8
Figura 2. Durmiente decorado oculto por la bóveda encamonada en la Parroquia de Nuestra Señora de la Asunción, Torija, Guadalajara.	8
Figura 3. Vista de Madrid desde el Oeste, frente a la Puerta de la Vega, por Anton Van der Wyngaerde en 1562, encargado por Felipe II para recoger las vistas de las ciudades hispanas (García et al., 2014).	21
Figura 4. Evolución urbanística de Madrid en 1474, 1561, 1734 y 1892. (Madrid histórico, 2003).....	22
Figura 5. Iglesia y asilo de San José de la Montaña, Madrid, 1890.....	24
Figura 6. Iglesia del Cristo de la Salud, Madrid, 1915.	24
Figura 7. Interpretación de Rusconi de la bóveda de madera de Vitrubio (Rusconi, 1590). Dibujo que acompaña de la caña (<i>Arundo donax</i>) y el esparto (<i>Spartium junceum</i>).	27
Figura 8. Ejecución de una bóveda de madera descrita por Vitrubio, según la interpretación de Howe (1999).....	27
Figura 9. Detalle de la construcción de una catedral por Philippe Fix y de las grúas medievales usadas (Erlande-Brandenburg, 1993).	28
Figura 10. Armaduras de cubiertas, en las que se observan riostras curvadas para formar la armadura. (De Honnecourt, c. 1235).....	29
Figura 11. Cercha formada por dos piezas curvas cuyas uniones son en diente de sierra y se unen mediante clavijas metálicas, dibujo de Leonardo Da Vinci (Hahmann, 2006) y prensa para curvar las vigas (Marinoni, 1975).	30

Figura 12. Ilustración de Leonardo sobre el diseño de cimbras para el Duomo de Milán (Maltese, 1978).	30
Figura 13. Bóveda encamonada con clavijas de madera (De l'Orme, 1561).	31
Figura 14. Distintas soluciones planteadas por De l'Orme mediante arcos encamonados con clavijas de madera (Gómez, 2007).	32
Figura 15. Armaduras de cubiertas abovedadas (Serlio, 1600).	33
Figura 16. Detalles de construcción de puentes en madera (Scamozzi, 1714).	33
Figura 17. Sección transversal del Barber Surgeon's Hall, de Iñigo Jones. Dibujos Universidad de Worcester. (Theodore, 2000).	34
Figura 18. Representación de armadura quebrantada (Savot, 1624).	35
Figura 19. Planos de cúpula con linterna (Jousse, edición de 1751).	36
Figura 20. Esquema de cómo realizar una media naranja en diez cascos por Diego López de Arenas (ed. 1867).	37
Figura 21. Descripción de cómo construir una bóveda de cañón, tabicada y encamonada (San Nicolás, ed. 1796).	38
Figura 22. Construcción de una cúpula encamonada, lámina de Fray Lorenzo de San Nicolás (Villanueva, 2005).	39
Figura 23. Armadura de cubierta cuyos elementos curvos están sujetos a la armadura principal (Wilhelm, ed.1668).	40
Figura 24. Propuesta para el crucero del antiguo San Pablo. Sección, 1666 (Maure, 1998).	40
Figura 25. Armadura de chapitel, muchas veces confundido con el sistema de cúpula encamonada (Álvarez, 1674).	41
Figura 26. Detalle de cubierta cuyo espacio abovedado cuelga del tirante inferior de la cercha (Le Muet, 1681).	42
Figura 27. Detalles de mansardas con el intradós colgado curvo en su parte inferior (Le Muet, 1681).	42
Figura 28. Distintas soluciones de cubierta de madera (Bullet, 1691).	43
Figura 29. Techos abovedados mediante piezas curvas colgadas de la estructura superior (D'Aviler, edición 1738).	43

Figura 30. Bóveda colgada de la estructura superior (D'Aviler, edición 1738).	44
Figura 31. Distintas soluciones de cubiertas de madera (D'Aviler, edición 1738).	44
Figura 32. Lámina de construcción en madera, donde incluye las reglas de trazado y los tipos básicos de armaduras (Jombert, 1740).	45
Figura 33. Detalles de soluciones de cubiertas y puentes (Bélidor, edición 1813).	46
Figura 34. Diferentes figuras de troncos y ramas de árboles destinadas para la construcción de navíos, lámina 20 y 21 (Navarro, 1756).	47
Figura 35. Representación de las principales piezas de las cuadernas (Navarro, 1756).	48
Figura 36. Piezas que configuran el casco del barco (Duhamel, 1758).	48
Figura 37. Colocación de las piezas de madera para conformar en casco del barco (Duhamel, 1758).	49
Figura 38. Armaduras de cubiertas con perfiles rectos (Blondel, 1771).	50
Figura 39. Dibujo del Louvre (Blondel, 1771).	51
Figura 40. Sección longitudinal en perspectiva del Ayuntamiento realizada por Blondel en 1756 (Biblioteca Digital Hispánica, 2016).	51
Figura 41. Ensayo de viga (Le Camus, 1782).	52
Figura 42. Cúpula de Halle aux blé (Krafft, 1805).	53
Figura 43. Blondel-Patte, "Cours d'Architecture", t. VI, pl. CXXIII. Charpente du dôme du Val de Grâce (Bails, 1802).	54
Figura 44. Representación del puente Piscataqua en Portsmouth, New Hampshire (Griggs, 2013).	55
Figura 45. Diseño del «Permanent Bridge» sobre el río Schuylkill, Filadelfia (Griggs, 2013).	56
Figura 46. Láminas de David Gilly donde se representa el sistema de arcos encamionados de Philibert de l'Orme (Gilly, 1797).	57
Figura 47. Modelo de ensayo realizado por Zimmermann (1830).	58
Figura 48. Modelo de ensayo realizado por Ardant (1840).	59
Figura 49. Cúpula de M. Stierme, lámina CXXV (Rondelet, 1810).	61
Figura 50. Lámina CXXVIII donde se explica el sistema de camones de Philibert de l'Orme (Rondelet, 1810).	62

Figura 51. Lámina CXXX del Tratado de Rondelet, aplicación del método de M. Lacase (Rondelet, 1810).	63
Figura 52. Planta, sección y detalles del sistema de De l'Orme, lámina 102 realizada por Emy (1828).	64
Figura 53. Solución planteada por el Coronel Emy (Oslet, 1890).	64
Figura 54. Planta y sección longitudinal y transversal del cuartel de Marac, lámina 102 realizada por Emy (1828).	65
Figura 55. Detalle de cúpula según la resolución de Philibert de l'Orme (Tredgold, edición de 1885).	66
Figura 56. Bóveda circular (CCC) del Palacio episcopal de Auxerre (Tredgold, edición de 1885).	66
Figura 57. Armaduras y detalles del arranque de la propuesta de De l'Orme (Newlands, 1869).	68
Figura 58. Lámina realizada por Arias y Scala (1888) donde representa el sistema utilizado por de l'Orme y de Lacasse.	69
Figura 59. Lámina realizada por Arias y Scala (1888) donde representa varios proyectos del coronel Emy.	71
Figura 60. Sistema de Philibert de l'Orme (Gaztelu, 1899).	72
Figura 61. Representación del sistema Emy (Gaztelu, 1899).	73
Figura 62. Lámina de Rovira i Rabassa (1900) en el que se explica cómo curvar piezas de madera, el sistema de De l'Orme y Emy.	74
Figura 63. Cercha de madera realizada mediante jabalcones curvos (Oslet, 1890).	75
Figura 64. Tres soluciones de buhardillas con solución curva (Oslet, 1890).	75
Figura 65. Solución de cercha de gran luz (Oslet, 1890).	76
Figura 66. Soluciones de mansardas curvas (Oslet, 1890).	76
Figura 67. Detalles constructivos de bóvedas encamionadas al estilo de De l'Orme (Oslet, 1890).	77
Figura 68. Detalles constructivos de bóvedas encamionadas al estilo de Rondelet (Oslet, 1890).	78
Figura 69. Solución constructiva de bóvedas encamionadas planteada por Lacase (Oslet, 1890).	78
Figura 70. Representación de bóveda encamionada cuyas costillas arrancan de una pieza de solera (Marussi, 1986).	79

Figura 71. Representación de bóveda encamonada parcialmente embebida en el muro de adobe (Marussi, 1986).	80
Figura 72. Sección transversal y longitudinal de la bóveda encamonada del Palacio Serristori, Florencia (Arriaga, 1992).	80
Figura 73. Axonometría de la bóveda encamonada del Salón de Bailes del Palacio Serristori (Arriaga, 1992).	81
Figura 74. Sección y detalle constructivo del arco laminado de la iglesia de S. Firenze (Manned et al., 1993).	82
Figura 75. Comparación del sistema constructivo de las cimbras en contraposición a los arcos encamonados, apuntes de Antonio Cámara sobre construcción en madera (Villanueva, 2005).	82
Figura 76. Bóveda encamonada de la Iglesia de la Compañía de Jesús en Córdoba, Argentina (Campi, 2009).	83
Figura 77. Construcción realizada por María Campi, siguiendo el sistema de De l'Orme (Campi, 2009).	83
Figura 78. Detalle de la cubierta del techo de la iglesia de la compañía de Jesús (Conti, 1996).....	84
Figura 79. Salón de Honor del Castillo de Valentino en Turín (Bertolini-Cestari et al, 2012).	85
Figura 80. Bóveda encamonada del Salón de Plenos del Senado (Bustamante, 2012).	86
Figura 81. Arco encamonado en estudio y representación de los nudos relevantes (Jaksch et al., 2012).	87
Figura 82. Entrada a la cúpula de la Universidad Tecnológica de Viena y modelo de análisis 3D propuesto (Jaksch et al., 2012).	88
Figura 83. A. Detalle del extradós de la bóveda encamonada y B. Resultados de las imágenes térmicas (Quagliarini et al., 2012).	88
Figura 84. Imágenes de bóvedas encamonadas de la Iglesia de la Santísima Trinidad, Florencia (Macchioni et al., 2013).	89
Figura 85. Vista interior de la bóveda del Leopoldinum Auditorium (Jasieńko et al., 2014).	89
Figura 86. Detalle constructivo y fotografía del interior de la bóveda esquifada del Leopoldinum Auditorium (Jasieńko et al., 2014).	90
Figura 87. Modelo teórico realizado por Anna Marzo (2006).	93
Figura 88. Modelo teórico realizado por Fabio Fabbri (2010).	93

Figura 89. Diagrama de esfuerzos relativos al análisis realizado por José Luis Gómez (2003).	94
Figura 90. Modelo de elementos finitos en el que se ha modelizado la discontinuidad de los arcos (Ferreira et al., 2013).	94
Figura 91. Modelo ensayado por Cecilia Alonso y Abdy Kermani (Alonso et al., 2012).	95
Figura 92. Modelo de puente peatonal diseñado por Abdy Kermani (2005).	96
Figura 93. Pórtico de ensayo modelo MCO-30.	103
Figura 94. Pórtico de ensayo hidráulico con el modelo a escala real de arco encamonado.	104
Figura 95. Captadores de recorrido usados en varios ensayos.	106
Figura 96. Xilohigrómetro de Resistencia eléctrica.	106
Figura 97. MST, medición realizada entre los extremos de las piezas.	107
Figura 98. Detalle del micrófono del PLG.	107
Figura 99. Componentes del acelerómetro.	108
Figura 100. Acelerómetro colocado en la clave delantera y caja de conexión.	108
Figura 101. Plano de Texeira de la villa de Madrid (1656).	116
Figura 102. Plano geométrico de la Villa y Corte de Madrid de 1800.	118
Figura 103. Determinación de los valores de CKDR de una pieza.	129
Figura 104. Máquina de ensayos a flexión simple con dos cargas puntuales con una distancia entre apoyos de 1700 mm.	131
Figura 105. Distancia entre apoyos y cargas aplicadas en el ensayo de flexión.	131
Figura 106. Colocación de los LVDT en el centro de la viga de madera maciza.	132
Figura 107. Disposición de tirafondos para ensayo perpendicular y paralelo a la fibra.	133
Figura 108. Procedimiento de carga.	134
Figura 109. Mediciones y curva teórica de deslizamiento-carga.	135
Figura 110. Medidas, distancias y colocación de los LVDT en el ensayo de Flexión-Rotación.	136
Figura 111. Imagen del ensayo de Flexión-Rotación, detalle de la colocación de los LVDT.	137

Figura 112. Determinación del K_{rot} en el ensayo de Flexión-Rotación.	137
Figura 113. Pieza encamonada, tipo A: con tornillo central y tipo B: sin tornillo central. Alzado y planta.	139
Figura 114. Detalle de apoyo de la viga.	140
Figura 115. Colocación de los LVDT en la probeta	141
Figura 116. Colocación de los LVDT en la junta en estudio.	141
Figura 117. Diagrama de esfuerzos cortantes, momentos flectores y deformación de la pieza.	142
Figura 118. Fuerzas generadas en cada elemento de fijación como consecuencia del momento flector.	143
Figura 119. Modelo de arcos encamonados, alzado, planta y axonometría. Cotas principales.	145
Figura 120. Distribución de los tirafondos y distancias entre ellos.	146
Figura 121. Proceso de construcción del arco del modelo de ensayo real. A) Plantilla colocación camones. B) Replanteo de los camones. C) segunda fila de camones. D) Plantilla colocación tornillos. E) Placa metálica con plantilla del apoyo del arco; posteriormente untada en grasa. F) Colocación primer arco. G) Colocación de la segunda mitad del arco sin la clave. H) Arco construido con los arriostramientos.	147
Figura 122. Distribución de cargas aplicadas.	148
Figura 123. Colocación de los bidones en el ensayo de carga de duración media.	148
Figura 124. Ubicación de los LVDT para el estudio general de deformaciones y giros.	149
Figura 125. Ensayo de rotura del modelo de arcos encamonados.	150
Figura 126. Colocación del acelerómetro en el modelo ensayado.	151
Figura 127. Axonometría y alzados de la estructura en estudio con indicación de la aplicación de los golpes durante el ensayo dinámico, con el acelerómetro situado en el centro de la pieza.	152
Figura 128. Aplicación de los golpes durante el ensayo con PLG.	153
Figura 129. Colocación de los acelerómetros. En la clave y en el riñón derecho de ambos arcos.	154
Figura 130. Axonometría de la estructura en estudio con indicación de la aplicación de los golpes durante el ensayo.	155

Figura 131. Localización de los NLINK en la estructura de arcos encamionados. En rojo se representan los NLINK 1, en azul los NLINK 2 y en verde el NLINK 3.	158
Figura 132. Conexión entre camones mediante uniones metálicas. Representación de la estructura real en la parte superior y debajo el modelo en SAP2000® de los diferentes tipos de NLINK usados y su ubicación. Vista frontal y en planta (la línea punteada indica su posición en el modelo de cálculo).	158
Figura 133. Holgura entre camones.....	159
Figura 134. Definición de las ecuaciones constitutivas para la rigidez a la cizalladura de los tirafondos y para la rigidez rotacional del modelo de comportamiento lineal. F/M: fuerza o momento; δ/θ : desplazamiento o giro.	160
Figura 135. Vista general del modelo de barras realizado en SAP2000®, esquema de barras y vista extruida.....	160
Figura 136. Definición de ecuaciones constitutivas: a) MP-I y b) MP-II para la rigidez a la cizalladura de los tirafondos; c) MP-III para la rigidez axial de un camón con respecto a otro camón incluyendo una holgura inicial; d) MP-IV, para la rigidez rotacional; y e) MP-V, para la rigidez rotacional en la junta entre camones incluyendo la rigidez al entrar en contacto las testas de los dos camones.....	161
Figura 137. Representación del modelo A en SAP2000® respecto a la probeta analizada.	163
Figura 138. Modelo A realizado en SAP2000®, esquema de barras y vista extruida.	163
Figura 139. Modelo A.2, realizado en SAP2000®, esquema de barras y vista extruida.	164
Figura 140. Representación del modelo B en SAP2000® respecto a la probeta analizada.	165
Figura 141. Modelo B, realizado en SAP2000®, esquema de barras y vista extruida.....	165
Figura 142. Representación del modelo C en SAP2000® respecto a la probeta analizada.	166
Figura 143. Modelo C, realizado en SAP2000®, esquema de barras y vista extruida.....	166
Figura 144. Representación del modelo A de arcos encamionados, sistema de barras y modelo extruido.....	167
Figura 145. Representación del modelo B de arcos encamionados, sistema de barras y modelo extruido.....	167
Figura 146. Representación del modelo C de arcos encamionados, sistema de barras y modelo extruido.....	168

Figura 147. Planta y sección de la cúpula de la capilla de Nuestra Señora de Belén en su huida a Egipto.	177
Figura 148. Fotografía de las trazas conservadas en la iglesia de las Calatravas y reconstrucción del dibujo.	178
Figura 149. Salón de bailes del Palacio de Fernán Nuñez y detalles constructivos de la sala anexa. .	179
Figura 150. Sala noble del Palacio de Gaviria.	180
Figura 151. Bóveda esquifada encamonada situada en la escalera principal de acceso del Hospital de la VOT.....	181
Figura 152. Sección de la iglesia de San Antonio de los Alemanes, proyecto de restauración de 1980. Arquitecto: Guillermo Costa.	183
Figura 153. Comparación de tipos de bóvedas encamonadas. A. Bóveda suspendida o colgada. B. Bóveda auto-portante. C. Bóveda estructural.....	184
Figura 154. Comparación de una bóveda colgada de una estructural (Congreso de los diputados, Madrid), una bóveda autoportante (Iglesia de San Ildefonso, Madrid) y bóveda estructural (Iglesia en Barranco, Lima, Perú).	185
Figura 155. Resumen de características de las obras visitadas.	185
Figura 156. Nave de Gaudí en Mataró, Barcelona: vista interior de la nave y detalles del apoyo, clave y junta entre camones.	186
Figura 157. Corte transversal, longitudinal y radial de <i>Pinus sylvestris</i> L.- <i>Pinus nigra</i> Arnold. Caracteres identificativos diferenciadores: 1. anillos de crecimiento diferenciados y traqueidas longitudinales de sección poligonal, 2. radios leñosos uniseriados, 3. radios leñosos pluriseriados, 4. traqueidas radiales con dientes hasta el centro del lumen, 5. parénquima radial de paredes axiales lisas, 6. parénquima radial de paredes horizontales lisas y 7. punteaduras de los campos de cruce tipo ventana.....	191
Figura 158. Corte transversal, longitudinal y radial de <i>Pinus pinaster</i> Aiton. Caracteres identificativos diferenciadores: 1. anillos de crecimiento diferenciados y traqueidas longitudinales de sección poligonal y circular, 2. radios leñosos uniseriados, 3. traqueidas radiales con dientes hasta el centro del lumen, 4. parénquima radial de paredes horizontales lisas y punteadas y 5. punteaduras de los campos de cruce tipo pinoide.....	192
Figura 159. Corte transversal, longitudinal y radial de <i>Pinus pinea</i> L. Caracteres identificativos diferenciadores: 1. anillos de crecimiento diferenciados y traqueidas longitudinales de sección poligonal, 2. radios leñosos uniseriados, 3. radios leñosos pluriseriados, 4. parénquima radial de paredes axiales noduladas, 5. parénquima radial de paredes horizontales punteadas, 6. punteaduras de los campos de cruce tipo pinoide y 7. punteaduras de los campos de cruce tipo piceoide.	193

Figura 160. Mapa de distribución del pino silvestre (<i>Pinus sylvestris</i> L.) (MAPAMA, 2017).	195
Figura 161. Mapa de distribución del pino laricio (<i>Pinus nigra</i> Arnold.) (MAPAMA, 2017).	195
Figura 162. Mapa de distribución del pino piñonero (<i>Pinus pinea</i> L.) (MAPAMA, 2017).	196
Figura 163. Mapa de distribución del pino resinero (<i>Pinus pinaster</i> Aiton.) (MAPAMA, 2017).	196
Figura 164. Distribución de los pinares más próximos a Madrid de los pinos estudiados en España, cuya madera se ha identificado en las construcciones estudiadas: silvestre, laricio, piñonero y resinero.	197
Figura 165. Posible procedencia de las especies de pino encontradas en los elementos constructivos analizados.	198
Figura 166. Imágenes de Priego (Cuenca) y cómo las maderadas, bien en forma de tablas o de troncos, bajaban por el río Escabas al Tajo hasta Aranjuez. Destaca en todas las fotografías el nivel de deforestación de las laderas que daban a los ríos (Asociación de gancheros, Comarca de Priego, 2010).	199
Figura 167. Sierra de agua situada en Aranjuez, 1743. Planta y localización en la proximidad del Palacio (Biblioteca del Palacio Real, Patrimonio Nacional).	200
Figura 168. Aserradero de Valsaín, siglo XIX (Sanz, 2000).	201
Figura 169. Calzada del Puerto de la Fuenfría (Sanz, 2000).	201
Figura 170. Carretas tiradas por bueyes (Sanz, 2000).	201
Figura 171. Las Navas del Marqués, Ávila (Postales, España Antigua, hasta 1939).	202
Figura 172. Pinares de El Pualar, Madrid (Velasco, 2015).	203
Figura 173. Hacheros, carreteros, guardas del pinar y otros trabajadores posando para la cámara ante la serrería de El Pualar hacia 1910 (Archivo de la Sociedad Belga de los Pinares del Pualar).	203
Figura 174. Carros con madera para aprovisionar el mercado de Madrid (Archivo de la Sociedad Belga de los Pinares del Pualar).	204
Figura 175. Deformación de la unión encamonada recta, situación inicial vs situación final del ensayo.	219
Figura 176. Giro producido en la junta de estudio de la unión encamonada recta.	219
Figura 177. Desplazamiento y giro de las juntas entre camones separadas 15 mm.	220

Figura 178. Rotura de las piezas encamionadas planas.	224
Figura 179. Localización de los giros y desplazamientos comparados indicando el número de LVDT utilizado.	228
Figura 180. Estado inicial y final del ensayo de agotamiento del arco encamionado y detalles de rotura debido a tracción perpendicular a la fibra en zonas próximas a los riñones.	231
Figura 181. Deformación del arco ensayado a agotamiento.....	231
Figura 182. Deformación del arco, estado inicial y estado final con fotografías en las juntas indicando su abertura.....	232
Figura 183. Vibración de la estructura correspondiente al modo 1. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 35,43 Hz.	236
Figura 184. Vibración de la estructura correspondiente al modo 2. Movimiento y giro en el plano xy. Valor frecuencia: 38,58 Hz.	236
Figura 185. Vibración de la estructura correspondiente al modo 3. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 120,78 Hz.	237
Figura 186. Vibración de la estructura correspondiente al modo 6. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 286,06 Hz.	237
Figura 187. Vibración de la estructura correspondiente al modo 11. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 607,52 Hz.	237
Figura 188. Representación de la vibración del modelo para las frecuencias desechadas.....	241
Figura 189. Vibración de la estructura correspondiente al modo 6. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 2,9 Hz.	242
Figura 190. Vibración de la estructura correspondiente al modo 11. Movimiento en el plano xy-xz. Valor frecuencia: 6,7 Hz.	242
Figura 191. Vibración de la estructura correspondiente al modo 13. Movimiento en el plano xy-xz. Valor frecuencia: 13,3 Hz.	243
Figura 192. Vibración de la estructura correspondiente al modo 16. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 24,46 Hz.	243
Figura 193. Vibración de la estructura correspondiente al modo 17. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 31,24 Hz.	244
Figura 194. Vibración de la estructura correspondiente al modo 21. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 39,27 Hz.	244

Figura 195. Dos primeros modos de vibración de arco continuo con apoyos fijos.....	245
Figura 196. Dos primeros modos de vibración de arco continuo con apoyos empotrados.....	246
Figura 197. Zona de contacto entre camones al entrar en carga la estructura y desaparecer la holgura inicial de 1 mm.....	247
Figura 198. Representación de la simplificación de la ecuación constitutiva relativa al K_{ser} con respecto al gráfico correspondiente a los ensayos.	254
Figura 199. Determinación del número de tirafondos a considerar en la unión entre camones.	260
Figura 200. Justificación del valor de K_{rot} situado en la junta entre camones.....	260
Figura 201. Vista frontal de los dos tornillos agrupados en el NLINK 1.....	266
Figura 202. Vista frontal de los dos tirafondos agrupados en el NLINK 1.	319
Figura 203. a) zona de contacto de dos camones en el modelo real; b) Modelo de análisis de la articulación.	320
Figura 204. Determinación de los valores de CKDR.....	528
Figura 205. Determinación de los valores de CKDR de una pieza.	529
Figura 206. Estudio de las juntas entre camones en la situación posterior al ensayo de agotamiento.	554
Figura 207. Pieza 01 (9,9 MC/ MST 651+622 μs / 12,681 kg).....	555
Figura 208. Pieza 02 (9,0 MC/ MST 704+682 μs / 12,362 kg).....	555
Figura 209. Pieza 03 (9,5 MC/ MST 572 +555 μs / 12,840 kg).....	556
Figura 210. Pieza 04 (8,9 MC/ MST 555+541 μs / 12,284 kg).....	556
Figura 211. Pieza 05 (7,9 MC/ MST 668+664 μs / 10,144 kg).....	557
Figura 212. Pieza 06 (6,8 MC/ MST 720+718 μs / 11,295 kg).....	557
Figura 213. Pieza 07 (9,2 MC/ MST 664+685 μs / 11,522 kg).....	558
Figura 214. Pieza 08 (9,5 MC/ MST 650+648 μs / 12,722 kg).....	558
Figura 215. Pieza 09 (8,3 MC/ MST 626+625 μs / 11,387 kg).....	559
Figura 216. Pieza 10 (8,7 MC/ MST 642+614 μs / 11,824kg).....	559

Figura 217. Vibración longitudinal FFT de la pieza 1.	560
Figura 218. Vibración transversal de canto con dos apoyos situados a 0,224 L de la pieza 1.....	560
Figura 219. Vibración transversal de canto a bajas frecuencias con dos apoyos situados a 0,224 L de la pieza 1.	561
Figura 220. Vibración transversal de tabla (I) con dos apoyos situados a 0,224 L de la pieza 1 sobre apoyos de Sapely.	561
Figura 221. Vibración transversal de canto (I) con dos apoyos situados a 0,224 L de la pieza 1 sobre apoyos de Sapely.	562
Figura 222. Vibración transversal de tabla (II) con dos apoyos situados a 0,224 L de la pieza 1 sobre apoyos de Sapely.	562
Figura 223. Vibración transversal de canto (II) con dos apoyos situados a 0,224 L de la pieza 1 sobre apoyos de Sapely.	563
Figura 224. Vibración longitudinal con dos apoyos situados a 0,224 L de la pieza 1 sobre apoyos de Sapely.....	563
Figura 225. Vibración transversal de tabla (I) con dos apoyos situados a 0,224 L de la pieza 2 sobre apoyos de Sapely.	564
Figura 226. Vibración transversal de canto (I) con dos apoyos situados a 0,224 L de la pieza 2 sobre apoyos de Sapely.	564
Figura 227. Vibración transversal de tabla (II) con dos apoyos situados a 0,224 L de la pieza 2 sobre apoyos de Sapely.	565
Figura 228. Vibración transversal de canto (II) con dos apoyos situados a 0,224 L de la pieza 2 sobre apoyos de Sapely.	565
Figura 229. Vibración longitudinal con dos apoyos situados a 0,224 L de la pieza 2 sobre apoyos de Sapely.....	566
Figura 230. Ejemplo de toma de datos de las frecuencias propias en Hz del arco encamonado (programa informático Vibraciones)	567

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de los tirafondos de acero Rothoblass, VGZ 7x100, aportados por el fabricante.	102
Tabla 2. Lista de edificios que pudiesen contener bóvedas encamonadas.....	121
Tabla 3. Muestras recogidas en las visitas realizadas.....	124
Tabla 4. Lista los edificios de Madrid capital visitados	174
Tabla 5. Características de las bóvedas encamonadas visitadas.	187
Tabla 6. Resultados de la identificación de la especie de madera de las muestras recogidas en las visitas realizadas.	190
Tabla 7. Contenido de humedad, densidad, densidad al 12% de humedad y clasificación visual de las piezas analizadas.....	205
Tabla 8. Frecuencia propia de vibración longitudinal, tiempos de vuelo, velocidades de transmisión y módulos de elasticidad dinámico estimado en función de las técnicas no destructivas: MST y PLG.	206
Tabla 9. Valores de CKDR, central y global, de cada una de las piezas analizadas.....	207
Tabla 10. Módulo de elasticidad global y tensión de rotura.	208
Tabla 11. Coeficientes de la ecuación 16.....	208
Tabla 12. Coeficientes de la ecuación 17.....	209
Tabla 13. Coeficientes de la ecuación 18.....	210
Tabla 14. Coeficientes de la ecuación 19.....	211
Tabla 15. Coeficientes de la ecuación 20.....	212
Tabla 16. Valores procedentes de los ensayos realizados paralelos a la fibra.	213
Tabla 17. Valores procedentes de los ensayos realizados perpendicular a la fibra.	215
Tabla 18. Valores medios de $K_{ser,0}$ y $K_{ser,90}$ procedentes de los ensayos realizados.	216
Tabla 19. Comparación de los valores medios de los ensayos con el valor deducido por la norma EN 1995-1-1.....	216
Tabla 20. Resultados de los ensayos de determinación de la rigidez a la rotación.....	218

Tabla 21. Datos comparativos de los seis ensayos realizados, tres del Tipo A (con tirafondo central) y tres del Tipo B (sin tirafondo central).	221
Tabla 22. Valores correspondientes a los ensayos realizados de vigas encamonadas.	225
Tabla 23. Comparación de resultados entre las piezas de madera aserrada y encamonadas planas.	226
Tabla 24. Valores obtenidos de frecuencias propias en Hz del ensayo realizado.	233
Tabla 25. Valores de frecuencia propia para las vibraciones longitudinal y transversales.	234
Tabla 26. Frecuencias teóricas calculadas mediante fórmulas matemáticas (Ross & Pellerin, 1994).	235
Tabla 27. Captura de pantalla de los valores de las frecuencias propias del modelo teórico para los 20 primeros modos calculados por el programa informático SAP2000®	235
Tabla 28. Comparación de las frecuencias propias medidas y procedentes del análisis numérico.	238
Tabla 29. Valores obtenidos de frecuencias en Hz propias del ensayo realizado.	239
Tabla 30. Valores de las frecuencias propias del modelo teórico para los 21 modo calculados por el programa informático SAP2000®	241
Tabla 31. Comparación de las frecuencias propias del modelo real y del modelo teórico.	245
Tabla 32. Frecuencias propias relativas a arco continuo.	246
Tabla 33. Datos relativos a los NLINK introducidos en Sap2000® y los valores correspondientes a cada eje.	248
Tabla 34. Datos relativos al NLINK introducido en el modelo teórico para representar el comportamiento de la junta.	249
Tabla 35. Datos relativos a los NLINK del modelo B.	252
Tabla 36. Datos relativos a los NLINK del modelo C.	255
Tabla 37. Datos relativos al NLINK introducido en el modelo A para representar el comportamiento de la junta.	258
Tabla 38. Datos relativos al NLINK introducido en el modelo B para representar el comportamiento de la junta.	262
Tabla 39. Datos relativos al NLINK introducido en el modelo C para representar el comportamiento de las uniones.	264
Tabla 40. Comparación de los valores de K_{ser} de los diferentes ensayos realizados.	276

Tabla 41. Comparación frecuencias propias modelo real vs teórico de los arcos encamonados	278
Tabla 42. Lista de iglesias, conventos y ermitas detalladas en el plano de Texeira (1656).....	309
Tabla 43. Relación de las iglesias descritas en el Plano geométrico de Madrid de 1800	311
Tabla 44. Lista de iglesias, conventos y ermitas detalladas en la Guía de Mesoneros Romanos.....	313
Tabla 45. Lista de iglesias detalladas en la Elías Tormo.....	316
Tabla 46. Lista de posibles edificios que pudiesen contener bóvedas encamonadas de la Guía del COAM.....	317
Tabla 47. Listado de edificios susceptibles de contener bóvedas encamonadas.....	323
Tabla 48. Hojas resumen de la recogida de datos del contenido de humedad de la madera.	523
Tabla 49. Evolución del contenido de humedad de la pieza 39 (con mayor contenido de humedad aclimatada en el laboratorio).	526
Tabla 50. Evolución del contenido de humedad de la pieza 40 (con mayor contenido de humedad aclimatada en la cámara de acondicionamiento).....	527
Tabla 51. Clasificación visual y clase resistente asociada.	529
Tabla 52. Comparación de los valores estimados y reales de módulo de elasticidad.....	530
Tabla 53. Comparación de los valores estimados y reales de Tensión de rotura.....	533
Tabla 54. Holgura entre camones en mm en la situación previa al ensayo de agotamiento (primer ensayo).....	552
Tabla 55. Holgura entre camones en mm en la situación previa al ensayo de agotamiento (segundo ensayo).....	553

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Evolución del Contenido de Humedad medio de la madera en % (ordenadas) respecto al número de días de aclimatación (abscisas) para las piezas 39 y 40.	128
Gráfico 2. Resultados obtenidos tras realizar las visitas a las obras.....	176
Gráfico 3. Porcentaje de las especies de madera utilizadas en la construcción de las bóvedas encamionadas inspeccionadas.	194
Gráfico 4. Modelo ajustado entre la tensión de rotura y el módulo de elasticidad dinámico procedente de los ensayos realizados con PLG.	210
Gráfico 5. Modelo ajustado entre la tensión de rotura y el CKDR global.....	211
Gráfico 6. Gráfico Fuerza unitaria-Desplazamiento de la probeta nº 1 para determinar el $K_{ser,0}$	214
Gráfico 7. Gráfico Fuerza unitaria-Desplazamiento de la probeta nº 1 para determinar el $K_{ser,90}$	216
Gráfico 8. Gráfico Fuerza-desplazamiento del ensayo 1 de K_{rot}	217
Gráfico 9. Gráfico Momento- Giro para determinar la rigidez a la rotación K_{rot}	218
Gráfico 10. Determinación del punto de cambio de rigidez de la pieza 1 con tirafondo central.....	221
Gráfico 11. Gráficos Fuerza-desplazamiento del pistón de carga de las piezas Tipo A.	222
Gráfico 12. Gráficos Fuerza-desplazamiento del pistón de carga de las piezas Tipo B.	222
Gráfico 13. Comparación de los valores medios de cada tipo de ensayo: A y B.	223
Gráfico 14. Comparación de gráficos fuerza-desplazamiento central de los ensayos realizados y valor medio.	223
Gráfico 15. Desplazamiento medido en la clave del arco (carga y descarga).....	227
Gráfico 16. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento en la clave del arco en los dos ensayos de agotamiento realizados.	229
Gráfico 17. Comparación de los gráficos de Fuerza-desplazamiento en la zona de los riñones de los dos ensayos realizados.	229
Gráfico 18. Comparación de los gráficos Fuerza-giro en el camón central en los dos ensayos de rotura realizados.	230

Gráfico 19. Comparación del gráfico fuerza desplazamiento del modelo lineal y el ensayo 1 de agotamiento del arco.....	248
Gráfico 20. Representación del comportamiento de la junta entre camones, Multilinear Plastic V..	250
Gráfico 21. Comparación de resultados Fuerza-desplazamiento de los dos modelos de SAP2000....	250
Gráfico 22. Comparación de los resultados de los modelos teóricos 1_A y 1_B de Momento frente a giro.	251
Gráfico 23. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento entre el modelo A y los resultados medios de los ensayos.	251
Gráfico 24. Representación del comportamiento de la junta entre camones, Multilinear Plastic II y V.	253
Gráfico 25. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento entre el modelo B y los resultados medios de los ensayos.	254
Gráfico 26. Representación del comportamiento de la junta entre camones, Multilinear Plastic II y V.	256
Gráfico 27. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento entre el modelo C y los resultados medios de los ensayos.	257
Gráfico 28. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento de los modelos A, B y C y los resultados medios de los ensayos.	257
Gráfico 29. Representación del comportamiento de la junta entre camones: MP-II y MP-V.....	259
Gráfico 30. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento en la clave del arco entre el modelo teórico A y los ensayos de agotamiento realizados.....	261
Gráfico 31. Representación del comportamiento de la junta entre camones: MP-II y MP-V.....	263
Gráfico 32. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento en la clave del arco entre el modelo B y los ensayos de agotamiento realizados.	264
Gráfico 33. Representación del comportamiento de las uniones del modelo C.	265
Gráfico 34. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento en la clave del arco entre el modelo C y los ensayos de agotamiento realizados.	267
Gráfico 35. Comparación de gráficos Fuerza-desplazamiento en la clave de los modelos teóricos y resultados experimentales.	268

Gráfico 36. Evolución del Contenido de Humedad medio de la madera en % (ordenadas) respecto al número de días de aclimatación (abscisas) para las piezas 39 (mayor contenido de humedad aclimatada en el laboratorio) y 40 (mayor contenido de humedad aclimatada en la cámara de acondicionamiento).....	528
Gráfico 37. Desplazamiento máximo producido en el ensayo a flexión de las piezas de madera correspondientes al apartado 6.3.1. Caracterización de la madera.....	530
Gráfico 38. Módulo resistente de las piezas de madera correspondientes al apartado 6.3.1. Caracterización de la madera.	531
Gráfico 39. Módulo de elasticidad de las piezas de madera correspondientes al apartado 6.3.1. Caracterización de la madera.	531
Gráfico 40. Fuerza última de las piezas de madera correspondientes al apartado 6.3.1. Caracterización de la madera.	532
Gráfico 41. Comparación de los valores de módulo de elasticidad estimado VS real.....	532
Gráfico 42. Comparación de los valores de Tensión de rotura estimado con los distintos equipos VS real	533
Gráfico 43. Comparación de los valores de Tensión de rotura medio estimado con los distintos equipos VS real	533
Gráfico 44. Gráfico momento-giro para determinar la rigidez a la rotación Krot de la pieza número 1.	538
Gráfico 45. Gráfico momento-giro para determinar la rigidez a la rotación Krot de la pieza número 2.	538
Gráfico 46. Gráfico momento-giro para determinar la rigidez a la rotación Krot de la pieza número 3.	539
Gráfico 47. Gráfico fuerza-desplazamiento de la viga plana sin tirafondo central número 1.....	539
Gráfico 48. Gráfico fuerza-desplazamiento de la viga plana sin tirafondo central número 2.....	540
Gráfico 49. Gráfico fuerza-desplazamiento de la viga plana sin tirafondo central número 3.....	540
Gráfico 50. Gráfico fuerza-desplazamiento de la viga plana con tirafondo central número 1.	541
Gráfico 51. Gráfico fuerza-desplazamiento de la viga plana con tirafondo central número 2.	541
Gráfico 52. Gráfico fuerza-desplazamiento de la viga plana con tirafondo central número 3.	542

Gráfico 53. Gráfico fuerza-desplazamiento de la junta central de la viga plana sin tirafondo central número 1.	542
Gráfico 54. Gráfico fuerza-desplazamiento de la junta central de la viga plana sin tirafondo central número 2.	543
Gráfico 55. Gráfico fuerza-desplazamiento de la junta central de la viga plana sin tirafondo central número 3.	543
Gráfico 56. Gráfico fuerza-desplazamiento de la junta central de la viga plana con tirafondo central número 1.	544
Gráfico 57. Gráfico fuerza-desplazamiento de la junta central de la viga plana con tirafondo central número 2.	544
Gráfico 58. Gráfico fuerza-desplazamiento de la junta central de la viga plana con tirafondo central número 3.	545
Gráfico 59. Gráfico del giro de la junta central de la viga plana sin tirafondo central número 1.	545
Gráfico 60. Gráfico del giro de la junta central de la viga plana sin tirafondo central número 2.	546
Gráfico 61. Gráfico del giro de la junta central de la viga plana sin tirafondo central número 3.	546
Gráfico 62. Gráfico del giro de la junta central de la viga plana con tirafondo central número 1.	547
Gráfico 63. Gráfico del giro de la junta central de la viga plana con tirafondo central número 2.	547
Gráfico 64. Gráfico del giro de la junta central de la viga plana con tirafondo central número 3.	548
Gráfico 65. Gráfico fuerza-desplazamiento vertical de la junta entre camones de la viga plana sin tirafondo central número 1.	548
Gráfico 66. Gráfico fuerza-desplazamiento vertical de la junta entre camones de la viga plana sin tirafondo central número 2.	549
Gráfico 67. Gráfico fuerza-desplazamiento vertical de la junta entre camones de la viga plana sin tirafondo central número 3.	549
Gráfico 68. Gráfico fuerza-desplazamiento vertical de la junta entre camones de la viga plana con tirafondo central número 1.	550
Gráfico 69. Gráfico fuerza-desplazamiento vertical de la junta entre camones de la viga plana con tirafondo central número 2.	550

Gráfico 70. Gráfico fuerza-desplazamiento vertical de la junta entre camones de la viga plana con tirafondo central número 3.	551
--	-----

1. INTRODUCCIÓN

RESUMEN INTRODUCCIÓN:

La madera ha sido la base de todo tipo de estructuras a lo largo de la historia, como se demuestra en los diferentes tratados históricos sobre arquitectura y construcción. Sin embargo, es un material poco valorado y reconocido, tal vez por no considerarse noble como otros materiales como el ladrillo, la piedra o el acero.

Una estructura encamonada permite salvar grandes luces a partir de piezas de madera de pequeñas dimensiones, aportando soluciones económicas y de rápida ejecución.

El sistema encamonado aparece en Europa en el siglo XVII, aunque en el tratado de Vitrubio (15 a.C) ya se describe la forma de construir los enlucidos en las villas romanas, bóvedas fingidas, que nos recuerdan al sistema constructivo de las bóvedas encamonadas.

En España tuvo una rápida aceptación debido a que esta solución permitía adecuar las cubiertas de los edificios al estilo arquitectónico que reinaba en el resto de Europa en los siglos XVII y XVIII, el Barroco, colgando dichas bóvedas encamonadas de las cerchas originales, sin desmontar la estructura preexistente.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la madera hunde sus raíces en los inicios de la historia humana. Desde los tiempos más remotos, el hombre utilizaba la madera para múltiples usos y, junto con la piedra, fue el material estructural que utilizó primero. Ya fueran humildes chozas o grandes construcciones, este material ha sido protagonista de nuestra historia. La dependencia de la madera de los bosques hizo que, hasta la aparición de los combustibles fósiles y la siderurgia, se viviera una edad de la madera hasta el siglo XIX.

La madera en la construcción, objeto de este trabajo, ha formado parte total o parcial en edificaciones desde que el hombre perfeccionó el manejo de las herramientas.

El tratado más antiguo sobre construcción que ha llegado hasta nuestros días data del siglo I a. C. “*De architectura*” de Marco Vitruvio, arquitecto e ingeniero romano, donde recoge las primeras descripciones sobre la composición, cualidades y usos de la madera, mostrando especial interés sobre las características de la madera frente a agentes xilófagos, (González, 1999). También, recoge en su tratado los diseños constructivos realizados en la época, describiendo los pasos necesarios hasta la finalización de la obra.

Las construcciones de las obras de ingeniería romana hasta las grandes catedrales góticas requirieron ingentes cantidades de madera para los trabajos de andamiaje y cimbrado, entre otros. No solo eso, la madera constituía la solución más económica, rápida y eficaz, debido a la relación resistencia-peso, y economía en el transporte, lo que llevaría a la desaparición de masas forestales; inicialmente, en las zonas próximas a los asentamientos humanos, cada vez más lejos, hasta deforestar extensos territorios. La pérdida de las masas arboladas es la causa que justifica que la voz que hace referencia en el castellano medieval a la antigua silva latina fuera ‘monte’. Las masas forestales quedaron relegadas a los terrenos cuya orografía era inadecuada para el cultivo y los asentamientos urbanos que se localizaban en su proximidad. La asimilación se deduce de la comparación de la copia latina del siglo X del Fuero Juzgo con la versión romance del siglo XIII (Gil, 2003).

El conocimiento de la madera evoluciona más rápidamente en el siglo XIX. El primer tratado sobre la madera en lengua castellana procede de 1880, y se debe al Ingeniero de Montes Eugenio Plá y Ravé. Con el título *Maderas de construcción civil y naval*, trata en su comienzo del estudio de la estructura anatómica de la madera, y dedica un capítulo a la física de la madera, donde por primera vez se aporta un compendio de valores referidos a las características mecánicas procedentes de la flora euroamericana y asiática, (Plá y Ravé, 1880).

El uso de la madera siempre ha estado presente en nuestras vidas, sin embargo, desde la aparición de los nuevos materiales: acero y hormigón, parece que su uso ha caído en el olvido. Lo que no ha ocurrido en gran número de países, cuyas masas forestales tuvieron una mayor continuidad que las españolas. Y, cuando se mantienen usos tradicionales, como es el caso de los bancos de la Catedral de León, los antiguos que fueron contruidos con madera de pino de Soria los renovaron por otros realizados con madera de fresno americano.

Existen muy pocos técnicos especializados en dicho material y es frecuente observar la sustitución, en rehabilitaciones de edificios públicos, de piezas de grandes escuadrías de madera por “livianas” cerchas metálicas. Privando a nuestras generaciones futuras de un legado histórico. Un ejemplo fue la reforma de las cubiertas de madera de El Monasterio de El Escorial. Mientras que Anselmo Arenillas y Pedro Hurtado y Ojalvo de la Dirección General de Bellas Artes mantienen la madera en su reforma de 1955, en la realizada en 1963 por Ramón Andrada, arquitecto del Patrimonio Nacional, se sustituyeron los entramados leñosos por estructuras de hierro, hormigón y fábrica.

Por tanto, se considera necesario conocer nuestra historia maderera, descubrir cómo y para qué se usaba, cuál era el método constructivo y su modelo estructural para poder rehabilitarlo, primando los valores culturales.

Este estudio sólo cubre una pequeña parte relativa a dicho material: las bóvedas encamonadas en Madrid capital, continuando la línea abierta en la tesis doctoral de D. Pedro Hurtado Valdez sobre las bóvedas encamonadas en el Virreinato de Perú.

Procede, comprender en primer lugar que significa encamonado.

La primera vez, bajo nuestro conocimiento, que se ha encontrado el término camón es en 1633, de la mano de Diego López de Arenas, alcalde alarife de Sevilla, en *“Breve compendio de la Carpintería de lo blanco y tratado de alarifes y de relojes de sol”* (López de Arenas, 1633):

«Y si la media naranja la quisieres hacer en ocho cascos; haras lo mismo que aquí, excepto el circulo del (folio 32 anverso) estriuo, haras ocho partes como hiciste aquí diez, y si fuere en doce harás respectiuamente; las quales demostraciones de los camones y plantas, y cascos [...] (folio 32 reverso).

Y en quanto a los empalmes de los camones se hará conforme se demuestra en los dos camones de la primera demostra[c]ión, traçando primero en vn suelo llano, y a propósito los dichos camones; y en la misma traça de ellos se iran sácando sus plantillas con su diente como parece en la demostración; porque no avrá madera que alcance a dar todo el camon con toda la vuelta que ha menester [...] (folio 33 reverso). camones y limas tienen sus centros algo oscuros. Y supongo que teniendo la pieça quatro varas en quadro y que tenemos conocido el grueso de sus maderas, y que armaron los camones vna vara, pon en el suelo o pared lisa la linea de las quatro varas, y en el medio leuanta vna perpendicular de vna vara [...] (folio 35 anverso).

y se hara la misma diligencia que en la montea de los camones que dexamos dicho, de modo que en su mayor altura no ha de leuantar mas que la vara que leuantaron los camones; porque há de clauar limas y camones todos a vn peso [...] (folio 35 anverso).

En estas monteas se sacaran las plantillas, las de la lima para la lima; y las de los camones para los camones [...] (folio 35 reverso).

esta montea de limas, y camones ha de ser conforme lo que arma la muestra, que lo que hemos dicho, que camones, y limas leuantaron vna vara ha sido suposición [...] (folio 36 anverso).»

En el artículo CAMÓN del *“Léxico de Alarifes de los siglos de oro”* (García, 1968) se define como:

(Arq., Carp.) Madero de principal de una armadura de forma curva.

Etim. Relacionado, como cambiaja, con cama, ‘pieza encorvada que forma parte del arado’.

Enrique Nuere ha realizado el examen de los términos utilizados en la carpintería de lo blanco español y hace referencia a la palabra camón como sinónimo de cercha o forma, definiéndolo finalmente como pieza curva de una armadura también curva (Nuere, 2000).

Según el Diccionario crítico etimológico castellano e hispánico (Corominas y Pascual, 1980), se define camón 'pina', como 'parte de una cercha.' Considera que se debe a López de Arenas, el uso del término por primera vez.

Según el Diccionario Enciclopédico Larousse (2009), la acepción arquitectónica de camón corresponde a:

(Arq.) Armazón de cañas o listones para formar las bóvedas encañonadas o fingidas. (Larousse, 2009)

Una estructura encamonada, es aquella que a partir de piezas de pequeña escuadría de madera consigue salvar medias luces (entre 5 y 20 metros). Los camones, de formas rectangulares o curvas en sus bordes, se contrapeaban unos a otros, permitiendo que no existan solapamientos en las juntas, eliminando la discontinuidad existente. De esta forma, a partir de retales de madera era posible construir estructuras de grandes dimensiones. Este sistema posibilitaba la creación de una alternativa económica y de rápida ejecución, en comparación con las soluciones coetáneas planteadas en ladrillo o piedra.

Cuando se habla de bóvedas encamonadas, suele haber confusión, debido a que la palabra camón también es considerada, erróneamente, como sinónimo de cimbra para fabricar los arcos de mampostería. Las cimbras, generalmente, se conformaban a base de armaduras construidas mediante camones que daban forma al intradós y tirantes que aportaban solidez necesaria para soportar el peso de la fábrica. Rieger (1763) señala:

«Para la construcción de los arcos se preparan tablas de la misma figura del arco y se aplican dos, ò tres de ellos arcos, según lo pida el grueso del arco, que se và à fabricar»

Las bóvedas encamonadas tienen su origen en Europa, en el siglo XVII, aunque se difundió rápidamente por América gracias a los alarifes españoles (Hurtado, 2011).

La corte castellana, itinerante durante siglos, se instaló en Madrid el 12 de febrero de 1561. En su elección como capital, pudo influir en no ser sede de ninguna alta jurisdicción eclesiástica (obispos o cardenales), lo que suponía la falta de ornato de las ciudades que eran cabeza de diócesis, y la ausencia de edificios civiles relevantes. El prestigio de pasar de villa a Corte requería incorporar rápidamente edificios monumentales o su adecuación al nuevo estilo europeo, el barroco, que surgió como contraposición a la reforma protestante de Lutero, que predicaba la sobriedad y ausencia de decoración. Una rápida solución fue adaptar las cubiertas de par y nudillo o pares con tirantes al nuevo estilo arquitectónico, sin desmontar la estructura preexistente¹ (figuras 1 y 2).

¹ En varias obras visitadas, se ha observado en el intradós de la bóveda encamonada durmientes decorados donde se apoyan los tirantes de las cerchas o techumbres mudéjares. Esto demuestra que la cubierta original

Figura 1. Armadura de lazo de la Parroquia San Esteban Proto Mártir, Mocejón, Toledo, actualmente oculta por una cúpula encamonada.

Figura 2. Dormiente decorado oculto por la bóveda encamonada en la Parroquia de Nuestra Señora de la Asunción, Torija, Guadalajara.

estaba a la vista desde el interior del templo y al adecuarse dicha construcción al estilo arquitectónico barroco, las decoraciones anteriores fueron ocultas.

Las bóvedas encamonadas se realizaban con tablas de madera (camones) que se solapaban entre sí para formar arcos (cerchas), los cuales definían la forma que tendrían las bóvedas, y eran estabilizados lateralmente mediante piezas de madera denominadas correas o teleras. Sobre los arcos y correas se colocaba un cerramiento que podía ser un entablado, listones de madera, y en la mayoría de casos se colgaban de la estructura principal de cubierta, cerchas de cuchillo o de par y nudillo, mediante unos cogotes de madera. En el intradós se colocaba un recubrimiento de yeso que se adhería al entablado de madera, situado entre los arcos encamonados, mediante unas cuerdas enrolladas a éstos. Dichas estructuras encamonadas, suspendidas de los atirantados de las armaduras, hicieron posible un cambio radical en la fisonomía interior de los templos.

Dicho sistema constructivo se desarrolló en toda Europa entre los siglos XVII y XIX, debido a su construcción fácil, rápida y económica, gracias a las especiales características del material usado y su elevada resistencia en relación a su peso, lo que permitía poder colgar dichas estructuras de las cerchas que conformaban la cubierta original a dos aguas.

Para estudiar el patrimonio existente relativo a las bóvedas encamonadas en Madrid capital, se han realizado una serie de visitas a los bajo-cubiertas de los edificios públicos, comprendidos entre los siglos XVII y XIX, tal y como se explica en el apartado 5.1. *Estudio de la presencia de las bóvedas encamonadas en Madrid.*

1. Introducción

2. OBJETIVOS

RESUMEN OBJETIVOS:

La presente tesis plantea un estudio histórico constructivo, basado en la visita de aproximadamente un centenar de edificios en Madrid capital, cuyo objetivo es analizar, catalogar y comparar dicho patrimonio arquitectónico, y un estudio sobre el comportamiento estructural de las bóvedas encamonadas, cuyo objetivo primordial es verificar dichas estructuras mediante unos modelos teóricos.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de esta tesis doctoral son los siguientes:

- Localización de los edificios que contengan dicho sistema constructivo con el objeto de conocer y catalogar el patrimonio que ha llegado a nuestros días, estudiar su sistema constructivo, evolución en el tiempo y su estado actual, en Madrid capital.

Para ello se visitaron noventa y un edificios, accediendo en la mayoría de los casos al espacio de bajocubierta. De esta forma ha sido posible realizar un estudio del desarrollo y evolución constructiva de las bóvedas encamonadas para poder analizar los cambios y mejoras a lo largo de su periodo de construcción. Además de realizar un catálogo de edificios visitados donde se han descrito las características constructivas de las bóvedas visitadas, en cuanto a sus dimensiones, proporciones, composición y estado actual, identificando los tipos existentes en relación a los materiales, época de construcción y estilo arquitectónico.

En los casos en los que las bóvedas eran encamonadas, se ha realizado un análisis de la madera utilizada con el fin de establecer el comercio de madera a lo largo del período histórico comprendido entre los siglos XVII y XIX, así como la evolución del precio de la madera y la comparación con respecto a las obras realizadas en mampostería.

- Desarrollo de un modelo de análisis para poder analizar, verificar, y en su caso, rehabilitar este patrimonio. Para ello se ha realizado un análisis estructural, como se explicará en el apartado 5.4. *Modelos teóricos de comportamiento.*

La elaboración de un modelo o modelos de análisis de las soluciones existentes tiene una segunda vertiente orientada a las técnicas de reparación. Su objetivo es servir de apoyo a la diagnosis y reparación de dicho patrimonio de gran valor.

Aunque, como se menciona en la introducción, las bóvedas encamonadas realizadas en Europa son principalmente estructura secundaria (bóvedas colgadas o auto-portantes), se ha propuesto un modelo teórico que permita el análisis de su comportamiento mecánico aplicable a cualquiera de los tres tipos existentes.

El estudio planteado tiene un enfoque totalmente clásico, con la vertiente experimental en paralelo a la teórica. Mediante la parte experimental, se podrán validar los modelos teóricos, y al mismo tiempo esa parte servirá para orientar, en un proceso iterativo, al modelo o modelos teóricos.

3. ANTECEDENTES

3. Antecedentes

RESUMEN ANTECEDENTES:

Se responde a las preguntas de cuándo surgen las bóvedas encamonadas y por qué y cuándo se dejan de realizar y por qué.

Se plantea el estudio de los tratados europeos que describen sistemas constructivos con madera similares a los observados en las bóvedas encamonadas visitadas. Desde el "*Tratado de Arquitectura*" de Vitruvio hasta las enciclopedias constructivas realizadas a principio del siglo XX.

Se analizan los estudios recientes sobre las bóvedas encamonadas, donde se clasifican en tres categorías: histórico-constructivo, intervención en estructuras antiguas y análisis del comportamiento estructural.

3. Antecedentes

3. ANTECEDENTES

El período histórico que comprende este trabajo comienza en el siglo XVI, correspondiendo a la fecha, de acuerdo con nuestro conocimiento, de aparición de este tipo de bóvedas.

Madrid, en 1518 apoyó el Movimiento Comunero de la mano de su regidor Juan de Zapata, al igual que otras ciudades castellanas. La derrota de éstos en 1520 en la Batalla de Villalar, coincide con la villa asediada, obligó a la ciudad a rendirse y fue ocupada por las tropas reales (Widmann, 2013).

En el reinado de Felipe II se declaró capital del reino y el traslado definitivo de la Corte se realizó en 1561. Hasta ese momento, la urbe estaba compuesta por unas veinte mil personas en los actuales barrios de Santo Domingo, Sol y Antón Martín (Alvar, 1985). Las dimensiones de la ciudad en aquel momento han quedado recogidas en la vista de Madrid realizada por Wyngaerde (figura 3).

Figura 3. Vista de Madrid desde el Oeste, frente a la Puerta de la Vega, por Anton Van der Wyngaerde en 1562, encargado por Felipe II para recoger las vistas de las ciudades hispanas (García *et al.*, 2014).

Felipe II, al elegir como ubicación de la capital una villa sin obispo y escasa en nobles de grandes linajes, se aseguraba de no compartir su autoridad en la ciudad. Se barajaron otras ciudades, pero la histórica Toledo era capital religiosa y asiento de una nobleza poderosa y, entre las más idóneas ciudades costeras, Barcelona estaba adscrita al Consejo de Aragón, y el Rey, tras la revuelta de los comuneros, tenía mucho más poder en Castilla, Lisboa era un territorio de reciente incorporación y Sevilla ya tenía preponderancia económica con la Casa de la Contratación de las Indias, además de poseer nobleza local y obispado. Madrid había sido sede de reuniones de la Corte desde la Baja Edad Media, estaba ubicada en el centro peninsular y contaba con abastecimiento de aguas a través del Manzanares (Domingo, 2014) y, sin tener que solventar los 40-60 m de desnivel entre el cauce y la ciudad, se disponía de los viajes de agua de la época musulmana.

Debido a la reciente capitalidad, la nobleza, junto con hidalgos, soldados, licenciados, al igual que aquellos que buscaban una mejora de vida o incluso hacer fortuna, emigraron a Madrid. A partir de este momento, se inició el paso de villa a ciudad, de forma caótica y desordenada, debido a la rapidez de sus construcciones. De forma acelerada, la población aumentó al triple por lo que existía un gran

3. Antecedentes

problema, la escasez de viviendas². Surge en este momento la figura de Arquitecto Municipal, de la mano de Francisco de Mora, que fue nombrado como Maestro Mayor de Obras (Alvar, 1989).

Madrid adquirió gran importancia nacional e internacional tras convertirse en capital de la Monarquía Hispánica, debía adaptarse a ese nuevo título, por ello en este espacio urbano nuevo se situaron innumerables edificios privados, públicos, iglesias y conventos para dar cabida al incremento de habitantes. Madrid creció en extensión y debía aumentar su belleza. En la figura 4, se observa la evolución urbanística que sufrió la ciudad desde 1474 hasta 1892.

Figura 4. Evolución urbanística de Madrid en 1474, 1561, 1734 y 1892. (Madrid histórico, 2003).

Es la construcción de dichos espacios públicos lo que cobra interés en el presente estudio. Sobre todo, aquellos que por limitaciones económicas y por la necesidad de realizarlas en un período de tiempo corto, se construyeron con madera. Tal y como describe Elías Tormo en su guía *Las iglesias del antiguo Madrid* (Tormo, 1985):

«En realidad, los frailes adivinaron a tiempo los destinos de la modesta villa y fue suya la urbanización, casi a la exclusiva.»

² La ciudad de Madrid pasa de 20.000 a cerca de 60.000 habitantes en 1598.

La mayoría de cúpulas, torres y extensas huertas que alteran la monotonía del caserío madrileño en el plano de Texeira, completado en 1656, se debe a la multitud de monasterios y conventos que se construyeron.

La llegada de los Borbones a la corte española trajo un estilismo diferente al barroco que existían en esos momentos en España (Fernández, 2016), y se puede dar por concluido el período de construcción de bóvedas encamonadas. Conventos e iglesias se convirtieron en plazas y plazuelas. La creación de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando incidiría en esos nuevos gustos. El 25 de noviembre de 1777, Floridablanca promulgó un Real Decreto, influido por Antonio Ponz³, en la que se obligó a la adopción de materiales considerados más nobles y duraderos, que la madera, como eran la piedra, el mármol, el jaspe o, a lo más, el estuco imitando aquellos materiales. Las razones que esgrimían los académicos era el desatino de los monstruosos adornos y altares y de los “pinos sin número”, en alusión al material predominante en los retablos. La utilización de una madera como la del pino era considerada frágil, corruptible, impropia de tan digno destino, de corta duración y expuesta a incendios (Rodríguez, 2006). Aunque el Real Decreto hacía referencia a los retablos de las iglesias, la mala propaganda realizada sobre la madera hizo que comenzase el declive de su empleo constructivo.

Otro hito que potencia y conlleva el desuso de las bóvedas encamonadas es la aparición del acero como material de construcción, que igualaba las virtudes de la madera: rapidez y economía.

En las figuras 5 y 6 se observan dos fotografías del espacio situado bajocubierta de dos iglesias de Madrid capital, construidas a final del siglo XIX y principios del XX. En la primera de ellas (figura 5), la Iglesia y asilo de San José de la Montaña, construida en 1890, se observa que las bóvedas contienen unos ejes estructurales realizados mediante perfiles metálicos rectos de corta longitud. Aunque no es un sistema encamonado en toda regla, ya que los perfiles no se solapan entre ellos, nos indican una evolución de los encamonados a un sistema propio de estructura metálica.

³ El secretario de la Real Academia de las Bellas Artes de San Fernando, conocido jansenizante y frénético antibarroco, además de enemigo acérrimo de Churriguera, redactó el documento que fue asumido oficialmente por Carlos III en 1777.

Figura 5. Iglesia y asilo de San José de la Montaña, Madrid, 1890.

En la bóveda de la Iglesia del Cristo de la Salud (figura 6), construida en 1915, se observa algo similar. Los ejes estructurales (longitudinales y transversales a eje con las cerchas) están realizados con perfiles metálicos curvos, probablemente roblonados unos a otros. A partir de este momento, las bóvedas encamionadas se dejan de construir.

Figura 6. Iglesia del Cristo de la Salud, Madrid, 1915.

3.1. Las bóvedas encamonadas en la tratadística y publicaciones históricas

3.1.1. Precedentes y origen en el siglo XVI

Desde el comienzo de las primeras civilizaciones, el hombre usó la madera o bien para conformar sus construcciones o bien como elemento auxiliar para poderlas realizar en otro material, como la piedra o mampostería. La construcción de bóvedas de madera era un hecho conocido desde épocas antiguas. La civilización romana construía sus bóvedas de piedra y ladrillo gracias a las cimbras realizadas con dos o tres filas de camones, en función del diámetro de los arcos. El origen de las cimbras, a su vez, se remonta a la construcción de las cloacas de Roma, como indica Arias y Scala (1888) en su tratado de *Carpintería antigua y moderna*. Aunque se desconoce la composición de las cimbras, se puede presuponer en base a las construcciones de bóvedas de medio punto y de los arranques salientes que se dejaban en ellas. Sin embargo, no han llegado a nuestros días testimonios escritos que ilustren cómo se realizaban.

El primer tratado que hace referencia a la madera en la construcción y a su empleo en las bóvedas es el de **Marco Vitrubio Polión** (80-70 a.C. – 15 a.C.). Su obra, *Tratado de Arquitectura*, escrita en el año 15 a.C. permaneció ignorada hasta 1414 y se imprimió por primera vez en Roma en 1486, en edición del humanista y gramático Fray Giovanni Sulpicio de Veroli, y la primera edición ilustrada fue publicada en Venecia en 1511, con grabados en madera sobre la base de las descripciones en el texto, probablemente por Fray Giovanni Giocondo. Está estructurada en diez libros, en los que expone los conocimientos de su época sobre la teoría y la práctica arquitectónica, entre los que incluye la construcción de edificios, a los que dedica los siete primeros libros, las obras públicas y los diseños de máquinas para la construcción de edificios. El volumen segundo lo dedica a los diferentes materiales utilizados en la construcción, como el ladrillo, la piedra, la cal, o la madera, de la que trata en su capítulo noveno. Opina que los árboles se deben cortar durante el otoño hasta antes de entrar la primavera. Trata de los tipos de madera que se usaban en la época y dedica especial atención al pino laricio (*Pinus nigra* Arnold), al que denomina *Larigno*.

La primera traducción completa al castellano se debe a Lázaro de Velasco que la realizó en 1564. En 1673 tiene lugar una traducción al francés, con comentarios, realizada por el médico y matemático Claude Perrault. Esta edición francesa será la traducida al castellano y publicada en 1761 por Joseph Castañeda, teniente director de Arquitectura de la Real Academia de San Fernando.

En el artículo quinto, apartado cuarto lo titula “*los techos embobedados*”. Que se corresponde con el tercer capítulo⁴, del séptimo libro de Vitruvio. En este capítulo compendia el modo de efectuar los enlucidos en Roma mediante listones formando un arco para generar el techo abovedado. Correspondía a una falsa bóveda que se colgaba de las vigas de forjado, bajo las cuales se disponían correas longitudinales para dar la curvatura necesaria al tejido de caña o al enlistonado que definía el intradós de la bóveda. La traducción de Castañeda (1761, pp. 48) dice:

⁴ En el original latino se titula: De camerarum dispositione, albario et tectorio opere. Donde *camero*, as, are, avi, atum. Es edificar en forma de bóveda; *albarium*, ii. Es capa de yeso o cal para jabelgar, jalbegamiento, estucamiento, estuco; *tector*, oris, el encalador o albañil que blanquea o revoca las paredes (Ximenez, 1827)

«Los Techos deben tambien formarse con mucha precaucion. Para hacerlos en figura de Bobeda, que llamamos Bobeda fingida, se clavarán á las maderas de los Suelos ó á los Cabrios ó Pares de la Armadura, de dos en dos pies, unos Camones curbos de Madera. A este fin se escogerá la Madera que no esté sujeta á corrupcion, como es el Ciprés, Box, Enebro y Olivo, y jamás usar de Encina ó Roble, porque se esquebraja y ocasiona rendijas en las Obras. Asegurados estos Camones, se atarán á ellos con tomizas Cañas Griegas quebrantadas. "Estas "Cañas tenian el mismo uso que hoy tienen los listones de tabla. Sobre dichas Cañas se hará un jarrado de Mezcla de Arena, para impedir que las gotas de agua que puedan caer de arriba perjudiquen al Techo. Se jarrará por abaxo con Yeso: despues se igualará con Mezcla de Cal y Arena; y ultimamente se pulirá con otra de Cal y Marmol.»

No debió tener mucho éxito esta traducción cuando el presbítero Don Joseph Ortiz y Sanz, inicia la suya en 1777 a partir, entre otras, de una de las mejores traducciones al italiano, la realizada por Daniel Bárbaro en 1556, que dilatará en el tiempo por la dificultad del empeño en aclarar la obra de Vitruvio, y evitar los errores de quienes le habían precedido. Considera la necesidad de observar personalmente los códices manuscritos de Vitruvio y, en particular, conocer los edificios antiguos que quedaban en Italia. Tras viajar por Italia y establecerse en Roma en 1779, volvió a la traducción y lo que antes veía insuperable, comprendió que se debía a la negligencia y desidia de los anteriores traductores y comentadores. Aun así, tardaría años en que su traducción, con un importante número de notas explicativas a pie de página que muestran el estado de la arquitectura en la época, viera la imprenta.

El tercer capítulo, del séptimo libro de Vitruvio, Ortiz (1787, pp. 171) lo titula *De los jaharrados*⁵ y escribe:

«Habiendo pues de formarse boveda, será de esta manera. Dispongase una serie de listones rectos, distantes entre sí no más de dos pies, y estos serán de ciprés si le hay; porque el abeto se carcome, y el tiempo le deteriora. Estos listones se curvarán en arco, y se asegurarán á la contignación, ó al maderaje del techo, con cantidad de saetas, ó sean pescantes, fijos con clavos de hierro. Estas saetas deben ser de madera libre de carcoma, vejez y humedades, como el box, sabina [junipero], olivo, roble, ciprés, y otras semejantes, excepto la encina [quercum], que cabecea y resquebraja todas las obras en que se pone.

Asegurados los listones, se unirá á ellos un texido de cañas Griegas quebrantadas, atándolas con tomiza [cuerda] de esparto de España, y siguiendo la curvatura. Por la parte superior de este camon se dará una capa de mortero, para que si penetraren algunas gotas de la contignación, ó del techo, no pase al enlucido. Si no hubiere cañas Griegas, se tomarán carrizos de las lagunas, y se harán manojos de la longitud necesaria, é iguales en grueso, atándolos con tomiza, cuyos lazos no distarán entre sí mas de dos pies. Estos manojos se asegurarán á los listones con tomiza, según se ha dicho, metiéndoles dentro algunas varas de madera para mayor seguridad. Todo lo demás se hará como arriba queda dicho.

Concluido y texido el encamonado, se extenderá en su cielo inferior la trulizacion⁶: luego se igualará con una mano de mortero común; y últimamente se acicalará con greda ó con estuco. Enlucida la bóveda, se

⁵**Jaharro y jaharrar.** Son vocablos arábigos, de los quales usan los alvañires. Vale tanto jaharrar como igualar la pared, rehinchéndola con yeso y raspándola, e igualándola con la plana queda emparejado para luzirla (Covarrubias, 1611).

⁶ Ortiz (1797, pp. 172), en su nota 8 aclara que la trulización es la primera mano de revoco que se daba a las paredes para sacar su rectitud, llenar huecos y desigualdades y preparar la superficie para el ornato, estuco o greda. El nombre se debe a la llana que los latinos designaban con la palabra *trulla*.

cercará de cornisa debaxo de su arranque, la qual conviene sea muy ténue y sutil; porque siendo grande, su mismo peso la despega, y cae [...]»

Rusconi realiza una interpretación gráfica del texto vitrubiano en 1590, como aparece en la figura 7 y Howe (1999) hace su propia interpretación en la figura 8, sistema constructivo más parecido al encontrado en las obras visitadas.

Figura 7. Interpretación de Rusconi de la bóveda de madera de Vitrubio (Rusconi, 1590). Dibujo que acompaña de la caña (*Arundo donax*) y el esparto (*Spartium junceum*).

Figura 8. Ejecución de una bóveda de madera descrita por Vitrubio, según la interpretación de Howe (1999).

Según la interpretación de Rowland y Howe (1999) y Hurtado Valdez (2011), el sistema descrito por Vitrubio se corresponde con un techo curvo de cañas en suspensión a las vigas horizontales, por lo que no existen arcos de madera y por lo tanto no se puede considerar encamonado. Sin embargo, en la traducción realizada por Ortiz (1787) y considerada de las más fiables, se hace referencia a listones curvados en arco. Es posible que, debido a las pequeñas luces a salvar en las villas romanas, los arcos curvados se pudieran realizar con una sola pieza de madera. En el momento en que la luz aumentó, fue necesario realizar dichos arcos mediante el solapamiento de listones, generando el encamonado.

Durante la edad media, no se ha encontrado testimonio escrito debido al hermetismo cultural entre gremios y logias. Sin embargo, se pueden observar miniaturas de códices que permiten analizar el sistema de grúas medievales usadas para la construcción de las cubiertas a dos aguas de las catedrales (Benito, 2011), como se observa en el detalle de la construcción de una catedral de Philippe Fix (figura 9).

Figura 9. Detalle de la construcción de una catedral por Philippe Fix y de las grúas medievales usadas (Erlande-Brandenburg, 1993).

En el cuaderno de **Villard de Honnecourt** (1200-1250), se recogen datos sobre las técnicas constructivas medievales y de ingeniería, aplicando principios geométricos, que demuestran su interés por la técnica y el funcionamiento de la maquinaria y herramientas existentes, (Bechmann, 1991). Su manuscrito, "*Livre de portraiture*", datable entre 1220 y 1240, comienza con el siguiente texto:

«Villard de Honnecourt os saluda y recomienda a todos aquellos que se sirvan de las construcciones que se encuentran en este libro de rezar por su alma y acordarse de él, pues en este libro se puede encontrar una ayuda válida para el gran arte de la construcción y de algunas instrucciones de carpintería y encontraréis el arte del retrato y sus elementos tal como lo requiere y lo enseña el arte de la geometría»

Realiza las primeras referencias gráficas conocidas sobre armaduras de cubierta. Aunque no muestra bóvedas de madera, hace patente que en la arquitectura medieval se empleaban elementos curvos para solución de cubiertas (figura 10).

Figura 10. Armaduras de cubiertas, en las que se observan riostras curvadas para formar la armadura. (De Honnecourt, c. 1235).

Hasta el siglo XV no se vuelve a encontrar ningún escrito que aborde este tema.

León Battista Alberti (1404-1472), sacerdote, humanista, arquitecto, matemático, poeta italiano y tratadista, aporta en su tratado una serie de recomendaciones constructivas relativas a la construcción de puentes, principalmente. En el libro II, capítulo V del "*De Re Aedificatoria*"⁷, publicado en 1450, describe a que tratamientos debe someterse la madera para que los agentes abióticos y bióticos no la dañen. Destacamos su labor debido a la necesidad que manifiesta de cubrir grandes luces mediante la unión de diversas piezas de menores dimensiones, por falta de maderos de grandes escuadrías

⁷ El tratado de arquitectura de Leon Battista Alberti emula el *De architectura libri decem* de Vitrubio, formado por diez libros: diseño (*lineamenta*), materiales (*materia*), la obra (*opus*), obras de uso común (*universorum opus*), obras de uso restringido (*singulorum opus*), ornamentación (*ornamentum*), ornamentación de los edificios públicos civiles (*publici profani ornamentum*), ornamentación de las construcciones privadas (*privatorum ornamentum*), mantenimiento de los edificios (*operum instauratio*).

(Arriaga, 1988). Sin embargo, cuestiona el empleo de la madera en construcción, alegando problemas de durabilidad y solidez, aunque reconoce su flexibilidad y facilidad de trabajo (Gómez, 2007).

En las ilustraciones de **Leonardo da Vinci** (1452-1519), que datan de 1478 a 1519, y pertenecen al “*Codex Atlanticus*”, expone dibujos de vigas obtenidas con piezas colocadas en rosca una sobre otra y curvadas mediante una prensa manual, (figura 11). Las uniones se solucionaban con acoplamientos en dientes de sierra y clavijas metálicas que atravesaban el conjunto.

Figura 11. Cercha formada por dos piezas curvas cuyas uniones son en diente de sierra y se unen mediante clavijas metálicas, dibujo de Leonardo Da Vinci (Hahmann, 2006) y prensa para curvar las vigas (Marinoni, 1975).

En el “*Codex Ashburnham*”, cuyos dibujos los realizó entre 1489 y 1492, se aprecia el estudio que realizó Leonardo para las cimbras del tiburio del Duomo de Milán. Se observa que estaban realizadas mediante listones solapados, que nos recuerdan a las vigas laminadas de hoy en día (figura 12).

Figura 12. Ilustración de Leonardo sobre el diseño de cimbras para el Duomo de Milán (Maltese, 1978).

En el siglo XVI Italia se sitúa a la cabeza de la producción de tratados sobre arquitectura, caracterizados por su carácter teórico y universal. Aparecen numerosos manuales prácticos de carpintería.

La obra de **Philibert de l'Orme** (1510-1570), arquitecto francés, nacido en Lyon, que estudió en Italia, destaca entre ellos, debido a que no recoge los usos tradicionales de la época, sino que plantea modelos diferentes, nuevos sistemas constructivos.

Hasta el momento, la solución constructiva para salvar grandes luces era mediante cerchas y celosías, que a medida que aumentaba la luz a salvar, mayores eran las escuadrías de los elementos de madera. De l'Orme consigue salvar grandes luces mediante la suma de piezas pequeñas de madera, usando la forma de arco, consiguiendo que todas las secciones se encuentren comprimidas (Arriaga, 1988).

En 1561, publica en París el libro *"Nouvelles inventions pour bastir et à petit frais"* donde describe la carpintería modular enclavijada, en las que se utilizan maderas de pequeña escuadría. Realiza numerosas láminas describiendo arcos formados por camones arriostrados lateralmente, con espigas pasantes, unidas por clavijas de madera para definir cubiertas abovedadas (Candelas, 1998). Consideraba que era una alternativa para obtener piezas de gran longitud a bajo costo y con objeto de solventar la escasez de maderas de gran escuadría para salvar grandes luces. Además, dicho sistema de engranaje de piezas pequeñas permitía estabilidad de conjunto y mayor facilidad de sustituir alguna pieza si ésta se deterioraba, sin necesidad de demolición, (figura 13).

Figura 13. Bóveda encamonada con clavijas de madera (De l'Orme, 1561).

Aunque es considerado el padre de las bóvedas encamonadas, algunos autores opinan, que su sistema procede de la observación de edificaciones antiguas⁸. Los detalles constructivos realizados en los folios 291 y 293 de su tratado, son considerados los primeros de la historia de la construcción en carpintería, conscientemente utilizados. No son representaciones a gran escala, sino detalles acotados, con nomenclatura en cada una de las piezas y representaciones de todos los elementos que constituyen el sistema.

De l'Orme considera que las dimensiones adecuadas son, para la longitud entre 0,974 metros hasta 1,3 metros, y con respecto al grosor, 0,027; 0,033 y 0,04 metros.

⁸ Serlio hace referencia a la construcción que descubrió en el *Palacio de Tournelles* realizada con piezas de madera curvas y construida entre el siglo XV y mediados del XVI en París. A su vez, Rondelet describe en su *"Traité théorique et pratique de l'art de bâtir"*, en 1810, que la primera obra realizada mediante planchas de maderas es la descubierta por Serlio en el siglo XVI.

Utilizó por primera vez esta técnica en el Castillo de la Muette en 1548, donde consiguió salvar una luz de 19,49 metros, y posteriormente en el Castillo de Montceaux y en Mont-Dauphin. En la figura 14, se observan distintas soluciones planteadas por De l'Orme.

Figura 14. Distintas soluciones planteadas por De l'Orme mediante arcos encamonados con clavijas de madera (Gómez, 2007).

Su obra literaria no obtuvo gran éxito en vida, debido a que perdió su cargo como arquitecto real tras la muerte de Enrique II y tuvo que regresar a Roma. Allí obtuvo el título de abad de Saint-Serge, lo que le permitió dirigir varias obras. Su estancia en la corte, le había acumulado gran cantidad de enemigos, lo que hace que sus obras e ideas no tuviesen el reconocimiento que merecían. Además, la oposición de las regiones del sur, tradicionalmente más ligadas al uso medieval de la piedra, tampoco le ayuda a la difusión de su modelo innovador. Su obra no es redescubierta hasta el siglo XIX, por el renovado interés por el gótico, gracias a la labor de Rondelet y Emy, principalmente.

La preocupación por salvar grandes luces a partir de piezas menores también era compartida por varios arquitectos de la época, como Palladio o Serlio.

Andrea Palladio (1508-1580), arquitecto veneciano que se centró principalmente en estructuras de celosía para puentes, no profundiza en el estudio de los arcos o bóvedas de madera, aunque hace referencia a un par de edificios que contenían bóvedas encamonadas, destacando su poco peso: el convento de la Caridad de Venecia y las bodegas de Moncenigo (Palladio, 1570).

El arquitecto manierista italiano, **Sebastiano Serlio** (1475-1554), escribió el tratado "*Tutte l'opere d'architettura et prospettiva*" obra teórica fundamental de la arquitectura durante la época moderna. Cinco tomos de su tratado fueron publicados a partir de 1537. Dos más, de un total de ocho, se publicaron después de su muerte. En ella, muestra su preocupación por desarrollar piezas de madera que permitiesen grandes luces, mediante piezas de menor longitud. Aporta una sencilla manera a partir de vigas o viguetas demasiado cortas, solapándolas a la mitad de éstos. Solamente describe sus propuestas sin incluir gráficos o detalles relevantes para poder construirla (figura 15).

Hace referencia a la reparación que realizó en el Palacio des Tournelles, donde al encontrar tablones de madera, curvos, cubiertos de yeso; opinó que tenía más de doscientos años.

« Serlio, qui vivait avant Philibert de l'Orme, rapporte qu'ayant été chargé par François I, de faire quelques réparations au Palais des Tournelles, il y trouva des voûtes formées de courbes en planches recouvertes d'un enduit de plâtre fort dur, qui avait plus de deux cents ans d'ancienneté. » (Rondelet, 1810)

Figura 15. Armaduras de cubiertas abovedadas (Serlio, 1600).

Culturalmente ligado a Serlio, el arquitecto renacentista italiano **Vincenzo Scamozzi** (1548-1616), en 1572 estudia el tratado de Vitrubio según la interpretación de Bárbaro y Palladio (Venturi, 1965) y considera que la arquitectura es una ciencia exacta, cuyas reglas había que estudiarlas con atención y paciencia. En 1615, publica *“Dell’idea della Architettura Universale”*, donde describe los entramados para realizar puentes, pero no se centra en las bóvedas de madera (figura 16).

Figura 16. Detalles de construcción de puentes en madera (Scamozzi, 1714⁹).

⁹ La edición consultada, de 1714, es una reimpresión de la original editada en 1615.

3.1.2. Siglo XVII

En el siglo XVII, Francia toma el relevo a Italia, y las numerosas publicaciones persiguen una finalidad práctica y de preocupación por los aspectos constructivos.

Sin embargo, los primeros ejemplos cronológicos proceden de Inglaterra, como es el caso de Iñigo Jones, quien influido por las reglas de proporción y simetría de Vitrubio y por los principios clasicistas del renacimiento italiano, desarrolla estructuras en celosía más eficientes que las que se usaban en Italia en ese momento.

Iñigo Jones (1573-1652), primer arquitecto importante de la época moderna, (Hart, 2011) desarrolla grandes luces mediante piezas de madera de pequeña escuadría. En la sección transversal de su obra Barber Surgeon's Hall (figura 17), hoy destruida, se observa que la bóveda se encuentra colgada de la cercha de cubierta y apoyada en el muro en sus extremos. Sin embargo, no se han encontrado detalles constructivos para verificar si este tipo de estructuras las realizaba siguiendo del modo de De l'Orme.

Figura 17. Sección transversal del Barber Surgeon's Hall, de Iñigo Jones. Dibujos Universidad de Worcester. (Theodore, 2000).

Iñigo Jones introdujo las ideas arquitectónicas italianas en Gran Bretaña, permitiendo espacios abovedados de grandes luces mediante elementos de madera de pequeñas dimensiones, similares a los representados en los dibujos de Palladio y Serlio, tal y como lo describe David Yeomans (1984):

«When Inigo Jones introduced Italian architectural ideas into Britain, he also brought a new kind of roof structures that facilitated the construction of large scale spaces. The unsupported ceilings of the Banqueting House and St Paul's, Covent Garden, were both over 50 feet and although similar spans had been built before, they had relied upon quite different structural methods which created a distinct architecture. The roofs of Westminster Hall and those of many lesser halls, like those at the Oxford and Cambridge colleges, used either arch or hammer-beam forms whose open structures dominated the rooms. These structures were quite unsuited to providing flat ceilings or roofs which, when required, had relied upon massive tie beams. Instead of this rather crude structural method, Inigo Jones supported his flat ceilings and roofs by using the much more efficient trussed roofs which were in use in Italy at the time and were shown in the drawings of Palladio and Serlio. These structures allowed large spans to be constructed with timbers of smaller scantling, particularly for the tie beam which no longer needed to carry the full weight of the roof and which no longer needed to be built in a single length. It might be argued that the use of this new structural form was essential to the development of the new classical style of architecture in England but, although he was the first architect to use it on any scale in Britain, the influence of Inigo Jones on its subsequent use and development is questionable because of the interruption to building by the Civil War and the rediscovery of the form by others thereafter. »

Coetáneo a Jones, **Henry Wotton** (1586-1639), poeta y diplomático inglés, para justificar la influencia del clasicismo italiano en el territorio inglés, tradujo al inglés los Elementos de Arquitectura de Vitrubio en 1624. En su obra *"The Elements of Architecture"*, 1624, hace referencia a los grandes tratadistas hasta el momento y nombra a Philibert de l'Orme sin entrar en detalles de su sistema de bóvedas encamionadas (Wotton, 1903).

En ese mismo año, **Louis Savot** (1579-1640), considerado por algunos autores como el padre de los manuales de arquitectura del siglo XVII en Francia (Wiebenson, 1982), publica *"L'architecture française des bâtiments particuliers"* (1624). De carácter general, incluye indicaciones sobre el dimensionado de elementos, propiedades de los materiales, precios, métodos de medición, tasación y ordenanzas vigentes¹⁰. En sus láminas describe un tipo de cubiertas de madera que aparecerían en todos los tratados franceses hasta el siglo XIX: la armadura quebrantada, también denominada mansarda (figura 18), que permitía habilitar los espacios de desván, reduciendo la altura excesiva de las cubiertas y construyéndose con maderas de menores dimensiones que las de las armaduras a dos aguas. Sin embargo, no hace referencia a las bóvedas encamionadas.

Figura 18. Representación de armadura quebrantada (Savot, 1624).

¹⁰ En 1672 y 1685, se reeditó la obra, siendo revisada por Blondel.

Tres años más tarde, **Mathurin Jousse** (1575-1645), publica su tratado "*L'art de charpenterie*" (1627), reeditado posteriormente muchas veces, lo que nos hace pensar que se usó como guía de carpintería durante bastante tiempo¹¹.

El texto se compone de 125 ilustraciones descritas y comentadas, no es un tratado organizado en capítulos como los demás mencionados (figura 19). Se ilustran 34 edificios: plantas y secciones, función del edificio, detalles de las cimbras, además de descripciones y definiciones detalladas de los útiles y herramientas necesarias para llevar a cabo el trabajo de carpintero.

Describe los procesos de ejecución y los tipos de armaduras ejecutadas en Centroeuropa desde el siglo XIII. Aunque no se centra en describir las bóvedas encamionadas, si se observan bóvedas circulares similares a las que ilustran posteriormente Christopher Wren (1632-1723) o Thomas Tredgold (1788-1829).

Figura 19. Planos de cúpula con linterna (Jousse, edición de 1751).

¹¹ Se realizaron numerosas reediciones: 1650, 1664, 1692, 1702, 1751.

Siguiendo la línea marcada por Mathurin Jousse, los tratados específicos de carpintería del primer tercio del siglo XVII en España recogen y analizan las soluciones empleadas en su ámbito.

Diego López de Arenas, realiza uno de los tratados españoles más importantes del siglo XVII *“Carpintería de lo blanco y tratado de alarifes”*, publicado en 1633, donde precisa las técnicas y reglas de carpintería para la construcción de armaduras de madera, ilustrándolo con dibujos. Su intención era realizar un manual práctico con recetas de taller para aprendices del oficio, aportando las reglas de geometría y carpintería vigentes en el siglo XVII cuya aplicación comenzaba a estar en desuso (Fernández-Shaw, 2002). En dicho tratado, hace referencia a los camones y a la forma de realizar sus juntas (López de Arenas, edición de 1867).

En el glosario define camón como:

«Madero principal de una armadura de forma curva. Especie de par curvo ó labrado en forma de arco que se emplea en las armaduras de cúpulas, medias naranjas, medias cañas, etc»

Y define patrón, elemento usado como plantilla, mediante:

«Regla ó pieza de madera del ancho del trazo de esta que sirve para mantener la forma semicircular de los camones en las medias naranjas y para sacar la regla baja de los paños ochavados y para otros usos análogos.»

Esta última definición parece reflejar que sus descripciones no corresponden con el sistema constructivo encamonado que estamos estudiando. Hace pensar que su explicación tiene más que ver con la forma de curvar la madera para hacer arcos o para cimbrar las bóvedas y cúpulas, que, en realizar arcos con tablas cortas (figura 20):

«agora los peraltes en esta parte de círculo, y quedarán inclusos los dos camones, y en la planta sacarás los campaneos que tiene cada camon, dándoselos por la órden que se da á la campana de la lima de la media caña.»

«Y en quanto á los empalmes de los camones, se hará conforme se demuestra en los dos camones de la primera demostración, traçando primero en vn suelo llano, y á propósito, los dichos camones, y en la misma traça dellos se irán sacando sus plantillas con su diente, como parece en la demostración: porque no avrá madera que alcance á dar todo el camon con toda la buelta que ha menester.»

Figura 20. Esquema de cómo realizar una media naranja en diez cascos por Diego López de Arenas (ed. 1867).

En la misma época, **Fray Andrés de San Miguel** (1577-1644), fraile carmelita, arquitecto, ingeniero hidráulico, matemático, es autor de varios escritos, agrupados en tres temas: el Templo de Salomón, donde describe algunos templos de Perú y las reglas para construir las iglesias de su Orden; el segundo, referido a la arquitectura y matemáticas y el tercero sobre tratados de agua y el desagüe de la ciudad (Cuesta, 2008). Se centra en las cerchas de media caña, las trazas de lazo y del uso de los cartabones carpinteros (Nuere, 1990).

El término “bóveda encamonada” no se empieza a usar, de forma habitual, hasta la llegada de **Fray Lorenzo de San Nicolás** (1593-1679), fraile de la Orden de Agustinos Recoletos y arquitecto de la corte española durante el siglo XVII. Su reconocimiento se debe, en gran parte, a los tratados de arquitectura que publicó. En 1639 escribe la primera parte de “*Arte y Vso de Architectvra*”, donde usa el término de “bóveda encamonada” de forma recurrente. La segunda se publicaría en 1665.

Fray Lorenzo describe, en el capítulo LVIII: *Trata del primer género de bóveda, que es un cañon seguido, y de las dificultades que acerca de él se pueden ofrecer*, cómo realizar una bóveda encamonada según el procedimiento español, es decir, sujeta a una estructura superior (figura 21), similar al sistema planteado por Vitrubio en el 15 a.C. Proponía alternativas en madera a las cúpulas de piedra, debido a su economía, rapidez y a los menores empujes sobre muros que producía la madera.

«Si la bóveda de cantería fuere rebaxada ó levantada de punto, [...], será necesario hacer para cada dovela regla cercha, para que acudan bien los lechos o sobrelechos. Demás de lo dicho se puede ofrecer en algún salón hacer una bóveda rebaxada, y esta unas veces se hace encamonada, haciendo camones de madera, que son unos pedazos de viguetas ó tablones, y fixanse en el asiento de la bóveda, y rematán en el tercio de su lado, y de unos á otros se tabica y queda la bóveda con menos peso: y por el exemplo precedente lo entenderás mejor, aunque no es la misma traza. Supongo, que en el hueco AB, quieres hacer una bóveda rebaxada ACB, y que es su suelo de madera MN, clava en el suelo de parte á parte dos ristreles con buenos clavos en el lugar que demuestra ST, después á cada madero echa las zancas o tornapuntas PQLV, y desde le asiento de la bóveda AB, ve tabicando de sencillo hasta los ristreles, y lo que hay de uno á otro ristrel, entre madero y madero, pasarás el tabicado de bóveda; y lo demás del suelo entomizado, [...] y quedará como el diseño lo demuestra. [...] Si fuese encamonada, sentarás los camones en el lugar que están las zancas o tornapuntas, con la parte de vuelta que les toca.» (San Nicolás, edición de 1796)

Figura 21. Descripción de cómo construir una bóveda de cañón, tabicada y encamonada (San Nicolás, ed. 1796).

Definía el camón como:

«haciendo camones de madera, que son unos pedazos de vigueta ó tablones, y fijanse en el asiento de la bóveda y rematan en un tercio de su lado.»

Según San Nicolás, una bóveda encamonada debía suspenderse a las vigas del forjado (suelo), en donde se dispondrían dos viguetas en sentido longitudinal (rastreles) y éstas se conectarían con los tornapuntas de las vigas. Las cerchas confeccionadas con camones se colocarían desde un durmiente de madera definiendo el arranque de la bóveda, debiendo tomar contacto con los tornapuntas, las viguetas longitudinales y la parte media de la viga de forjado. Estas bóvedas se podían tabicar con ladrillos en la zona de arranque dejando las piezas de madera anudadas con esparto para luego ser recubierto con yeso. Los tornapuntas no solo reducían la luz de las vigas de forjado, también ayudaban a dar la forma al intradós y aportaban mayor estabilidad a la bóveda frente a los empujes y la acción del viento.

En la segunda parte de su tratado, en el capítulo cincuenta y uno, representa la construcción de una bóveda encamonada en una lámina (figura 22).

Figura 22. Construcción de una cúpula encamonada, lámina de Fray Lorenzo de San Nicolás (Villanueva, 2005).

En 1649, **Johann Wilhelm** (1595-1669), publica la obra *“Architectura Civilis: O descripción y esbozo de muchas renombradas cubiertas, como altas agujas, tejados en cruz, acodamientos, algunas cúpulas, también prensas, puentes levadizos: Item, toda clase de prensas, escaleras de caracol, y otras fábricas mecánicas similares”*, donde describe estructuras de madera para armaduras, torres, puentes y máquinas. Las bóvedas francesas que describe están formadas por piezas curvas cuya unión se realiza con abrazaderas metálicas (figura 23).

Figura 23. Armadura de cubierta cuyos elementos curvos están sujetos a la armadura principal (Wilhelm, ed.1668).

Christopher Wren (1632-1723), alcanza la fama por sus trabajos de reconstrucción de las iglesias de Londres tras el incendio de 1666. Como medio de trabajo utilizó dibujos y maquetas, debido a que consideraba que éstas le ayudaban a juzgar o valorar la calidad de su proyecto (Montes, 1994). Aunque no deja ningún texto escrito, se han conservado los planos de sus obras (figura 24), en las que se observan armaduras de celosía y cubiertas abovedadas, formadas por riostras y puntales, cuyos arcos están formados mediante camones (Gómez, 2006).

Figura 24. Propuesta para el crucero del antiguo San Pablo. Sección, 1666 (Maure, 1998).

Volviendo a España, el texto de **Rodrigo Marco** (o Álvarez), *“breve compendio de la carpintería y tratado de lo blanco, con algunas cosas tocantes a la jeometría y puntas del compás”*, publicado en 1674, contiene parte del tratado de López de Arenas, copiado literalmente, a partir del undécimo capítulo (Candelas, 1998). Sin embargo, se detiene en las explicaciones de cada una de las partes de la estructura inferior de la armadura: soleras, tirantes, estribos, etc., se centra en la explicación de las armaduras de limas derivadas de la estructura de par y nudillo, añade datos como la ejecución de armaduras para cúpulas (figura 25), o el sistema de estribado y en el capítulo 50: *Como Aras esta Armadura Desta Cupula Decarpintería*, se refiere a la cúpula encamonada, con claras referencias a fray Lorenzo, aunque no le cita (Toajas, 1989). En su descripción, Álvarez (1674) escribe:

«Porque no ygnoren algunos maestros de carpintería la execución de la fabrica de chapiteles, pondré aquí la planta y diseño desta cúpula, y entenderán que es sacada por otra luz que yo he tenido, es que en mis primeros años de mi infancia travaje en Madrid en algunos chapiteles, en Salamanca en el de los Agustinos Descalzos, y también maestré el de los padres clérigos Menores y Trinitarios Descalzos.»

La influencia de fray Lorenzo de San Nicolás en Marco Álvarez se puede relacionar con haber sido este último discípulo directo del agustino, trabajando juntos en la Iglesia de las Agustinas de Salamanca (1675-1679), cuyo proyecto era de fray Lorenzo y Marco Álvarez uno de los canteros de fábrica, cuyo contrato lo firma con fecha de 29 de marzo de 1675 (Madruga, 1983).

Figura 25. Armadura de chapitel, muchas veces confundido con el sistema de cúpula encamonada (Álvarez, 1674).

3. Antecedentes

En 1681, **Pierre Le Muet** (1591-1669), arquitecto, ingeniero militar y escritor francés, escribe "*Manière de bâtir pour toutes sortes de personnes*", cuyo objetivo es orientar a los sectores implicados en la edificación y contiene un amplio catálogo de tipos empleados en la construcción en el París de principios del siglo XVII, arquitectura doméstica, palacios y grandes villas, mediante plantas, alzados, secciones y ocasionalmente detalles constructivos. Su gran aceptación se comprueba debido a las cinco reediciones en el siglo XVII, con adiciones de ejemplos de obras.

En las láminas relativas a las mansardas se puede ver el intradós curvo en su parte inferior, sostenidas por la estructura superior (figuras 26 y 27).

Figura 26. Detalle de cubierta cuyo espacio abovedado cuelga del tirante inferior de la cercha (Le Muet, 1681).

Figura 27. Detalles de mansardas con el intradós colgado curvo en su parte inferior (Le Muet, 1681).

Diez años más tarde, **Pierre Bullet** (1639-1716), arquitecto francés, publica en 1691 "*L'Architecture Pratique*", tratado general de arquitectura cuya finalidad es ofrecer un manual práctico, además de técnico. Se describen: forjados, entramados, tabiques, escaleras, aunque la parte más extensa es la relativa a cubiertas. Bullet realiza un recorrido histórico a través de los autores clásicos, comparando las soluciones italianas y francesas (Gómez *et al.*, 2000).

Aunque no desarrolla bóvedas encamonadas, si describe cubiertas de madera con pares curvos y mansardas similares a las ya estudiadas (figura 28).

Figura 28. Distintas soluciones de cubierta de madera (Bullet, 1691).

En ese mismo año, se difunde, el texto "*Cours D'Architecture*", 1691, de **Augustin-Charles D'Aviler** (1653-1701). Este arquitecto francés realiza un estudio de los órdenes arquitectónicos similar al de Vignola. Su obra consiste en un tratado general de arquitectura cuyo objetivo es el estudio de la teoría de los órdenes, aunque incluye un capítulo sobre carpintería de armar. Se definen detalladamente las armaduras quebrantadas o mansardas (figuras 29 y 30). Considera que el uso de madera en la construcción permite un ahorro económico, espacial y de peso.

Figura 29. Techos abovedados mediante piezas curvas colgadas de la estructura superior (D'Aviler, edición 1738).

3. Antecedentes

Figura 30. Bóveda colgada de la estructura superior (D'Aviler, edición 1738).

En la parte dedicada a las estructuras de madera, representa una cúpula de faldones curvos sobre planta cuadrada, una cúpula peraltada sobre planta circular y estructuras formadas por tirantes, riostras y puntales de características similares a las soluciones encamionadas de De l'Orme, sin entrar tampoco a describirlas (figura 31).

Figura 31. Distintas soluciones de cubiertas de madera (D'Aviler, edición 1738).

3.1.3. Siglo XVIII

En España, gracias a San Nicolás, las referencias sobre bóvedas encamionadas figuran en los textos de la época. En Francia, cuyos tratados siguen siendo los más numerosos, aun siendo cuna de Philibert de l'Orme, sólo aparecen ilustraciones que recuerdan su método, sin centrarse en explicar su construcción. En esta situación encontramos los escritos de Jombert y Bélidor, a los que nos referimos a continuación.

Charles Antoine Jombert (1712-1784), escritor y editor francés, se basa en tratados anteriores (Vitruvio, Palladio, Bullet, etc.) para redactar un manual sobre la construcción práctica, similar al de Muet, en el que desarrolla detalles constructivos de ejemplos de viviendas. Nombra varias veces a Philibert de l'Orme, pero por sus soluciones en la cimentación y el trabajo con la piedra, no por su sistema encamionado.

En sus láminas relativas a las cubiertas de madera en los edificios, se observan mansardas cuyo intradós están formado por piezas rectas en vez de curvas, (figura 32).

Figura 32. Lámina de construcción en madera, donde incluye las reglas de trazado y los tipos básicos de armaduras (Jombert, 1740).

En 1729, **Bernard Forest de Bélidor** (1698-1761), publica su obra *“La Science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d’architecture civile”*. En el libro 2, *de la Mécanique des Voûtes*, sigue el análisis de La Hire (1712) y se centra en el cálculo del empuje de los arcos, con el fin de aprovecharlo para proyectar los estribos de los puentes. Su objetivo era elaborar una normativa para la construcción (Heyman, 2004). En sus dibujos de soluciones de cubiertas, se observan elementos curvos colgados de la estructura superior (figura 33).

Figura 33. Detalles de soluciones de cubiertas y puentes (Bélidor, edición 1813).

En 1756, **Juan José de Navarro** (1687-1772), español nacido en Mesina, primer Marqués de la Victoria y nombrado Director General de la Armada en 1750, finaliza en 1756 su manuscrito *“Diccionario demostrativo de la configuración y anatomía de toda arquitectura naval moderna”* ya presentados sus fundamentos en 1740 cuando ingresó en la Real Academia Española. Su obra, compuesta por 129 láminas, conservadas en el Museo Naval de Madrid, que escribió y diseñó entre 1719 y 1756 es, sin duda, el compendio y resumen del ingente esfuerzo llevado a cabo en España durante la primera mitad del siglo XVIII para revitalizar la fabricación de navíos, medio fundamental para ejercer el Poder Naval en los grandes espacios oceánicos que España había dominado desde el siglo XVI y se disputaba con la Armada inglesa, tras un siglo de deterioro. En su obra, el Marqués de la Victoria, muestra *“todos los maderos y piezas de construcción que se emplean a formar un navío desde el corte de los monte asta su total aparejos”* (figura 34 y 35).

Figura 34. Diferentes figuras de troncos y ramas de árboles destinadas para la construcción de navíos, lámina 20 y 21 (Navarro, 1756).

3. Antecedentes

Figura 35. Representación de las principales piezas de las cuadernas (Navarro, 1756).

En construcción naval, también destaca **Henri-Louis Duhamel du Monceau** (1700-1782), ingeniero naval, físico, jurista, botánico, químico, agrónomo, inspector general de la marina, escritor y científico francés, escribió sobre temas muy variados: agricultura, selvicultura, fisiología vegetal, meteorología, entre otros. En 1758 publica *“Les éléments d’architecture navale”*, 1758, donde se observan las distintas escuadrías y piezas que conforman el casco de los barcos, con el mismo interés de Juan José Navarro, el Marqués de la Victoria, pero finalizado ocho años antes (figura 36 y 37).

Figura 36. Piezas que configuran el casco del barco (Duhamel, 1758).

Figura 37. Colocación de las piezas de madera para conformar en casco del barco (Duhamel, 1758).

Aunque no se puede relacionar la propuesta de la construcción de cuadernas de la arquitectura naval con el sistema planteado por De l'Orme. Las piezas de madera usadas para conformar los cascos de los barcos eran piezas largas curvadas mediante la aplicación de calor o labradas mediante azuela en escuadrías de madera procedentes de árboles que lo permitiesen. Además, no se aprecian solapamientos de piezas planas, cortas y delgadas para generar la forma de arco.

En el mismo año que la obra de Duhamel, se publica en Viena el libro *Elementos de toda la arquitectura civil* del padre jesuita **Cristián Rieger** (1714-1780). Nacido en Viena, profesor de matemáticas y de arquitectura, es uno de los máximos representantes del crecimiento cultural y científico de la corte imperial vienesa en la mitad del siglo XVIII. En su estancia en Madrid, desde 1760 a 1767, como Cosmógrafo Mayor de Carlos III en el Consejo de Indias y Maestro de Matemáticas en el Colegio Imperial de Madrid, regido por la Compañía de Jesús, estuvo relacionado con la Academia de Bellas Artes de San Fernando, intentando implantar la nueva enseñanza de arquitectura ligada al profesional de elevadas competencias técnicas e intelectuales, y separarla del mundo tradicional de los alarifes y maestros de obras (Florensa, 1948). Durante su etapa madrileña, su libro fue traducido por Miguel de Benavente (1763), cinco años después de su publicación original. Su obra se convertiría en un hito de la renovación de la teoría de la arquitectura en la España de Carlos III (Calatrava *et al.*, 2008).

Rieger (1763) hace referencia a las maderas aptas para edificación y armaduras y describe como se realizan las cimbras para la construcción de arcos:

«Para la construcción de los arcos se preparan tablas de la misma figura del arco, y se aplican dos, ò tres de estos arcos, según lo pida el grueso del arco, que se vâ à fabricar. Estos se ponen sobre las paredes, ò pilares: se les ponen encima otras tablas travesadas, que son las que reciben los materiales, de que se forma el arco. Todo este armazón de madera se afirma con puntales, hasta que el arco se seque, y entonces se quitan. *El modo de armar estos arcos, que se usa en España, es muy sencillo, y muy conveniente.*»

Jacques-François Blondel (1705-1774), arquitecto y urbanista francés, destaca como uno de los más importantes teóricos de la arquitectura del siglo XVIII. En su publicación de 1771 "*Cours d'Architecture, ou traité de la décoration, distribution et constructions des bâtiments*", recopila las conferencias que imparte en las escuelas técnicas de Francia, en las que solamente trata el tema de las bóvedas de madera compuestas por elementos lineales (figura 38).

Figura 38. Armaduras de cubiertas con perfiles rectos (Blondel, 1771).

El texto fue continuado por **Pierre Patte** (1723-1814), que añadiría nuevos temas en los años siguientes. Sin embargo, no trata las bóvedas encamonadas, aunque si nombran varias veces a Philibert de l'Orme en lo referente a sus diseños arquitectónicos, así como su propuesta del Louvre (Blondel, 1771).

En la lámina relativa a la sección del Louvre¹², realizada en 1756 (figura 39), y en la sección longitudinal del Ayuntamiento de París (figura 40), se aprecia que las cúpulas, realizadas en madera, cuelgan de la estructura principal de la cubierta (Blunt, 1983).

¹² En 1564, Catalina de Médici había encargado a Philibert de l'Orme la construcción de la segunda residencia real al oeste del Louvre, en los jardines de las Tullerías. Esta construcción constituye la primera ampliación del futuro museo, puesto que en 1595 ambas residencias se unieron.

Figura 39. Dibujo del Louvre (Blondel, 1771).

Figura 40. Sección longitudinal en perspectiva del Ayuntamiento realizada por Blondel en 1756 (Biblioteca Digital Hispánica, 2016).

Desde la mitad del siglo XVIII, las teorías de la ilustración francesa se propagan fácilmente, constituyendo un punto de referencia para los italianos. En este contexto, **Francesco Milicia**, en *"Me Principi di architettura civile"*, realiza notas técnicas sobre la técnica de construcción de De l'Orme, lo que indica que hubo difusión de sus ideas, pero sin demasiado interés real. El florentino **Giuseppe Del Rosso**, consiguió difundir las técnicas de construcción francesas en Italia, mediante su libro *"Pratica di ed Economia dell'arte fabbricare"* en el que compara los sistemas constructivos de ambos países, como los descritos por León Battista Alberti, Vincenzo Scamozzi y Bernard Bosque de Belidor. En 1797, publica *"Della fácil de costruzione 'Ponti di legno por Torrenti e Piccoli fiumi"*, donde describe la construcción de puentes realizados mediante pequeñas piezas de madera, similar a lo descrito por de l'Orme, así como sus ventajas: disponibilidad de materia prima y ahorro (Rita, 2009).

Giuseppe Valadier (1762-1839), arquitecto, urbanista, orfebre italiano y el máximo exponente del neoclasicismo en Roma, describió las características de las bóvedas encamionadas italianas, mostrando las similitudes con las descritas por Fray Lorenzo de San Nicolás. Las bóvedas se suspenden de la estructura superior y están conformadas por camones rectos, el recorte en el extradós se consideraba perjudicial para la estructura, debido a que se debilitaba la pieza en el sentido de las fibras, tal y como se documentó en la bóveda encamionada del Palacio Serristori en Florencia (Tampone, 2001).

El primer autor que trata el tema de un proyecto en madera con rigor técnico es **Nicolas Le Camus de Mézières** (1721-1789), arquitecto y teórico francés, que escribe en 1781 "*Le guide de ceux qui veulent bâtir*" (Le Camus, 1781) y en 1782 "*Traité de la force des bois*". En el último texto publica los resultados experimentales y modelos teóricos de flexión en vigas de madera (figura 41), aunque no incluye estudio de arcos, solamente de piezas planas.

Figura 41. Ensayo de viga (Le Camus, 1782).

Hasta finales del siglo XVIII no es realmente redescubierta la personalidad y obra de Philibert de l'Orme, gracias al resurgimiento del estilo gótico y a la reedición del tratado de **Francois Derand** "*L'architecture des voutes, ou l'art des traits et coupes des voutes*", realizado por François Amédée Frézier, donde se elogia la arquitectura gótica por sus aspectos estructurales y funcionales, aunque no por sus características estéticas.

En 1783, **Jean Guillaume Legrand** (1743-1808) y **Jacques Molino** (1743-1831) construyeron la cúpula de “*Halle aux blés*” de 39 metros de luz, que se convirtió en el mejor ejemplo de las cualidades de la carpintería de Philibert de l’Orme (figura 42). Es a partir de ese momento, cuando la obra del último comienza a tener difusión, y en el siglo XVIII empieza a aparecer en la mayoría de los tratados.

Figura 42. Cúpula de Halle aux blé (Krafft, 1805).

En España, gracias a **Benito Bails** (1731-1797), que estudia en la universidad de Perpiñán y se desplaza luego a París, se dispone de la traducción de diversos escritos de la época. Este matemático y arquitecto español de la ilustración, publica en 1783 “*Arquitectura Civil*”, cuyo objetivo es generar un texto de enseñanza de la forma más clara y completa, por ello, reprodujo el material que estaba mejor escrito sobre cada tema¹³ (Abellán, 1981).

Cita a Fray Lorenzo al hablar de las armaduras, pero no refleja las bóvedas encamionadas, ya que acude a Blondel reproduciendo la armadura de la cúpula de Val-de-Grâce de París (figura 43) (Navascués, 1983).

Pocos años después de su muerte, se imprimió el “*Diccionario de Arquitectura Civil*”¹⁴ (Bails, 1802), donde define camón como:

¹³ Sus publicaciones tuvieron un elevado número de ediciones, algunas en vida del autor y revisadas por Agustín de Betancourt. Esto se debe a que eran texto obligatorio en las academias de Bellas Artes y Escuelas de Dibujo y otros centros de prestigio en España de segunda mitad de siglo XVIII, como la Academia Militar de Matemáticas de Barcelona y la Escuela de Matemáticas de la Real Sociedad Económica Aragonesa de Amigos del País.

¹⁴ Bails realiza un avance de su Diccionario en la primera edición de *Arquitectura Civil* de 1783 pero lo omitió en las posteriores, posiblemente pensando en la futura publicación del Diccionario.

3. Antecedentes

«Madero principal de una armadura de forma curva, los pares curvos son camones.»

Y cerchón, de forma similar al camón:

«Lo mismo que camon. Especie de par, ó contrapar curvo que sirve en las armaduras de las cúpulas, en las cimbras.»

Figura 43. Blondel-Patte, "Cours d'Architecture", t. VI, pl. CXXIII. Charpente du dôme du Val de Grâce (Bails, 1802).

3.1.4. Siglo XIX

A finales del siglo XVIII y principios del XIX, el sistema de Philibert de l'Orme aparece en los diseños de puentes de América del Norte. Paine, Palmer, Wernwag y Burr diseñaron una estructura de arcos de madera combinados en una cercha.

William Paine diseñó el puente Piscataqua en Portsmouth, New Hampshire, construido en 1794 (figura 44). Con una luz de 719 metros y una anchura de 11 metros, era considerado como una obra maestra de la arquitectura y conocido como el «*gran Arco*» ya que en el centro había un imponente arco de 68 metros de luz, y 5 m de canto. Las piezas se fabricaron con madera curvada con la dirección de las fibras orientada en dirección del arco, es decir, de forma paralela a la directriz. Los vanos de aproximación estaban constituidos por una armadura de rollizos que se unían a las cerchas del arco (Miller *et al.*, 2014).

Figura 44. Representación del puente Piscataqua en Portsmouth, New Hampshire (Griggs, 2013).

El Puente Haverhill en Massachusetts, también de 1794, es similar al anterior, con 3 arcos, cada uno de ellos de 55 metros de longitud, incluía en uno de sus extremos un tramo levadizo de 9 m de longitud.

En 1804, **Timothy Palmer** construyó el «*Permanent Bridge*» sobre el río Schuylkill en Filadelfia (figura 45), que se mantuvo en pie hasta 1850 en que fue sustituido por un puente de madera más moderno a la vez que se ensanchaba para permitir el paso de vagones de ferrocarril. Como casi todos los puentes construidos por este gran ingeniero era de tres vanos de cerchas en forma de arco, que en este caso era continua; uno central de 59,5 metros y dos laterales de 45 m cada uno (Magazine of History and Biography, 2016).

Figura 45. Diseño del «Permanent Bridge» sobre el río Schuylkill, Filadelfia (Griggs, 2013).

El primer puente cubierto que se construyó en Norteamérica fue el «*Waterford Bridge*», 1804, sobre el río Hudson en Nueva York. Fue construido por **Theodore Burr** con madera de pino amarillo. Consta de cuatro arcos con luces de 47, 49, 53 y 55 metros.

Lewis Wernwag (1770 - 1843) fue otro importante ingeniero especializado en la construcción de puentes. Durante los 27 años de su carrera como ingeniero construyó 29 puentes. El más emblemático de ellos es el «*Colossus*» construido en 1812 sobre el río Schuylkill, Pensilvania, con una luz de 102 metros. Estaba constituido por cinco arcos de madera paralelos, cada uno de ellos con 6 metros de altura. La estructura estaba formada por tres costillas de madera, cada una de cuatro pies de profundidad y un pie de espesor, formadas por seis capas de tabloncillos de dos pulgadas de espesor cada uno. Charles Augustin Coulomb y Gaspard-Francois-Marie Clair-Riche De Prony expertos destacados ingeniería, mecánica aplicada, y obras públicas de grandes luces, consideraron que su solución procedía de un artista ingenioso. El puente, que no se patentó hasta 1829, fue destruido por el fuego en 1831 (Peraza, 2008).

Otros puentes construidos por este ingeniero fueron el «*Economic Bridge*» en 1810 sobre el río Nashamom en Pensilvania, basado en una estructura en voladizo; el «*New Hope Bridge*» sobre el río Delaware, Pensilvania, construido en 1813-14 con 6 arcos con una luz de 53 metros.

A finales del siglo XVIII y primera mitad del siglo XIX se publicaron numerosos estudios sobre análisis estructurales, entre ellos destacamos a Gilli, Karsten, Zimmermann y Ardant.

En 1797, el arquitecto alemán **David Gilly** (1748-1808) publica un tratado de carpintería donde incluye el sistema descrito por de l'Orme y añade sus propias ideas teóricas (figura 46). Analizó los esfuerzos cortantes en los apoyos e identificó los lugares de mayor esfuerzo en los arcos (Gilly, 1797). El ingeniero Johann Albert Eytelwein (1764-1848) consideraba las uniones de madera como conexiones rígidas. Los ingenieros de mediados de siglo XIX consideraron que los arcos que mejor optimizaban la transmisión de fuerzas de compresión eran los de fábrica, lo que generó un abandono del sistema realizado en madera.

Figura 46. Láminas de David Gilly donde se representa el sistema de arcos encamionados de Philibert de l'Orme (Gilly, 1797).

En 1805, **Jacob Cristiano Karsten**, profesor alemán de la Academia de Rostock, publicó un ensayo sobre tablas curvas, llegando a la conclusión de que los techos de forma parabólica eran los que más resistían (Karsten, 1805). A partir de los ensayos realizados por Pieter van Musschenbroeck (1692-1761), Karsten dedujo las fórmulas necesarias para determinar la altura de los camones, cuya resistencia variaba con el cuadrado de la altura. Sin embargo, en sus estudios consideraba las uniones fijas. Según los cálculos de Karsten, una viga curvada era once veces más fuerte que una lineal.

En los estudios de **Johann Franz Xaver Maschek** y **Franz Joseph Ritter von Gerstner** (1756-1832), sobre la capacidad de carga de puentes realizados mediante arcos encamionados, atribuyeron la falta de rigidez de las articulaciones a la deformación de la madera bajo fuerzas de compresión. El fracaso de las estructuras analizadas se debía a la desviación de la línea prevista de empujes.

En la misma línea de estudio, **Franz Ernst Theodor Funk**, ingeniero hidráulico, estudió el comportamiento de varios modelos formados por dos arcos encamionados separados a 60 centímetros y arriostrados entre ellos, midiendo sus deformaciones al aumentar las cargas. El modelo siempre falló por las articulaciones, por lo que Funk propuso fortalecer las articulaciones mediante la adición de tablones (Funk, 1812).

Zimmermann, realizando modelos a escala, registró el comportamiento de la estructura hasta llegar al colapso. En sus ensayos (figura 47), el fallo de la estructura siempre se localizó en las articulaciones inferiores, por lo que sugirió fortalecer los soportes del arco mediante secciones transversales de mayor dimensión (Zimmermann, 1830).

Figura 47. Modelo de ensayo realizado por Zimmermann (1830).

Paul Joseph Ardant, profesor de arquitectura y construcción en la *Ecole d'Applications de l'artillerie et du génie* de Metz, como Zimmermann anteriormente, en 1840, realizó experimentos sobre cerchas sometiénolas a cargas en sus contornos curvos mediante cuerdas y poleas (figura 48). Fue el primero en aplicar, en sus análisis, el comportamiento elástico de los materiales, de acuerdo con la teoría de la elasticidad de Henri Navier (1785-1838). Realizó 15 modelos, a escala, de arcos encamionados con luces alrededor de 12 metros y cargas individuales dispuestas simétricamente, en los que midieron la deformación en la clave y observó que las estructuras fallaban en sus uniones. Los camones giraban por sus uniones, hundiéndose en la clave y elevándose en la zona de los arranques fallando por cizallamiento paralelo a la fibra (deslizamiento) en la posición de los clavos (Ardant, 1840). El desarrollo de los arcos tipo Emy y de las estructuras metálicas hicieron que el sistema de Philibert de l'Orme acabase en el olvido.

Figura 48. Modelo de ensayo realizado por Ardant (1840).

Con respecto a los tratados de arquitectura, uno de los más importantes del siglo XIX es el realizado por **Jean Rondelet** (1743-1829). El arquitecto y teórico francés, publica en 1810 "*Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*", formado por 7 volúmenes, en los que trata diversos temas. En el cuarto tomo, centrado en la carpintería, realiza una introducción, basándose en el Tratado de Vitrubio, en la que expone las especies de madera adecuadas para su uso en la construcción de edificios. Destacando el *Robur*¹⁵, *Quercus*, *Aesculus*, *Cerrus*, *Suber*, *Pinus*, *Cupressus*, *Larix*, *Abies*, *Fagus*, entre otros. También incluye especies asiáticas, africanas y americanas, e indica sus características y utilizaciones óptimas.

Las maderas no han gozado de un interés especial por parte de carpinteros y arquitectos hasta que no se supo valorar bien las cargas diferenciales que soportaban las distintas variedades, pues el concepto de especie no poseía la significación científica de la actualidad. Procede aprovechar una obra del XIX basada en una del mundo clásico para plantear la ambigüedad que este recurso ha sido tratado históricamente. Las asignaciones de los nombres latinos utilizados por Vitrubio para designar a las maderas son resultado de opiniones que no tiene por qué ser correctas, por no ser coincidentes las voces latinas con el conocimiento actual. *Robur*, para Jacques André (1985), traductor de la Historia natural de Plinio al francés, le identifica con *Quercus petraea*. Aduce que el nominativo de *robur*, *-oris*, *rōbus* «rojo» alude al color de su follaje, el único de todos los robles que lo mantiene del otoño a la primavera. *Quercus*, considera que es un roble sin especificación (André, 1985). *Aesculus*, lo identifica con los robles y alude al vasco eskur, «roble» (André, 1985). *Cerrus*, considera de origen no indoeuropeo, le asigna a *Quercus cerris*, roble presente en Italia, pero no en España. El término de Vitrubio lo compara con el vascuence *arta-karro*, o el catalán *carrasca* (André, 1985). *Suber*, su relación con el gr. *σῦφαρ* «piel rugosa» la considera aceptable, por lo identifica con el alcornoque (*Quercus suber*) (André, 1985). *Pinus*, aunque en muchos casos es imposible identificar la especie en los textos, le asigna como principal acepción, pino piñonero (*Pinus pinea*), (André, 1985). Apoya esta idea el lat. *pinaster*, o pinastro, «pino falso», «pino bastardo» por no dar los piñones comestibles como el piñonero, cualidad que la poseen todas las especies actuales de pinos a excepción del piñonero. *Cupressus*, es aceptada por todos los autores como ciprés (*Cupressus sempervirens*) (André, 1985).

Larix, André (1985) lo identifica en primer lugar con *Larix decidua*, el alerce, en segundo lugar, con el pino piñonero cuando traduce el *πεύχη* de Teofrasto y en tercer lugar al pino laricio (*Pinus nigra*

¹⁵ Se considera que *Robur* hace referencia a la especie *Quercus robur* L. y *Quercus* a *Quercus ilex* L.

subsp. *laricio*). Sin embargo, el alerce solo vive de modo natural en los Alpes y Cárpatos, con poblaciones disjuntas en las tierras bajas del norte de Polonia y sur de Lituania. El alerce es la única conífera europea que pierde sus acículas, por lo que sería una especie con este carácter a destacar, pero que no es reflejado nunca por los autores antiguos. Plinio en su *Naturalis Historia* (XVI) dice *Picem in Europa sex genera cognaturum arborum ferunt* (la pez en Europa la producen seis géneros emparentados) *pinus, pinaster, picea, abies, larix* y *taeda*. Del «*larix*» señala que en Troade, situada en la cota de Anatolia se diferencia la especie de montaña de la del litoral, y recuerda que los autores no se acuerdan de las denominaciones de cada especie, por lo alude al punto de vista romano. En nuestra opinión el «*Larix*» de Vitrubio se refiere al *Pinus nigra*, especie que fue muy abundante en las llanuras aluviales del río Po, localizado en la Italia septentrional y que fluye, de oeste a este, desde los Alpes cocios al mar Adriático, donde desemboca al sur de Venecia. *Larix* fue escogido por Miller (1754) para designar a árboles de las zonas templadas y frías del hemisferio boreal y ello ha contribuido a asignar a especies de este género los árboles mencionados por los autores antiguos. Los ejemplos utilizados, sin ser exhaustivos, permiten entender la falta de idoneidad de confrontar nombres antiguos con especies modernas. Máxime cuando en el momento en que Vitrubio las menciona la deforestación era un carácter destacado.

Basándose en el Tratado de Serlio, muestra una preocupación por salvar grandes luces con piezas de pequeña longitud, haciendo hincapié en los tipos de empalmes entre las piezas de madera, caja y espiga, muescas o media madera. En el texto se explica que cuando las uniones se encuentran bien ajustadas, el resultado es similar al de una viga de dimensiones continuas. Rondelet (1810), comenta:

«Serlio donne un moyen fort simple pour former des planchers avec des poutres ou des solives trop courtes pour aller d'un mur à l'autre, en les faisant porter alternativement sur le mur et sur le milieu de chaque pièce [...] Les pièces de bois qui forment ces planchers peuvent s'assembler les unes avec les autres à tenons et mortaises, ou par entailles à moitié bois. Il faut remarquer que par le premier moyen qui est le plus usage, les pièces ne sont soutenues à leurs extrémités que par des tenons dont la plus grande épaisseur ne peut être que le tiers de celle de la pièce, tandis que par le moyen des entailles à mi-bois, la force se trouve également partagée entre les parties qui portent et celles qui sont soutenues. Lorsque ces assemblages sont bien ajustés et que les parties qui remplissent les entailles y entre un peu de force, il en résulte presque autant de solidité que s'il n'y avait pas d'entailles. Si ce sont des solives qui n'en portent qu'une on deux autres de remplissage, on leur donnera la dix-huitième partie de leur longueur pour leur épaisseur verticale. C'est-à-dire neuf lignes par pied, au lieu de la vingt-quatrième partie, que nous avons ci-devant indiqué, à cause des assemblages.

Si l'on veut que ces assemblages soient à tenons et mortaise, on divisera l'épaisseur vertical du bois en trois parties égales, celle du milieu sera pour le tenon ou la mortaise [...] Pour faire sentir la bonté de ce moyen, nous ferons remarquer que deux poutres ou solives ajoutées l'une au bout de l'autre, sans assemblage pourraient se soutenir par ce seul procédé, car si l'on empêche le joint de se désunir par le bas, le haut servira de point d'appui pour lui procurer la fermeté nécessaire. »

En el tratado, explica el modo de construir diversos tipos de cubierta de madera, típicas de determinados lugares de Europa, donde nombra a Jean Charles Krafft, y distintas posibles soluciones de mansardas, en las que nombra a Bernard Forest de Bélidor y Pierre Bullet, todos ellos franceses. También hace referencia a Mathurin Jousse, Nicolas Founeau, Stierme (figura 49) y Benito Bails, representando soluciones de cúpulas realizados por éstos.

Figura 49. Cúpula de M. Stierme, lámina CXXV (Rondelet, 1810).

En la figura 49, se observa una mitad de la planta y la sección de la cúpula, realizada mediante arcos de camones para generar el contorno exterior e interior. Para Rondelet, este sistema no producía gran ahorro:

« Une moitié du plan et de la coupe de ce dôme, indique des courbes en planches au lieu de chevrons, pour former le galbe extérieur et la surface de la voûte intérieure ; mais il serait facile de démontrer que ce changement qui formerait un ouvrage moins solide, ne produirait pas beaucoup d'économie. »

Con respecto a las bóvedas encamionadas, considera que la forma correcta de construirlas es la planteada por de l'Orme; evitando realizar perforaciones y cajeados en el centro de los camones para introducir clavijas debido a que debilitan la estructura. Establece que la mejor solución es clavando entre si las piezas de madera, lo que favorece el movimiento natural de la madera tras cambios de humedad y evita la aparición de fendas. Su solución implica colocar las riostras en los bordes de los arcos (figura 50). Para proporcionar mayor estabilidad a la estructura, propone unir las bóvedas a una armadura formada por pares y tirantes (Hurtado, 2011).

« Philibert de Lorme fixe la longueur de ces planches pour toute sortes de courbes à 4 pieds, mais nous pensons que lorsque la courbe est une demi-circonférence ou un arc de sercle dont la courbure est uniforme, il ne faut pas s'astreindre rigoureusement à cette mesure; il vaut mieux en prendre une un peu plus ou un peu moins longue, qui divise la courbe en un nombre quelconque de parties égales. Cette longueur peut même varier pour chaque division, dans l'ellipse dont la courbure n'est pas uniforme, afin que les fibres des planches puissent se eroiser, ce qui donne plus de roideur aux courbes et empêcher les planches de se fendre, il est faciles de voir, que moins il y a de courbure, plus il faudra de longueur pour obtenir cet avantage [...].

Nous pensons qu'au lieu des liernes qui traversent ces courbes, il vaudrait mieux les placer dessus et dessous, en les entaillant à moitié bois et les clouant sur chaque courbe, ce qui produirait autant de solidité avec moins d'ajustement et de dépense. D'ailleurs les bois étant sujets à augmenter de grosseur par l'humidité et à diminuer dans la sécheresse, les liernes et les clés de bois qu'on fait entrer de forcé dans les mortaises, peuvent, dans un tem humide, faire fendre les planches des courbes et les liernes, et rendre leur assemblage trop lâche dans les tems de sécheresse. »

Figura 50. Lámina CXXVIII donde se explica el sistema de camones de Philibert de l'Orme (Rondelet, 1810).

Cita a M. Lacase quien ideó un sistema de ensamblaje entre camones mediante el sistema de unión de rayo de Jupiter para conformar un arco gótico (figura 51). Rondelet opina que este sistema reúne todas las ventajas del método de Philibert de l'Orme, pero con menos gasto. Sin embargo, considera que es un sistema más teórico que práctico. No se ha encontrado ninguna obra existente con este sistema de unión.

«M. Lacase, entrepreneur de charpente à Paris, a trouvé un moyen fort ingénieux de former des courbes pour les combles, avec des solives de 5 et 7 pouces de grosseur, refendu en deux et assemblées à trait de Jupiter. Ces courbes qui forment un cintre gothique, sont réunies par des liernes et des entretoises. Ce nouveau moyen réunit tous les avantages de la méthode de Philibert de Lorme, avec moins de dépense.»

Figura 51. Lámina CXXX del Tratado de Rondelet, aplicación del método de M. Lacase (Rondelet, 1810).

La labor de **Armand-Rose Emy (1771-1851)**, coronel francés, en el ámbito de las estructuras de madera, se debe a su innovación para fabricar formas curvas mediante piezas acopladas de tabla en sentido horizontal, considerándose una vuelta de tuerca al sistema planteado por de l'Orme. En el sistema de Emy, las tablas no requerían de perfil curvo debido a que las piezas rectas se colocaban arqueadas como roscas superpuestas. Los ensamblajes alternados se realizaban mediante muescas y se trababan mediante pasadores y bridas metálicas o tochos de madera. Este sistema conlleva una gran diferencia con el de Philibert de l'Orme (figura 52), debido a que es necesario el empleo de tablas de gran longitud para que su flexión sea más sencilla. Aun así, las juntas debían contrapearse y las cerchas debían arriostrarse adecuadamente (Mongelli, 2006).

Figura 52. Planta, sección y detalles del sistema de De l'Orme, lámina 102 realizada por Emy (1828).

El coronel realizó sus arcos Emy mediante tablonos de abeto de 55 mm de espesor, 0,13 m de ancho y 12-13 metros de longitud. Los tablonos se superponen unos sobre otros y se curvan, utilizando tornillos y barras de hierro para unirlos (figura 53). La primera obra donde mostró su sistema innovador fue en la cubierta del picadero del cuartel de Libourne, 1819, de 68 pies de luz, posteriormente en el cuartel de Marac¹⁶, de 1825, con un hangar de 65 pies de luz (figura 54) y un año después en el cuartel de Libourne (Gómez, 2013).

Figura 53. Solución planteada por el Coronel Emy (Oslet, 1890).

¹⁶ La cercha fue cargada con 11.000 kg sin producirse ninguna perturbación del sistema. Con su método, consiguió llegar hasta luces de 100 metros.

Figura 54. Planta y sección longitudinal y transversal del cuartel de Marac, lámina 102 realizada por Emy (1828).

El mismo Emy indica en la memoria publicada en el año 1828, los siguientes datos:

«Los arcos están formados de tablonos de abeto, de 0,055 m de espesor por 0,13 m de ancho y 12 á 13 metros de longitud, todos ellos quedan fija é invariablemente unidos en superposición; por medio de pernos y cinchos de hierro. Cuando los tablonos no son bastante largos para formar el arco de una sola pieza, se ensamblan á juntas encontradas, evitando que las juntas caigan hacia los riñones del trasdós y en el vértice en el intradós. Los pernos de retención tienen unos 0,018 de diámetro, y la longitud que carga el espesor del arco, distribuyéndolo de 0,80 m en 0,80 m poco más ó menos. Los cinchos son de hierro aplanado y se colocan en los intervalos.»

Mientras tanto, en Inglaterra, **Thomas Tredgold** (1788-1829), ingeniero inglés, publica en 1820 *“Elementary Principles of Carpentry”*, la primera obra de referencia sobre estructuras de madera basada en conocimientos científicos.

Describe las propiedades de la madera, sus tratamientos, su conservación, la clasificación de la madera por especies y sus características físico-mecánicas, la resolución de fuerzas y tensiones en vigas y distintas soluciones constructivas para cubiertas, cúpulas, puentes, uniones, correas, etc.

En el *capítulo III: on the framing of timber, section II: Roofs*, hace referencia a cúpulas o techos cilíndricos contruidos según el principio sugerido por Philibert de l’Orme. Describe como se realiza su construcción, a base de costillas curvas, formadas por tres filas de camones¹⁷, que arrancan de una planta curva y se juntan en la parte alta (figura 55).

¹⁷ Es la primera vez que se observa el sistema encamonado realizado mediante tres filas de camones. Se desconoce el porqué de esta variación.

«Domical or cylindrical roof may be constructed of timber on the principle suggested by Philibert de Lorme. In this method, a series of curved ribs are placed so that their lower ends stand upon a curb at the base, and the upper ends meet at the top, diagonal struts being introduced between them.

These ribs are formed of planks put together in thicknesses, with the joints crossed and well bolted together: there should be at least three thicknesses in each rib, not bent, but applied flat together in a vertical planes, and their edges cut to the proper curvature; the layers of the ribs may be held together without bolts, by merely the horizontal rings or purlins, which pass through a mortise hole in the middle and have themselves a slit into which a wooden key is driven on each side of the rib, as shown in the figure. Examples of this form of roof can be seen in the Town Hall and Corn Exchange at Farnham, Surrey, built by Mr. Tarn. »

Figura 55. Detalle de cúpula según la resolución de Philibert de l'Orme (Tredgold, edición de 1885).

Tredgold describe, también, como realizar bóvedas circulares, citando como ejemplo el Palacio episcopal de Auxerre y el Wenstminster Hall. Los arcos formados mediante camones se encuentran suspendidos del tirante y aportan solidez y estabilidad a la estructura (figura 56).

Figura 56. Bóveda circular (CCC) del Palacio episcopal de Auxerre (Tredgold, edición de 1885).

«Hammer-beam roofs are sometimes found over old gothic buildings, and their forma is shown in figure 33. In this kind of roof, we may suppose that the feet of the rafters are first prevented from spreading by being framed into a tie-beam; the middle part of the tie-beam is afterwards cut away, and the remaining parts (H) are called hammer-beams. To prevent these beams from thrusting outwards, a diagonal strut (S) is framed into its inner end, and also into a vertical wall-piece (W), which is itself framed into the underside of the hammer-beam. A vertical strut (S') is also placed between the rafter and the end of the hammer-beam. By this means a considerable amount of the thrust of the rafters is thrown vertically down the walls. There will, however, always remain sufficient horizontal thrust to push out the walls, if they are not built very strong, or supported by external buttresses. One of the lightest and best combined specimens of timber framing for an open roof is in the chief apartment of the episcopal palace of Auxerre, which is now changed into the Prefecture for the department. In the engraving figure 34, will be remarked between the tie-beam B and the stay D, a series of curves CCC intended to receive oak planking or shingles, to form a circular vaulting slightly depressed in the centre. The king-post I passes down the centre of the half section of a circle, as it were, and suspends the tie-beam. The purlins, rafters, and main couples are tied together, and the former to the ridge-tree by cross pieces. The planking is nailed to the circles and the joints hidden by mouldings, which also serve to give strength and stability to the framing. The whole of the wood-work is as light as it is solid, and no particle of material has been allowed to remain that was not necessary. Several examples remain of a modification of this system, but with interior vaulting preserved. In some cases, the use of the tie-beam is dispensed with, and the rafters in each pair tied together by cross pieces as described above. In others, where the tie-beam is retained, the top stay is deflected from the horizontal, and made to form a portion of the circle to support the planking of the vaulting. The most remarkable specimen of hammer beam roof, as well as the largest and most magnificent, is that of Wenstminster Hall.»

Cuarenta años más tarde, en Escocia, **James Newlands** (1813-1871), arquitecto e ingeniero civil, publica *"The Carpenter's Assistant"*, 1860, otro ejemplo de texto de construcción práctica del siglo XIX. Recoge a todos los autores estudiados anteriormente: Rondelet, Emy, de l'Orme, Thomas Tredgold, Bullet, Mesanges, etc. En la figura 57, se observa la representación realizada por Newlands del sistema constructivo propuesto por de l'Orme.

Figura 57. Armaduras y detalles del arranque de la propuesta de De l'Orme (Newlands, 1869).

A lo largo del siglo XIX, España se caracteriza por la difusión de varios Diccionarios y Tratados sobre arquitectura y construcción. Se destacan Destacamos el realizado por Federico de Arias y Scala, Luis Gaztelu Maritorea y Antoni Rovira y Rabassa.

Federico de Arias y Scala, ingeniero español del siglo XIX. Publica la primera edición de su tratado en 1888, reeditado en 1891 y 1893, *"Carpintería antigua y moderna"*, la mejor y más completa obra sobre dicha materia publicada en España en el siglo XIX (León, 1996), donde describe las bóvedas encamionadas, pero denominándolas *"sistema de tablas puestas de plano"* (figura 58). En la edición de 1893 señala:

«Este sistema está compuesto de arcos ó semicírculos formados por [...] dos gruesos de tablas puestas de punta y cuyas juntas se dirigen al centro. En cada arco, las juntas de un grueso de tablas corresponden á las líneas de centro del otro grueso, y cada tabla sólo tiene unos 130 centímetros de largo por 22 de ancho y 27 milímetros de espesor. Los semicírculos están separados de 0,66 metros apoyando en soleras colocados en la coronación de los muros [...] o sobre las cornisas exteriores del edificio [...] En ambos casos, las cajas de estas soleras reciben á las espigas practicadas en el arranque de los arcos.

Filiberto Delorme (sic) no empleaba los pasadores para ligar las tablas de un mismo semicírculo unas con otras, puesto que cada tabla está atravesada por un solo pasador, sino que de este modo impedía, no tan sólo su resbalamiento, sí que por medio de llaves las adosaba unas á otras sin obligarlas á cerrar sus juntas.»

Figura 58. Lámina realizada por Arias y Scala (1888) donde representa el sistema utilizado por de l'Orme y de Lacasse.

Arias y Scala hace referencia a Rondelet con su mejora constructiva:

«Rondelet aconseja que todos los pasadores se coloquen en los bordes de los arcos, en muescas practicadas al efecto, elevándoles en las tablas y alternándoles, esto es, colocando uno fuera y otro dentro. [...] Las tablas están clavadas una sobre otra y los pasadores van clavados en las tablas.»

Con respecto al sistema de Lacasse, advierte las ventajas destacadas en su momento por Rondelet, pero niega dicha mejora, en cuanto a rigidez, economía y volumen utilizado:

«Con este sistema, Lacasse forma cubiertas curvas empleando maderas de 0,135 m á 0,190 m de grueso, partidas en dos y ensambladas á rayo de Júpiter. Estas curvas, formando arcos góticos, están unidas por cadenas y apoyos, y según Rondelet, el conjunto constituye un sistema con todas las ventajas del de Filiberto Delorme y con menos gasto.»

Las curvas principales [...] están ligadas por cadenas entalladas á media madera, [...]. Los intervalos entre estas curvas y las cadenas ó refuerzos están cortados ó divididos por travesaños y falsas curvas que sostienen el enlatado exterior de la cobija y el enlatado interior de sostenimiento del techo. Los travesaños ensamban á espiga cuadrada en las curvas principales, y las falsas curvas ensamban por medio de entalladuras ó muescas..

A pesar de la solidez que Rondelet atribuye á esta clase de entramados, dista mucho de poderse comparar con la del sistema de Filiberto. Las curvas del sistema Lacasse son muy estrechas, están empalmadas á hilo y su flexibilidad es mucha, mientras que la estabilidad de los arcos de 0,216 m de ancho, del sistema de Filiberto, es perfecta.

Las cadenas ó refuerzos del sistema de Filiberto que atraviesan á los arcos, no les debilita de ningún modo; por el contrario, en el sistema Lacasse, las muescas á media madera de los ensambles y de los rayos de Júpiter reducen á la mitad el ancho y resistencia de las curvas.

En cuanto á economía, el volumen de las maderas empleadas en las curvas del sistema Lacasse es evidentemente igual al empleado en el sistema de Filiberto, puesto que, si bien las curvas del primer sistema son $\frac{3}{8}$ menos anchas que los arcos de Filiberto, están en cambio más apretadas en la misma relación; luego el volumen de la madera para las curvas es el mismo. Con relación á los refuerzos, este volumen es mayor. El número de estas piezas es el mismo en ambos sistemas, sólo que en el de Lacasse son más anchas. En cuanto á los ensambles, son los mismos en los dos sistemas. Los únicos casos en que puede prestar utilidad el sistema de Lacasse, es cuando no pueda disponerse de tablas ni de madera de grande escuadría y se tenga solamente viguetas.»

Arias y Scala describe en el capítulo XXX, los arcos formados por tablas colocadas de plano, sistema Emy (figura 59).

«A pesar del mérito de la invención de Filiberto Delorme y de la elegancia de las cubiertas construidas según este sistema, siempre que sea posible disponer de grandes piezas de madera y emplearlas en toda su longitud, bajo el punto de vista de la economía, sean preferibles en esta forma que no tal como las emplea Filiberto.

La ejecución del sistema de Emy no presenta ninguna dificultad, siendo su mano de obra más fácil que la del sistema de semicírculos de tablas. En el de Emy todas las piezas son rectas; todos los ensambles están hechos por muescas, sin ninguna caja ni espiga, excepto en la cumbrera, que es como en los demás sistemas. Los procedimientos de construcción y de alzado son sencillísimos.

Emy pone la tabla entera puesta de plano, la cual por su naturaleza es recta; pero como hay medios para encorarla tanto como se desee, las encorva según la curvatura que convenga, reúne las que sean necesarias según la carga que deba recibir el arco, tratándolas bien entre sí, con lo cual constituye una armadura muy sólida.

Emy coge la tabla, la arquea, pone encima de ella otro grueso, y otro y otro, todos ellos en la misma disposición, poniendo unos á continuación de otros, si no alcanzan las dimensiones que ha de tener la bóveda, y procurando que estas uniones sean alternadas. Hecho esto, pone de distancia en distancia diversos pasadores que cojan á todas las tablas, y alternando con estos unos pinchos de hierro, para que todas las tablas trabajen unidas.

Las combinaciones de este sistema pueden variar al infinito con relación al número, la forma y la longitud de los arcos, cuya fuerza puede aumentarse según las necesidades, sin que por ello cambie el sistema, ni perjudique á la elegancia de la construcción, bastando para ello añadir tablas según las necesidades. [...].

Los arcos de Filiberto Delorme están formados por tres gruesos, á lo menos, de tablas de 12 á 13 decímetros de largo puestas de punta y de canto; los arcos de Emy, por contrario, resultan de tabloncillos largos y delgados puestos de plano unos sobre otros encorvados en forma de semicírculo.

Las gemelas normales están entalladas, así como las caras planas de los arcos, á un centímetro de profundidad, de modo que forman ensambles de dos centímetros, con el doble objeto de mantener los arcos bien apretados impedir el resbalamiento de las tablas.

Así pues, el sistema de Filiberto exige un número mucho más considerable de piezas y de juntas que el de Emy, puesto que, como ya se ha podido observar, un arco de Emy, correspondiente al mismo espacio cubierto, sólo consta de 15 piezas y de 12 juntas á lo más.

Los arcos de Filiberto Delorme dan mucha mayor cantidad de merma, bien sea á causa de la inclinación de las juntas que deben cortarse en dirección al centro, ó bien por tener que reducir las tablas á la longitud

La extraordinaria fuerza o resistencia del sistema de Emy se debe á la gran diferencia que existe en el número, la especie y la distribución de las juntas, y á la gran ventaja de conservar la madera todo su hilo en todo el desarrollo de los arcos, todo lo cual permite dar una gran ligereza á los cuchillos y poderlos espaciar de 3 metros, mientras que en el sistema de Filiberto el espaciado máximo de los arcos sólo alcanza á 0,70 m.»

Luis Gaztelu Maritorena (1858-1927), ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, profesor de cálculo infinitesimal de la Escuela de Ingenieros y Arquitectos y científico navarro que realizó brillantes estudios de ingeniería. En 1899 publica *“Carpintería de armar”*, doce años más tarde que el texto de Arias y Scala. En su obra describe las propiedades y defectos de las maderas, sus precios en el mercado, las herramientas adecuadas, ensamblajes, proporciones y distintas soluciones constructivas para emplear dicho material: cerchas, armaduras, arriostramientos, construcciones ligeras y sus sobrecargas de uso.

M.A.B. 2017

«Las cerchas de madera, sin tirante, están formadas por arcos que sostienen los pares. Los tipos de Filiberto Delorme y del coronel Emy se prestan á salvar grandes luces. La forma ojival es la más favorable para la evacuación de las aguas.

La armadura de cúpula de Filiberto Delorme se compone de tabloncillos de 1,30 m de longitud próximamente, unidos entre sí por clavos ó cabillas de madera, enlazándose las cerchas por riostras horizontales que las atraviesan y apretadas con cuñas. Estas riostras deben tener el mismo canto que los tabloncillos curvos y por tabla cuatro veces el canto. Los tabloncillos, hechos solidarios entre sí, adquieren tal fijeza que los arcos no ejercen empujes laterales sobre los muros en que se apoyan. Con este sistema se pueden construir cerchas de medio punto, elípticas, ojivales, etc. [...]. Para armaduras de 7,80 metros de diámetro, se emplean tabloncillos curvos de 0,21 metros de ancho por 0,02 metros de espesor. Para luces de 11,70 metros los tabloncillos tienen 0,27 por 0,04 m. En las armaduras de 19,5 m, son de 0,35 por 0,05 m.

Para apoyar estas armaduras en los muros se deja á un metro por debajo de su coronación un retallo de la mitad del espesor del muro, y en este retallo se coloca una carrera de 0,21 á 0,24 metros de espesor; se abren en esta pieza rebajos distantes entre sí 0,65 metros para recibir los arranques de los arcos, que hacen las veces de cabios.

Este sistema es costoso, porque los tabloncillos valen más que las piezas de escuadrías ordinarias. Para las construcciones pequeñas tiene la ventaja de ser ligero y de poderse apoyar en muros de poco espesor.

La armadura Emy para luces de 20 metros es un arco que se compone de tabloncillos estrechos de mucha longitud (12 á 13 metros por 0,13x0,055), superpuestos y encorvados según su espesor por virtud de su flexibilidad únicamente; el arco va unido por medio de manguetas-cepos á los pares exteriores. [...]. Las cerchas distan entre sí 3 metros y van arriostradas por cepos horizontales.»

Figura 60. Sistema de Philibert de l'Orme (Gaztelu¹⁸, 1899)

¹⁸ En las ilustraciones de Gaztelu se observa que, aunque describe la solución de De l'Orme, el sistema representado en las dos primeras imágenes, corresponden al modelo planteado por Rondelet.

Figura 61. Representación del sistema Emy (Gaztelu, 1899).

Un año más tarde, en 1900, **Antoni Rovira i Rabassa** (1845-1919), arquitecto español titulado en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, profesor de geometría descriptiva en la Escuela de Maestros de Obras y catedrático de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, difunde su texto *“La Madera y su Estereotomía”*, donde describe el sistema de cerchas y camones en sus dos variantes, la de De l’Orme y la de Emy, además de incluir la variante de Lacasse (figura 62).

«Dos disposiciones son las que en rigor lo constituyen, derivando cada uno de ellos según el modo como adquieran la forma curva los maderos, y así las colocaremos en dos agrupaciones especiales, á una la llamaremos, sistema de Camones de curva por canto y á la otra sistema de Camones de curva por tabla; el primero debido á Filiberto de Lorme y el segundo modificación del primero al conocido coronel Emy.

Que el sistema concebido por de Lorme, no sólo satisfacía á la economía y carencia del material de grandes dimensiones, sino que también á las condiciones de solidez, lo dice el ingenio desplegado en la superposición é íntimo enlace de todas las piezas parciales, ya con las juntas sobre macizo, el cual, al recibir las como lecho, realiza la trabazón, ya con el claveteado que las atraviesa de una á otra parte para hacerlas solidarias, ya también para aumentar la intimidad y concluidas de unificar recurriendo á las espigas y clavijas que auxilian poderosamente el contacto en fuerza del remache de las citadas clavijas.

Una modificación de semejante sistema presenta Lecaze¹⁹, carpintero de París, cual consiste en formar las curvas, no ya de tablas, sino con verdaderos maderos, cuyo grueso alcanza de 14 á 19 centímetros, rajados luego en dos y unidos á rayo de Júpiter [...] este sistema adolece del inconveniente que, siendo más largas las piezas que los fragmentos de tablas usadas por de Lorme, necesita cortar más fibras para acusar la curva del contorno, y de aquí más gasto, á la vez que se debilita más la madera.

El procedimiento de Filiberto de Lorme [...] tiene el inconveniente de debilitar algún tanto la madera cuando llega el caso de cortar las orillas de las cerchas parciales, al objeto de dar la forma curva á las caras superior é inferior del total del camón, además de ocasionar una pérdida de madera, por más que los cerchones parciales podrían ya derivar de residuos de otros trabajos. A remediar dichos inconvenientes tiende el procedimiento de d’Emy; componiendo el camón con varios tablones superpuestos flexibles y doblados ó encorvados de plano, manteniendo su curvatura por medio de tornillos, pasadores de hierro, abrazaderos, etc.»

¹⁹ En el texto original aparece escrito como Lecaze, aunque haga referencia a Lacasse.

Figura 62. Lámina de Rovira i Rabassa (1900) en el que se explica cómo curvar piezas de madera, el sistema de De l'Orme y Emy.

En Francia, al igual que en España, los tratados generales tienen gran difusión. En esta línea se encuentra **Gustave Oslet** (1852-1911), ingeniero francés que realizó el "*Traité de charpente en bois*" donde describe mediante explicaciones, dibujos en planta y sección, axonometrías y detalles constructivos, distintas soluciones de cubierta con madera, explicando los elementos que las constituyen y las uniones de las piezas. A lo largo del texto se observan distintos tipos de soluciones de cubierta mediante elementos curvos pendidos de la estructura principal. En sus láminas, se observan dos soluciones de cerchas, cuyos jabalcones son curvos, (figura 63). Representa una sección transversal y otra longitudinal, donde define cada una de las piezas y sus ensamblajes.

En la figura 65, se plantea la solución de una cercha de gran luz, 18,5 metros, cuyo arco está formado por seis tablas, de 0,22 metros de ancho y espesores de 0,03 metros, unidas entre sí mediante pernos y a la cercha principal mediante estribos.

[illegible]

Figura 66. Soluciones de mansardas curvas (Oslet, 1890).

En el capítulo IX: *Divers types de combles, II. Descombles en dôme et des combles à surfaces courbes formées par des planches*, Oslet describe cubiertas en cúpula o bóveda, reconociendo la importancia de su invención a Philibert de l'Orme:

« Philibert Delorme, architecte du temps de Henri II, frappé de la rareté et de la cherté des bois de grandes dimensions nécessaires à la composition des fermes d'une grande portée, a imaginé les charpentes connues sous son nom depuis 1561 et dont l'usage devrait être plus répandu. Il proposa de construire des combles et des dômes avec des bois courbés au lieu de fermes. Ces bois courbes étaient formés de planches posées de champ, les unes à côté des autres et reliées avec des boulons. Il appliqua cette méthode avec avantage, non seulement aux dômes, mais dans d'autres fermes très légères en apparence et néanmoins très solides. Comme nous le verrons par quelques croquis, Philibert Delorme formait de véritables voûtes en menuiserie ayant évidemment de grands avantages. Elles ne chargent pour ainsi dire pas la construction et laissent au-dessous un grand espace utilisable dans lequel on peut aisément pratiquer des logements. »

Oslet considera que las bóvedas encamonadas de De l'Orme tienen como ventaja su poco peso y debido a su disposición la carencia de empujes a la que se encuentra sometida. Sin embargo, considera que no producen un gran ahorro económico debido a la mano de obra que requiere este tipo de estructuras.

En la figura 67, Oslet describe que las cerchas se componen de piezas de madera de forma curva, que se mantienen unidas mediante una serie de clavijas, de dos en dos o de tres en tres, de manera que el extremo de un camón se corresponde con el medio del otro. Los arcos se mantienen separados a una distancia constante gracias a un sistema de entramados o nervaduras:

« Les fermes sont composées de planches courbes boulonnées jointivement deux à deux ou trois à trois, comme le montre en perspective le croquis (789), de manière que l'extrémité de l'une corresponde au milieu de l'autre. Ces planches se placent par travées de 0,66 m à 1 mètre et sont maintenues à écartement invariable par des liernes L. »

Figura 67. Detalles constructivos de bóvedas encamonadas al estilo de De l'Orme (Oslet, 1890).

3. Antecedentes

En la figura 68, Oslet representa la mejora introducida por Rondelet en el sistema constructivo de las bóvedas encamionadas, en el que las riostras se insertan en los camones mediante pequeñas muescas o rebajos tanto en su intradós como extradós. Oslet considera que esta solución es más sencilla de construir debido al ahorro de trabajo.

Figura 68. Detalles constructivos de bóvedas encamionadas al estilo de Rondelet (Oslet, 1890).

Oslet también reconoce la ventaja económica conseguida mediante el método de Lacaze, el cual realiza el ensamblaje de los camones mediante rayos de Júpiter, (figura 69).

« Un charpentier de Paris, nommé Lacaze, a fait une modification plus importante. Au lieu de composer les courbes avec des planches posées de champ et assemblées, il les forme au moyen de solives de 5 à 7 pouces (0,14 à 0,19 m) de grosseur, refendues en deux et entées à trait de Jupiter. Ce moyen réunit tous les avantages précédents, mais avec plus d'économie. »

Figura 69. Solución constructiva de bóvedas encamionadas planteada por Lacaze (Oslet, 1890).

En el tratado se explica el sistema planteado por el coronel Emy, incluyendo detalles constructivos y aclaraciones sobre sus ventajas e innovaciones.

3.2. Estudios recientes sobre las bóvedas encamonadas

Con respecto a los estudios actuales, se observan dos tipos de publicaciones, los histórico constructivos, y las relativos a intervenciones en el patrimonio histórico arquitectónico.

3.2.1. Estudio histórico-constructivo

Destaca **Pedro Hurtado Valdez**, quien se ha especializado en el tema de las bóvedas encamonadas en el Virreinato de Perú. Realiza el estudio histórico y el análisis del tipo constructivo de dicho sistema estructural. Debido a los terremotos que afectan a la zona andina de América del Sur, su estudio recoge el análisis sísmico del sistema constructivo (Hurtado, 2011).

Existen artículos anteriores a Hurtado sobre las bóvedas encamonadas en Perú, como es el caso de **Ferruccio Marussi Castellán**, quien estudia dicho sistema constructivo tradicional de los edificios patrimoniales virreinales. Marussi analiza una serie de iglesias para explicar la forma en que fueron construidas y ha realizado detalles constructivos, como se muestra en las figuras 70 y 71 (Marussi, 1986).

Figura 70. Representación de bóveda encamonada cuyas costillas arrancan de una pieza de solera (Marussi, 1986).

Figura 71. Representación de bóveda encamonada parcialmente embebida en el muro de adobe (Marussi, 1986).

En 1992, **Francisco Arriaga** describe el sistema constructivo de la cubierta del Salón de Baile del Palacio Serristori en Florencia, construido en el primer decenio del siglo XVI, (figuras 72 y 73), y describe las comprobaciones estáticas de la estructura, realizadas por Feletti y Fachinetti (Fachinetti *et al.*, 1990; Feletti *et al.*, 1992), para verificar su estado. La bóveda encamonada, probablemente construida en 1896, año en el que se realizaron las obras que dieron lugar al estado actual del salón de Baile, se encuentra suspendida de dos vigas de madera de alma reticulada con cruces de San Andrés, con una luz libre de 14,32 metros, de las que cuelgan cinco vigas de menor sección de las que suspende la parte superior plana de la bóveda. Las vigas están realizadas con abeto blanco (*Abies alba* Mill.). La bóveda encamonada está formada por costillas de trazado curvo de tres filas de camones, realizada con madera de chopo. Se observaron valores elevados de tensión y deformación de la viga principal, debido a su gran luz, además de daños por ataques xilófagos y fuertes fendas, reparadas mediante refuerzos metálicos (Arriaga, 1992).

Figura 72. Sección transversal y longitudinal de la bóveda encamonada del Palacio Serristori, Florencia (Arriaga, 1992).

En 1993, A. **Manned** publica un artículo acerca del análisis histórico y estructural mediante técnicas no destructivas de las bóvedas de la Iglesia de S. Firenze construida en 1670. El modelo estructural planteado no se describe en detalle y parece no modelizar las juntas entre camones. Los arcos que conforman la bóveda, pertenecientes a la primera mitad del siglo XIX, poseen una curvatura constante de 8,32 metros de radio y está compuesto por trece láminas de abeto “plateado” (*Abies alba* Mill.), cada una de 2 cm de espesor, siguiendo las directrices planteadas por el Coronel Emy, y ensambladas mediante clavos de hierro (figura 74), (Manned *et al.*, 1993).

Figura 74. Sección y detalle constructivo del arco laminado de la iglesia de S. Firenze (Manned *et al.*, 1993)

En el año 2005, **Luis de Villanueva**, reabre el estudio de estas bóvedas y las denomina “bóvedas de carpintería de madera”, considerándolas frecuentes en España a partir del siglo XVII e indicando que dicha solución provisional se utilizaba como definitiva. Manifiesta la opinión de que el origen de las bóvedas encamonadas es el paso de negativo a positivo de lo que hasta ese momento era una construcción provisional, es decir, invertir la forma constructiva de las cimbras (figura 75), (Villanueva, 2005).

Figura 75. Comparación del sistema constructivo de las cimbras en contraposición a los arcos encamonados, apuntes de Antonio Cámara sobre construcción en madera (Villanueva, 2005).

Maria Campi ha estudiado a fondo el sistema constructivo de De l'Orme, además de obras realizadas por sus discípulos, como la cubierta de la Iglesia de La Compañía de Jesús en Córdoba, Argentina (figura 76), realizada por el padre Lemer, arquitecto jesuita.

Figura 76. Bóveda encamonada de la Iglesia de la Compañía de Jesús en Córdoba, Argentina (Campi, 2009).

Campi ha realizado construcciones basándose en el sistema tradicional de Philibert de l'Orme tal y como se aprecia en la figura 77 (Campi, 2009).

Figura 77. Construcción realizada por María Campi, siguiendo el sistema de De l'Orme (Campi, 2009).

En la misma línea nos encontramos el estudio realizado por **Raffaella Conti** (Conti, 1996) en el que realiza un estudio histórico constructivo a cerca del sistema de De l'Orme, (figura 78).

Figura 78. Detalle de la cubierta del techo de la iglesia de la compañía de Jesús (Conti, 1996).

3.2.2. Intervención en estructuras antiguas

Existen varios artículos relacionados con intervenciones en bóvedas encamonadas de edificios históricos. Tal es el caso de **Clara Bertolini-Cestari, Stefano Invernizzi, Antonia Spano y Lara Mallamaci**, quienes han realizado un estudio sobre la bóveda encamonada del Salón de fiesta (Salone delle Feste) del castillo de Valentino en Turín, del siglo XVII, actualmente el aula magna de la facultad de Arquitectura de la Politécnica de Turín (figura 79). Las dimensiones de la bóveda son 16 metros de longitud por 11 metros de anchura. Los camones poseen entre 3 y 6 centímetros de espesor, 20-40 cm de ancho y longitudes de 2-3 metros. Las costillas se encuentran separadas 0,7 metros y están realizadas con chopo (*Populus sp.*). Realizaron ensayos no destructivos, estudios láser y orto-fotografía del estado actual, además, de un modelo 3D mediante elementos finitos para estudiar las deformaciones producidas y las principales anomalías geométricas, con el objeto de realizar la rehabilitación de la estructura correctamente (Bertolini-Cestari *et al.*, 2012; Bertolini-Cestari *et al.*, 2013).

Figura 79. Salón de Honor del Castillo de Valentino en Turín (Bertolini-Cestari *et al.*, 2012).

Ayerza, Barrio, Gómez y Santana por su parte, abordaron el tema de las bóvedas lógicas de las iglesias del País Vasco, desde la perspectiva histórica, pero dichas bóvedas poseen características constructivas distintas a las encamonadas (Ayerza *et al.*, 1996).

Rosa Bustamante ha realizado un análisis constructivo de la bóveda encamonada del Salón de Plenos del Senado de Madrid, del primer cuarto del siglo XIX (Bustamante *et al.*, 2012), analizando cada uno de los elementos que conforman la bóveda: plafón central, camones del perímetro, encadenado, lunetos, cornisa e intradós de la bóveda. En el estudio se manifiesta la necesidad de sustituir formas de madera por otras de acero, tras realizar un escaneado en tres dimensiones en base a una nube de puntos para determinar las deformaciones existentes (figura 80).

3. Antecedentes

Figura 80. Bóveda encamionada del Salón de Plenos del Senado (Bustamante, 2012).

Stefan Jaksch se centra en el estudio de la bóveda de la cúpula del edificio principal de la Universidad Tecnológica de Viena, de 1815, para examinar la calidad del material y desarrollar los conceptos de seguridad frente al fuego y a los terremotos (figura 81). Se realizó un modelo 3D de elementos finitos para verificar su estado estructural. La bóveda encamonada está formada por varias costillas de tres filas de camones cada una. Los camones de 5-6 cm de grosor, 40 cm de ancho y 1,80 metros de longitud están clavados unos a otros mediante clavos de hierro forjado y colgados de la estructura principal de la cubierta. El estado de la madera se considera adecuado, a excepción de una pequeña zona con pudrición blanca debido a una fuga de agua localizada y ataque de insectos xilófagos, cuyas piezas fueron sustituidas.

El modelo teórico planteado no modeliza las juntas entre camones (figura 82), considerando uniones semirrígidas. Con respecto a la protección frente a fuego, se consideró que las dimensiones actuales proporcionaban estabilidad durante 30 minutos, tiempo de evacuación exigido por la norma (Jaksch *et al.*, 2012).

Figura 81. Arco encamonado en estudio y representación de los nudos relevantes (Jaksch *et al.*, 2012).

Figura 82. Entrada a la cúpula de la Universidad Tecnológica de Viena y modelo de análisis 3D propuesto (Jaksch *et al.*, 2012).

Enrico Quagliarini, describe el método seguido, mediante ensayos no destructivos (END), para determinar el estado de conservación de la bóveda encamionada del Teatro filarmónico de Ascoli Piceno, en Italia, de 1832. Con el objetivo de minimizar la intervención sobre las obras de naturaleza histórica usaron termografía infrarroja y vibrómetros sobre la parte del intradós de la bóveda, para determinar que áreas del yeso se encontraban separadas de su sujeción (cañizo) y determinar el estado de las uniones clavadas (figura 83), (Quagliarini *et al.*, 2012; 2014).

Figura 83. A. Detalle del extradós de la bóveda encamionada y B. Resultados de las imágenes térmicas (Quagliarini *et al.*, 2012).

Macchioni realiza un análisis estructural de los elementos que conforman la estructura de la Iglesia de la Santísima Trinidad de Florencia, estudiando las posibles pudriciones y ataques xilófagos de la madera, así como las dimensiones de las piezas para que sean capaces de soportar la sobrecarga de uso existente. En el artículo se observan bóvedas encamionadas, sin embargo, en el texto no se hace referencia a ellas (figura 84), solamente se describe que su estado es adecuado y que los ataques de hongos se encuentran concentrados en los elementos de soporte próximos a las paredes, aunque la intervención de restauración no es considerada urgente, (Macchioni *et al.*, 2013).

Figura 84. Imágenes de bóvedas encamonadas de la Iglesia de la Santísima Trinidad, Florencia (Macchioni *et al.*, 2013).

Jasieńko describe en su artículo los pasos seguidos para proponer un programa de conservación del Auditorio de la Universidad de Wrocław, Polonia (*Leopoldinum Auditorium*) construido entre 1728-1732 (figura 85). Realiza pruebas dinámicas de la estructura, pruebas de resistencia de la madera y el acero, del contenido de humedad y resistografías. La bóveda del auditorio de 37 metros de largo, 11,6 metros de ancho y 7,4 metros de altura se encuentra suspendida de la estructura superior de madera, que fue sustituida por perfiles metálicos. Aunque esta bóveda no puede considerarse encamonada, se considera de gran importancia porque permite entender cómo pueden estar realizadas las bóvedas esquifadas de los palacios visitados en Madrid, de los que no existe acceso a su parte superior (figura 86) (Tomasz *et al.*, 2010; Jasieńko *et al.*, 2014).

Figura 85. Vista interior de la bóveda del Leopoldinum Auditorium (Jasieńko *et al.*, 2014).

3. Antecedentes

Figura 86. Detalle constructivo y fotografía del interior de la bóveda esquifada del Leopoldinum Auditorium (Jasieńko *et al.*, 2014).

3.2.3. Estudio del comportamiento estructural

Existen numerosos estudios sobre el comportamiento estático de arcos continuos de madera, es decir, conformados mediante elementos continuos o, en el caso de estar formados por varias piezas, sin modelizar las uniones entre camones. **Malekzadeh** estudia la deformación por cizallamiento y el fallo por delaminación de los arcos laminados circulares (Malekzadeh, 2009), y **Hai Qian** analiza su respuesta al someterlos a cargas térmicas de acuerdo con la teoría de la elasticidad termo-elástica (Qian et al, 2015). También, existen análisis de vibración de arcos laminados, donde incluyen los efectos de la deformación por cizallamiento, estudiando la influencia de la orientación de las fibras en la frecuencia fundamental de la estructura (Çevik, 2010; Carpentieri et al., 2015; Nanda, 2015).

El tema de las frecuencias propias en arcos de madera, también ha sido muy estudiado en las últimas décadas, sin embargo, no existen estudios en arcos compuestos por piezas de pequeña escuadría y en los que existan juntas entre ellos. Se han encontrado numerosos artículos en los que se analizan las frecuencias naturales y el pandeo de los arcos laminados circulares, incluyendo en el análisis como le afectan los esfuerzos de cizallamiento transversales, las tensiones interlaminares y la inercia a torsión. Sin embargo, el estudio se centra en los problemas de delaminación y otros efectos secundarios relativos del material laminado. (Matsunaga, 2004; Kovács, 2013).

Por otro lado, los estudios de los comportamientos de las conexiones mecánicas también han sido muy numerosos en las últimas décadas, pero no en estructuras encamionadas. Destacamos a **Meschke**, quien estudia, en su tesis, el diseño de cáscaras realizadas en madera laminada e incluye el análisis del comportamiento estructural de los elementos metálicos. Evalúa los modelos teóricos mediante valores empíricos de las conexiones, sus deformaciones y los mecanismos de fallo, incluyendo los modelos teóricos de Johansen (Meschke, 1989). Este trabajo ha sido continuado, por muchos otros, como **D'Amico**, cuyo objetivo era realizar una descripción del comportamiento mecánico de este tipo de estructuras para evitar problemas en el diseño y construcción (D'Amico, 2015).

A su vez, **Pirner** analiza numérica y experimentalmente la no linealidad geométrica de una cúpula formada por arcos de madera laminada (Pirner et al., 1988) y **Tongtoe** investiga el modo de fallo de estructuras espaciales de madera mediante modelos de elementos finitos. Su modelo teórico representa una cúpula donde el punto de fallo se encuentra localizado en los conectores viga-cubierta, representados mediante resortes no lineales que modelizan el comportamiento frente al deslizamiento. Su principal objetivo es determinar el comportamiento estructural de este sistema constructivo, su respuesta en equilibrio, modo de fallo y carga última, considerando las no linealidades geométricas y materiales. Aunque se centra en bóvedas de madera laminada encolada y su modelo de fallo depende de los conectores metálicos, se considera que es un artículo que sirve de referencia para marcar las pautas del modelo teórico de este estudio. Tongtoe concluye con que la carga crítica disminuye a medida que aumenta la flexibilidad de las juntas y que las condiciones de carga asimétrica producen tensiones de carga más críticas (Tongtoe, 1997).

Rammer centra sus investigaciones en los arcos de madera laminada, estudiando su comportamiento estructural, amortiguamiento frente al sismo, deformaciones y modelos de fallo, incluyendo el sistema de conexiones y su respuesta no lineal (Rammer et al., 2016).

En el trabajo realizado por **Stéphane Girardon** se desarrolla un modelo de elementos finitos para reproducir el comportamiento a flexión de vigas multicapa mixtas de madera y hormigón, basándose en los trabajos anteriores de Kreuzinger (Kreuzinger, 2001) y de Pirazzi (Pirazzi, 2005). Los pasadores metálicos poseen un comportamiento no lineal y los modelos analíticos elásticos, en dos dimensiones, han sido complementados mediante los resultados procedentes de estudios experimentales (Girardon et al., 2014).

Sobre el estudio del comportamiento estructural del sistema de conexión de las vigas mixtas madera-hormigón, existen numerosas publicaciones (Ceccotti, 1995; Kreuzinger, 1999; Girhammar et al., 2007; Lukaszewska, 2009; Fragiaco et al., 2011), sin embargo, el dicho sistema de unión se considera completamente distinto al existente entre los camones que conforman las bóvedas en estudio.

Destacamos a **Gliniorz**, quien realiza un modelado computacional detallado con elementos finitos lineales y no lineales para calcular las fuerzas internas y deformaciones globales y locales de elementos estructurales multicapa con conexiones semirrígidas entre las capas. Con respecto a elementos curvos, hace énfasis en las tensiones residuales debidas a la propia construcción del arco (Gliniorz et al., 2002).

Algunos de estos trabajos, aunque no estén directamente relacionados con la estructura encamionada, pueden servir de guía para entender cómo modelizar el deslizamiento en el sistema de unión. Uno de los primeros trabajos fue el realizado por **Foschi** donde describe un modelo no lineal de las conexiones, en términos de módulo de deslizamiento considerando el comportamiento no lineal de la madera y su anisotropía (Foschi, 1974).

Wang preocupado también por los sistemas de conexión busca predecir la resistencia de articulaciones realizadas con clavos, deslizamiento, valor último y su influencia en la madera (Wang et al., 2010).

José Luis Fernández Cabo, genera el arquetipo de análisis de vigas mixtas basado en la matriz de flexibilidad, considerando el deslizamiento en los conectores y teniendo en cuenta un modelo anterior propuesto por Tammola y Jutila (Jutila et al., 2010; Fernández-Cabo et al., 2011; 2012).

Nanda realiza un análisis de la propagación de ondas en arcos laminados (Nanda, 2015) y **Anh-Tuan** sobre el análisis de flexión y pandeo de vigas curvas laminadas, pero tratándose en todo momento de arcos laminados, nunca encamionados (Anh-Tuan et al., 2015)

Sin embargo, los estudio relativos a los arcos encamionados son escasos. Destacamos la tesis doctoral de **Anna Marzo**, que analiza las cubiertas del Palacio Real de Nápoles, del siglo XVIII y reconstruidas en el siglo XIX, mediante un modelo de elementos finitos (figura 87), para observar el comportamiento a carga constante de la estructura de cubierta, aunque los arcos son considerados como elementos continuos sin modelizar las juntas entre camones (Marzo, 2006). Su principal objetivo está dirigido en verificar un sistema de refuerzo metálico destinado a restauración de forjados y cubiertas, por lo que el análisis de las bóvedas es secundario. En sus últimas publicaciones, evalúan la estructura en términos de fuerza- deformación, basándose en el Eurocódigo 5, aunque sigue sin introducir las discontinuidades generadas por las juntas entre los camones (Grippa et al., 2010; Faggiano et al., 2010; Mazzolani et al., 2010).

Figura 87. Modelo teórico realizado por Anna Marzo (2006).

En la misma línea que Marzo, **Fabio Fabbri** realiza una modelización con elementos finitos de la bóveda de la Iglesia de Santa Maria delle Grazie, en Puglia (figura 88), para comprobar el comportamiento estructural de refuerzos de fibra de polímeros situados a los lados de las cerchas (Fabbri, 2010) y **José Luis Gómez** la bóveda encamionada de la iglesia jesuita de Córdoba, Argentina (figura 89), (Gómez *et al.*, 2003).

En ambos modelos, tampoco se modelizan las juntas entre camones.

Figura 88. Modelo teórico realizado por Fabio Fabbri (2010).

Figura 89. Diagrama de esfuerzos relativos al análisis realizado por José Luis Gómez (2003).

Carina Fonseca Ferreira y Dina D'Ayala, estudian la interacción entre la estructura de madera y las unidades de mampostería de edificios históricos. Han generado varios modelos mediante elementos finitos en los que se incluye la bóveda encamionada, incluyendo las uniones semirrígidas entre camones, de modo similar al planteado en la presente tesis, y los muros de adobe. La naturaleza ortótropa de la madera se considera al introducir valores de rigidez distintos para las direcciones perpendicular y paralela a la fibra (figura 90), (Ferreira *et al.*, 2013).

Figura 90. Modelo de elementos finitos en el que se ha modelizado la discontinuidad de los arcos (Ferreira *et al.*, 2013).

Charles H. Woodworth, aunque preocupado por las uniones metálicas de elementos de madera, incluye en sus estudios modelos de arcos formados por tablones de pequeña escuadría. Su objetivo es facilitar la construcción de arcos de madera, pudiendo ser montado en el suelo, pero no se centra en el estudio del comportamiento estructural de la madera, solo de sus uniones metálicas (Woodworth, 1954).

Cecilia Alonso y Abdy Kermani estudian el comportamiento de los puentes de grandes luces con soluciones de arcos laminados, considerando que su bajo coste y su eficiencia estructural aportan grandes ventajas a este tipo de construcciones. El puente está diseñado de tal forma que el tablero de paso se encuentra suspendido de dos arcos. Aunque el tablero, está realizado con madera laminada postesada, los arcos están realizados mediante el sistema laminado vertical tipo De l'Orme, generados mediante tablas de longitudes cortas con juntas a tope. Estudiaron el comportamiento de un puente de 12 metros de luz cuyo uso era el paso de peatones bajo condiciones de carga estática (figura 91). Los arcos estaban conformados por tablas cortas de madera de 20 mm de espesor de madera de abeto Sitka (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) atornillados entre sí y cortados en ángulo para que la compresión se transfiriera a través de las juntas a tope. El empuje horizontal era transmitido a unas columnas de acero. El ensayo consistía en someter al puente a una serie de cargas aplicadas en 4 puntos hasta alcanzar una carga distribuida equivalente a 5 kN/m^2 .

El puente colapsó al llegar a una carga excéntrica de 50 kN. Tras sustituir las piezas dañadas, el modelo volvió a soportar la misma carga de rotura. Se llegó a la conclusión de que el fallo de la estructura al someterla a carga simétrica, se debe al pandeo fuera del plano de los arcos.

Para el análisis del comportamiento de la estructura, generaron un modelo teórico de elementos finitos usando un análisis elástico lineal, en el que se modelizaron las uniones y el comportamiento de los tornillos, mediante conexiones lineales (muelles) que representaban la elasticidad de la unión. El estudio cubre el primer orden del comportamiento elástico lineal, no incluye los mecanismos de fallo debidos al pandeo (Alonso *et al.*, 2012).

Figura 91. Modelo ensayado por Cecilia Alonso y Abdy Kermani (Alonso *et al.*, 2012).

Kermani, continua el análisis de este tipo de puentes peatonales, en el que la plataforma de paso está formada por tablonces de madera contrapeados y unidos mediante bulones transversales (figura 92). Sus estudios sobre el comportamiento estructural frente a cargas estáticas y dinámicas, sirven de guía para los estudios estructurales planteados sobre los arcos encamonados, aunque se considera que los modelos no son similares (Kermani *et al.*, 2005; 2008)

Figura 92. Modelo de puente peatonal diseñado por Abdy Kermani (2005).

En el *Anexo A: Tabla cronológica de los antecedentes históricos* se pueden observar las referencias estudiadas en una línea del tiempo, para conocer de forma visual en que períodos se publicaron más tratados de carpintería en el que se referenciaba a las bóvedas encamonadas y en que franja de tiempo se ha estudiado dicho sistema constructivo.

4. MATERIAL Y EQUIPOS

4. Material y equipos

RESUMEN MATERIAL Y EQUIPOS:

Descripción de los materiales (madera y acero relativo a las uniones) y equipos utilizados, divididos en las siguientes categorías:

- Máquinas de ensayos mecánicos (pórtico de ensayo hidráulico, máquina de ensayo hidráulica manual y captadores de recorrido LVDT).
- Equipos de ensayos no destructivos (xilohigrómetro de resistencia eléctrica, equipo portátil de ondas de impacto MST, equipo portátil de vibración PLG y sensores de aceleración).
- Programas informáticos (CODEIN - Vibraciones, programa informático del PLG, SAP2000, Statgraphics Centurion XII e Identificación de maderas de coníferas).

4. Material y equipos

4. MATERIAL Y EQUIPOS

4.1. Material de ensayo

4.1.1. Madera:

En las probetas y modelos de ensayos mecánicos se ha utilizado madera aserrada de pino laricio (*Pinus nigra* Arnold) procedente del aserradero Ayuntamiento de Cuenca Maderas S.A. Se adquirieron piezas de madera cepillada de 40 x 200 mm de sección y longitud de 3,1 m, a partir de las que se elaboraron las probetas de ensayo y los camones de los modelos a escala.

Se realizó una clasificación visual de las piezas de acuerdo con la norma UNE 56544 y se obtuvo el siguiente rendimiento: 45% de calidad ME-1, 54% de calidad ME-2 y 1% de rechazo. La calidad mayoritaria, ME-2, se asigna a una clase resistente C18 según las normas UNE-EN 338 y UNE-EN 1912. Esta clase resistente tiene un valor característico de resistencia a flexión correspondiente al 5º percentil de 18 N/mm², un valor medio del módulo de elasticidad de 9.000 N/mm² y un valor medio de densidad de 380 kg/m³.

Para los montantes y diagonales de arriostramiento de los dos modelos de arcos a escala real realizados, se empleó madera microlaminada, Kerto Q (denominado en inglés LVL: Laminated Veneer Lumber) y madera de tiras laminadas (PSL: Parallel Strand Lumber), respectivamente. Las piezas de LVL tenían 50 mm de espesor, 100 mm de canto y 0,84 m de longitud y una densidad media de 480 kg/m³, al igual que las triangulaciones realizadas con Paralam (Parallel Strand Lumber), cuyas dimensiones eran 39 mm x 200 mm de sección y 0,90 m de longitud.

4.1.2. Acero: Uniones

Las soluciones tradicionales, empleaban, o bien, clavijas de madera, o bien, de forja de sección variable (forma piramidal), con calidades muy distintas a los aceros actuales. Los clavos antiguos no estaban normalizados ni en dimensiones ni en resistencia y son difíciles de conseguir o fabricar. Por ello, se han usado tirafondos de acero Rothoblass®, VGZ 7x100, con un diámetro de 7 mm y una longitud de 100 mm, para la conexión por acoplamiento de los camones, de los que se conocen sus características mecánicas y el módulo de deslizamiento.

En la tabla 1, se observan los datos procedentes del fabricante.

Tabla 1. Datos de los tirafondos de acero Rothoblass, VGZ 7x100, aportados por el fabricante.

Diámetro nominal, (mm)	7,00
Diámetro cabeza (mm)	9,50
Diámetro núcleo (mm)	4,60
Diámetro cuello (mm)	5,00
Preagujero (mm)	4,00
Momento plástico característico: M_{yk} (N·mm)	14.174,20
Parámetro característico de resistencia extracción: $f_{ax,k}$ (N/mm²)	11,70
Resistencia característica a tracción: $f_{tens,k}$ (kN)	15,40
Límite elástico característico $f_{y,k}$ (N/mm²)	1.000,00

Según el Eurocódigo 5, el módulo de deslizamiento por cálculo se determina según la expresión:

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \cdot \frac{d}{23};$$

Siendo:

$$\rho_m = 480 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 1,1 \times 4,60 = 5,06 \text{ mm (diámetro efectivo)}$$

$$K_{ser} = 480^{1,5} \times \frac{5,06}{23} = 2.313 \text{ N/mm}$$

Este parámetro no es suministrado por el fabricante para los tirafondos VGZ.

Para el arriostramiento de los modelos a escala se han utilizado barras de acero de 20 mm de diámetro nominal y módulo de elasticidad de 200 kN/mm² (GEWI[®]) para el atado transversal de los arcos.

4.2. Medios y equipos

Los medios y equipos utilizados durante las diferentes fases del desarrollo experimental se dividen en dos grupos, en función de las instalaciones y del equipo humano de los dos laboratorios que han colaborado en los trabajos experimentales.

El primero de ellos está formado por el Laboratorio de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM), UPM, el cual posee un equipo técnico y personas con gran experiencia en la labor docente y de investigación. El equipo humano perteneciente a este laboratorio durante el periodo de tiempo de desarrollo experimental de la investigación, diciembre 2012 a julio 2017, estaba formado por las siguientes personas: D. José Luis Fernández Cabo, director del laboratorio, Dña. Almudena Majano Majano, quien sustituyó al primero, D. Javier Rasines, técnico de laboratorio y D. Juan Martín Melchor, quien sustituyó a éste último.

El segundo de ellos es el Laboratorio de Industrias de los Productos Forestales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, UPM. Este laboratorio se emplea para el desarrollo práctico de las asignaturas impartidas por la Unidad Docente y para realización de proyectos de investigación sobre la madera y otros productos forestales. El equipo humano perteneciente a este laboratorio durante el periodo de tiempo de desarrollo experimental de la investigación, marzo 2016 a diciembre 2016, estaba formado por D. Ignacio Bobadilla Maldonado, profesor titular de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, UPM.

El equipo humano de la cátedra de estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, UPM, formado por Francisco Arriaga Martitegui, Miguel Esteban Herrero, Guillermo Íñiguez González y Daniel Fernández Llana también ha colaborado en los trabajos de investigación.

4.2.1. Máquinas de ensayos mecánicos:

- **Pórtico de ensayo hidráulico**, marca CODEIN, modelo MCO-30, número de serie 04037, con alimentación de 220 V, específicamente diseñado para realizar ensayos mecánicos conforme a la norma UNE-EN 408:2011, dotado con una célula de carga de 294 kN (30 toneladas) (figura 93). Este equipo pertenece al laboratorio de estructuras de la ETS de Arquitectura de la UPM y ha sido utilizado para determinar las propiedades mecánicas de la madera maciza usada en los diferentes ensayos y para estudiar el comportamiento mecánico de las uniones de encamionados.

Figura 93. Pórtico de ensayo modelo MCO-30.

4. Material y equipos

- **Máquina de ensayo hidráulica manual**, formada por un cilindro, marca POWER TEAM, modelo B, número de serie C258C y una bomba de accionamiento manual, marca LARZEP. La máquina dispone de un equipo de medida digital para la lectura de la fuerza conectado a 16 canales. La transmisión de la fuerza al equipo de medida se realiza a través de una célula de carga de 196 kN (20 t), marca CODEIN, modelo PBI20, número de serie 616. La unidad de medida es kp, con una resolución de 0,1 kp (figura 94).

Este equipo pertenece al laboratorio de estructuras de la ETS de Arquitectura de la UPM y ha sido utilizado para los ensayos a rotura del modelo a escala real del arco.

Figura 94. Pórtico de ensayo hidráulico con el modelo a escala real de arco encamonado.

Estos equipos son calibrados anualmente por Técnicas de Calibrado y Control S.L. pertenecientes a CODEIN, en base al procedimiento específico PEC/TCC/01, conforme a la norma UNE-EN ISO 7500-1:2006 y UNE-EN ISO 376:2011.

- **Captadores de recorrido LVDT** (Linear Variable Displacement Transducer), fabricados por SOLARTRON y utilizados en los diferentes ensayos realizados en el pórtico de ensayo hidráulico y en la máquina de ensayo hidráulica manual, que poseen las siguientes características (figura 95):

- LVDT 1: Captador de desplazamiento de 5 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo AX/2.5/ S (Canal 11), número de serie M922503A347-01-Código 13.
- LVDT 2: Captador de desplazamiento de 5 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo AX/2.5/ S (Canal 12), número de serie M922503A347-02-Código 3.
- LVDT 3: Captador de desplazamiento de 10 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo AX/5/ S (Canal 10), número de serie M922505A347-01-Código 1.
- LVDT 4: Captador de desplazamiento de 20 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo AX/10/ S (Canal 9), número de serie M923423a347-01.
- LVDT 5: Captador de desplazamiento de 20 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo AX/10/S (Canal 11), número de serie M922509a716-01-Código 11.
- LVDT 6: Captador de desplazamiento de 20 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo AX/10/ S (Canal 12), número de serie M922509C716-02-Código 12.
- LVDT 7: Captador de desplazamiento de 20 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo AX/10/ S (Canal 13), número de serie M922509C716-03-Código 5.
- LVDT 8: Captador de desplazamiento de 20 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo AX/10/ S (Canal 14), número de serie M922509C716-04-Código 14.
- LVDT 9: Captador de desplazamiento de 50 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo 50 mm (Canal 5), número de serie MA0250GLP03A645-01-Código 9.
- LVDT 10: Captador de desplazamiento de 50 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo 50 mm (Canal 15), número de serie MA0500GCL03C719-01-Código 4.
- LVDT 11: Captador de desplazamiento de 100 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo 100 mm (Canal 6), número de serie MA0500GLD03C645-02-Código 7.
- LVDT 12: Captador de desplazamiento de 100 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo 100 mm (Canal 9), número de serie MA0500GLP03A524-01-Código 10.

4. Material y equipos

- LVDT 13: Captador de desplazamiento de 200 mm, con una resolución absoluta de 0,01 mm, marca SOLARTRON, Modelo 100 mm (Canal 16), número de serie MA0500GLP03C645-01-Código 8.

Estos equipos pertenecen al laboratorio de estructuras de la ETS de Arquitectura de la UPM.

Figura 95. Captadores de recorrido usados en varios ensayos.

4.2.2. Equipos de ensayos no destructivos:

- **Xilohigrómetro de resistencia eléctrica**, equipo de medición del contenido de humedad. El equipo utilizado ha sido el Hydromette HT 85 T (Gann Mess-u. Regeltechnik GmbH, Alemania), con corrector de temperatura ambiente, medida previamente por el medidor del equipo y de la especie, en este caso *Pinus nigra* (9.1).

Los electrodos utilizados fueron clavos aislados modelo M-18-Teflon (Gann Mess-u. Regeltechnik GmbH, Alemania) de 60 mm de longitud, introducidos en la cara a 1/3 de profundidad del canto (figura 96).

Dicho equipo pertenece al laboratorio de estructuras de la ETSAM, de la UPM y los clavos aislados de la Unidad Docente Cálculo de Estructuras de la ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural de la UPM.

Figura 96. Xilohigrómetro de Resistencia eléctrica.

- **Equipo portátil de ondas de impacto MST**, MicroSecond Timer, de la empresa Fakopp Enterprise de Hungría, es un aparato de medición del tiempo de transmisión de onda acústica (μ s). Está compuesto por dos sensores: emisor y receptor con punta en forma de pincho, conectados mediante cables a una consola (figura 97). Es necesaria la realización de un impacto, mediante un martillo de 100 g de masa, sobre el emisor para generar una onda. El impacto debe ser limpio y preciso. La resolución del equipo es de 1 μ s.

El equipo pertenece al laboratorio de estructuras de la ETS de Arquitectura de la UPM.

Figura 97. MST, medición realizada entre los extremos de las piezas.

- **Equipo portátil de vibración PLG**, Portable Lumber Grader, fabricado por la empresa Fakopp Enterprise de Hungría, es un equipo de medición de la frecuencia natural de vibración longitudinal (figura 98). Está compuesto por una balanza de capacidad máxima 125 kg y una resolución de 10 g, un amplificador de señal para la balanza, un micrófono unidireccional con sensibilidad de -56 Db, rango de frecuencias entre 100 y 15000 HZ y rango de temperaturas entre 5 y 40 °C, martillo de 200 g de masa y el programa informático.

El equipo pertenece a la Unidad Docente Cálculo de Estructuras de la ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural de la UPM.

Figura 98. Detalle del micrófono del PLG.

4. Material y equipos

- **Sensores de aceleración**, marca ADCL335, de 3 ejes, con rango de medida de aceleración $\pm 2g$ y con las siguientes medidas 6 cm de largo, 3 cm de ancho y 0,3 cm de espesor (figuras 99 y 100). Los rangos de medida de frecuencia son los siguientes:

- Eje x e y: 0,5 Hz- 1600Hz.
- Eje z. 0,5 Hz-550 Hz.

Este equipo pertenece al laboratorio de estructuras de la ETS de Arquitectura de la UPM.

Figura 99. Componentes del acelerómetro.

Figura 100. Acelerómetro colocado en la clave delantera y caja de conexión.

4.2.3. Material auxiliar:

- Atornillador de batería Bosch, modelo PSR 7,2 LI, potencia 570 W.
- Balanza de laboratorio PCE WS 30, con un rango de pesaje de hasta 30 kg y resolución de 0,5 g, fabricado por PCE Instruments.
- Baño termostático Bunsen circular serie BT-3, regulación de temperatura desde ambiente a 200°C, tensión 230v/50H, capacidad 3 litros.
- Calibre digital marca STARRETT, modelo electrónico digital 727, rango 0-300 mm, resolución 0,01 mm.
- Cámara fotográfica Sony Next 7.
- Cepilladora de dos caras FORMAT 4, modelo Dual 51, para el cepillado de las piezas.
- Cuchilla de microtomo manual para orientar las muestras en los cortes longitudinal, tangencial y radial.
- Escuadras de carpintero para realizar las marcas en las piezas a ensayar.
- Flexómetros de 5 y 10 metros de longitud con resolución 1,0 mm para medir las dimensiones de las piezas.
- Galga de espesor 1 mm, sin escala, para medir las juntas entre camones.
- Gatos de diferentes tamaños, para fijar los LVDT en su colocación final en los ensayos.
- Martillo de goma y maza de madera, para introducir los sensores del equipo MicroSecond Timer.
- Microscopio ECOVISION M-100FL & BP-20, OPTIKA microscopes- Italy, con iluminador eléctrico y objetivos 4x, 10x y 40x.
- Microtomo, Reichert, nº 329142, para realizar las preparaciones con espesores de 22 micras, con mordazas para facilitar la fijación de la muestra.
- Regla milimetrada de 200 mm con resolución 1,0 mm.
- Rotulador indeleble para realizar las marcas necesarias en cada pieza: disposición de los apoyos, LVDT, medición de nudos para determinar el CKDR...
- Portas y cubres para la realización de las muestras.

- Segueta manual, para obtener muestras de dimensiones adecuadas.

4.2.4. Programas informáticos:

- **CODEIN**, programa informático que registra las mediciones realizadas por las máquinas de ensayos mecánicos, captadores de recorrido y sensores de aceleración, permitiendo representar gráficos durante la realización de los ensayos.
- **Vibraciones**, programa informático realizado por CODEIN, que registra las vibraciones producidas en una estructura y que son recogidas por los sensores de aceleración (acelerómetros). Indica en una gráfica la transformada de Fourier.
- **Programa informático del PLG**, que mediante la presión sonora recogida por el micrófono y haciendo uso de la transformada rápida de Fourier, obtiene la frecuencia natural del primer modo de vibración. Muestra dicha frecuencia con resolución de 1 Hz, el Edin y la clase resistente asignada.
- **SAP2000**, programa informático de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D, utilizado para realizar los modelos teóricos
- **Statgraphics Centurion XII**, programa informático de estadística, versión demo estudiantes.
- **Identificación de maderas de coníferas**, programa informático realizado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Ingeniería Forestal, Cátedra de Tecnología de la Madera, UPM, en colaboración con Asociación de Investigación Técnica de las industrias de la madera y el corcho (AITIM).

5. MÉTODOS

RESUMEN MÉTODOS:

La metodología se resume en cuatro fases diferenciadas organizadas en torno a los dos objetivos primordiales, el estudio histórico constructivo y el comportamiento estructural de las bóvedas encamonadas.

- Para poder realizar el estudio histórico constructivo, fue necesario realizar un listado de edificios, cuya construcción fuese realizada en el período correspondiente a la difusión de las bóvedas encamonadas. Ese periodo histórico comprende desde el siglo XVI hasta el XIX, debido a que las estructuras preexistentes se ocultaban mediante dichas bóvedas fingidas para adecuarse al barroco, hasta el siglo XIX, momento en el que fueron sustituidas por estructuras metálicas roblonadas que igualaban el tiempo de ejecución.
- De esas visitas realizadas, en base al listado de edificios potenciales de contener bóvedas encamonadas, se analizaron pequeñas muestras de madera para conocer las especies utilizadas en dicho sistema constructivo.
- Con respecto al estudio del comportamiento estructural, se realizaron experimentos a pequeña escala, cuyo objetivo era conocer la conducta de las uniones. Para ello, se comenzó acondicionando, preparando y caracterizando las piezas de madera utilizadas en los diferentes ensayos propuestos: de flexión de piezas de madera maciza, ensayos para determinar el módulo de deslizamiento del tirafondo, ensayos para la determinación de la rigidez a la rotación de un par de tirafondos y de una unión encamonada. De forma prácticamente paralela, se realizaron ensayos a escala real de dos modelos de arcos encamonados, que fueron ensayados hasta el agotamiento, y el primero de ellos previamente bajo carga constante con duración media. También, se realizaron análisis dinámicos de la estructura completa y de una simplificación de ésta (pieza simple encamonada recta).
- Con los valores obtenidos se proponen varios modelos teóricos de comportamiento lineal y no lineal de la estructura completa.

5. MÉTODOS

5.1. Estudio de la presencia de las bóvedas encamonadas en Madrid

El método seguido, para localizar los edificios con bóvedas encamonadas en Madrid, comienza con el estudio de cinco documentos, que permiten seguir la evolución histórica de la ciudad: el *Plano de Texeira*, realizado en 1656; el *Plano geométrico de Madrid* de 1808, la guía de Madrid escrita, poco después del mapa anterior por uno de los mejores cronistas Don Ramón de Mesoneros Romanos (1803-1882), *Manual de Madrid. Descripción de la Corte y de la Villa*, Madrid, 1831, y la posterior *Nuevo manual histórico-topográfico-estadístico, y descripción de Madrid*, Madrid, 1854; El libro guía de Elías Tormo Monzón (1869-1957), jurista y político conservador, que publicó una extensa obra sobre temas de arte y arqueología, de la que manejamos, *Las iglesias de Madrid*, publicadas en 1927 y numerosas veces reeditada y la *Guía de Arquitectura y Urbanismo de Madrid del COAM*, Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, (COAM, 1984). Este primer análisis pretende hacer un inventario de los edificios que puedan contener bóvedas encamonadas.

El resultado final es un listado de 91 edificios que fueron visitados para confirmar la existencia de encamonados, y a la vez recoger la información necesaria: muestras de madera para su identificación, dimensiones de escuadría y separaciones, datos generales de la cubierta (tipo de armadura, escuadrías, etc.), estado de conservación, daños, dificultad de acceso y fotografías.

5.1.1. Plano de Texeira

El primer plano que se conoce de Madrid es el debido Antonio Marcelli hacia 1635 a escala 1:4.500, donde los edificios vienen representados en perspectiva caballera. Pero el primero con especial interés es el plano del cartógrafo portugués Pedro Texeira Albernaz (1595-1662) que realizó para Felipe IV, ya separada Portugal de la Monarquía Hispana (1580-1640): *Topographia de la villa descrita por Don Pedro Texeira* (1595-1662). Editada por primera vez en 1656 en Amberes²⁰ y grabada por Salomón Savery²¹ en planchas de cobre en Amsterdam. Se cree que el origen del plano, que se hizo sobre la Villa y Corte de Madrid, está en un regalo que recibió Felipe IV en 1640, que consistía en una imagen grabada de la ciudad de Bruselas de grandes dimensiones y dedicada al propio rey. El tamaño, así como la planta y vista de los edificios y las leyendas que contenían la descripción corográfica de la ciudad, hicieron al rey considerar la conveniencia de contar con una representación similar de la villa de Madrid. La *Topographia* de Texeira supuso una imagen acorde con el estatus de Capital del Imperio y como Corte de la Monarquía Hispánica. Es por ello, que se cree que fue el propio Felipe IV quien corrió con los gastos de elaboración, doscientos escudos, pagados por el denominado Bolsillo Secreto del Rey. Es el plano más importante del siglo XVII, pues se considera una representación fiel en perspectiva caballera con el alzado orientado al sur de los edificios. El Ayuntamiento no obtuvo su propio ejemplar

²⁰ Centro europeo muy importante en la edición de libros y grabados en cobre. El hecho de que fuese grabado en el extranjero justificaría los errores de ortografía y localización existentes en el plano.

²¹ Artista grabador de origen judío.

hasta el siglo XVIII. A mediados del siglo XIX, Mesonero Romanos hacía referencia a la existencia de dos ejemplares, que él supiera, del plano original: uno muy deteriorado, propiedad del Ayuntamiento y otro que él mismo poseía. En 1881 se realizó la primera edición facsímil por el actual Instituto Geográfico Nacional, en aquel momento Instituto Geográfico y Estadístico.

Mesonero Romanos dejó escrito:

«y como es de temer que con el tiempo lleguen á faltar los rarísimos ejemplares que aun pueden existir, creemos hacer un servicio en consignar aquí sus detalles.»

Gracias a Mesonero, que exhumó del olvido este plano, nos ha sido posible conocer los edificios que existieron en aquel momento en la Villa de Madrid.

El plano representa una planta geométrica de la Villa a la que posteriormente se le añadieron las imágenes de los alzados y la distribución interna de cada manzana (figura 101). Los edificios que se representaron con mayor cuidado son los referenciados en la leyenda del plano, cuya elección se debía al libro *Teatro de las grandezas de Madrid*, de Gil González Dávila publicado en 1623 y mantuvieron el mismo orden. Algunos conventos e iglesias que ya se habían construido en la fecha del plano, no figuran en él. Esto puede deberse a que los trabajos de estudio se hubiesen realizado con bastante anterioridad y que hubiese transcurrido mucho tiempo desde que se dibujó hasta que se realizó la impresión.

Figura 101. Plano de Texeira de la villa de Madrid (1656).

Se puede decir que el Madrid reflejado por Texeira es el Madrid de Gómez de Mora, quien realizó un gran número de edificios entre 1610 y 1648.

El plano original mide 2,85 x 1,8 metros aproximadamente, grabado en veinte planchas de 57 x 45 centímetros y realizado en perspectiva desde el sur de la ciudad. La escala aproximada es 1:1.840.

En el plano de Teixeira, además de permitir una visión de la monumentalidad de los edificios de Madrid, permite observaciones ajenas a la arquitectura y el urbanismo. Llama la atención el arbolado de la ribera del Manzanares, aguas arriba de la Casa de Campo. La curiosidad de que el camino de El Pardo tiene árboles plantados hasta Migas Calientes que, por sus diferentes dimensiones, son fruto de dos momentos de plantación. También está arbolado el camino a la Virgen de Atocha, así como el olivar que le rodea o el cercano olivar de San Jerónimo. El Prado de San Jerónimo muestra tres alineaciones dobles de árboles, una contigua al gran espacio denominado Prado Alto, y menos relevante es el arbolado del prado de Recoletos, mientras que el Prado de Atocha está limitado por huertas. Consideramos relevante los enormes terraplenes, llenos de cárcavas, frutos de la erosión por la deforestación en lo que debió ser el primer núcleo habitable y amurallado de la ciudad musulmana; en el que sobresale el enorme barranco que separaba la ciudad y constituye la calle de Segovia. Es llamativo que lo que fue la Huerta y dehesa de la Florida y que, a finales del XVII pasaría a llamarse la montaña del Príncipe Pío (de Saboya), hoy templo de Debod, aparece aterrazada y plantada en lo que sería una de las primeras restauraciones forestales. La entidad de los jardines ligados a las propiedades reales tiene una relevancia notable, como algún que otro palacio.

Es de considerar el bajo número de huertas que aparecen y la magnitud de los rasos desolados que rodean a la ciudad, por lo que el abastecimiento de la ciudad, forzosamente, debería venir de fuera, por la pérdida de los recursos naturales que tuviera.

La exactitud y precisión del plano de Teixeira no se vería igualada hasta doscientos años después, gracias a la maqueta de Madrid realizada por el cartógrafo militar, liberal y masón, León Gil de Palacio (1778-1849), realizada en madera de chopo por encargo de Fernando VII al ver trabajos previos realizados durante su exilio en Valladolid, por lo que fue rehabilitado en 1829 y en el año 1830 realiza el modelo topográfico en escala 1:432 que permanece actualmente en el Museo de Historia de Madrid, localizado en el antiguo Hospicio. En el *anexo B. Listado de edificios* se muestran, en la tabla 42, los edificios religiosos incluidos en el plano de Teixeira.

5.1.2. Plano geométrico de Madrid de 1800

El plano geométrico de Madrid realizado por Fausto Martínez de la Torre y Josef Asensio, (Martínez, 1800), incluye una tabla con la localización numerada de iglesias y otros sitios públicos, dibujados en planta. Representa fundamentalmente las distintas manzanas y los 64 barrios, en los que se incluye el Jardín Botánico (1781) del paseo del Prado, que había sustituido al de Migas Calientes. Figuran por primera vez templos de fundación reciente, como la iglesia y Convento de las Nuevas Salesas (1748) y la Capilla de Nuestra Señora de la Soledad de la calle de la Paloma, una paralela a la calle Toledo que nace en la calle Calatrava y finalizaba en la cerca que rodeaba la ciudad. La escala es de mil Varas Castellanas, 1:11.733 (figura 102).

En el *anexo B. Listado de edificios* se muestran, en la tabla 43, los edificios públicos y religiosos incluidos en el plano geométrico de Madrid de 1800.

Figura 102. Plano geométrico de la Villa y Corte de Madrid de 1800.

5.1.3. Paseo por Madrid o Guía del forastero de Mesoneros Romanos

La guía realizada por Ramón de Mesoneros Romanos, 1803-1882, escritor, cronista y bibliotecario de la villa de Madrid, pretendía mostrar a los forasteros los monumentos públicos y establecimientos de Madrid²². En cada uno de los edificios se indica la calle donde se encuentra y se basó en los escritos de los cronistas de Madrid Ambrosio Morales, Gil González Dávila y Manuel Quintana, entre otros. Mesoneros Romanos comienza realizando un estudio histórico de Madrid, desde el asentamiento de los romanos hasta el abandono de las tropas francesas, realizando un inventario de todos los edificios existentes²³. En el *anexo B. Listado de edificios* se muestran, en la tabla 44, los edificios públicos y religiosos incluidos en la guía realizada por Ramón de Mesoneros Romanos.

²² La guía se divide en diez capítulos: I. Sobre el plano de Madrid, II. Sobre las cosas de primera necesidad y ocurrencia para un recién llegado, III. Del gobierno y oficinas, IV. De los templos, V. Palacios, monumentos públicos y principales curiosidades, VI. Establecimientos de beneficencia, VII. Fuentes y aguas, VIII. Ciencias, IX. Manufacturas y almacenes, X. Paseos y diversiones.

²³ 6 monasterios, 146 templos religiosos, 1 colegiata, 18 parroquias, 33 conventos de religiosos y 29 de religiosas, 16 oratorios y capillas, 6 ermitas

5.1.4. Guía de Elías Tormo

Elías Tormo y Monzó, 1869-1957, crítico literario y de arte, jurista historiador, arqueólogo y político español, fue senador del Reino y Ministro de la Instrucción Pública y Bellas Artes durante el gobierno del general Dámaso Berenguer. Fue además Catedrático de Teoría de la Literatura y de las Artes en la Universidad de Salamanca, Patrono del Prado, Decano de la Facultad de Filosofía y Letras, 1913 y académico de la Real de Bellas Artes (Tormo, 1985). Su vida la dedicó a una gran actividad cultural. Su labor de cátedra no se limitaba a seminario o conferencias en la Universidad, sino que realizaba excursiones con sus alumnos a monumentos y museos. Gracias a dichos viajes, Tormo realizó una guía sobre las Iglesias²⁴, que ha servido de base para conocer que obras existían en el Madrid capital de principios del siglo XX.

Tormo publicó en la modesta revista católica *La Lectura Dominical*, dirigida por Don Álvaro López Núñez, unas breves notas sobre las visitas a las iglesias antiguas de Madrid realizadas²⁵, de carácter esquemático y meramente informativo. Estas anotaciones fueron recogidas en dos fascículos editados en la imprenta de A. Marzo en 1927, constituyendo un punto importante en la bibliografía de Historia del Arte Español. Esta guía permitía conocer los que había perdurado de los derribos del siglo XIX²⁶, tras la desamortización de Mendizábal, y los perdidos por incendios provocados por las masas revolucionarias del XX y de lo que se había perdido.

En el *anexo B. Listado de edificios* se muestran, en la tabla 45, los edificios religiosos descritos en la guía realizada por Elías Tormo.

²⁴ En estos años, la *Sociedad Española de Excursiones* y la *Sociedad Española de Amigos del Arte* se encuentran en pleno auge.

²⁵ Las visitas conferencias tuvieron lugar los miércoles de las 18 semanas que corren entre la sexagésima y la del Corpus de 1927.

²⁶ No se incluyen aquellos templos reedificados y oratorios particulares, como la Buena Dicha, el Cristo del Olivar, San Pascual, Santa Cruz, el Corazón de Jesús y San Francisco de Borja. Hubo algunos templos no visitados, pero de los que incluye notas, como: las Servitas, la capilla de Caballerizas, la ermita de San Isidro y las parroquias de la Casa de Campo y Moncloa.

5.1.5. Guía de edificios emblemáticos realizada por el COAM

La Fundación del Colegio de Arquitectos de Madrid (COAM) ha editado una guía (COAM, 1984) compuesta por tres tomos que incluye los edificios más emblemáticos de la arquitectura de Madrid desde el siglo XIII hasta el año de publicación, 1982. En la guía, los 2.282 edificios se encuentran catalogados en función de su ubicación en los distintos distritos al que pertenecen²⁷ y se muestra el nombre del edificio, autor y fecha de construcción y de las posteriores rehabilitaciones realizadas posteriormente. Se han seleccionado los edificios que se ha considerado que pudiesen contener bóvedas encamonadas.

En el *anexo B. Listado de edificios* se muestran, en la tabla 46, los edificios emblemáticos contemplados en la guía realizada por el COAM.

5.1.6. Lista de edificios de Madrid capital a visitar

De acuerdo con las guías y planos descritos en los puntos anteriores se ha realizado una lista (tabla 2), donde se recogen los 91 edificios que se han visitado con la fecha de construcción y la dirección.

Para obtener acceso al espacio bajocubierta de dichos edificios se localizaron los teléfonos y direcciones de cada uno de ellos mediante las páginas amarillas. Llamando por teléfono y enviando correos a las direcciones que iban aportando, se consiguieron visitar la mayoría de ellos.

²⁷ Distrito de Centro, Arganzuela, Retiro, Salamanca, Chamartín, Tetuán, Chamberí, Fuencarral- El Pardo, Moncloa-Aravaca, Latina, Carabanchel, Usera, Puente de Vallecas, Moratalaz, Ciudad Lineal, Hortaleza, Villaverde, Villa de Vallecas, Vicálvaro, San Blas y Barajas)

Tabla 2. Lista de edificios que pudiesen contener bóvedas encamionadas.

SIGLO	Nº	Nombre	Construcción	Dirección
S.XV	1	Iglesia de San Nicolás de los Servitas	s. XV	Plaza San Nicolás, 6, 28013
	2	Iglesia de San Pedro el Viejo	s. XV	Calle Nuncio, 14, 28005
S.XVI	3	Iglesia de San Pedro Ad Vincula	s. XVI	Calle de Sierra Gorda, 5, 28031
	4	Iglesia y convento San Jerónimo el Real	1503-1505	Calle de Moreto, 4, 28014
	5	Capilla del Obispo en la parroquia de San Andrés	1520	Plaza de la Paja, 28005
	6	Monasterio de las Descalzas Reales	1559	Plaza de las Descalzas, s/n, 28013
S.XVII	7	Iglesia parroquial de San Miguel Arcángel	s. XVI-XVII	Calle Islas Bermudas, 28, 28034
	8	Capilla del Palacio de Viana.	s. XVI-XVII	Calle Duque de Rivas, 1, 28012
	9	Iglesia de Santa María la Antigua	s. XVI-XVII	Calle Virgen de la Antigua, 9, 28032
	10	Convento de las Carboneras	1607	Plaza del Conde de Miranda, 3, 28005
	11	Real Monasterio de Agustinas Recoletas de Santa Isabel	1611	Calle de Santa Isabel, 44, 28012
	12	Real Monasterio de la Encarnación	1611	Plaza de la Encarnación, 1, 28013
	13	Parroquia del Carmen	1611	Calle del Carmen, 10, 28013
	14	Iglesia Parroquial de San Justo y Pastor	1612	Plaza Dos de Mayo, 11, 28004
	15	Palacio del Duque de Uceda o de los Consejos	1613-1625	Calle Mayor, 79, 28013
	16	Colegiata de San Isidro	1622	Calle de Toledo, 37, 28005
	17	Iglesia de San Antonio de los Alemanes	1624	Calle Puebla, 22, 28004
	18	Casón del Buen Retiro	1637-1701	Calle de Alfonso XII, 28, 28014
	19	Iglesia y convento de Benedictinas de San Plácido	1641	Calle San Roque, 9, 28004
	20	Capilla de San Isidro en San Andrés	1642	Plaza San Andrés, 1, 28005 Madrid
	21	Parroquia de San Ginés y Capilla del Santo Cristo	1645	Calle del Arenal, 13, 28001
	22	Palacio de Abrantes	1655	Calle Mayor, 86, 28013
	23	Iglesia y convento de las Mercedarias Descalzas de don Juan de Alarcón	1656	Calle de Valverde, 15, 28004
	24	Capilla del Cristo de los Dolores de la Venerable Orden Tercera	1662	Calle San Buenaventura, 1, 28005
	25	Convento de las Góngoras	1663	Calle Luis de Góngora, 5, 28004
	26	Iglesia y convento de las Comendadoras de Santiago el Mayor	1667	Plaza Comendadoras, 28015
	27	Convento de las Trinitarias Descalzas de San Ildefonso	1668	Calle Lope de Vega, 18, 28014
	28	Iglesia de Santa María la Real de Montserrat	1668	Calle San Bernardo, 79, 28015
	29	Iglesia de las Calatravas	1670	Calle de Alcalá, 25, 28014
	30	Iglesia y convento del Sacramento	1671	Calle del Sacramento, 11, 28005
	31	Real Hospicio de San Fernando	1673	Calle Fuencarral, 78, 28013
	32	Templo de la Orden de Teatinos	1678	Calle de Embajadores, 15, 28012
	33	Hospital e Iglesia de la Enfermería de la Venerable Orden Tercera	1693	Calle San Bernabé, 13, 28005
	34	Parroquia de San Martín	1695-1725	Calle del Desengaño, 26, 28004
	35	Casa de la Villa	1696	Calle Mayor, 67, 28012
	36	Iglesia Pontificia de San Miguel	1698	Calle de San Justo, 4, 28005
S.XVIII	37	Palacio de Bauer	s. XVIII	Calle San Bernardo, 44, 28015
	38	Ermita de la Virgen del Puerto	1718	Paseo Virgen del Puerto, 4, 28005
	39	Capilla de la Real Congregación de Nuestra Señora de la Concepción	1723-1726	Calle de Toledo, 39, 28005
	40	Capilla y Comedor del Ave María	1728	Calle del Doctor Cortezo, 4, 28012
	41	Palacio de Parcent	1729	Calle San Bernardo 62, 28015
	42	Iglesia de San José	1730-33	Calle de Alcalá, 43, 28014
	43	Iglesia de San Marcos	1753	Calle de San Leonardo, 10, 28015
	44	Iglesia de Santa Bárbara y Palacio de Justicia	1758	Calle del Gral. Castaños, 2, 28004
	45	Iglesia de San Francisco el Grande	1761	C/ San Buenaventura, 1, 28005
	46	Palacio de Godoy o del Marqués de Grimaldi	1778	Plaza de la Marina Española, 9, 28013
	47	Convento de las Reparadoras e iglesia del convento	1782-1925	Plaza de la Marina Española, 12, 28013
	48	Parroquia de San Sebastián. Capilla de Belén	1784	Calle Atocha, 39, 28012
	49	Colegio Oficial de Médicos	1787-1831	Calle de Santa Isabel, 51, 28012
	50	Oratorio del Caballero de Gracia	1789	Calle Caballero de Gracia, 5, 28013
	51	Iglesia y Colegio de San Antón	1794	Calle de Hortaleza, 63, 28004
	52	Iglesia y convento de las Salesas Nuevas	1794-1801	Calle de San Bernardo, 72, 28015

5. Métodos

S.XIX	53	Parroquia de Santa María de Habla Alemana	s. XIX	Avenida de Burgos, 12, 28036
	54	Palacio de Buenavista	1802	Calle Alcalá. 52, 28014
	55	Palacio del Senado	1810	Plaza de la Marina Española, 828013
	56	Iglesia de Santiago. Original derribada con Bonaparte	1811	Calle de Santiago, 24, 28013
	57	Iglesia de San Ildefonso	1826-1950	Plaza de San Ildefonso, 28004
	58	Congreso de los Diputados	1842	Calle Floridablanca, S/N, 28071
	59	Palacio del Marqués de Salamanca	1846	Paseo de Recoletos, 10, 28001
	60	Palacio de Fernán Nuñez	1847	Calle de Santa Isabel. 44, 28012
	61	Palacio del Marqués de Gaviria	1847	Calle del Arenal, 9, 28013
	62	Teatro de la Zarzuela	1856	Calle de Jovellanos, 4, 28014
	63	Iglesia y convento de San Pascual	1866	Paseo de Recoletos, 11, 28004
	64	Real Monasterio de Santa Teresa de las Carmelitas Descalzas	1870	Calle de Ponzano, 79, 28003
	65	Iglesia parroquial de San Matías	1877	Plaza de la Iglesia, 2, 28033
	66	I. N.B. Cervantes	1878-1881	Calle de Embajadores, 70, 28012
	67	Iglesia y convento de las Dominicas de Santo Domingo	1879	Calle de Claudio Coello, 112, 28006
	68	Iglesia y convento de las Salesas Reales	1880	C/ Santa Engracia, 18, 28010
	69	Convento y colegio de las Siervas de María	1880	Plaza de Chamberí, 7, 28010
	70	Asilo y hospital del Niño Jesús	1881-1885	Av. de Menéndez Pelayo, 65, 28009
	71	Teatro María Guerrero	1884	Calle de Tamayo y Baus, 4, 28004
	72	Iglesia de San Fermín de los Navarros	1886-1935	Paseo de Eduardo Dato, 10, 28010
	73	Iglesia de San Andrés de los Flamencos	1887	Calle de Claudio Coello, 99, 28006
	74	Iglesia de Santa Cruz	1889	Calle de Atocha, 6, 28012
	75	Escuela Profesional de Sordomudos e Iglesia Española Reformada Episcopal	1890	Calle de la Beneficencia, 18, 28004
	76	Iglesia y asilo de San José de la Montaña	1890	Calle de Fernández de la Hoz, 16, 28010
	77	Iglesia y Convento de Agustinos Recoletos	1892	Paseo de Recoletos, 20-22, 28001
	78	Parroquia del Perpetuo Socorro	1892-1897	Calle Manuel Silvela, 14, 28010
	79	Iglesia de la Paloma	1896	Plaza Virgen de la Paloma, 19, 28005
S.XX	80	Iglesia de la Milagrosa	1901-1904	Calle de García de Paredes, 45, 28010
	81	Iglesia de San Manuel y San Benito	1902	Calle de Alcalá, 83, 28009
	82	Iglesia y Convento de los Ángeles	1902	Calle de Bravo Murillo, 93, 28003
	83	Iglesia del Colegio de la Divina Pastora	1903	Calle de Santa Engracia, 142, 28003
	84	Convento de La Latina	1904	Calle de Toledo, 52
	85	Iglesia de Santa Cristina	1904	Paseo de Extremadura, 32, 28011
	86	Iglesia de las Religiosas de María Inmaculada	1907	Calle Funcarral, 97, 28004
	87	Iglesia Evangélica Alemana	1907-1909	Paseo de la Castellana, 6, 28046
	88	Oratorio del Santo Cristo del Olivar	1910	Calle Cañizares, 4, 28012
	89	Palacio del Conde de Vistahermosa	1910-1915	Calle de Fuencarral, 97, 28004
	90	Iglesia del Cristo de la Salud	1915	Calle de Ayala, 12, 28001
	91	Iglesia de la Buena Dicha	1916	Calle de Silva, 21B, 28004

5.2. Análisis muestras de madera obtenidas en las visitas realizadas

El objetivo de estos análisis es conocer la especie de madera utilizada en la construcción de bóvedas encamonadas en Madrid capital, para poder estudiar su procedencia y establecer el comercio maderero a lo largo del período histórico comprendido entre los siglos XVII y XIX.

Se obtuvieron muestras de madera de 15 edificios de los 91 visitados, solamente de aquellas obras que poseían bóvedas encamonadas y acceso al espacio de bajocubierta. En cada uno de ellos, se obtuvo una muestra de diferentes elementos constructivos: tirantes, nudillos, camones... en función de su accesibilidad.

El material utilizado para obtener las muestras de madera, ha sido un formón y un martillo de cabeza metálica. De esta forma, realizando una pequeña muesca en la madera se obtenían astillas de madera de al menos 1,5 cm² de sección y 3 cm de longitud.

En la tabla 3, se indican las muestras recogidas en cada visita.

Tabla 3. Muestras recogidas en las visitas realizadas.

Nº	EDIFICIO	CONSTRUCCIÓN BÓVEDA	PROCEDENCIA
1	Casón del Buen Retiro	1637-1701	Camón bóveda Nudillo cercha central
2	Colegiata de San Isidro	1664	-
3	Iglesia de las Calatravas	1670	-
4	Capilla IES San Isidro. Colegio Imperial	1723	-
5	Iglesia del Sacramento (Fuerzas Armadas)	1744	Camón I Pieza suelta zona bóveda
6	Palacio de Fernán Núñez	1753-1849	-
7	Palacio del Marqués de Grimaldi	1779-1780	Tirante cercha Camón I Camón II
8	Parroquia de San Sebastián. Capilla de Belén	1784-1951	-
9	Iglesia y Colegio de San Antón	1794	Tirante nave central Tirante zona altar Carpintería ventana Camón nave central I Camón nave central II
10	Real Monasterio de la Encarnación	s. XVIII	Camón claustro lateral
11	Convento Agustinos Calzados (Senado)	1810	Tirante Estructura vertical Camón bóveda I Camón bóveda II
12	Iglesia de San Ildefonso	1826-1950	Camón cúpula I Camón cúpula II Camón bóveda nave central Camón bóveda nave lateral Camón bóveda zona altar Peldaño escalera Piezas sueltas zona cúpula I Piezas sueltas zona cúpula II Piezas sueltas zona cúpula III Tirante nave lateral derecha Par nave central
13	Congreso de los Diputados	1842	Camón cúpula exterior
14	Capilla del Palacio de Viana.	1843	Tabla ripia Camón I Camón II
15	Palacio de Gaviria	1846	-
16	Capilla del Convento de las Siervas de María	1851	Camón I Camón II Tabla ripia
17	Casa de la Villa	1859	Camón bóveda esquinada Pieza suelta zona bóveda
18	Iglesia y convento de San Pascual	1866	Tablas cubierta Camón capilla lateral I Camón capilla lateral II
19	Iglesia de San Fermín de los Navarros	1886-1935	Par cercha central Tablas cubierta
20	Iglesia de San Andrés de los Flamencos	1887	Camón arco lateral Durmiente cercha central Correa cercha lateral
21	Colegio Oficial de Médicos	1893	Camón I Camón II
* El nombre de los edificios que aparecen en rojo no tenían acceso al espacio de bajocubierta, por lo que no se pudieron obtener muestras de madera.

Los pasos seguidos para preparar las muestras analizadas son los siguientes:

- **Orientación de la muestra**

Se parte de las muestras recogidas en los edificios anteriormente descritos y se talla un cubo de 15 a 20 mm de lado, siempre y cuando sea posible, limpiando la sección transversal con una cuchilla para verificar la dirección de los radios o anillos de crecimiento. Conocido este dato, se orientan los planos tangencial y radial. Posteriormente, se obtiene un cubo cuyas dimensiones no sean superiores a 10 mm de lado para facilitar la realización de los cortes. El orden de los cortes a realizar es primero el radial y posteriormente el tangencial y transversal, debido a la información que contiene.

- **Tinción y reblandecimiento de la muestra**

Dicho cubo de madera se sumerge en un bote lleno de alcohol y glicerina a partes iguales y 10 gotas de safranina, para que durante su cocido en el baño termostático Bunsen se produzca la tinción de la muestra para resaltar la diferenciación histológica de la madera, entre 80 y 100°C. De esta forma se reblandece la madera, eliminando el aire contenido en los lúmenes celulares y se reblandece la pared celular, facilitando el corte con el microtomo.

El tiempo de inmersión depende de la densidad de la madera. Las especies ligeras requieren de muy poco tiempo (unas horas), mientras que las duras necesitan largos períodos de inmersión (días, semanas e incluso meses). En las muestras analizadas, se han mantenido sumergidas en el agua caliente durante 24 horas, en los casos en los que la madera continuaba dura, se ha ampliado el plazo de tiempo otras 24 horas más.

- **Corte**

Se usa un microtomo, caracterizado por la robustez de sus elementos y la cuchilla afilada, para realizar las preparaciones con espesores de 22 micras.

La fijación de la muestra sobre el microtomo se realiza mediante mordazas. Cuando los tres cortes se ejecutan sobre la misma muestra se recomienda comenzar por la superficie radial, siguiendo por la tangencial y por último, la transversal.

El bloque de seccionamiento ideal debe medir aproximadamente 2 cm de largo, radialmente, alrededor de 1 cm de ancho, tangencialmente y 2 cm de longitud, transversalmente. Estas dimensiones se ajustan al tamaño de la muestra original obtenida de las iglesias visitadas.

Una vez fijada la muestra sobre las mordazas, se mantiene húmeda añadiendo xileno con un pincel. Los primeros cortes servirán para igualar o enrasar la superficie de corte y a partir de un determinado momento los cortes comienzan a obtenerse con regularidad, pudiendo ser recogidos con un pincel, pinza o yema de los dedos, evitando que se enrolle.

La observación de la madera así cortada presenta muchas dificultades, ya que la pérdida de agua en corte delgado es muy rápida y sólo permite su observación durante unos instantes. Para solucionar este problema se debe realizar un tratamiento de montaje permanente.

- **Montaje**

Los cortes realizados con el microtomo son montados sobre un porta de vidrio, depositando a continuación una gota de bálsamo de Canadá. El cubre se sitúa sobre una de las aristas del porta y se deja caer lentamente con la ayuda de una aguja sobre el bálsamo, quedando la muestra entre los dos elementos: cubre y porta. El lento descenso facilita la evacuación de burbujas de aire que dificultan la observación de la muestra. El secado del bálsamo se realiza introduciendo el montaje en una estufa a 60°C durante 20-30 días, manteniendo presionado el porta y cubre con ayuda de unas pinzas.

- **Identificación y etiquetado de las preparaciones microscópicas**

Para la identificación de las muestras se ha usado un microscopio ECOVISION M-100FL & BP-20, anteriormente descrito y el programa: “Identificación de maderas de coníferas” realizado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Ingeniería Forestal, Cátedra de Tecnología de la Madera, UPM, en colaboración con Asociación de Investigación Técnica de las industrias de la madera y el corcho (AITIM).

La clave establecida responde a un sistema abierto, dividido en 6 grupos, traqueidas con 29 caracteres, parénquima longitudinal 8, radios leñosos 37, canales resiníferos 7, otros caracteres 2 y regiones geográficas 9.

Una vez identificada la especie, se etiquetan las preparaciones ya montadas con dos adhesivos a ambos lados del portaobjetos, quedando el cubre con los cortes entre ellas. Se indica el nombre científico, el edificio, la pieza constructiva o estructural de procedencia y la fecha de análisis.

5.3. Caracterización experimental

5.3.1. Preparación de las piezas de madera

Como se ha comentado en el apartado 4.1.1., la madera aserrada de pino laricio (*Pinus nigra* Arnold), usada para realizar las probetas y modelos de ensayos mecánicos, procede del aserradero Ayuntamiento de Cuenca Maderas S.A. Se adquirieron piezas de madera cepillada de 40 x 200 mm de sección y longitud de 3,1 m, a partir de las que se elaboraron las probetas de ensayo y los camones de los modelos a escala, con un contenido de humedad medio superior a 20%.

La madera estuvo a la intemperie durante un largo periodo de tiempo, con una temperatura media de 13,6°C y Humedad Relativa media del aire de 38%, hasta que se introdujo en el Laboratorio de Estructuras de la ETSAM cuyas condiciones eran 18,3°C de temperatura y 32% de Humedad Relativa del aire.

El lote de madera se dividió en dos grupos, el primero de ellos se introdujo en una cámara de acondicionamiento normalizado en las condiciones fijadas por la norma, es decir, a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura y $65 \pm 5\%$ de humedad relativa y realizando un almacenamiento que permitiese la ventilación de todas las caras de las piezas para homogeneizar el secado; y el segundo de ellos, en el interior del laboratorio, que, al estar situado en un sótano, sus condiciones de humedad y temperatura son prácticamente constantes; alrededor del 20°C y 50% de humedad relativa.

Cada pieza de madera fue numerada y se midió su contenido de humedad, con un higrómetro de resistencia eléctrica Hydromette HT 85 T, en 12 puntos de cada cara para corroborar la homogeneización en el grado de humedad de las piezas. Se introdujeron dos electrodos, clavos aislados, hasta una profundidad de 1/3 de la pieza y a una distancia entre ellos de 30 mm, mediante el uso de la maza propia del equipo. El contenido de humedad se determina a través de la medición de la resistencia eléctrica de la madera al paso de la corriente eléctrica.

Tras realizar dicha medición sobre las 8 primeras piezas y comprobar la distribución homogénea de humedad, se disminuyó el número de mediciones a 3 en cada cara por día. Dichas mediciones se realizaron evitando las zonas con nudos.

En el gráfico 1, se observa la evolución del contenido de humedad medio de la pieza con mayor contenido de humedad de cada uno de los dos grupos, siendo la pieza 1 la representante del grupo que fue aclimatado en el laboratorio y la 2, en la cámara de acondicionamiento.

Gráfico 1. Evolución del Contenido de Humedad medio de la madera en % (ordenadas) respecto al número de días de aclimatación (abscisas) para las piezas 39 y 40.

Se observa un secado algo más rápido en la cámara que fuera de ella, aunque las diferencias dejan de ser relevantes entre la tercera y cuarta semana, momento en donde se produce el equilibrio higroscópico. El equilibrio en ambas piezas es muy similar, de un 12,20% para la pieza número 1 (aclimatada fuera de la cámara, pero dentro de las instalaciones del laboratorio) y de un 14,19% para la número 2 (aclimatada en la cámara bajo las condiciones de la norma). Se aprecia que el secado fuera de la cámara, seca un poco más la madera, pero con una diferencia no excesiva.

Una vez que la madera llegó al punto de equilibrio higroscópico y a medida que se fueron realizando los distintos ensayos, se cortaron dichas piezas a las dimensiones de longitud requeridas.

Posteriormente, como se comentó en el apartado 4.1.1., se realizó una clasificación visual de los tabloncillos resultantes, de acuerdo con la norma *UNE-EN 56544:2011* y se obtuvieron los siguientes rendimientos: 45% de calidad ME-1, 54% de calidad ME-2 y 1% de rechazo.

La calidad mayoritaria, ME-2, corresponde a una clase resistente C18 según la norma *UNE-EN 1912:2012*, cuyas propiedades asignadas, según la norma *UNE-EN 338:2016*, son: valor característico (5º percentil) de la resistencia a flexión de 18 N/mm², valor medio del módulo de elasticidad de 9.000 N/mm² y valor medio de la densidad de 380 kg/m³.

En el Anexo F.1. *Preparación de las piezas de madera* se recogen las hojas resumen relativas a la toma de datos del contenido de humedad de la madera y su evolución.

5.3.2. Caracterización de la madera

Para determinar las características de la madera, módulo de elasticidad y tensión de rotura, se seleccionó una muestra de diez piezas de 40 x 200 mm de sección y 3,1 m de longitud, que se clasificaron visualmente y se ensayaron con métodos no destructivos y mecánicos.

5.3.2.1. Clasificación visual

Se realizó la clasificación visual de cada pieza de madera, haciendo uso de la norma española *UNE 56544:2011*. La clasificación visual se realizó en seco, es decir, con un contenido medio de humedad inferior o igual al 20%.

Además, la nudosidad de las piezas se evaluó mediante el parámetro Concentrated Knot Diameter Ratio (CKDR), definido en la norma japonesa de madera estructural de coníferas, *SIS-19 1991*.

El CKDR es la suma de los diámetros de los nudos contenidos en las cuatro caras de una sección de 15 cm de longitud dividido por el perímetro de la pieza. Los diámetros de los nudos deben medirse entre dos líneas tangenciales al nudo y paralelas a la dirección longitudinal de la pieza (figura 103). Si dicho diámetro supera en 2,5 veces el menor diámetro del nudo, dicho valor se dividirá entre 2. El máximo valor de los CKDR calculados, indica la calidad de la pieza. Lógicamente su valor oscila entre 0 y 1.

Se midieron dos tipos de CKDR máximos: uno el correspondiente a la zona central, sobre el vano central de longitud igual a 8 veces el canto, es decir, en los 1,6 metros centrales de la pieza, y otro, el global, correspondiente al valor máximo de toda la pieza.

Este parámetro se utiliza con frecuencia como complemento en las técnicas no destructivas para alcanzar una mayor correlación con la resistencia a flexión de la madera.

Figura 103. Determinación de los valores de CKDR de una pieza.

5.3.2.2. Ensayos no destructivos

- Contenido de humedad y densidad

Primero se estimó el contenido de humedad de la madera, mediante un xilohigrómetro Hydromette HT 85 T, de acuerdo con lo establecido en la norma *UNE-EN 13183-2:2002*. Se introdujeron dos electrodos, clavos aislados, hasta una profundidad de 1/3 de la pieza y a una distancia entre ellos de 30 mm, mediante el uso de la maza propia del equipo, evitando cualquier tipo de singularidad.

La densidad se determinó mediante las dimensiones y la masa de cada pieza, medida mediante una balanza PCE WS 30.

- Equipo de ondas de impacto

El equipo portátil MST, MicroSecond Timer, es un aparato de medición del tiempo de transmisión de onda acústica (μs). Es necesaria la realización de un impacto limpio y preciso, mediante un martillo de 100 g de masa.

Se realizaron medidas longitudinales en dirección paralela a la fibra con el MST, colocando los sensores en las testas opuestas y tomando dos medidas, una con los sensores colocados en la testa a 1/3 (MST sup) y otra a 2/3 de la altura de la sección (MST inf), centrados respecto al canto.

Para determinar la velocidad de propagación de la onda, se divide la distancia entre emisor y receptor, en este caso la longitud de la pieza, 3,1 m, entre la media del tiempo, medida superior e inferior, recogido por el equipo MST (s).

El módulo de elasticidad dinámico se ha determinado multiplicando la densidad por la velocidad de propagación de la onda al cuadrado 5 (ecuación 1).

$$E_{din} \left(\frac{N}{m^2} \right) = \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot v_{END}^2 \left(\frac{m}{s} \right)^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

- Equipo de vibración (Portable Lumber Grader)

Se coloca el micrófono cercano a la testa, se golpea en la misma testa o en la opuesta con un martillo cuya masa sea aproximadamente el 3% del peso de la pieza. En función de la presión sonora recogida por el micrófono y usando la transformada de Fourier, se obtiene la frecuencia natural del primer modo de vibración longitudinal, con resolución de 1 Hz.

Para determinar la velocidad de propagación de la onda, se utiliza la ecuación 2, siendo l la distancia entre emisor y receptor, en este caso 3,1 m, y f, la frecuencia recogida por el equipo MST (Hz=s⁻¹).

$$v_{END} \left(\frac{m}{s} \right) = 2 \cdot l(m) \cdot f(Hz) \quad \text{Ecuación 2}$$

El módulo de elasticidad dinámico se ha determinado multiplicando la densidad por la velocidad de propagación de la onda al cuadrado, al igual que en el caso anterior (ecuación 1).

5.3.2.3. Ensayo de flexión de las piezas de madera maciza

El ensayo de flexión se ha realizado en el pórtico de ensayo hidráulico, modelo MCO-30, conforme a la Norma UNE-EN-408:2011+A1:2012., dotado por una célula de carga de 30 toneladas (figura 104). Para evitar el vuelco lateral de la pieza a flexión se colocaron unas horquillas con dos piezas de madera a 500 mm de cada uno de los extremos. Para evitar el aplastamiento en las zonas de apoyo y de aplicación de carga, se colocaron unas pletinas metálicas de 10 mm de espesor y 50 mm de ancho.

Figura 104. Máquina de ensayos a flexión simple con dos cargas puntuales con una distancia entre apoyos de 1700 mm.

La disposición de ensayo se muestra en la figura 105.

Figura 105. Distancia entre apoyos y cargas aplicadas en el ensayo de flexión.

La deformación producida se midió mediante dos LVDT, números 11 y 12, bajo la sección central de la viga, colocando uno a cada lado de la sección, como se muestra en la figura 106. También se registró la deformación del puente de apoyo de la probeta y fue descontado de la deformación anterior. Su influencia era muy reducida, inferior al 2%.

Figura 106. Colocación de los LVDT en el centro de la viga de madera maciza.

Para calcular el módulo de elasticidad global, se utilizó el tramo del gráfico Fuerza-flecha en el punto medio, comprendido entre $0,1 F_{\text{máx, estimada}}$ y $0,4 F_{\text{máx, estimada}}$, mediante la ecuación 3:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Siendo, a: distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo (mm); l: luz en flexión (mm); b: ancho sección (mm); h: altura sección (mm); $w_2 - w_1$: incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$ (mm); $F_2 - F_1$: incremento de carga sobre la línea de regresión en newtons. La deformación era igual al valor medio de los dos LVDTs.

La resistencia a flexión se calcula mediante la ecuación 4:

$$f_m = \frac{6Fa}{bh^2}$$

Ecuación 4

Siendo: a: distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo (mm); b: ancho sección (mm); h: altura sección (mm); F: carga de rotura en newtons.

5.3.3. Ensayos para la caracterización de las uniones

Este grupo de ensayos tiene por objetivo modelizar el comportamiento mecánico de las uniones entre camones, para implementar el modelo teórico explicado en el apartado 5.4. Modelos teóricos de comportamiento.

5.3.3.1. Determinación del módulo de deslizamiento del tirafondo: K_{ser}

El objetivo de este ensayo es determinar los valores relativos al modulo de desplazamiento K_{ser} en los casos de dirección del esfuerzo perpendicular y paralelo a la fibra. El procedimiento de ensayo se hizo de acuerdo con la norma *UNE EN 26891:1992*.

Para la realización de este ensayo, se construyeron 24 probetas constituidas por tres piezas de madera de dimensiones 200 x 200 mm x 40 mm de grueso, unidas mediante 6 tirafondos Rothoblass® VGZ 7x100, tal y como se muestra en la figura 107. Los tirafondos se introdujeron a simple cortadura colocando 3 por cada cara y contrapeadas. Se ensayaron 13 probetas con los tirafondos trabajando en dirección paralela a la fibra y 11 en dirección perpendicular a la fibra. Se procedió a igualar las caras mediante una regruesadora para que el espesor de todas las probetas sea el mismo, 40 mm. De esta forma se pretendía evitar, en la medida de lo posible, los alabeos que presentan algunas piezas.

Figura 107. Disposición de tirafondos para ensayo perpendicular y paralelo a la fibra.

Para registrar el desplazamiento la pieza central de la probeta, se usaron dos LVDT, números 5 y 6, de 20 mm de recorrido, situados en cada línea de junta.

Las probetas fueron ensayadas en el pórtico de ensayo, modelo MCO-30. Fue necesario estimar la carga máxima mediante cálculos preliminares, considerando que dicha fuerza estimada correspondía con un desplazamiento del camón central de 15 mm. En base a los diferentes ensayos realizados, dicha carga estimada fue ajustándose para evitar que la desviación entre el valor estimado y el máximo fuese mayor del 20%.

La carga fue aplicada hasta $0,4 F_{est}$, y se mantuvo durante 30 s. Después, se redujo a $0,1 F_{est}$ y se mantuvo durante 30 s. A continuación, se incrementó hasta que alcanzó la carga máxima o un deslizamiento de 15 mm (figura 108). Por debajo de $0,7 F_{est}$ se emplea un régimen constante de carga o de deslizamiento que corresponde a $0,2 F_{est}$ por minuto $\pm 25\%$. Por encima de $0,7 F_{est}$ se emplea una velocidad constante de deslizamiento, ajustada de manera que se logre la carga máxima o un deslizamiento de 15 mm en un tiempo de ensayo adicional de 3 a 5 minutos. El tiempo total del ensayo es de 10 a 15 minutos. El ensayo se detiene al alcanzar la carga final o al alcanzar un deslizamiento de 15 mm.

Figura 108. Procedimiento de carga.

Para cada probeta de ensayo se registraron las mediciones de deslizamiento v_{01} , v_{04} , v_{14} , v_{11} , v_{21} , v_{24} , v_{26} y v_{28} , que se muestran en la figura 109.

Figura 109. Mediciones y curva teórica de deslizamiento-carga.

Para cada ensayo se determinaron, a partir de las medidas efectuadas, los siguientes valores:

1) carga máxima

$$F_{\text{máx}}$$

2) carga máxima estimada

$$F_{\text{est}}$$

3) deslizamiento inicial

$$v_i = v_{0,4}$$

4) deslizamiento inicial modificado

$$v_{i,\text{mod}} = \frac{4}{3}(v_{04} - v_{01})$$

5) asiento de la unión²⁸

$$v_s = v_i - v_{i,\text{mod}}$$

6) deslizamiento elástico

$$v_e = \frac{2}{3}(v_{14} + v_{24} - v_{11} - v_{21})$$

7) módulo de deslizamiento inicial

$$k_i = 0,4 F_{\text{est}} / v_i$$

²⁸ v_s es negativa cuando la carga-desplazamiento sea inicialmente convexa.

8) módulo de deslizamiento

$$k_s = 0,4 F_{est} / v_{i,mod}$$

9) deslizamiento a 0,6 $F_{máx}$

$$V_{0,6}$$

10) deslizamiento modificado a 0,6 $F_{máx}$

$$V_{0,6,mod} = V_{0,6} - V_{24} + V_{i,mod}$$

11) deslizamiento a 0,8 $F_{máx}$

$$V_{0,8}$$

12) deslizamiento modificado a 0,8 $F_{máx}$

$$V_{0,8,mod} = V_{0,8} - V_{24} + V_{i,mod}$$

5.3.3.2. Determinación de la rigidez a la rotación K_{rot} de un par de tirafondos

El objetivo de este ensayo es determinar la rigidez rotacional K_{rot} . Para ello, se construyeron 3 probetas constituidas por una pieza de 811 x 200 x 40 mm y dos de 405,5 x 200 x 40 mm, unidas mediante 4 tirafondos Rothoblass® VGZ 7x100, dos en cada extremo, tal y como se observa en las figuras 110 y 111.

Figura 110. Medidas, distancias y colocación de los LVDT en el ensayo de Flexión-Rotación.

Figura 111. Imagen del ensayo de Flexión-Rotación, detalle de la colocación de los LVDT.

El experimento consiste en un ensayo a flexión sobre dos piezas en voladizo unidas a una viga biapoyada mediante parejas de tirafondos. El giro producido en las uniones se calcula mediante la medición del desplazamiento vertical de los puntos próximos a la conexión. Para registrar dicho giro, producido entre las piezas de madera, se usaron cuatro LVDT, números 4, 5, 6 y 7, de 20 mm de recorrido, en sólo un lado de la probeta. Las probetas fueron ensayadas en el pórtico de ensayo hidráulico, modelo MCO-30, con una velocidad de carga de 10,0 kp/s.

Para determinar el valor del K_{rot} se calcula el momento correspondiente a la fuerza aplicada ($F/2$) por la distancia entre el apoyo y el punto de aplicación de la fuerza (d) y el giro producido por la fuerza ($\theta_t = \theta_1 - \theta_2$), como se indica en la figura 112.

Figura 112. Determinación del K_{rot} en el ensayo de Flexión-Rotación.

Aprovechando este ensayo de Flexión-Rotación, para determinar la rigidez a la rotación K_{rot} del par de tirafondos, se calculó el K_{ser} correspondiente a cada tirafondo en dirección paralela a la fibra, para verificar los valores obtenidos con el ensayo anterior, apartado 5.5.3.1. *Determinación del módulo de deslizamiento del tirafondo: K_{ser}* , de la siguiente forma, (ecuación 5):

$$K_{ser} = \frac{F}{\delta};$$

$$F = \frac{M}{75 \text{ mm}};$$

$$\delta = \left(\frac{75}{2}\right) \cdot \theta;$$

$$K_{ser} = \frac{2 \cdot M}{75 \cdot 75 \cdot \theta} = K_{rot} \cdot \left(\frac{2}{75 \cdot 75}\right)$$

Ecuación 5

5.3.3.3. Estudio mecánico de una unión encamonada

El objetivo de este ensayo es estudiar el comportamiento de la junta entre camones para poder definirlos en el modelo teórico y, además determinar su capacidad de carga y su rigidez para estimar su sección efectiva con respecto a una pieza de sección maciza.

Se utilizaron dos tipos de probetas:

- Tipo A: Pieza encamonada con dos pares de tirafondos y un tirafondo central
- Tipo B: Pieza encamonada con dos pares de tirafondos y sin tirafondo central

El objetivo de estos dos ensayos era conocer si la influencia del tirafondo central era o no relevante.

Ambas piezas encamonadas tienen una longitud total de 1,80 metros. En ambos casos, se dispusieron dos filas de piezas, una conformada por 2 piezas de 0,9 m de longitud y otra con 3 piezas de dimensiones 0,5 m, 0,8 m y 0,5 m. La unión se realizó mediante tirafondos de acero Rothoblass®, VGZ7x100, colocados a tresbolillo, siguiendo la distribución planteada en el modelo de arcos encamonados descrito en el apartado 5.5.4. La distribución y distancia entre los tornillos se observa en la figura 113. En los puntos de apoyo y de aplicación de la carga, se han situado unas pletinas metálicas de 5 cm de ancho y 1 cm de espesor para evitar el aplastamiento de la madera (figura 114).

TIPO A

Alzado

Planta

Cotas en mm

TIPO B

Alzado

Planta

Cotas en mm

Figura 113. Pieza encamionada, tipo A: con tornillo central y tipo B: sin tornillo central. Alzado y planta.

Figura 114. Detalle de apoyo de la viga.

Para registrar los desplazamientos y giros de la junta central en estudio, se usaron cinco LVDT (figura 115 y 116):

- LVDT 3, extensómetro de longitud ± 10 mm, para determinar el desplazamiento vertical de la junta central de la viga.
- LVDT 4, extensómetro de longitud ± 20 mm, para determinar el desplazamiento horizontal de la junta central de la viga (compresión).
- LVDT 5, extensómetro de longitud ± 20 mm, para determinar el desplazamiento horizontal de la junta central de la viga (tracción).
- LVDT 9, extensómetro de longitud ± 50 mm, para determinar el desplazamiento vertical del camón central.
- LVDT 10, extensómetro de longitud ± 50 mm, para determinar el desplazamiento vertical del camón central.

Figura 115. Colocación de los LVDT en la probeta .

Figura 116. Colocación de los LVDT en la junta en estudio.

Se ensayaron tres probetas de cada tipo, tipo A y tipo B, que se cargaron a flexión sobre dos puntos simétricos, situados a 485,2 mm del centro del vano de la pieza, en el pórtico de ensayo hidráulico, modelo MCO-30, a una velocidad constante de avance de la cabeza de carga de 2 mm/min. Los apoyos se encuentran a 50 mm de los extremos de la pieza, separados entre sí 1.700 mm, como se observa en la figura 117.

$$M = \frac{F}{2} \cdot d$$

$$\theta = \frac{lvdt_5 - lvdt_4}{150 \text{ mm}}$$

$$K_{rot} = \frac{M}{\theta}$$

Figura 117. Diagrama de esfuerzos cortantes, momentos flectores y deformación de la pieza.

El dispositivo de carga utilizado permite la medición de la fuerza con una precisión del 1% de la carga aplicada y para cargas inferiores al 10% de la carga máxima con una precisión del 0,1% de la carga máxima aplicada.

Se toma como flecha la media de las dos mediciones de desplazamiento vertical realizadas en cada fila de camones, en el punto medio de la pieza, con una precisión del 1%.

La posición de la aplicación de las cargas se ha diseñado para evitar que el cortante influya en la junta en estudio, con el fin de poder determinar con facilidad las fuerzas que actúan en la misma. En este caso, una de las filas de camones se considera como junta auxiliar para la otra fila de camones. Se determina la rigidez a la rotación del conjunto del grupo de 4 o 5 tirafondos que existe a cada lado de la junta. Esta junta tiene una holgura de 1 mm aproximadamente, lo que es cercano a lo encontrado en la observación de encamonados existentes. En las otras dos juntas de la fila “auxiliar” de camones se ha dejado una holgura de 15 mm, suficiente para que no lleguen a contactar a lo largo del ensayo. De esta manera no influyen en las mediciones realizadas para obtener la rigidez a la rotación (figura 117).

Figura 118. Fuerzas generadas en cada elemento de fijación como consecuencia del momento flector.

Para analizar el comportamiento de la junta, solicitada por el Momento M , se considera que, en los medios de unión, tirafondos, se generan fuerzas (F_1 , F_2 , F_3 y F_4), dispuestas tangencialmente sobre círculos de radio r ($r=r_1$, r_2 , r_3 y r_4), siendo dicho radio la distancia del tirafondo al centro de rotación C , $r=0,2714$ m, que en este caso coincide con la situación del tornillo central, definido como centro geométrico de la unión (figura 118) (Argüelles et al., 2015).

Planteando la condición de equilibrio, se obtiene la ecuación 6:

$$M = \sum_{i=1}^4 F_i \cdot r_i$$

Ecuación 6

Además, entre las piezas enlazadas, se produce un giro relativo de un ángulo θ , debido al deslizamiento en los medios de unión. Para este deslizamiento se admite, de acuerdo con el Eurocódigo 5, un comportamiento lineal del material, por lo que dicho desplazamiento será (ecuación 7):

$$d_s = \frac{F_i}{K_{ser,i}}; \theta = \frac{d_s}{r_i} = \frac{F_1}{K_{ser,1} \cdot r_1} = \frac{F_2}{K_{ser,2} \cdot r_2} = \frac{F_3}{K_{ser,3} \cdot r_3} = \frac{F_4}{K_{ser,4} \cdot r_4} \quad \text{Ecuación 7}$$

Siendo K_{ser} el módulo de deslizamiento. Este módulo tendrá un valor intermedio entre el paralelo y el perpendicular a la fibra.

Combinando las ecuaciones 6 y 7, se obtiene:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^4 F_i \cdot r_i}{\sum_{i=1}^4 K_{ser,i} \cdot r_i^2} = \frac{M}{K_{rot}}; \theta = \frac{M}{K_{rot}} = \frac{F_i}{K_{ser,i} \cdot r_i} \quad \text{Ecuación 8}$$

De donde,

$$F_i = \frac{K_{ser,i} \cdot r_i}{K_{rot}} \cdot M \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde K_{rot} representa la rigidez a la rotación de la unión, definida por la ecuación 10.

$$K_{rot} = \sum_{i=1}^4 K_{ser,i} \cdot r_i^2 = K_{ser,\alpha} \cdot \sum_{i=1}^4 r_i^2 \quad \text{Ecuación 10}$$

Despejando $K_{ser,\alpha}$ se obtiene la ecuación 11.

$$K_{ser,\alpha} = \frac{K_{rot}}{4 \cdot r^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

Para contrastar los resultados de $K_{ser,0}$ y $K_{ser,90}$, obtenidos anteriormente en el apartado 5.3.3.1, con el de este apartado, se ha utilizado la ecuación planteada por Racher (1995), basada en la fórmula de Hankinson, considerando que $\alpha = 77^\circ$.

$$K_{ser,\alpha} = \frac{K_{ser,0} \cdot K_{ser,90}}{K_{ser,0} \cdot \cos^2 \alpha + K_{ser,90} \cdot \sin^2 \alpha} \quad \text{Ecuación 12}$$

5.3.4. Construcción de los modelos de arcos encamionados

En el Laboratorio de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM), UPM, se construyeron dos arcos encamionados, exactamente iguales, para la realización de los ensayos. Cada modelo se compone de dos arcos unidos entre sí mediante montantes y diagonales (figura 119).

Figura 119. Modelo de arcos encamionados, alzado, planta y axonometría. Cotas principales.

El arco, de trazado semicircular, se construye a tamaño real con una luz entre ejes de apoyos de 6,34 metros y 3,27 metros de flecha.

Los camones y contracamones, de forma poligonal, tienen un tamaño de aproximadamente 800 mm de largo en su línea media, 200 mm de canto y 40 mm de espesor, medidas muy habituales en las construcciones visitadas.

Para realizar el corte diagonal en la testa, en cada uno de los camones, se utilizó una plantilla en madera de okume, *Aucoumea klaineana* (Oliv.) Nied., fabricada mediante corte por control numérico a partir del dibujo de AutoCAD del ensayo, para definir con precisión la geometría de los camones.

Se ejecutaron dos arcos, cada uno de ellos conformado por una fila de 12 camones y otra fila de 12 contracamones, los cuales se unen con tirafondos de acero Rothoblass®, VGZ 7x100, colocados a tresbolillo. La distribución y distancia entre los tirafondos (figura 120), reproducen aproximadamente la práctica tradicional.

Figura 120. Distribución de los tirafondos y distancias entre ellos.

En la figura 120, se indican las distancias y separaciones mínimas exigidas en el Eurocódigo 5, tomando un diámetro d , intermedio entre el diámetro del núcleo y el diámetro eficaz, de 4,5 mm.

Los arcos se construyeron uniendo sus camones en el suelo, usando como plantilla una copia impresa en papel. Primero, se realizaron 4 medios arcos, sin el camón de la clave, que sería colocado una vez que dos medios arcos se dispusieran en su posición vertical definitiva. La separación libre entre los dos arcos era 840 mm.

En la base se dispuso un atirantado mediante dos barras GEWI. En uno de los apoyos de cada arco se colocó una placa metálica de 400 x 1500 x 10 mm untada de grasa, con el objetivo de minimizar el rozamiento y obtener el valor real del empuje al que está sometido el arco, a través de una célula de carga intercalada en el atirantado en la base. El otro apoyo se atornilló al suelo, para impedir su deslizamiento.

Una vez contruidos los dos arcos, se arriostraron mediante montantes y diagonales. Los montantes están contruidos por piezas de madera microlaminada (Kerto Q), 50 mm de espesor, 100 mm de canto y 0,84 m de longitud y las triangulaciones realizadas con Paralam (Parallel Strand Lumber), con dimensiones de 39 mm x 200 mm de sección y 0,90 m de longitud. En la figura 121, se observa el proceso de montaje.

Figura 121. Proceso de construcción del arco del modelo de ensayo real. A) Plantilla colocación camones. B) Replanteo de los camones. C) segunda fila de camones. D) Plantilla colocación tornillos. E) Placa metálica con plantilla del apoyo del arco; posteriormente untada en grasa. F) Colocación primer arco. G) Colocación de la segunda mitad del arco sin la clave. H) Arco construido con los arriostramientos.

5.3.5. Ensayos mecánicos del modelo de la estructura encamónada

5.3.5.1. Ensayo bajo carga constante con duración media

El objetivo de este ensayo es estudiar el comportamiento de la estructura encamónada bajo una carga de duración media, analizar las deformaciones producidas y su recuperación tras eliminar las cargas.

El arco encamónado, descrito en el apartado anterior 5.5.4, fue cargado, de forma simétrica, con 18 bidones rellenos de agua, 9 en cada arco. Dichos bidones se ataron a los camones mediante cuerdas, y se fueron rellenando de agua hasta alcanzar su capacidad, que correspondía a 50 kp cada uno, es decir, 8,82 kN aproximadamente de carga total (figuras 122 y 123).

Figura 122. Distribución de cargas aplicadas.

Figura 123. Colocación de los bidones en el ensayo de carga de duración media.

La duración del ensayo fue de 15 días, en los que se registraron las deformaciones y giros de la estructura mediante 13 LVDT, distribuidos en diferentes puntos, como se muestra en la figura 124.

Figura 124. Ubicación de los LVDT para el estudio general de deformaciones y giros.

Los captadores de recorrido utilizados son los siguientes:

- LVDT 9, 11, 12 y 13, que miden el desplazamiento perpendicular al camón.
- LVDT 10, que mide el desplazamiento horizontal de dicho punto.
- Los grupos de LVDT 1-7-8 y 2-4-5, que registran la rotación local y el desplazamiento perpendicular al camón.
- El grupo de captadores LVDT 3-6, capaz de medir la rotación local.

Los datos se registraron durante el proceso de carga y de descarga.

5.3.5.2. Ensayo del arco hasta el agotamiento

El objetivo de este ensayo es conocer la carga de agotamiento del arco, su modo de rotura, así como la localización de las rótulas plásticas. Además permitirá verificar los modelos de análisis explicados en el apartado 5.3. *Modelos teóricos de comportamiento.*

Para ello, se construyeron dos arcos encamonados, exactamente iguales, y se ensayaron en condiciones similares en la máquina de ensayo hidráulica manual (figura 125). Uno de ellos, era el mismo que fue previamente sometido a carga constante con duración media, apartado 5.5.5.1. El segundo se construyó exactamente igual que el primero y se ensayó hasta el agotamiento. En ambos casos, las cargas se aplicaron con un avance constante de la cabeza de carga de 2 mm/min.

Los desplazamientos y deformaciones de los camones se midieron con LVDT, con la misma distribución que en el ensayo bajo carga constante con duración media (figura 124).

Figura 125. Ensayo de rotura del modelo de arcos encamonados.

5.3.6. Análisis dinámico. Frecuencias propias de vibración

5.3.6.1. Pieza simple encamonada recta

El objetivo de este estudio es indagar si es posible determinar las frecuencias propias de la probeta, pieza encamonada simple, para poder compararla con una pieza de dimensiones similares en madera maciza y verificar el comportamiento del modelo teórico en SAP2000© ante el análisis dinámico.

En este ensayo se analizó una viga Tipo B (sin tirafondo central) utilizada en el estudio mecánico de una unión encamonada, (figura 113, apartado 5.5.3.3). Debe observarse que sólo se realizaron ensayos en dos probetas, debido a que los resultados no fueron muy claros, como se verá en el capítulo de resultados.

Para determinar las frecuencias de vibración y con el espectro de frecuencias, poder determinar las frecuencias propias de la estructura, se utilizaron dos equipos de ensayos no destructivos, sensores de aceleración (acelerómetro) y el equipo portátil de vibración con micrófono (PLG). También, se estimaron las frecuencias teóricas en función de las fórmulas matemáticas planteadas por Blevins, 1979 y Baño *et al.*, 2011.

a) Sensores de aceleración

El acelerómetro se situó en el centro del vano y en una de las caras de la pieza (figura 126). Se midieron las vibraciones longitudinales y transversales de la pieza.

Figura 126. Colocación del acelerómetro en el modelo ensayado.

El ensayo dinámico consistía en introducir golpes, en la dirección vertical y sobre la cara superior de la pieza, con un martillo metálico de 100 g de masa, localizados en tres posiciones distintas, como se observa en la figura 127, en el punto medio y en los extremos.

Figura 127. Axonometría y alzados de la estructura en estudio con indicación de la aplicación de los golpes durante el ensayo dinámico, con el acelerómetro situado en el centro de la pieza.

Se llevaron a cabo 6 ensayos, realizando en cada uno de ellos, 20 golpes en cada una de las 3 localizaciones, descritas en la figura 127.

A medida que se realizaban los 20 impactos en cada localización descrita, el programa informático *Vibraciones* de CODEIN, indicaba en una gráfica el resultado de la transformada de Fourier. De esta forma, se localizaban los puntos de máxima amplitud. Se anotaron los valores que más se repetían durante esos veinte impactos, que deberían corresponder con los modos de vibración de la estructura en estudio.

b) Equipo portátil de vibración

Con el otro equipo de ensayos no destructivos, PLG, se realizaron dos tipos de ensayos, para determinar la frecuencia propia de vibración en dirección longitudinal y transversal, respectivamente. Para ello, se aplicaron impactos, en dos localizaciones distintas de la pieza, con el martillo metálico, con una fuerza similar.

Para determinar la frecuencia propia de la pieza en dirección longitudinal, se aplicó el impacto en la testa de la pieza, situando los apoyos en los extremos y para determinar la frecuencia en dirección transversal (vibración en flexión), de cara y de canto, se aplicaron los impactos con el martillo en el centro del vano de la pieza, situando los apoyos en los extremos y a $0,224 L$, como se muestra en la figura 128 y colocando la pieza en posición de canto y de tabla. Los ensayos se realizaron en dos probetas iguales (figuras 126 y 127).

Figura 128. Aplicación de los golpes durante el ensayo con PLG.

Con el programa informático del PLG, se obtuvo la frecuencia natural del primer modo de vibración mediante la transformada de Fourier, con una resolución de 1 Hz.

c) Frecuencias teóricas

El cálculo realizado para conocer las frecuencias propias en flexión proviene de las soluciones planteadas por Blevins (1979), basada en la siguiente fórmula (ecuación 13):

$$\frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot E \cdot I}{m \cdot L^4}} = f(\text{Hz})$$

Ecuación 13

Siendo, g : la gravedad en mm/s^2 ; E : el módulo de elasticidad en kp/mm^2 ; I : el momento de inercia en mm^4 ; m : la masa en kg/mm y L : la luz en mm .

5.3.6.2. Arco encamonado

El objetivo de este ensayo es determinar las frecuencias propias de vibración en dirección transversal de la estructura de arcos encamonados, descrita en el apartado 5.5.4.

Para ello, se han usado cuatro acelerómetros, dos en cada arco, que miden la vibración en el eje y, dirección transversal, dispuestos tal y como muestra la figura 129. La posición de cada acelerómetro corresponde con la siguiente nomenclatura, a la que se hará referencia en el apartado 6.3.4.2. *Arco encamonado y comparación con el modelo teórico:*

- Riñón delantero: acelerómetro colocado en el primer arco, en la zona intermedia comprendida entre el arranque y la clave (posición 1).
- Riñón trasero: acelerómetro colocado en el segundo arco en la zona intermedia comprendida entre el arranque y la clave (posición 2).
- Clave delantera: acelerómetro colocado en la clave del primer arco (posición 4).
- Clave trasera: acelerómetro colocado en la clave del segundo arco (posición 3).

Figura 129. Colocación de los acelerómetros. En la clave y en el riñón derecho de ambos arcos.

La lectura de los acelerómetros se ha realizado de la siguiente manera:

- *De forma individual:* activando en cada lectura un solo acelerómetro de los cuatro.
- *Dos a dos:* activando parejas de acelerómetros en todas las combinaciones posibles (clave + riñón delanteros, clave + riñón traseros, riñones y claves).
- *4 acelerómetros:* activando todos los acelerómetros a la vez.

Se han realizado tandas de golpes con un martillo de 100 g, a razón de 20 impactos distanciados aproximadamente 1 s entre ellos. Los impactos fueron aplicados en seis localizaciones distintas, como se observa en la figura 130, en la zona de los riñones y de la clave, activando, de manera paulatina, el registro de los distintos acelerómetros, para obtener una lectura clara en cada uno de los impactos.

Figura 130. Axonometría de la estructura en estudio con indicación de la aplicación de los golpes durante el ensayo.

Las lecturas de los distintos acelerómetros, corresponde a la siguiente configuración:

- Acelerómetro 1 activo (riñón delantero): 20 golpes realizados en cada una de las 6 localizaciones, ejes x e y activados.
- Acelerómetro 2 activo (riñón trasero): 20 golpes realizados en cada una de las 6 localizaciones, ejes x e y activados.
- Acelerómetro 3 activo (clave trasera): 20 golpes realizados en cada una de las 6 localizaciones, ejes x e y activados.
- Acelerómetro 4 activo (clave delantera): 20 golpes realizados en cada una de las 6 localizaciones, ejes x e y activados.
- Acelerómetro 1 y 2 activos (riñón delantero y trasero): 20 golpes realizados en cada una de las 6 localizaciones, ejes x e y activados.
- Acelerómetro 1 y 4 activo (riñón delantero y clave delantera): 20 golpes realizados en cada una de las 6 localizaciones, ejes x e y activados.

- Acelerómetro 1 y 2 activos (riñón delantero y riñón trasero): 20 golpes realizados en cada una de las 6 localizaciones, ejes x e y activados.
- Acelerómetro 3 y 4 activo (clave delantera y trasera): 20 golpes realizados en cada una de las 6 localizaciones, ejes x e y activados.
- Los cuatro acelerómetros activos con los ejes x e y activados y aplicando 20 impactos en cada una de las 6 localizaciones.

A medida que se realizaban los 20 impactos en cada localización descrita, el programa informático *Vibraciones* de CODEIN, indicaba en una gráfica el resultado de la transformada de Fourier. De esta forma, se localizaban los puntos de máxima amplitud. Se anotaron los valores que más se repetían durante esos veinte impactos, que deberían corresponder con los modos de vibración de la estructura en estudio.

5.4. Modelos teóricos de comportamiento

Se han estudiado varios modelos teóricos con el objetivo de poder analizar, verificar, y en su caso, rehabilitar el patrimonio histórico-constructivo de las bóvedas encamonadas, cuando sea preciso. De una forma sencilla, se puede modelizar la estructura encamonada y determinar su carga de agotamiento y deformaciones producidas, comparándolas con las cargas de servicio y deformaciones existentes en la obra a rehabilitar.

Se han propuesto modelos de barras 3D en SAP2000®, de comportamiento lineal y no lineal, en los que la madera está introducida como un material isótropo. La ortotropía de la madera está considerada en los modelos de conexión entre los camones, mediante los tirafondos y las juntas.

- **Modelo de uniones**

A diferencia de lo descrito en el Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1:2016) donde la rigidez de la conexión mecánica, K_{ser} (módulo de deslizamiento), es la misma para cualquier dirección, en los modelos planteados se considera un valor para la dirección paralela a la fibra, $K_{ser,0}$, y otro distinto para la dirección perpendicular, $K_{ser,90}$. De esta forma, se tiene en cuenta en el modelo el comportamiento ortótropo de madera, permitiendo el empleo de un material isótropo para definir las barras de madera, debido a que en cada uno de los tirafondos modelizados se introducen distintos valores de rigidez rotacional y de deslizamiento para cada uno de los ejes, paralelo y perpendicular a la fibra.

Los tipos de conexión modelados son los correspondientes a los sistemas de conexión entre camones, y están divididos en dos categorías:

- La conexión entre camones mediante los tirafondos, a través de los módulos de deslizamiento y de rotación.
- El contacto de testa entre los camones, es decir la junta entre camones de una misma fila. Cuando el arco está descargado, la holgura entre camones es de 1 mm, sin embargo, al entrar en carga, se produce el giro de los camones y éstos entran en contacto en uno de sus bordes, modificándose la rigidez.

En el modelo numérico, los diferentes tipos de conexión entre camones, se han definido mediante el elemento de Sap2000® denominado NLINK, que permite definir las propiedades generales de dicho elemento en cada uno de los 3 ejes locales 1, 2 y 3, nomenclatura definida por SAP2000®.

En función del tipo de unión entre los camones, existen tres tipos de conexiones (figuras 131 y 132):

- NLINK 1, que corresponden con los dos tirafondos situados en los extremos de los camones.
- NLINK 2, que corresponde con el tirafondo central entre camones, si existe.
- NLINK 3, que corresponde con la junta existente entre camones. En un primer estado de la estructura, en el que no se encuentra sometido a ninguna carga más que la de peso propio, la separación entre camones es 1 mm, como se ha podido medir en el modelo construido (figura 133).

Sin embargo, tras un estado de carga, se generan una serie de desplazamientos y giros de los camones debido a la deformación producida y la holgura entre los camones comienza a disminuir hasta que se ponen en contacto en uno de sus extremos. Es a partir de este momento, donde se debe tener en cuenta el cambio de rigidez debido al contacto entre las piezas.

Figura 131. Localización de los NLINK en la estructura de arcos encamados. En rojo se representan los NLINK 1, en azul los NLINK 2 y en verde el NLINK 3.

ALZADO

Detalle 1. Ejes de los NLINK

PLANTA

Detalle 2. Ejes de los NLINK

Figura 132. Conexión entre camones mediante uniones metálicas. Representación de la estructura real en la parte superior y debajo el modelo en SAP2000® de los diferentes tipos de NLINK usados y su ubicación. Vista frontal y en planta (la línea punteada indica su posición en el modelo de cálculo).

Figura 133. Holgura entre camones.

La diferencia entre los dos modelos planteados, de comportamiento lineal y no lineal, reside en la definición de las características de estos NLINK, que se explica a continuación.

5.4.1. Modelo de comportamiento lineal

En este modelo, los NLINK 1 y 2, se modelizaron introduciendo los valores de $K_{ser,0}$, $K_{ser,90}$ y K_{rot} , determinados en los ensayos descritos en el apartado 6.3.2.1. *Determinación del módulo de deslizamiento: K_{ser}* , en cada eje pertinente. El NLINK 3 ha sido representado mediante un elemento denominado “GAP”, en SAP2000®, que representa la rigidez de la madera al entrar en contacto la testa de los dos camones, es decir, cuando la holgura de 1 mm desaparece.

Las ecuaciones constitutivas, que representan el comportamiento de las uniones al entrar en carga, se representan en la figura 134.

Figura 134. Definición de las ecuaciones constitutivas para la rigidez a la cizalladura de los tirafondos y para la rigidez rotacional del modelo de comportamiento lineal. F/M : fuerza o momento; δ/θ : desplazamiento o giro.

En la figura 135, se representa el esquema de barras y la vista extruida del modelo teórico.

Figura 135. Vista general del modelo de barras realizado en SAP2000®, esquema de barras y vista extruida.

5.4.2. Modelos de comportamiento no lineal

Se han modelizado varios modelos de comportamiento no lineal, modelizando las piezas encamionadas descritas en el apartado 5.3.3.3. *Estudio de una unión encamionada* y los arcos encamionados, descritos en el apartado 5.3.4. *Construcción de los modelos de arcos encamionados*.

En cada uno de los ejes de cada NLINK, se definieron una serie de ecuaciones constitutivas, denominadas MP: Multilinear Plastic por SAP2000®, en función de su comportamiento al entrar en carga, basándose en leyes elasto-plásticas, pero discretizadas en partes lineales.

La figura 136 representa los cuatro tipos de ecuaciones constitutivas utilizadas en el modelo. El b) es una simplificación del a).

Figura 136. Definición de ecuaciones constitutivas: a) MP-I y b) MP-II para la rigidez a la cizalladura de los tirafondos; c) MP-III para la rigidez axial de un camón con respecto a otro camón incluyendo una holgura inicial; d) MP-IV, para la rigidez rotacional; y e) MP-V, para la rigidez rotacional en la junta entre camones incluyendo la rigidez al entrar en contacto las testas de los dos camones.

El tipo **MP- I** (figura 136 a) se utilizó para describir el comportamiento real de la carga - deslizamiento real de los tirafondos correspondientes a los grados de libertad locales de U1 y U2 (desplazamientos según el eje local 1 y 2, respectivamente). Este tipo se utiliza de forma simplificada según MP-II en los NLINK 1 y 2 para los casos de carga paralela y perpendicular a la fibra. Para ello, los ejes locales de cada NLINK fueron orientados para corresponder con la dirección paralela y perpendicular a la fibra. Los valores introducidos corresponden a los obtenidos en los ensayos de caracterización de uniones, apartado 5.3.3.1. *Determinación del módulo de deslizamiento del tirafondo: K_{ser}* .

El **MP- II** (figura 136 b) corresponde a la simplificación del tipo MP -I. El rango elástico corresponde con la rigidez a cortante obtenida experimentalmente de acuerdo con la norma UNE-EN 26891:1992, del Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1:2016). La carga última, F_u , se calcula de tal manera que el área bajo las funciones de MP- I y MP - II sean iguales.

El **MP- III** (figura 136 c) se utiliza para definir la rigidez axial correspondiente al grado de libertad local U1 del NLINK 3. Es una conexión que modela la holgura inicial de la junta entre los extremos de dos camones contiguos. Esta rigidez axial sólo existe para situaciones de compresión. El área de contacto entre los camones se calcula teniendo en cuenta una superficie de contacto medio de 1/10 del canto total del camón (20 mm de $h=200\text{mm}$), en base a lo observado en los ensayos realizados.

El **MP- IV** (figura 136 d) corresponde a la rigidez rotacional del NLINK 1, debido a la existencia de dos tirafondos, grado de libertad local R1. También se utiliza para modelar la rigidez rotacional en NLINK 3, producido por el contacto de los dos camones consecutivos, unidos lateralmente por otro camón y sus tirafondos correspondientes.

El **MP- V** (figura 136 e) corresponde a la rigidez rotacional del NLINK 3, producido por el contacto de los dos camones consecutivos, unidos lateralmente por otro camón y sus tirafondos correspondientes, incluyendo la rigidez de la madera correspondiente al contacto entre testas de dichos camones.

La justificación matemática de dichas ecuaciones se detalla en el *Anexo C. Justificación del modelo de las conexiones*.

5.4.2.1. Pieza simple encamonada recta

Se ha modelizado la pieza encamonada recta, descrita en el apartado 5.2.3.3. *Estudio mecánico de una unión encamonada*, en el programa informático SAP2000®, introduciendo las mismas medidas y materiales que en la probeta de estudio, con el objetivo de representar en un modelo teórico sencillo el comportamiento de la junta entre camones.

Se han realizado tres modelos, A, B y C, empezando por el más sencillo, A, y terminando por el más complejo, C.

- El primero, **modelo A**, se ha modelizado con una sola línea de camones, representados mediante barras simples, introduciendo la segunda línea de camones del modelo real, en la unión de la primera, mediante los valores de rigidez relativos al NLINK 3 (figura 137 y 138). En este modelo se utilizó la ecuación constitutiva MP-V para simular el comportamiento de la junta entre camones.

Probeta ensayada

Alzado

Planta

Cotas en mm

Modelo teórico A (SAP2000)

Figura 137. Representación del modelo A en SAP2000® respecto a la probeta analizada.

Figura 138. Modelo A realizado en SAP2000®, esquema de barras y vista extruida.

Para cuantificar la influencia de los tramos cortos y extremos de madera de longitud 493,8 mm unidos semirrígidamente a los camones de los bordes, se realizó un segundo **modelo A.2**, en el que las piezas laterales incluían la sección de la pieza encamonada real, 200 x 80 mm (figura 139). Al existir una holgura de 15 mm en la junta de empalme, como era de esperar, su influencia resultó ser despreciable.

Figura 139. Modelo A.2, realizado en SAP2000®, esquema de barras y vista extruida.

La realidad estaría a medio camino de ambos modelos A.1 y A.2. El modelo A.1 no incluye en los dos tramos de los extremos, la sección de anchura doble, y el A.2. la incluye de manera solidaria. La realidad es que se unen semirrígidamente.

- El segundo, **modelo B**, se ha modelizado con las dos filas de camones existentes en la probeta ensayada. Corresponde con la pieza encamonada con dos pares de tirafondos y sin tirafondo central (Tipo B), descrita en el apartado 5.3.3.3. *Estudio mecánico de una unión encamonada*. Se han utilizado los NLINK 1 y 3, para definir las uniones (figura 140 y 141).

Probeta ensayada

Alzado

Planta

Modelo teórico A (SAP2000)

Cotas en mm

Alzado

Planta

Figura 140. Representación del modelo B en SAP2000® respecto a la probeta analizada.

Figura 141. Modelo B, realizado en SAP2000®, esquema de barras y vista extruida.

- El tercer y último, **modelo C**, se ha modelizado con las dos filas de camones existentes en la probeta ensayada, al igual que en el caso B. Corresponde con la pieza encamonada con dos pares de tirafondos y con tirafondo central (Tipo A), descrita en el apartado 5.3.3.3. *Estudio mecánico de una unión encamonada*.

Se han utilizado los NLINK 1, 2 y 3, para definir las uniones (figura 142 y 143).

Figura 142. Representación del modelo C en SAP2000® respecto a la probeta analizada.

Figura 143. Modelo C, realizado en SAP2000®, esquema de barras y vista extruida.

5.4.2.2. Arco encamonado

Se han realizado tres modelos del sistema encamonado A, B y C, empezando por el más sencillo, A, y terminando por el más complejo, C, con el objetivo de realizar un modelo que represente el comportamiento estructural de la estructura.

- El primero, **modelo A**, se ha modelizado con una sola línea de camones, representados mediante barras. En este modelo se utilizó la ecuación constitutiva MP-V para simular el comportamiento de la junta entre camones en el NLINK 3 (figura 144).

Figura 144. Representación del modelo A de arcos encamonados, sistema de barras y modelo extruido.

- El segundo planteado, **modelo B**, está constituido por dos filas de camones, cuyas juntas entre testas están definidas por la ecuación constitutiva MP-V en el NLINK 3, como se representa en la figura 145.

Figura 145. Representación del modelo B de arcos encamonados, sistema de barras y modelo extruido.

- El tercer y último, **modelo C** (figura 146), está constituido por dos filas de camones y los sistemas de conexión en SAP 2000®, NLINK 1, 2 y 3, se definieron mediante las ecuaciones constitutivas II, III y IV.

Figura 146. Representación del modelo C de arcos encamionados, sistema de barras y modelo extruido.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESUMEN RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

Los resultados que se muestran en el siguiente capítulo están organizados en torno a las dos líneas de investigación paralelas: el estudio histórico constructivo y el comportamiento estructural de las bóvedas encamonadas.

- Se muestran los resultados correspondientes al inventario de los edificios visitados y estudiados en base a la documentación obtenida en los diversos archivos históricos de Madrid: Archivo de la Villa, de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, COAM y relativos a las diversas congregaciones religiosas. Se ha realizado un análisis de los tipos de bóvedas, dimensiones de los elementos estructurales y constructivos, formas y dimensiones de los camones, tipología constructiva y análisis de las muestras obtenidas en las visitas.
- Con respecto a los resultados procedentes del estudio del comportamiento estructural, se muestran los correspondientes a los ensayos a pequeña escala:
 - caracterización de la madera mediante clasificación visual y ensayos no destructivos, planteando regresiones lineales múltiples entre el módulo de elasticidad global y tensión de rotura.
 - estudio del comportamiento de las uniones (K_{ser} paralelo y perpendicular a la fibra, K_{rot} de un par de tirafondos y de una unión completa)
 - comparación de la rigidez entre piezas de madera maciza y encamonadas, relacionando el módulo de elasticidad y tensión de rotura.
- También se discuten los resultados procedentes de los ensayos a escala real de los arcos encamonados:
 - bajo carga constante con duración media y de agotamiento, analizando el estado de las juntas en su estado previo y final.
 - análisis dinámico para determinar las frecuencias propias de vibración de las probetas analizadas y de los modelos teóricos planteados.
- Por último, se comparan los resultados de los ensayos de agotamiento y los modelos teóricos realizados en SAP2000®.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Inventario en Madrid

Los edificios que se han considerado para su estudio han sido los comprendidos entre el siglo XV hasta principios del siglo XX, para abarcar todo el período histórico de la construcción de las bóvedas encamonadas, incluyendo iglesias, conventos, palacios y teatros de Madrid capital. El sistema constructivo se origina en el siglo XVI y se utiliza para reformar los techos de los edificios existentes, hasta el siglo XVII, momento en el que se empieza a utilizar como solución original del proyecto. Es por ello, que se han considerado edificios anteriores al siglo XVI, ya que en alguna reforma o reconstrucción se pudieron realizar bóvedas encamonadas.

Muchas iglesias y conventos pertenecientes a los siglos XVI-XVII y XVIII han desaparecido debido a las numerosas guerras acontecidas en Madrid y a las reformas urbanísticas realizadas durante el gobierno de Napoleón y a principios del siglo XX, por lo que parte del patrimonio histórico-constructivo se ha perdido a lo largo de la historia. Los edificios existentes hoy en día, son una pequeña representación del esplendor perdido.

En la tabla 4 se recogen los resultados obtenidos, en las visitas realizadas, acerca del sistema constructivo de sus bóvedas.

Tabla 4. Lista los edificios de Madrid capital visitados

SIGLO	Nº	Código	Nombre	Construcción	Dirección
S.XV	1		Iglesia de San Nicolás de los Servitas	s. XV	Plaza San Nicolás, 6, 28013
	2	1	Iglesia de San Pedro el Viejo	s. XV	Calle Nuncio, 14, 28005
S.XVI	3		Iglesia de San Pedro Ad Vincula	s. XVI	Calle de Sierra Gorda, 5, 28031
	4	2	Iglesia y convento San Jerónimo el Real	1503-1505	Calle de Moreto, 4, 28014
	5		Capilla del Obispo en la parroquia de San Andrés	1520	Plaza de la Paja, 28005
S.XVII	6		Monasterio de las Descalzas Reales	1559	Plaza de las Descalzas, s/n, 28013
	7		Iglesia parroquial de San Miguel Arcángel	s. XVI-XVII	Calle Islas Bermudas, 28, 28034
	8	3	Capilla del Palacio de Viana.	s. XVI-XVII	Calle Duque de Rivas, 1, 28012
	9		Iglesia de Santa María la Antigua	s. XVI-XVII	Calle Virgen de la Antigua, 9, 28032
	10		Convento de las Carboneras	1607	Plaza del Conde de Miranda, 3, 28005
	11	1	Real Monasterio de Agustinas Recoletas de Santa Isabel	1611	Calle de Santa Isabel, 44, 28012
	12	3	Real Monasterio de la Encarnación	1611	Plaza de la Encarnación, 1, 28013
	13		Parroquia del Carmen	1611	Calle del Carmen, 10, 28013
	14		Iglesia Parroquial de San Justo y Pastor	1612	Plaza Dos de Mayo, 11, 28004
	15	2	Palacio del Duque de Uceda o de los Consejos	1613-1625	Calle Mayor, 79, 28013
	16	3	Colegiata de San Isidro	1622	Calle de Toledo, 37, 28005
	17	2	Iglesia de San Antonio de los Alemanes	1624	Calle Puebla, 22, 28004
	18	3	Casón del Buen Retiro	1637-1701	Calle de Alfonso XII, 28, 28014
	19		Iglesia y convento de Benedictinas de San Plácido	1641	Calle San Roque, 9, 28004
	20		Capilla de San Isidro en San Andrés	1642	Plaza San Andrés, 1, 28005 Madrid
	21	1	Parroquia de San Ginés y Capilla del Santo Cristo	1645	Calle del Arenal, 13, 28001
	22	2	Palacio de Abrantes	1655	Calle Mayor, 86, 28013
	23		Iglesia y convento de las Mercedarias Descalzas de don Juan de Alarcón	1656	Calle de Valverde, 15, 28004
	24		Capilla del Cristo de los Dolores de la Venerable Orden Tercera	1662	Calle San Buenaventura, 1, 28005
	25	1	Convento de las Góngoras	1663	Calle Luis de Góngora, 5, 28004
	26	1	Iglesia y convento de las Comendadoras de Santiago el Mayor	1667	Plaza Comendadoras, 28015
	27	1	Convento de las Trinitarias Descalzas de San Ildefonso	1668	Calle Lope de Vega, 18, 28014
	28		Iglesia de Santa María la Real de Montserrat	1668	Calle San Bernardo, 79, 28015
	29	3	Iglesia de las Calatravas	1670	Calle de Alcalá, 25, 28014
	30	3	Iglesia y convento del Sacramento	1671	Calle del Sacramento, 11, 28005
	31		Real Hospicio de San Fernando	1673	Calle Fuencarral, 78, 28013
	32		Templo de la Orden de Teatinos	1678	Calle de Embajadores, 15, 28012
	33	3	Hospital e Iglesia de la Enfermería de la Venerable Orden Tercera	1693	Calle San Bernabé, 13, 28005
	34	1	Parroquia de San Martín	1695-1725	Calle del Desengaño, 26, 28004
	35	3	Casa de la Villa	1696	Calle Mayor, 67, 28012
	36		Iglesia Pontificia de San Miguel	1698	Calle de San Justo, 4, 28005
S.XVIII	37		Palacio de Bauer	s. XVIII	Calle San Bernardo, 44, 28015
	38		Ermita de la Virgen del Puerto	1718	Paseo Virgen del Puerto, 4, 28005
	39	3	Capilla de la Real Congregación de Nuestra Señora de la Concepción	1723-1726	Calle de Toledo, 39, 28005
	40		Capilla y Comedor del Ave María	1728	Calle del Doctor Cortezo, 4, 28012
	41		Palacio de Parcent	1729	Calle San Bernardo 62, 28015
	42		Iglesia de San José	1730-33	Calle de Alcalá, 43, 28014
	43		Iglesia de San Marcos	1753	Calle de San Leonardo, 10, 28015
	44		Iglesia de Santa Bárbara y Palacio de Justicia	1758	Calle del Gral. Castaños, 2, 28004
	45	1	Iglesia de San Francisco el Grande	1761	C/ San Buenaventura, 1, 28005
	46	3	Palacio de Godoy o del Marqués de Grimaldi	1778	Plaza de la Marina Española, 9, 28013
	47		Convento de las Reparadoras e iglesia del convento	1782-1925	Plaza de la Marina Española, 12, 28013
	48	3	Parroquia de San Sebastián. Capilla de Belén	1784	Calle Atocha, 39, 28012
	49	3	Colegio Oficial de Médicos	1787-1831	Calle de Santa Isabel, 51, 28012
	50		Oratorio del Caballero de Gracia	1789	Calle Caballero de Gracia, 5, 28013
	51	3	Iglesia y Colegio de San Antón	1794	Calle de Hortaleza, 63, 28004
	52	1	Iglesia y convento de las Salesas Nuevas	1794-1801	Calle de San Bernardo, 72, 28015

S.XIX	53	Parroquia de Santa María de Habla Alemana	s. XIX	Avenida de Burgos, 12, 28036
	54	Palacio de Buenavista	1802	Calle Alcalá, 52, 28014
	55	Palacio del Senado	1810	Plaza de la Marina Española, 828013
	56	2 Iglesia de Santiago. Original derribada con Bonaparte	1811	Calle de Santiago, 24, 28013
	57	3 Iglesia de San Ildefonso	1826-1950	Plaza de San Ildefonso, 28004
	58	3 Congreso de los Diputados	1842	Calle Floridablanca, S/N, 28071
	59	Palacio del Marqués de Salamanca	1846	Paseo de Recoletos, 10, 28001
	60	3 Palacio de Fernán Nuñez	1847	Calle de Santa Isabel, 44, 28012
	61	3 Palacio del Marqués de Gaviria	1847	Calle del Arenal, 9, 28013
	62	Teatro de la Zarzuela	1856	Calle de Jovellanos, 4, 28014
	63	3 Iglesia y convento de San Pascual	1866	Paseo de Recoletos, 11, 28004
	64	Real Monasterio de Santa Teresa de las Carmelitas Descalzas	1870	Calle de Ponzano, 79, 28003
	65	Iglesia parroquial de San Matías	1877	Plaza de la Iglesia, 2, 28033
	66	I. N.B. Cervantes	1878-1881	Calle de Embajadores, 70, 28012
	67	Iglesia y convento de las Dominicas de Santo Domingo	1879	Calle de Claudio Coello, 112, 28006
	68	1 Iglesia y convento de las Salesas Reales	1880	C/ Santa Engracia, 18, 28010
	69	3 Convento y colegio de las Siervas de María	1880	Plaza de Chamberí, 7, 28010
	70	1 Asilo y hospital del Niño Jesús	1881-1885	Av. de Menéndez Pelayo, 65, 28009
	71	1 Teatro María Guerrero	1884	Calle de Tamayo y Baus, 4, 28004
	72	3 Iglesia de San Fermín de los Navarros	1886-1935	Paseo de Eduardo Dato, 10, 28010
	73	3 Iglesia de San Andrés de los Flamencos	1887	Calle de Claudio Coello, 99, 28006
	74	Iglesia de Santa Cruz	1889	Calle de Atocha, 6, 28012
	75	Escuela Profesional de Sordomudos e Iglesia Española Reformada Episcopal	1890	Calle de la Beneficencia, 18, 28004
	76	Iglesia y asilo de San José de la Montaña	1890	Calle de Fernández de la Hoz, 16, 28010
	77	Iglesia y Convento de Agustinos Recoletos	1892	Paseo de Recoletos, 20-22, 28001
	78	1 Parroquia del Perpetuo Socorro	1892-1897	Calle Manuel Silvela, 14, 28010
	79	Iglesia de la Paloma	1896	Plaza Virgen de la Paloma, 19, 28005
S.XX	80	Iglesia de la Milagrosa	1901-1904	Calle de García de Paredes, 45, 28010
	81	1 Iglesia de San Manuel y San Benito	1902	Calle de Alcalá, 83, 28009
	82	Iglesia y Convento de los Ángeles	1902	Calle de Bravo Murillo, 93, 28003
	83	Iglesia del Colegio de la Divina Pastora	1903	Calle de Santa Engracia, 142, 28003
	84	Convento de La Latina	1904	Calle de Toledo, 52
	85	Iglesia de Santa Cristina	1904	Paseo de Extremadura, 32, 28011
	86	1 Iglesia de las Religiosas de María Inmaculada	1907	Calle Funcarral, 97, 28004
	87	Iglesia Evangélica Alemana	1907-1909	Paseo de la Castellana, 6, 28046
	88	Oratorio del Santo Cristo del Olivar	1910	Calle Cañizares, 4, 28012
	89	2 Palacio del Conde de Vistahermosa	1910-1915	Calle de Fuencarral, 97, 28004
	90	Iglesia del Cristo de la Salud	1915	Calle de Ayala, 12, 28001
	91	2 Iglesia de la Buena Dicha	1916	Calle de Silva, 21B, 28004

1	Edificios a los que no se ha podido acceder a su bajocubierta, por no obtener el permiso de los propietarios
2	Edificios que no poseen acceso a bajocubierta
3	Edificios que poseen bóvedas o cúpulas encamionadas
	Edificios cuyas bóvedas están realizadas con fábrica

De los noventa y un inmuebles considerados (tabla 4), el 51,6% correspondían a bóvedas tabicadas (47 edificios) y el 17,6% contenían bóvedas encamionadas (16 edificios); no se pudo acceder a quince de ellos debido a que no se obtuvo permiso de los responsables o dueños del edificio (16,5%) y trece de ellos no poseían acceso al espacio de bajocubierta (14,3%), por lo que inicialmente existía un 30,8% de incertidumbre (gráfico 2). Para desechar la incógnita, se recurrió a la consulta de los planos o la documentación existente de dichas obras en los archivos históricos de Madrid, para intentar averiguar cuál era el sistema constructivo de sus bóvedas e incrementar la muestra de tipologías

Gráfico 2. Resultados obtenidos tras realizar las visitas a las obras

Siete de los veintiocho edificios que no pudieron ser inspeccionados, podrían tener el sistema en estudio del presente trabajo, como se explica a continuación:

- **Colegiata de San Isidro:**

Fray Lorenzo de San Nicolás, en el capítulo cincuenta y uno de su segundo libro, explica que la primera cúpula construida por el sistema encamonado fue la iglesia del Colegio Imperial de Madrid, construida entre 1622 a 1685 por el Padre Francisco Bautista de la Compañía de Jesús (Bonet, 1984; Villanueva, 1984):

«[...] en su gran fabrica de su Iglesia [del Colegio Imperial de Madrid], que, por los malos materiales de esta Corte, fue necesario echarla de madera. Yo hize la segunda en mi Convento de Agustinos Descalzos, en esta Villa de Madrid, en la capilla del Desamparo de Christo; la tercera hize en Talauera en la Hermita de Nuestra Señora del Prado, con el resto de su capilla mayor; y la quarta que tracé, se executó en Salamanca.»

- **Capilla de los arquitectos de Nuestra Señora de Belén en su huida a Egipto de la parroquia de San Sebastián:**

Se pudo acceder al archivo de la Congregación donde se estudió el proyecto de reconstrucción de 1951 llevado a cabo por el arquitecto Francisco Íñiguez, cuyos planos de ejecución incluyen la planta y la sección de la cúpula (figura 147) y la memoria y mediciones y presupuestos describen que la cúpula está realizada con camones de madera:

«Carpintería de armar compuesta por 233,60 m² de armadura de madera de pino, encamonada, entablada y moldada, a 250 ptas./m² (58.400 ptas.)»

Figura 147. Planta y sección de la cúpula de la capilla de Nuestra Señora de Belén en su huida a Egipto.

- **Iglesia de las Calatravas:**

En una de las capillas de la iglesia de las Calatravas se conservan las trazas realizadas por Fray Lorenzo de San Nicolás, donde se aprecia el detalle de la bóveda, que recuerda al dibujo de su tratado donde explicaba la construcción de las bóvedas encamonadas. Aunque no se conservan las trazas al completo, la sección de los materiales de la bóveda parece indicar que son de madera, sección pequeña comparada con la de los muros de fábrica. Además, el hecho de que la bóveda se encuentre sostenida por el punto medio de la viga y por unos jabalcones, de los que se deduce que el sistema constructivo de la bóveda no es autoportante (figura 148).

Figura 148. Fotografía de las trazas conservadas en la iglesia de las Calatravas y reconstrucción del dibujo.

- **Palacio de Fernán Núñez:**

El Palacio de Fernán Núñez, en la calle Santa Isabel, no poseía acceso al extradós de la bóveda del salón de baile; sin embargo, en la habitación contigua, sala de músicos, comparte el mismo techo abovedado, y se pudo observar que la estructura principal del edificio es un entramado de madera. El propio techo se había realizado mediante tablas de madera con cuerda enrollada (tomizo) para favorecer la consolidación del yeso de las pinturas (figura 149). Estos detalles nos permiten afirmar que la bóveda está fabricada con madera, ya que si estuviese construida en fábrica supondría una sobrecarga poco adecuada para la estructura principal de madera de edificio.

Aunque no se hayan encontrado ni la memoria ni el proyecto de ejecución o reforma del palacio, se considera que dicha bóveda muy probablemente es encamonada.

Figura 149. Salón de bailes del Palacio de Fernán Núñez y detalles constructivos de la sala anexa.

- **Palacio del Marqués de Gaviria:**

Con el Palacio del Marqués de Gaviria, construido entre 1846-47 en la calle Arenal, para el banquero de Isabel II y vendedor de las joyas de la Corona en París para beneficio de la Regente María Cristina, sucede lo mismo que con el de Fernán Núñez, no existe acceso al extradós de la bóveda de la sala noble. Desde los ventanales superiores (figura 150), fue posible asomarse a la bóveda y su encuentro con el marco de la ventana estaba realizado en madera. Si la bóveda estuviese realizada en fábrica, dicho encuentro también debería ser de fábrica. Por tanto, aunque no se haya podido corroborar de una forma más factible y sin haber localizado la memoria o planos de ejecución, se considera que su bóveda muy probablemente es encamonada.

Figura 150. Sala noble del Palacio de Gaviria.

- **Hospital e Iglesia de la Enfermería de la Venerable Orden Tercera:**

El Hospital de la Venerable Orden Tercera de la Gran Vía de San Francisco, inaugurado en 1686, presenta una bóveda esquifada sobre la escalera de dos tramos, que es encamonada (figura 151). Aunque actualmente no existe acceso al espacio de bajo-cubierta, en las obras de rehabilitación realizadas en el año 2009 de la mano de D. Francisco Cárcelos Garralón, arquitecto de la VOT, al destapar las molduras de yeso se descubrió la estructura encamonada de la bóveda vaída.

Figura 151. Bóveda esquifada encamonada situada en la escalera principal de acceso del Hospital de la VOT.

- **Iglesia de San Antonio de los alemanes:**

La iglesia, construida entre 1624 y 1633 en la esquina de la calle Puebla con la Corredera Baja, fue dedicada inicialmente a san Antonio de los Portugueses. En 1668, cuando ya Portugal dejó de formar parte de los dominios de los Austria, fue cedida a los católicos alemanes. En dos estudios, que hacen referencia a la bóveda elíptica de la iglesia de San Antonio de los alemanes, consideran que es encamonada: (Pajarón, 1977; Gómez, 2015)

«La cúpula oval y de construcción encamonada, está magníficamente decorada por un San Antonio en gloria sobre un anillo de basamento, pintado en “trampantojo”, con elementos arquitectónicos y figuras de santos.»

Sin embargo, en el proyecto de restauración²⁹ realizado por los arquitectos Amparo Berlinches Acín y José Miguel Merino de Cáceres, bajo la dirección de las obras por José María González-Valcárcel, en 1974, debido al mal estado de la cubierta que generaron desperfectos en las pinturas murales interiores, se dice textualmente:

«La solución de cubierta que hemos adoptado es un reflejo de lo que pudo ser la iglesia de haberse cubierto de acuerdo con el proyecto redactado por Gómez de Mora; hemos simplificado el diseño de la misma, pero conservando el espíritu.»

«Técnicamente resolvemos la estructura a base de una armadura metálica rematada exteriormente en pizarra.»

En 1980, el arquitecto Guillermo Costa realiza un nuevo proyecto de reforma de la iglesia de San Antonio de los Alemanes, donde explica:

«En dicho proyecto, se sustituyeron los elementos estructurales originales de cubierta a base de cerchas trianguladas por perfiles normalizados de acero laminado I-45. Se sanearon la coronación de los muros y se construyó un zuncho perimetral de hormigón para repartir las cargas y absorber los esfuerzos de tracción en el correspondiente anillo.»

«El tejado del cuerpo bajo del templo se encuentra hundido al encontrarse al correspondiente forjado de viguetas de madera en estado de ruina. En las mismas condiciones negativas aparece el forjado de suelo del coro, con viguetas de madera partidas en sus cabezas y con el consiguiente desprendimiento del suelo raso de cañizo inferior. [...] Se prevé la sustitución del forjado mediante viguetas constituidas por perfiles

²⁹ El proyecto de restauración de la Iglesia de San Antonio de los Alemanes se obtuvo en el archivo de la Santa Pontificia y Real Hermandad del Refugio y Piedad de Madrid. La iglesia y el hospital pasaron a pertenecer desde 1700 a la Hermandad del Refugio. Institución que tenía el compromiso de prestar ayuda a los necesitados de Madrid. Un sacerdote y dos seglares salían a buscar mendigos a los que ofrecer agua, pan blanco y un huevo duro. Se conserva la plantilla de madera cuyo agujero servía para desestimar el huevo si por allí entraba, pronunciando la frase: *Si pasa, no pasa*, lo que indicaba que el huevo era pequeño para el prestigio de una Hermandad a la que han pertenecido los reyes de España.

de acero laminado. Sobre este nuevo forjado se construirá un nuevo tejado a base de un tablero inclinado de hormigón poroso sobre tabiquillos rematado al exterior con teja plana.»

«Respecto a la restauración del cuerpo alto del templo integrado por el tambor de la cúpula y el campanario, la intención del arquitecto que suscribe es conseguir rescatar, si ello es posible, la hermosura de las fajas, resaltos, impostas y cornisas resueltas con fábrica de ladrillo y que puedan encontrarse bajo el actual revoco.»

Figura 152. Sección de la iglesia de San Antonio de los Alemanes, proyecto de restauración de 1980. Arquitecto: Guillermo Costa.

Analizando la memoria de los proyectos de restauración, donde se hace referencia a la realización de un anillo en la base de la bóveda para absorber las tracciones y estudiando la sección de 1980 del arquitecto Guillermo Costa (figura 152), se llega a la conclusión de que dicha bóveda está ejecutada con mampostería y no con el sistema constructivo encamonado, como afirmaban otros autores (Pajarón, 1977; Gómez, 2015). Si la bóveda estuviese realizada en madera, no sería necesario añadir ningún anillo para recoger los esfuerzos de tracción; su poco peso y el propio sistema constructivo mediante camones no requeriría de ningún tipo de refuerzo. La propia sección muestra una bóveda apoyada en los muros, con una sección lo suficientemente gruesa como para representar su construcción con fábrica. Por lo tanto, se considera que la bóveda de la iglesia de San Antonio de los alemanes está realizada en fábrica y por lo tanto no es encamonada.

Por lo tanto, se puede considerar que seis de los siete edificios, de los que se tenían dudas inicialmente, poseen bóvedas encamonadas; a partir de la documentación escrita: Colegiata de San Isidro, Capilla de los Arquitectos en la parroquia de San Sebastián y Hospital de la enfermería de la Venerable Orden Tercera, y por los materiales usados en el extradós o en habitaciones contiguas: Palacio de Fernán Núñez y Palacio del Marqués de Gaviria.

Tras las visitas realizadas, estudio de las obras a las que no se obtuvo acceso en archivos históricos y análisis de documentación escrita en artículos científicos, se han observado tres tipos estructurales diferenciados:

- Bóvedas suspendidas o colgadas
- Bóvedas auto-portantes
- Bóvedas estructurales

Las **bóvedas suspendidas o colgadas** son estructuras secundarias, soportadas por la estructura original del edificio: cerchas de cuchillo o de par y nudillo. Los arcos encamonados que conforman la bóveda son suspendidos mediante cogotes de madera al tirante de la cercha que conforma la estructura principal. Se considera que dicho sistema se realizaba cuando se pretendía adecuar el edificio preexistente, generalmente de estilo renacentista, al estilo barroco. Conformaba una solución de ejecución rápida cuando los recursos económicos eran limitados (figuras 153 y 154). La estabilidad de dichas bóvedas depende de la armadura de cubierta.

Las **bóvedas auto-portantes** solamente soportan su propio peso y se encuentran apoyadas en sus extremos en los muros de fábrica. No son sostenidas por la estructura principal de cubierta como ocurría en el primer tipo. Se construían desde el inicio de la obra. No son una adecuación de la estructura preexistente (figuras 153 y 154).

Las **bóvedas estructurales** son aquellas que soportan su propio peso y cargas variables de tipo climático, conforman la estructura principal de cubierta. Este tipo no se encuentra en España. Corresponden al tipo desarrollado en el Virreinato de Perú, localización de clima cálido con escasas lluvias. El extradós de las bóvedas, curvo, estaba recubierto de adobe para conseguir la permeabilización adecuada (figuras 153 y 154).

Figura 153. Comparación de tipos de bóvedas encamonadas. A. Bóveda suspendida o colgada. B. Bóveda auto-portante. C. Bóveda estructural.

Figura 154. Comparación de una bóveda colgada de una estructural (Congreso de los diputados, Madrid), una bóveda autoportante (Iglesia de San Ildefonso, Madrid) y bóveda estructural (Iglesia en Barranco, Lima, Perú).

Los resultados obtenidos se resumen gráficamente en la figura 155:

Figura 155. Resumen de características de las obras visitadas.

No se tiene constancia de que existan bóvedas encamonadas estructurales en Madrid capital, sin embargo, analizando la nave de Gaudí en Mataró, Barcelona, se llega a la conclusión de que dicho sistema constructivo se conocía y fue utilizado en la Península ibérica (figura 156).

Gaudí realizó el proyecto en 1864, aunque la construcción finalizó en 1875. Los arcos en forma de catenaria están compuestos por tres filas de camones, de espesores 65-95-65 mm, anchura 220 mm y longitudes máximas de 1,5 m. La luz de los arcos es 11 metros y la distancia entre arcos encamonados 4,11 m (valor superior al observado en las estructuras encamonadas de Madrid capital, como se observa en la tabla 5).

Figura 156. Nave de Gaudí en Mataró, Barcelona: vista interior de la nave y detalles del apoyo, clave y junta entre camones.

En el *anexo E: Planos históricos*, se muestran las bóvedas encamonadas localizadas, indicando cuando fueron construidas, en diferentes planos históricos de Madrid; el de 1635 “*La Villa de Madrid Corte de los Reyes Católicos de España*”, el Plano d Madrid de Pedro Texeira de 1656, el Plano de Madrid de Nicolás de Fer de 1706, el Plano geométrico de Madrid de 1808, la maqueta de Madrid “*Modelo de Madrid realizada por León Gil de Palacio de 1830*” y el plano de Madrid realizado por el Instituto Geográfico en 1906.

De cada edificio visitado, se realizaron fotografías y medidas de sus elementos constructivos.
El resumen de esos datos se refleja en la tabla 5:

Tabla 5. Características de las bóvedas encamionadas visitadas.

	CASÓN DEL BUEN RETIRO (Bóveda)	IGLESIA DEL SACRAMENTO (Bóvedas Iglesia)	IGLESIA DE SAN ANTON (Bóvedas Iglesia)	PALACIO DEL MARQUÉS DE GRIMALDI (Despacho Director)	CONVENTO AGUSTINOS DESCALZOS (SENADO) (Salón de Plenos antiguo)	REAL MONASTERIO DE LA ENCARNACIÓN (Rehabilitación claustral)	IGLESIA DE SAN IDONSO (Bóvedas Iglesia)	COLEGIO OFICIAL DE MÉDICOS (Anfiteatro Anatómico)	COLEGIO OFICIAL DE MÉDICOS (Pasadizo acceso)
Construcción estructura encamionada	1637-1701	1690-1744	1742-1794	1790-1808	1813-1820	1847	1827-1832	1780-1837	1780-1837
Tipo de estructura encamionada	Suspendida	Autoportante	Suspendida	Autoportante	Suspendida	Autoportante	Autoportante	Suspendida	Suspendida
Estructura principal cubierta	Par y nudillo	Par y nudillo	Par y nudillo	Cercha simple	Metálica	Cercha simple	Cercha simple	Cuchillo español	Cuchillo español
Forma sección camones	Poligonal	poligonal	Poligonal	Curva	Poligonal y curva	Poligonal	Poligonal	Poligonal	Poligonal
Luz bóveda (m)	10,76	9,1	12,7	5,7	14,88	2,27	8,8	26,2	3,4
Radio cúpula encamionada (m)	-	-	1,2	-	-	-	3,7	-	-
Sección tirantes (mm)	260x420	220x360	250x410	330x400	230x400	-	175x240	360x740	-
Sección costillas cúpula (mm)	-	-	200x200; 310x220	-	-	-	(35-45)x(200-280)	-	-
Separación entre tirantes (m)	1,5	1,67	2	0,6	4,2	-	1,05	5	-
Altura entre tirante e hilera (m)	3,37	3,13	5,2	2,2	3,4	1,52	2,51	4,6	-
Sección hilera (mm)	120x260	-	-	195x260	-	-	80x240	-	-
Sección durmiente (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sección nudillos (mm)	140x125x4260	135x190	-	-	-	-	-	-	-
Sección pendolón (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sección pares (mm)	165x165	150x215	200x280; 210x270	220x280	-	140x165	145x185	-	-
Distancia entre pares (mm)	Variable: 400; 580; 600	Variable: 600-650	650	600	-	680	500	-	-
Sección correas (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Filas de camones (nº)	3	1	2	2	2	2	2	1	2
Espesor camones (mm)	Variable: 30-55-35	60	40	30	Variable: 25-30	Variable: 30-35-45	Variable: 45-35	50	Variable: 35-50
Ancho camones (mm)	Variable: 140; 230; 275	Variable: 180-220	220	Variable: 120-180	Variable: 160-180	Variable: 180; 200; 220	Variable: 145; 170; 255	285	300
Longitud camones (mm)	1600	Variable: 1800-2400	1200-2000	Variable: 800-1200	Variable: 450-1200	-	Variable: 1200-2000	Variable: 1600-3150	1200
Distancia entre camones (mm)	Variable: 450; 500; 600	Variable: 550-700	600	400	650	540	Variable: 360; 440; 490	Variable: 640-780-795	Variable: 930-1450
Sistema de unión	Clavos forja	No se observan	No se observan	No se observan	Clavos forja	Clavos forja	Clavos de forja	Clavos de forja	Clavos de forja

	CAPILLA DEL PALACIO DE VIANA (Bóvedas capilla)	CONGRESO DE LOS DIPUTADOS (Salón de Sesiones)	CASA DE LA VILLA (Salón Goya)	IGLESIA Y CONVENTO DE SAN PASCUAL (Bóvedas iglesia)	IGLESIA DE SAN ANDRÉS DE LOS FLAMENCOS (Bóvedas iglesia)	CAPILLA DEL CONVENTO DE LAS SIERVAS DE MARÍA (Bóvedas capilla)	IGLESIA DE SAN FERMÍN DE LOS NAVARROS (Bóvedas iglesia)
Construcción estructura encamionada	1843	1843-1850	1857-1859	1865	1876	1880-1883	1886
Tipo de estructura encamionada	Suspendida. Neogótica	Suspendida	Autoportante	Autoportante	Autoportante. Neogótica	Autoportante. Neogótica	Autoportante. Neogótica
Estructura principal cubierta	Cuchillo español	Cuchillo español	Desaparecido	Cercha simple	Cercha simple	Cuchillo español	Cercha simple con pendolón
Forma sección camones	Poligonal	Curva	Poligonal	Poligonal y curva	Poligonal y curva	Poligonal	Curva
Luz bóveda (m)	3,08	9,44	20	9,6	7	8	9
Radio cúpula encamionada (m)	-	-	-	-	-	-	-
Sección tirantes (mm)	No accesible	-	-	60x250	170x220	205x285	180x280
Sección costillas cúpula (mm)	-	-	-	-	-	-	-
Separación entre tirantes (m)	No accesible	2,6	-	0,8	Variable: 1,42; 1,49; 1,50	3,93	3,7
Altura entre tirante e hilera (m)	No accesible	16	-	2,45	1,5	2,28	1,9
Sección hilera (mm)	No accesible	-	-	60x250	50x110	180x240	80x280
Sección durmiente (mm)	-	-	-	-	120x150x1500	-	-
Sección nudillos (mm)	No accesible	-	-	-	130x145x2420	-	-
Sección pendolón (mm)	-	-	-	-	-	205x230	190x235x1850
Sección pares (mm)	No accesible	170x265	-	140x200	90x100; 90x75	175x230	180x230x4000
Distancia entre pares (mm)	No accesible	860	-	Variable: 400; 450; 500	Variable: 470; 500; 560	Variable: 450-600	650
Sección correas (mm)	-	-	-	-	-	160x160/cada 450	80x110x1760
Filas de camones (nº)	3	2 y 3	1 con suplemento en junta	2	2	2	3
Espesor camones (mm)	Variable: 25-40	55	40. Suplemento: 30	-	30	Variable: 30-35	30
Ancho camones (mm)	Variable: 125-250	Variable: 175-260	200	200-220	80	Variable: 80-190	120
Longitud camones (mm)	Variable: 825-1700	Variable: 1200-1500-2000	Variable: 900-1500	900-1250	640-1420	Variable: 770-970	800-1500
Distancia entre camones (mm)	650-670	560	1700	450	850	400	Variable: 450-650
Sistema de unión	Clavos forja	Clavos forja	No se observan	No se observan	No se observan	Clavos forja	No se observan

En la tabla 5 se comparan los tipos estructurales de las bóvedas encamonadas visitadas y las medidas tanto de la estructura principal como del sistema encamonado. Se observa que:

- el 35,3 % de las bóvedas analizadas son suspendidas frente al 64,7 % que son autoportantes.
- La estructura principal de cubierta más utilizada corresponde con el de cercha simple, es decir, constituida por pares y tirantes, (33,3%), cuando las luces eran menores, y cercha de cuchillo español, constituida por pares, tirantes, tornapuntas y pendolón, (33,3%), en los casos de luces mayores. Las armaduras de par y nudillo se han encontrado en el 20% de las visitas hechas.
- Con respecto a la forma del perfil de los camones, en el 64,7% de los casos se trata de perfil poligonal-rectangular, los camones de perfil curvo representan el 17,6% al igual que las obras en las que se han encontrado tanto camones curvos como poligonales. No se encuentra explicación al hecho de labrar los camones con forma curva, debido a que el intradós de la bóveda nunca sería visto y supone un mayor esfuerzo.
- En el 40% de los casos, la luz de la estructura se encuentra en torno a los 10 metros. La mayor luz analizada, corresponde con la bóveda del anfiteatro Anatómico del Colegio Oficial de Médicos que posee 26,2 metros, siguiéndole la bóveda del antiguo Salón de Plenos del Senado con 15 metros.

La bóveda de luz menor es la correspondiente a la zona rehabilitada del Monasterio de la Encarnación, de 2,27 m. En este caso, toda la estructura del edificio es de ladrillo, sin embargo, debido a los destrozos producidos durante la Guerra de la Independencia y a los escasos recursos económicos de la congregación religiosa, el pequeño tramo de la nave de 10,72 x 2,27 metros se realizó con el sistema encamonado.

- La sección de los elementos que constituyen la estructura principal de cubierta (tirante, par, nudillo, hilera, etc), es muy variable y depende de las luces a salvar. Existe una gran dispersión de datos.
- Con respecto al sistema encamonado, en el 60% de los casos se observan dos filas de camones y en el 20% tres filas. El espesor de los camones varía entre 30 y 50 mm en la mayoría de los casos y el ancho se encuentra en un rango entre 80 y 300 mm. En los casos en los que el ancho es menor a 140 mm, se debe a que no se encuentran a la vista, es decir, que o bien poseen una capa de compresión de mortero u hormigón más reciente o a acumulación de cascotes o materiales de diversa naturaleza.

La longitud de los camones varía desde 400 a 2000 mm, encontrándose una longitud mayor en el Colegio Oficial de Médicos, 3150 mm en el camón más largo.

- Debido a la variabilidad de datos obtenidos, se llega a la conclusión de que el sistema encamonado no seguía unas leyes constructivas como se podría pensar tras analizar los textos de De l'Orme o Fray Lorenzo de San Nicolás. Es posible que su construcción dependiese de las secciones de madera disponibles y de las decisiones del maestro carpintero a lo largo de la obra.

6.2. Identificación de la especie de madera

Los resultados obtenidos de las muestras analizadas de madera se muestran a continuación (tabla 6).

Tabla 6. Resultados de la identificación de la especie de madera de las muestras recogidas en las visitas realizadas.

Nº	EDIFICIO	CONSTRUCCIÓN BÓVEDA	PROCEDENCIA	ESPECIE	OBSERVACIONES	FECHA RECOGIDA	FECHA ANÁLISIS
1	Casón del Buen Retiro	1637-1701	Camón bóveda	PS/PN	-	30/07/2016	04/10/2016
			Nudillo cercha central	PP	-		
2	Colegiata de San Isidro	1664	-	-	No existe acceso a la cúpula	-	-
3	Iglesia de las Calatravas	1670	-	-	No existe acceso a la cúpula	-	-
4	Capilla IES San Isidro. Colegio Imperial	1723	-	-	No se pudo obtener muestra	-	-
5	Iglesia del Sacramento (Fuerzas Armadas)	1744	Camón I	PS/PN	Buen estado de la madera	16/11/2016	05/12/2016
			Pieza suelta zona bóveda	PS/PN			
6	Palacio de Fernán Núñez	1753-1849	-	-	No existe acceso a la bóveda	-	-
7	Palacio del Marqués de Grimaldi	1779-1780	Tirante cercha	PS/PN	-	19/12/2016	21/12/2016
			Camón I	PS/PN			
			Camón II	PS/PN			
8	Parroquia de San Sebastián. Capilla de Belén	1784-1951	-	*Pinus sp.	No existe acceso a la cúpula	-	-
9	Iglesia y Colegio de San Antón	1794	Tirante nave central	PS/PN	Presencia de cruces de San Andrés	12/05/2016	17/05/2016
			Tirante zona altar	PS/PN	Presencia de cruces de San Andrés		
			Carpintería ventana	PP	-		
			Camón nave central I	PS/PN			
			Camón nave central II	PS/PN			
10	Real Monasterio de la Encarnación	s. XVIII	Camón claustro lateral	PS/PN	-	20/09/2016	04/10/2016
11	Convento Agustinos Calzados (Senado)	1810	Tirante	PP	-	28/11/2016	05/12/2016
			Estructura vertical	PS/PN			
			Camón bóveda I	PS/PN			
			Camón bóveda II	PS/PN			
12	Iglesia de San Ildefonso	1826-1950	Camón cúpula I	PPN	-	21/10/2016	30/11/2016
			Camón cúpula II	PPN	Presencia de carcoma (anóbidos)	12/12/2016	16/12/2016
			Camón bóveda nave central	PS/PN	-	21/10/2016	30/11/2016
			Camón bóveda nave lateral	PP	Muestra con nudo. Fibras reviradas	12/12/2016	16/12/2016
			Camón bóveda zona altar	PP			
			Peldaño escalera	PP			
			Piezas sueltas zona cúpula I	PS/PN		21/10/2016	30/11/2016
			Piezas sueltas zona cúpula II	PS/PN	-	12/12/2016	16/12/2016
			Piezas sueltas zona cúpula III	PS/PN			
			Tirante nave lateral derecha	PP	Presencia de cruces de San Andrés		
Par nave central	PP	Presencia de cruces de San Andrés					
13	Congreso de los Diputados	1842	Camón cúpula exterior	PS/PN	Pudrición parda	21/10/2016	05/12/2016
14	Capilla del Palacio de Viana.	1843	Tabla ripia	PS/PN	Buen estado de la madera	26/10/2016	30/11/2016
			Camón I	PS/PN			
			Camón II	PS/PN			
15	Palacio de Gaviria	1846	-	-	No existe acceso a la bóveda	-	-
16	Capilla del Convento de las Siervas de María	1851	Camón I	PS/PN	Buen estado de la madera	03/11/2016	05/12/2016
			Camón II	PS/PN			
			Tabla ripia	PP			
17	Casa de la Villa	1859	Camón bóveda esquifada	PS/PN	-	01/02/2017	04/02/2017
			Pieza suelta zona bóveda	PS/PN			
18	Iglesia y convento de San Pascual	1866	Tablas cubierta	PS/PN	-	03/10/2016	04/10/2016
			Camón capilla lateral I	PS/PN			
			Camón capilla lateral II	PS/PN			
19	Iglesia de San Fermín de los Navarros	1886-1935	Par cercha central	PS/PN	No se pudo recoger muestra de camó	26/07/2016	04/10/2016
			Tablas cubierta	PP			
20	Iglesia de San Andrés de los Flamencos	1887	Camón arco lateral	PS/PN	-	07/07/2016	06/10/2016
			Durmiente cercha central	PS/PN			
			Correa cercha lateral	PS/PN			
21	Colegio Oficial de Médicos	1893	Camón I	PS/PN	Buen estado de la madera	15/11/2016	30/11/2016
			Camón II	PPN			

* El nombre de los edificios que aparecen en rojo no tenían acceso al espacio de bajocubierta, por lo que no se pudieron obtener muestras de madera.

* En el proyecto de reforma de la Parroquia de San Sebastián en el capítulo de mediciones y presupuesto se hace referencia a "armadura de madera de pino, encamonada, entablada y moldada: 233,60m3; 58.400 ptas.) pero no se especifica la especie concreta.

Abreviaturas:

PP: *Pinus pinaster* Aiton.

PPN: *Pinus pinea* L.

PS/PN: *Pinus sylvestris* L. / *Pinus nigra* Arnold.

En la tabla 6 se observan las muestras analizadas de los edificios visitados que contienen bóvedas encamionadas, en función del elemento constructivo del que proceden.

Las especies encontradas son las siguientes y poseen los caracteres identificativos correspondientes:

Especies: Pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) - Pino laricio (*Pinus nigra* Arnold), debido a que anatómicamente ambas especies poseen los mismos caracteres identificativos.

Caracteres identificativos, que se observan en la figura 157 son:

- Anillos de crecimiento diferenciados
- Traqueidas longitudinales de sección poligonal
- Punteaduras areoladas presentes en las paredes tangenciales de las traqueidas longitudinales
- Punteaduras areoladas uniseriadas sobre las paredes radiales de las traqueidas longitudinales
- Punteaduras areoladas de abertura lobulada ocluida
- Parénquima longitudinal ausente o escaso
- Radios leñosos uniseriados
- Radios leñosos parcialmente biseriados
- Radios leñosos pluriseriados
- Número de células en altura entre 1 y 15
- Traqueidas radiales son engrosamientos helicoidales
- Traqueidas radiales dentadas
- Traqueidas radiales con dientes hasta el centro del lumen
- Parénquima radial de paredes axiales lisas
- Parénquima radial de paredes horizontales lisas
- Punteaduras de los campos de cruce tipo ventana
- De 1 a 2 punteaduras por campo de cruce
- Traqueidas radiales alternas
- Canales resiníferos de células epiteliales delgadas

Figura 157. Corte transversal, longitudinal y radial de *Pinus sylvestris* L.-*Pinus nigra* Arnold. Caracteres identificativos diferenciadores: 1. anillos de crecimiento diferenciados y traqueidas longitudinales de sección poligonal, 2. radios leñosos uniseriados, 3. radios leñosos pluriseriados, 4. traqueidas radiales con dientes hasta el centro del lumen, 5. parénquima radial de paredes axiales lisas, 6. parénquima radial de paredes horizontales lisas y 7. punteaduras de los campos de cruce tipo ventana.

Especie: Pino rodeno (*Pinus pinaster* Aiton.)

Caracteres identificativos, que se observan en la figura 158 son:

- Anillos de crecimiento diferenciados
- Traqueidas longitudinales de sección circular
- Traqueidas longitudinales de sección poligonal
- Punteaduras areoladas presentes en las paredes tangenciales de las traqueidas longitudinales
- Punteaduras areoladas uniseriadas sobre las paredes radiales de las traqueidas longitudinales
- Punteaduras areoladas biseriadas sobre las paredes radiales de las traqueidas longitudinales
- Barras de Sanio
- Parénquima longitudinal ausente o escaso
- Radios leñosos uniseriados
- Radios leñosos pluriseriados
- Número de células en altura entre 1 y 15
- Traqueidas radiales sin engrosamientos helicoidales
- Traqueidas radiales dentadas
- Traqueidas radiales con dientes hasta el centro del lumen
- Parénquima radial de paredes axiales lisas
- Parénquima radial de paredes axiales noduladas
- Parénquima radial de paredes horizontales lisas
- Parénquima radial de paredes horizontales punteadas
- Punteaduras de los campos de cruce tipo pinoide
- De 1 a 2 punteaduras por campo de cruce
- Parénquima radial con resina
- Canales resiníferos de células epiteliales delgadas

Figura 158. Corte transversal, longitudinal y radial de *Pinus pinaster* Aiton. Caracteres identificativos diferenciadores: 1. anillos de crecimiento diferenciados y traqueidas longitudinales de sección poligonal y circular, 2. radios leñosos uniseriados, 3. traqueidas radiales con dientes hasta el centro del lumen, 4. parénquima radial de paredes horizontales lisas y punteadas y 5. punteaduras de los campos de cruce tipo pinoide.

Especie: Pino piñonero (*Pinus pinea* L.)

Caracteres identificativos, que se observan en la figura 159 son:

- Anillos de crecimiento diferenciados
- Traqueidas longitudinales de sección poligonal
- Presencia de meatos
- Punteaduras areoladas presentes en las paredes tangenciales de las traqueidas longitudinales
- Punteaduras areoladas uniseriadas sobre las paredes radiales de las traqueidas longitudinales
- Punteaduras areoladas biseriadas sobre las paredes radiales de las traqueidas longitudinales
- Barras de Sanio
- Parénquima longitudinal ausente o escaso
- Radios leñosos uniseriados
- Radios leñosos pluriseriados
- Número de células en altura entre 1 y 15
- Traqueidas radiales sin engrosamientos helicoidales
- Traqueidas radiales dentadas
- Parénquima radial de paredes axiales lisas
- Parénquima radial de paredes axiales noduladas
- Parénquima radial de paredes horizontales lisas
- Parénquima radial de paredes horizontales punteadas
- Punteaduras de los campos de cruce tipo pinoide
- Punteaduras de los campos de cruce tipo piceoide
- De 1 a 2 punteaduras por campo de cruce
- Traqueidas radiales alternas
- Canales resiníferos de células epiteliales delgadas

Figura 159. Corte transversal, longitudinal y radial de *Pinus pinea* L. Caracteres identificativos diferenciadores: 1. anillos de crecimiento diferenciados y traqueidas longitudinales de sección poligonal, 2. radios leñosos uniseriados, 3. radios leñosos pluriseriados, 4. parénquima radial de paredes axiales noduladas, 5. parénquima radial de paredes horizontales punteadas, 6. punteaduras de los campos de cruce tipo pinoide y 7. punteaduras de los campos de cruce tipo piceoide.

Gráfico 3. Porcentaje de las especies de madera utilizadas en la construcción de las bóvedas encamonadas inspeccionadas.

Las 47 muestras de madera, obtenidas en los quince edificios de los que ha sido posible su extracción de los elementos constructivos, han permitido la identificación de Pino silvestre-laricio en el 72,0%, el 22% a pino pinaster y el 7% a pino piñonero (gráfico 3). Para considerar cual era el lugar más apropiado para su aprovechamiento, se acude a los mapas de las regiones de procedencia elaboradas por el MAPAMA, en las cuales se reflejan las masas naturales que han llegado hasta nuestros días con continuidad histórica. Es decir, estaban presentes en la época en que se hicieron los edificios estudiados. Aunque es conocido que existieron masas en la provincia de Madrid que han ido desapareciendo, pero pudieron ser utilizadas, como por ejemplo el pinar de Navalagamella, que aparece en las coplas del Marqués de Santillana. Aproximar cual es el origen de las maderas, requiere de la discusión sobre las masas forestales de las diferentes especies y las características motivadas por la facilidad de su traslado (figuras 160, 161, 162, 163 y 164):

Figura 160. Mapa de distribución del pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) (MAPAMA, 2017).

Figura 161. Mapa de distribución del pino laricio (*Pinus nigra* Arnold.) (MAPAMA, 2017).

Figura 162. Mapa de distribución del pino piñonero (*Pinus pinea* L.) (MAPAMA, 2017).

Figura 163. Mapa de distribución del pino resinero (*Pinus pinaster* Aiton.) (MAPAMA, 2017).

Figura 164. Distribución de los pinares más próximos a Madrid de los pinos estudiados en España, cuya madera se ha identificado en las construcciones estudiadas: silvestre, laricio, piñonero y resinero.

Las provincias que poseen los cuatro pinos encontrados, en las muestras obtenidas en las visitas realizadas, son Cuenca, Ávila y Segovia, las tres colindando con la provincia de Madrid. Es lógico pensar que un sistema constructivo económico, como el de las bóvedas encamionadas, no podía incrementar su coste seleccionando maderas de un coste elevado. Si bien las diferencias en precios pudieran no ser importantes e influye quien financiara las obras y la época de construcción, pues hay que considerar que puede haber más de cuatro siglos desde la más antigua a la más moderna.

El hecho de encontrar estas especies en la misma obra significa que se utilizaba la madera disponible en el mercado en el momento que era requerida, sin importar cual fuese su especie.

De hecho, en las memorias de los proyectos analizados, no se hace referencia a una especie en concreto, solamente exigían unas escuadrías determinadas de madera de pino.

Figura 165. Posible procedencia de las especies de pino encontradas en los elementos constructivos analizados.

Como se observa en la figura 165, las masas forestales más próximas a Madrid que contienen las especies de madera encontradas, se encuentran en:

- Cuenca (Montes Universales y Sistema Ibérico)
- Segovia (Sierra de Guadarrama y Valsaín)
- Ávila (Sistema Central, Valles del Tiétar y del Alberche, y Sierra de Gredos)

Con respecto a Cuenca, las principales especies explotadas son *Pinus nigra* Arnold y *Pinus pinaster* Aiton, que se transportaban por el río Armallones (Guadalajara) y el Escabas, afluentes del Tajo que eran conducidas por gancheros hasta Aranjuez. La madera era aserrada en una sierra de agua, cuya construcción data de 1588 y posteriormente transportadas por una buena carretera, por la existencia del Sitio Real, hasta la Corte en carretas tiradas por bueyes (figuras 166 y 167).

Figura 166. Imágenes de Priego (Cuenca) y cómo las maderadas, bien en forma de tablas o de troncos, bajaban por el río Escabas al Tajo hasta Aranjuez. Destaca en todas las fotografías el nivel de deforestación de las laderas que daban a los ríos (Asociación de gancheros, Comarca de Priego, 2010).

Figura 167. Sierra de agua situada en Aranjuez, 1743. Planta y localización en la proximidad del Palacio (Biblioteca del Palacio Real, Patrimonio Nacional).

Con respecto a Segovia, la principal especie dominante y exclusiva es *Pinus sylvestris* L., que era transportada por carretas tiradas por bueyes hasta la capital a través de la calzada del Puerto de la Fuenfría, o por los restos de la vía romana que subía desde Valsaín al puerto de Navacerrada y cuyo trazado fue alterado en 1788 por la construcción del tramo conocido por las siete revueltas, que supuso la tala de cerca de veinte mil pinos. La madera se conducía ya transformada en los diferentes tipos de escuadrías en el aserradero de Valsaín, lo que mejoraba el coste del transporte. Aunque como señalaba Agustín Pascual, el primer ingeniero de Montes que ordenó las masas de Valsaín, el gran problema de las cortas de su etapa (1849) era el elevado coste que suponía el transporte (figuras 168, 169 y 170).

Figura 168. Aserradero de Valsain, siglo XIX (Sanz, 2000).

Figura 169. Calzada del Puerto de la Fuenfría (Sanz, 2000).

Figura 170. Carretas tiradas por bueyes (Sanz, 2000).

Con respecto a Ávila, la principal especie es *Pinus pinaster* Aiton., que eran transportadas a la capital mediante carretas guiadas por bueyes (figura 171). La elección de estos pinares se debe a la utilización de estas masas para la construcción del Monasterio de El Escorial, como relata el Padre Sigüenza.

Figura 171. Las Navas del Marqués, Ávila (Postales, España Antigua, hasta 1939).

Sin embargo, se han de considerar otras posibilidades, en particular por que las maderas utilizadas para las bóvedas encamonadas no eran de grandes dimensiones. Tanto el pino piñonero, como el pino pinaster y el pino silvestre podrían proceder de los pinares de ambas especies que abundan en la provincia de Ávila y Madrid, en la parte inferior de la Sierra de Guadarrama, como podrían ser de los pinares del Quexigal (Cebreros) o en el caso del pino silvestre también los pinares del Valle de Lozoya. El Quexigal, con una superficie de 1.800 hectáreas, poseía pinares de piñonero y pinaster, entre los aprovechamientos estaba la producción de piñones y de pez. Fue comprado en 1563 por Felipe II y cedido a los padres jerónimos encargados del cercano monasterio escurialense, que se mantendría en poder de los monjes hasta la desamortización de Mendizábal, vendiéndose en 1837.

Para el pino silvestre y de propiedad religiosa destaca los pinares del Real Monasterio de Santa María de El Paular, fundado en 1390 y durante 450 años, un monasterio cartujo que sacaba beneficios importantes de los bosques que incluía desde 1675, cuando una Real Cédula de Carlos II les concedía el dominio sobre el monte en detrimento de la Ciudad y Sierra de Segovia. El monasterio poseía además dos batanes que se empleaban para una sierra de agua y para fabricar papel que, entonces, se hacía de trapos. La orden cartuja fue exclaustrada y el pinar vendido a lo que posteriormente se conoció como la Sociedad Belga de los pinares del Paular (figuras 172, 173 y 174).

Figura 172. Pinares de El Pular, Madrid (Velasco, 2015).

Figura 173. Hacheros, carreteros, guardas del pinar y otros trabajadores posando para la cámara ante la serrería de El Pular hacia 1910 (Archivo de la Sociedad Belga de los Pinares del Pular).

Figura 174. Carros con madera para aprovisionar el mercado de Madrid (Archivo de la Sociedad Belga de los Pinares del Paular).

6.3. Caracterización experimental

6.3.1. Caracterización de la madera

6.3.1.1. Clasificación visual

Se realizó una clasificación visual de la madera aserrada utilizada en el ensayo descrito en el apartado 5.2.2. *Caracterización de la madera*, utilizando la norma UNE-EB 56544:2011. Para ello, se analizaron y midieron las singularidades de las piezas: nudos, fendas, acebolladuras, desviación de la fibra y gemas. Las singularidades más restrictivas fueron los nudos.

La tabla 7, recoge el contenido de humedad, la densidad y la calidad visual de acuerdo con la norma UNE-EN 56544:2011. Las calidades ME-1 y ME-2 de esta especie, corresponden a las clases resistentes C30 y C18, respectivamente, de acuerdo con la norma UNE-EN 1912:2012 y la norma UNE-EN 338:2016.

Tabla 7. Contenido de humedad, densidad, densidad al 12% de humedad y clasificación visual de las piezas analizadas.

Nº	H	ρ_u	ρ_{ref}	CLASIF.
Pieza	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	VISUAL
1	9,9	511	517	ME-2
2	9,0	498	506	ME-2
3	9,5	518	524	ME-1
4	8,9	495	503	ME-1
5	7,9	409	418	ME-1
6	6,8	455	468	ME-1
7	9,2	465	471	ME-2
8	9,5	513	519	ME-2
9	8,3	459	468	ME-2
10	8,7	477	485	ME-2
VALOR MEDIO	8,8	480	488	

Siendo H: el contenido de humedad de las piezas (%), ρ : densidad de las piezas al contenido de humedad H, ρ_{ref} : densidad corregida al 12% de humedad de acuerdo con la norma UNE-EN 384:2016.

La densidad se corrigió al contenido de humedad de referencia ($u_{ref}=12\%$) de acuerdo con la norma UNE-EN 384:2016, según la expresión (ecuación 15):

$$\rho_{ref} = \rho_u \cdot (1 - 0,05 \cdot (u - u_{ref}))$$

Ecuación 14

Siendo ρ_{ref} : densidad de las piezas al 12% de humedad, ρ_u : densidad al contenido de humedad u , u : contenido de humedad de las piezas y u_{ref} : contenido de humedad igual al 12%.

No obstante, la densidad utilizada en los cálculos con técnicas no destructivas ha sido la densidad correspondiente al contenido de humedad de las piezas, con el fin de poder comparar los resultados con los obtenidos de los ensayos mecánicos al mismo contenido de humedad, sin necesidad de hacer correcciones según la normativa. Esas correcciones son genéricas y no siempre se ajustan igualmente a todas las especies.

6.3.1.2. Técnicas no destructivas

En la tabla 8, se observan los resultados procedentes de las técnicas no destructivas utilizadas, PLG y MST, según el apartado 5.3.2.2. *Ensayos no destructivos*, donde se ha determinado la velocidad de transmisión de la onda en ambos métodos y el módulo de elasticidad dinámico de cada una de las piezas. En el anexo F.5. *Análisis dinámico. Frecuencias propias de vibración*, se recogen los gráficos obtenidos mediante el programa informático del PLG relativo a las diez piezas ensayadas en este apartado.

Tabla 8. Frecuencia propia de vibración longitudinal, tiempos de vuelo, velocidades de transmisión y módulos de elasticidad dinámico estimado en función de las técnicas no destructivas: MST y PLG.

Nº Pieza	Frecuencia	Tiempos			Velocidad		Módulo de elasticidad dinámico		
	PLG long (Hz)	MSTsup (μ s)	MSTinf (μ s)	MST media (μ s)	Vel PLG (m/s)	Vel MST (m/s)	E _{din} PLG (N/mm ²)	E _{din} MST (N/mm ²)	E _{din} media END (N/mm ²)
1	735,2	651	622	637	4.558	4.870	10.624	12.129	11.377
2	659,1	704	682	693	4.086	4.473	8.324	9.975	9.149
3	822,8	572	555	564	5.101	5.501	13.474	15.669	14.571
4	851,7	555	541	548	5.281	5.657	13.812	15.851	14.831
5	696,4	668	664	666	4.318	4.655	7.625	8.862	8.244
6	651,3	720	718	719	4.038	4.312	7.426	8.466	7.946
7	674,5	664	685	675	4.182	4.596	8.125	9.814	8.969
8	685,3	650	648	649	4.249	4.777	9.261	11.704	10.482
9	734,6	626	625	626	4.555	4.956	9.525	11.278	10.401
10	720,0	642	614	628	4.464	4.936	9.501	11.618	10.559
VALOR MEDIO	723,1	645,2	635,4	640,3	4.483,2	4.873,3	9.770	11.537	10.653
CV (%)	9,27	7,98	8,86	8,33	9,28	8,73	23,16	22,03	22,49

Siendo, PLG long: frecuencia propia de vibración longitudinal medida con el PLG, en Hz; MST sup: medida tomada con el equipo MST, colocando los sensores en la testa a 1/3, de forma centrada al eje del canto; MST inf: medida tomada con el equipo MST, colocando los sensores en la testa a 2/3, centrada al eje del canto; velocidad: calculada con el tiempo de vuelo medio y la longitud para el MST, y la calculada con la frecuencia y longitud para el PLG; y Edin: Módulo de elasticidad dinámico, calculado con la velocidad y la densidad.

En la tabla 9, se registran los valores de CKDR central y global analizados, el valor más alto, la media y el coeficiente de variación (CV). Las zonas detalladas corresponden a la medición de los nudos, contenidos en las 4 caras, cuyo diámetro sea superior o igual a 10 mm, excepto los nudos pasantes, en una sección, de 15 cm de longitud, centrada en el nudo de dimensiones mayores.

Se recuerda que el CKDR central corresponde al valor más alto de las mediciones realizadas sobre el vano central de longitud igual a 8 veces el canto, es decir, en los 1,6 metros centrales de la pieza, y el global corresponde al valor máximo de toda la pieza.

Tabla 9. Valores de CKDR, central y global, de cada una de las piezas analizadas.

Nº Pieza	CKDR										CKDR CENTRAL			CKDR GLOBAL		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9	Zona 10	Media	CV %	Máximo	Media	CV %	Máximo
1	0,148	0,090	0,147	0,261	0,093						0,148	54,09	0,261	0,148	46,83	0,261
2	0,246	0,188	0,292	0,140	0,138	0,413	0,088	0,248	0,139	0,114	0,195	75,73	0,413	0,201	49,71	0,413
3	0,082	0,098	0,040	0,051	0,096	0,057	0,039				0,062	47,60	0,096	0,066	38,50	0,098
4	0,085	0,093	0,110	0,101	0,077	0,124	0,097	0,084			0,101	23,35	0,124	0,096	15,88	0,124
5	0,055	0,076	0,092	0,086	0,113	0,184	0,122	0,067	0,208		0,126	32,81	0,184	0,111	47,21	0,208
6	0,112	0,133	0,078	0,072	0,066	0,136					0,108	25,78	0,133	0,100	31,63	0,136
7	0,337	0,204	0,150	0,255	0,247	0,165	0,125	0,131	0,160		0,217	26,89	0,255	0,197	35,72	0,212
8	0,183	0,329	0,283	0,228	0,091	0,204	0,216				0,202	40,07	0,283	0,219	34,45	0,329
9	0,180	0,157	0,048	0,220	0,155	0,120	0,164				0,145	49,22	0,220	0,149	36,08	0,220
10	0,218	0,162	0,090	0,137	0,120	0,138	0,189	0,173	0,104	0,076	0,135	26,69	0,189	0,141	32,10	0,218

CKDR central

En el anexo F.2. *Caracterización de la madera*, se recogen algunas fotografías relativas a la determinación de los valores de CKDR y la clasificación visual correspondiente versus la clase resistente asociada.

6.3.1.3. Propiedades mecánicas

Haciendo uso de la norma UNE-EN 408:2011+A1, se determinaron el módulo de elasticidad global y la tensión de rotura de cada una de las piezas. En la tabla 10 se recogen los resultados, referidos al contenido de humedad de las piezas (sin corregir al 12%).

Tabla 10. Módulo de elasticidad global y tensión de rotura.

Nº	$E_{m,g}$	T_{rotura}
Pieza	(N/mm ²)	(N/mm ²)
1	9.195	45,81
2	7.767	37,50
3	15.013	81,01
4	14.368	73,31
5	8.266	74,77
6	7.482	74,67
7	8.819	60,29
8	9.503	33,20
9	9.970	72,47
10	9.635	75,97
Media	10.002	62,90
CV (%)	26,02	28,06

6.3.1.4. Relación entre mediciones no destructivas y propiedades mecánicas

Se han realizado regresiones lineales simples para la estimación del módulo de elasticidad mecánico y la tensión de rotura a partir del módulo de elasticidad dinámico, obtenido por MST y por PLG, y posteriormente, y regresiones lineales múltiples añadiendo el factor de nudosidad, CKDR, con los resultados siguientes:

- Módulo de elasticidad global medio

El modelo estadístico propuesto, realizado con los datos procedentes de las 10 piezas ensayadas, es el siguiente (ecuación 116):

$$E_{g,m} = a + b \cdot E_{din}$$

Ecuación 15

Donde, $E_{g,m}$ es el módulo de elasticidad global medio (N/mm²) y E_{din} es el módulo de elasticidad dinámico (N/mm²).

En la tabla 11, se detallan los valores de los coeficientes de la ecuación 16. El error absoluto medio corresponde al valor promedio de los residuos (N/mm²).

Tabla 11. Coeficientes de la ecuación 16.

Módulo de elasticidad global medio				
Variable	a	b	R ² (ajustado para g.l.)	Error absoluto medio
E _{din} MST	-747,08	1,1002	90,4	508,7
E _{din} PLG	-1.284,49	0,9783	90,2	640,5
E _{din} media END	-1.087,02	1,0409	90,8	564,0

El modelo estadístico propuesto, introduciendo el factor de nudosidad CKDR además del módulo de elasticidad dinámico, es el siguiente (ecuación 17):

$$E_{g,m} = a + b \cdot E_{din} + c \cdot CKDR$$

Ecuación 16

Donde, $E_{g,m}$ es el módulo de elasticidad global medio (N/mm²); E_{din} es el módulo de elasticidad dinámico (N/mm²) y el CKDR corresponde en cada caso al valor central o global, como se detalla en la tabla 12.

Tabla 12. Coeficientes de la ecuación 17.

Módulo de elasticidad global medio						
Variable	Variable	a	b	c	R ² (ajustado para g.l.)	Error absoluto medio
E _{din} MST	CKDR central	1.186,08	0,8852	-9.714,15	92,0	482,1
E _{din} PLG		635,70	1,0356	-5.224,63	89,9	520,6
E _{din} media END		871,75	0,9587	-7.533,96	93,3	484,3
E _{din} MST	CKDR global	1.152,70	0,8946	-1.031,40	93,1	440,8
E _{din} PLG		642,34	1,0387	-5.519,85	92,3	518,6
E _{din} media END		873,96	0,9644	-8.020,77	93,8	474,2

Se observa que al introducir la variable del factor nudosidad, CKDR, el valor de R² ajustado para los grados de libertad, mejora ligeramente, obteniendo un valor de 93,8 de R² con respecto a 90,8, procedente de la regresión lineal simple. Además, el error disminuye levemente.

La correlación existente entre el módulo de elasticidad mecánico y el dinámico (con o sin el parámetro CKDR) es muy elevada, y en general superior a la encontrada por otros autores (Íñiguez, 2007; Llana, 2016). Por otro lado, debe tenerse en cuenta que el número de piezas es muy reducido.

- Tensión de rotura

Se realizaron regresiones lineales simples entre la tensión de rotura y el módulo de elasticidad dinámico calculado con diferentes equipos, MST, PLG y con la media de ambos, dando lugar a la ecuación 18 de estimación.

$$T_{rot} = a + b \cdot E_{din}$$

Ecuación 17

Donde, T_{rot} es la tensión de rotura (N/mm^2) y E_{din} es el módulo de elasticidad dinámico (N/mm^2).

En la tabla 13, se detallan los valores de los coeficientes de la ecuación 18, aplicable a la especie de pino laricio. El error absoluto medio corresponde al valor promedio de los residuos (N/mm^2).

Tabla 13. Coeficientes de la ecuación 18.

Tensión de rotura				
Variable	a	b	R^2 (ajustado para g.l.)	Error absoluto medio
E_{din} MST	47,12	0,0014	3,9	14,3
E_{din} PLG	43,43	0,0020	5,2	14,0
E_{din} media END	45,24	0,0017	6,8	14,1

Se observan valores muy bajos de R^2 . Al realizarse solamente 10 ensayos, existe una dispersión de datos muy alta, y los modelos estadísticos no son consistentes estadísticamente. Para un mismo rango de elasticidad dinámico, se obtienen rangos de tensión de rotura muy amplios, como se observa en el gráfico 4. Esta correlación es menor que la obtenida por otros autores (Íñiguez, 2007; Llana, 2016).

Gráfico 4. Modelo ajustado entre la tensión de rotura y el módulo de elasticidad dinámico procedente de los ensayos realizados con PLG.

Por ello se decidió realizar un modelo estadístico utilizando una regresión lineal con la variable de CKDR, para analizar su influencia. De esta forma, se obtuvo la ecuación 19.

$$T_{\text{rot}} = a + b \cdot \text{CKDR}$$

Ecuación 18

Donde, T_{rot} es la tensión de rotura (N/mm^2) y el CKDR corresponde en cada caso al valor central o global, como se detalla en la tabla 14.

Tabla 14. Coeficientes de la ecuación 19.

Tensión de rotura				
Variable	a	b	R^2 (ajustado para g.l.)	Error absoluto medio
CKDR central	102,52	-275,50	58,6	9,3
CKDR global	104,19	-289,14	65,2	8,0

Se observa que la influencia del factor nudosidad es muy grande a la hora de predecir los valores de Tensión de rotura. El CKDR es la variable que mejor explica la resistencia de las piezas, por ello el modelo tiene un R^2 mucho más alto que el anterior.

Gráfico 5. Modelo ajustado entre la tensión de rotura y el CKDR global.

La nudosidad de las piezas ha influido en mayor manera debido a su fuerte presencia en las piezas analizadas. Eran piezas muy nudosas en la mayoría de los casos analizados.

Estos resultados no son los habituales, pero al tener pocos datos, los resultados no son consistentes estadísticamente, se observa una variabilidad muy grande. La correlación existente entre tensión de rotura y nudosidad (CKDR) no es utilizada, en general, por otros autores. Cabe destacar que alcanza valores relativamente elevados.

Debido a que la resistencia depende de la presencia de singularidades locales y los nudos son los más influyentes en la resistencia, se realizó la estimación de la tensión de rotura (T_{rot}) haciendo uso del módulo de elasticidad dinámico y de los valores relativos al CKDR, al observar que el factor de nudosidad mejoraba la correlación matemática de dichos modelos.

Se realizaron regresiones lineales múltiples entre la tensión de rotura y el CKDR global y central, dando lugar a la ecuación de estimación siguiente, ecuación 20:

$$T_{rot} = a + b \cdot E_{din} + c \cdot CKDR$$

Ecuación 19

Donde: T_{rot} es la tensión de rotura (N/mm^2); E_{din} es el módulo de elasticidad dinámico (N/mm^2) y el CKDR corresponde en cada caso al valor central o global, como se detalla en la tabla 15.

Tabla 15. Coeficientes de la ecuación 20.

Tensión de rotura						
Variable	Variable	a	b	c	R^2 (ajustado para g.l.)	Error absoluto medio
E_{din} MST	CKDR central	128,22	-0,0017	-318,89	52,5	8,7
E_{din} PLG		130,98	-0,0021	-330,76	53,1	8,7
E_{din} media END		129,59	-0,0019	-324,43	52,8	8,7
E_{din} MST	CKDR global	121,21	-0,0012	-313,18	63,3	7,4
E_{din} PLG		125,34	-0,0016	-325,41	64,4	7,5
E_{din} media END		123,13	-0,0014	-318,59	63,8	7,4

En este caso, el coeficiente de determinación es ligeramente inferior al caso anterior, pero el error es también menor.

Los modelos planteados son normales, lineales y homocedásticos. El estudio de la normalidad de las variables se realizó mediante el test estadístico de Kolmogorov-Smirnov, que plantea como hipótesis nula que una muestra proviene de una población normal, es decir, distribución de Gauss. Como el p-valor resultante es mayor que alfa, se acepta la hipótesis nula por lo que la distribución se considera normal.

Debido a que todas las variables básicas, para un nivel de confianza del 95%, obtuvieron un p-valor muy superior a 0,05, las muestras de dichas variables se ajustaron a distribuciones normales.

Para evaluar la bondad de ajuste se ha utilizado el coeficiente de determinación R^2 , que representa el porcentaje de variabilidad en la variable dependiente (Y) explicado por las variables independientes (X, Z). Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

En las tablas 12 y 15 se ha remarcado con negrita los modelos que poseen una R^2 más alta, sin embargo, los resultados son parejos en todos los casos y la muestra ensayada no es representativa, debido a que se ensayaron solamente 10 piezas.

En el anexo F.2. *Caracterización de la madera*, se recoge la comparación de los valores estimados mediante técnicas no destructivas y reales del módulo de elasticidad y tensión de rotura; así como la relación entre las mediciones no destructivas y las propiedades mecánicas.

6.3.2. Caracterización de las uniones

6.3.2.1. Determinación del módulo de deslizamiento: K_{ser}

A continuación, se recogen los resultados obtenidos en la determinación del K_{ser} en dirección paralela y perpendicular a la fibra, según el apartado 5.3.3.1. *Determinación del módulo de deslizamiento del tirafondo: K_{ser} .*

a) Paralelo a la fibra:

En la tabla 16 se observan los valores calculados de K_{ser} correspondientes a los ensayos de esfuerzo paralelo a la fibra. El valor de K_{ser} se ha obtenido mediante los valores medios procedentes de los dos captadores, LVDT 5 y 6. Se detallan los valores de Fuerza estimada, F_{est} , usada para realizar el ensayo, la Fuerza máxima alcanzada al producirse un desplazamiento central de 15 mm o alcanzado el agotamiento de la pieza, el valor de K_{ser} y el error producido entre la Fuerza estimada y la máxima alcanzada. Tanto la fuerza estimada como máxima son unitarias, es decir, el valor correspondiente a cada uno de los tirafondos (Fuerza total/6).

Tabla 16. Valores procedentes de los ensayos realizados paralelos a la fibra.

Nº Pieza	ENSAYO PARALELO A LA FIBRA			
	F_{est} (N)	F_{max} (N)	Error (%)	K_{ser} (N/mm)
1	3.200,0	3.312,0	3,38	1.780,0
2	3.200,0	3.273,6	2,25	2.530,0
3	3.400,0	3.235,8	-5,07	1.708,0
4	2.273,0	2.475,9	8,19	2.390,0
5	2.500,0	2.365,0	-5,71	2.553,0
6	2.500,0	2.347,5	-6,50	2.632,0
7	2.500,0	2.680,0	6,72	2.654,0
8	3.200,0	3.244,8	1,38	2.694,0
9	3.200,0	3.238,4	1,19	1.941,0
10	2.800,0	2.802,2	0,08	2.478,0
11	2.800,0	2.668,4	-4,93	2.674,0
12	2.800,0	2.800,8	0,03	2.598,0
13	2.800,0	2.774,8	-0,91	2.631,0
Media	2.859,5	2.863,0	3,56	2.404,8
Desviación Estándar				313,0
CV (%)				17,5

En el gráfico 6, se observa la fuerza unitaria frente al desplazamiento de la probeta nº 1.

Gráfico 6. Gráfico Fuerza unitaria-Desplazamiento de la probeta nº 1 para determinar el $K_{ser,0}$.

En el anexo F.3. *Caracterización de las uniones*, se recogen dos tablas resumen utilizadas para determinar el módulo de deslizamiento K_{ser} paralelo a la fibra según la norma UNE EN 26891:1992.

b) Perpendicular a la fibra:

En la tabla 17 se incluyen los valores calculados de K_{ser} correspondientes a los ensayos de esfuerzo perpendicular a la fibra. El valor de K_{ser} se ha obtenido mediante los valores medios procedentes de los dos captadores, LVDT 5 y 6. En dichos ensayos, el error cometido entre la Fuerza estimada y la Fuerza máxima (correspondiente a un desplazamiento de 15 mm), es similar en todos los casos, alcanzando un error medio 2,1%).

Tabla 17. Valores procedentes de los ensayos realizados perpendicular a la fibra.

N° Pieza	ENSAYO PERPENDICULAR A LA FIBRA			
	F_{est} (N)	F_{max} (N)	Error (%)	K_{ser} (N/mm)
1	2.200,0	2.303,4	4,49	1.795,0
2	2.580,0	2.578,5	-0,06	1.058,0
3	2.615,0	2.650,7	1,35	1.861,0
4	2.400,0	2.450,4	2,06	2.035,0
5	2.400,0	2.493,6	3,75	1.879,0
6	2.400,0	2.483,2	3,35	2.063,0
7	2.200,0	2.156,8	-2,00	1.315,0
8	2.200,0	2.166,4	-1,55	1.887,0
9	2.200,0	2.346,4	6,24	1.906,0
10	2.400,0	2.455,2	2,25	1.965,0
11	2.200,0	2.314,4	4,94	1.915,0
Media	2.345,0	2.399,9	2,91	1.789,0
Desviación Estándar				313,0
CV (%)				17,5

En el gráfico 7, está representada la fuerza unitaria frente al desplazamiento de la probeta n° 1.

Gráfico 7. Gráfico Fuerza unitaria-Desplazamiento de la probeta n° 1 para determinar el $K_{ser,90}$.

En el anexo F.3. *Caracterización de las uniones*, se recogen dos tablas resumen utilizadas para determinar el módulo de deslizamiento K_{ser} perpendicular a la fibra según la norma UNE EN 26891:1992.

En la tabla 18 se recogen los resultados obtenidos de $K_{ser,0}$ y $K_{ser,90}$, de los dos tipos de ensayo.

Tabla 18. Valores medios de $K_{ser,0}$ y $K_{ser,90}$ procedentes de los ensayos realizados.

	$K_{ser,0}$	$K_{ser,90}$
Media	2404,9	1789,0
Desv. Estándar	352,7	312,7
CV (%)	14,7	17,5
Mínimo	1708,0	1058,0
Máximo	2694,0	2063,0

Si se comparan los valores medios obtenidos en los ensayos con el valor deducido por las expresiones teóricas de la norma EN 1995-1-1 (apartado 4.1.2), son de orden parecido (tabla 19).

Tabla 19. Comparación de los valores medios de los ensayos con el valor deducido por la norma EN 1995-1-1.

Tipo de ensayo	K_{ser}		Eurocódigo 5
Tipo K_{ser}	$K_{ser,0}$	$K_{ser,90}$	K_{ser}
(N/mm)	2.404,9	1.789,0	2.313,0

6.3.2.2. Determinación de la rigidez a la rotación: K_{rot}

A continuación, se recogen los resultados obtenidos en la determinación del K_{rot} de las parejas de tirafondos descritos en el apartado 5.3.3.2. *Determinación de la rigidez rotacional K_{rot} de un par de tirafondos.*

Para determinar la rigidez a la rotación K_{rot} se realizaron tres ensayos, en los que se midieron los desplazamientos en 4 puntos, que se describen en el gráfico 8, para la probeta número 1.

Gráfico 8. Gráfico Fuerza-desplazamiento del ensayo 1 de K_{rot} .

A partir de las gráficas momento-giro de cada uno de los ensayos, se obtuvieron las rigideces a rotación, K_{rot} , como se muestra en el gráfico 9, correspondiente a la pieza 1 ensayada. Se dibujaron dos rectas regresión con un R^2 superior a 0,99, la primera entre el 20% y el 45% del momento en el tramo elástico, y la segunda entre el 70% y el 95% del momento en el tramo plástico. Trazando la vertical que pasa por el punto de intersección de ambas rectas, se determina sobre la gráfica el punto de cambio de rigidez. A partir de él, se obtuvieron los valores de fuerza, giro θ , momento y K_{rot} recogidos en la tabla 20. Además, se dedujo el modulo de deslizamiento paralelo a la fibra.

Gráfico 9. Gráfico Momento- Giro para determinar la rigidez a la rotación K_{rot} .

Tabla 20. Resultados de los ensayos de determinación de la rigidez a la rotación.

Nº ensayo	F (kN)	θ (rad)	M (kN.m)	K_{rot} (kN.m/rad)	$K_{ser,0}$ (N/mm)
1	1,360	0,025	0,1931	7,6041	2703,69
2	1,272	0,022	0,1806	8,1724	2905,74
3	1,290	0,032	0,1831	5,7585	2047,46
Media	1,307	0,026	0,1856	7,1783	2.552,30
CV (%)	3,6	19,5	3,6	17,6	17,6

La tabla 20, recoge los valores de K_{rot} de un par de tirafondos y la media de los tres ensayos. Dicho valor se introducirá en el NLINK 3 del modelo teórico correspondiente.

El valor medio de $K_{ser,0}$ en este ensayo, calculado mediante la ecuación 5 del apartado 5.3.3.2. *Determinación de la rigidez rotacional K_{rot} de un par de tirafondos*, $K_{ser,0} = 2.552,30$ N/mm, es similar al obtenido en el apartado 5.3.3.1. *Determinación del módulo de deslizamiento del tirafondo*: K_{ser} , cuyo valor es 2.405 N/mm. Aunque se han realizado pocos ensayos, la concordancia de resultados es muy buena. En el anexo F.3. *Caracterización de uniones*, se recogen los gráficos de los tres ensayos utilizados para obtener el valor de K_{rot} medio.

6.3.2.3. Estudio mecánico de una unión encamonedada

A continuación, se recogen los resultados obtenidos del estudio mecánico de la unión encamonedada descrito en el apartado 5.3.3.3. *Estudio mecánico de una unión encamonedada*.

En las figuras 175, 176 y 177 se observan las deformaciones y giros producidos a lo largo del ensayo de agotamiento realizado. Los camones al entrar en carga rotan, hasta que entran en contacto, al desaparecer la holgura de 1 mm en la junta central, generando un cambio de rigidez.

Figura 175. Deformación de la unión encamonedada recta, situación inicial vs situación final del ensayo.

Figura 176. Giro producido en la junta de estudio de la unión encamonedada recta.

Figura 177. Desplazamiento y giro de las juntas entre camones separadas 15 mm.

En la tabla 21 se detallan los valores obtenidos en cada uno de los ensayos realizados, donde se indican:

- $F_{\text{cambio de rigidez}}$: carga correspondiente al instante en el que se observa un cambio de rigidez en la gráfica Fuerza-desplazamiento en kN.
- $F_{\text{última}}$: carga máxima alcanzada en el ensayo en kN.
- $\delta_{\text{cambio rigidez central}}$: flecha correspondiente a la carga relativa al cambio de rigidez en mm.
- $\delta_{\text{max. central}}$: flecha máxima alcanzada en el ensayo en mm.
- Momento cambio de rigidez: momento correspondiente a la carga relativa al cambio de rigidez en kN·m.
- Momento $F_{\text{última}}$: momento correspondiente a la fuerza máxima alcanzada en el ensayo en kN·m.
- $F_{\text{tornillo cambio rigidez}}$: Fuerza correspondiente a cada tirafondo de la unión relativo al cambio de rigidez en kN.
- $\theta_{\text{cambio rigidez}}$: giro producido en cada camón en la junta de estudio correspondiente al instante en el que se produce el cambio de rigidez en radianes, definido en la figura 117, apartado 5.3.3.3.
- $\theta_{\text{último}}$: giro máximo alcanzado en el ensayo en la junta de estudio en radianes.
- $\delta_{\text{horizontal max (tracción)}}$: desplazamiento horizontal a tracción máximo alcanzado en el ensayo medido por el LVDT 4 (figura 117).
- $\delta_{\text{horizontal max (compresión)}}$: desplazamiento horizontal a compresión máximo alcanzado en el ensayo medido por el LVDT 5 (figura 117).

Para determinar el punto donde se produce un cambio de rigidez, se dibujaron dos rectas de regresión con un R^2 superior a 0,99, la primera entre el 20% y el 45% de la fuerza en el tramo elástico, y la segunda entre el 65% y el 95% de la fuerza en el tramo plástico. Trazando la vertical que pasa por el punto de intersección de ambas rectas, se determina sobre la gráfica el punto de cambio de rigidez; a partir de él, se obtuvieron los valores de fuerza, momento, desplazamiento vertical en el punto medio de la pieza y giro (gráfico 10).

Gráfico 10. Determinación del punto de cambio de rigidez de la pieza 1 con tirafondo central.

Tabla 21. Datos comparativos de los seis ensayos realizados, tres del Tipo A (con tirafondo central) y tres del Tipo B (sin tirafondo central).

PIEZA	F cambio rigidez (kN)	F última (kN)	δ flecha cambio rigidez central (mm)	δ flecha max. central (mm)	Momento cambio rigidez (kN·m)	Momento F última (kN·m)	F tirafondo cambio rigidez (kN)	θ cambio rigidez (rad)	θ último (rad)	δ Horizontal max. (tracción) junta central (mm)	δ Horizontal max. (compresión) junta central (mm)
VIGA PLANA ENCAMONADA TIPO A (con tirafondo central)											
VIGA 1	9,58	19,34	13,60	63,93	1,75	3,53	1,61	0,0194	0,3063	4,76	-0,08
VIGA 2	9,01	21,80	12,49	53,59	1,64	3,98	1,51	0,0173	0,2861	4,30	-0,10
VIGA 3	9,94	20,80	13,57	47,97	1,81	3,79	1,67	0,0207	0,2589	5,16	-0,12
Media	9,51	20,65	13,22	55,16	1,73	3,77	1,60	0,0191	0,2838	4,74	-0,10
VIGA PLANA ENCAMONADA TIPO B (sin tirafondo central)											
VIGA 1	8,51	25,60	12,20	54,26	1,55	4,67	1,43	0,0131	0,2780	3,24	-0,30
VIGA 2	9,08	20,90	11,15	52,19	1,66	3,81	1,53	0,0143	0,2119	3,64	-0,23
VIGA 3	7,70	21,86	12,74	43,33	1,40	3,99	1,29	0,0124	0,2421	3,33	-0,01
Media	8,43	22,79	12,03	49,93	1,54	4,16	1,42	0,0133	0,2440	3,40	-0,18
VALORES MEDIOS TOTALES											
Media	8,97	21,72	12,63	52,55	1,64	3,96	1,51	0,0162	0,2639	4,07	-0,14

Se observa un rango lineal inicial similar en las seis piezas ensayadas, sin embargo, en el tramo posterior, la pendiente es ligeramente mayor en las muestras que no contienen el tirafondo central (gráficos 11, 12, 13 y 14). El tramo posterior presenta todavía un comportamiento cercano al lineal.

Gráfico 11. Gráficos Fuerza-desplazamiento del pistón de carga de las piezas Tipo A.

Gráfico 12. Gráficos Fuerza-desplazamiento del pistón de carga de las piezas Tipo B.

Gráfico 13. Comparación de los valores medios de cada tipo de ensayo: A y B.

Gráfico 14. Comparación de gráficos fuerza-desplazamiento central de los ensayos realizados y valor medio.

Las piezas encamonadas planas alcanzan su carga máxima principalmente por compresión en la parte superior del camón central y por tracción perpendicular a la fibra en la junta entre camones en estudio (figura 178). Además, se observa que las probetas siempre fallan por la madera, nunca por el tirafondo.

Figura 178. Rotura de las piezas encamonadas planas.

En la tabla 22, se detallan los valores obtenidos en cada uno de los ensayos realizados, donde se indican:

- $K_{ser,\alpha}$: factor de deslizamiento instantáneo correspondiente al ángulo α formado por la dirección del esfuerzo y la dirección de la fibra ($\alpha=77^\circ$, apartado 5.3.3.3., ecuación 12), en N/mm.
- K_{rot} : rigidez a la rotación obtenido de dividir el momento correspondiente al instante de cambio de rigidez entre el giro producido en el mismo instante, en kN·m/rad.
- $E_{m,g}$: módulo de elasticidad global calculado mediante la ecuación 3 del apartado 5.3.2.3. en N/mm².
- σ_r : tensión de rotura obtenido mediante la ecuación 4, apartado 5.3.2.3. en N/mm².

Tabla 22. Valores correspondientes a los ensayos realizados de vigas encamionadas.

PIEZA	$K_{ser,\alpha}$ (N/mm)	K_{rot} (kN·m/rad)	$E_{m,g}$ (N/mm ²)	σ_r (N/mm ²)
VIGA PLANA ENCAMONADA TIPO A (con tirafondo central)				
VIGA 1	1221,41	89,97	1.468,62	13,42
VIGA 2	1291,77	95,15	1.329,90	15,12
VIGA 3	1191,69	87,78	1.377,92	14,43
Media	1234,96	90,96	1.392,15	14,32
VIGA PLANA ENCAMONADA TIPO B (sin tirafondo central)				
VIGA 1	1607,71	118,42	1.607,84	17,76
VIGA 2	1569,52	115,61	1.488,98	14,50
VIGA 3	1542,07	113,59	1.835,40	15,16
Media	1573,10	115,87	1.644,07	15,81
VALORES MEDIOS TOTALES				
Media	1404,03	103,42	1.518,11	15,07

El valor medio de K_{ser} estimado en el ensayo de agotamiento, $K_{ser,\alpha} = 1.404,03$ N/mm, tabla 22, es muy inferior a los determinados con los ensayos de caracterización de uniones, apartado 6.3.2.1. *Determinación del módulo de deslizamiento: K_{ser}* , donde $K_{ser,0,med} = 2.405$ N/mm y $K_{ser,90,med} = 1.789$ N/mm. Aplicando la ecuación 12, de Racher (1995), para los valores determinados de $K_{ser,0}$ y $K_{ser,90}$, le correspondería un K_{ser} global de 2.363,81 N/mm, valor bastante superior que el obtenido en estos ensayos.

Estos resultados tan dispares si se comparan con los deducidos en el ensayo simple según la norma 26891 (apartado 5.3.3.1) permiten deducir que el comportamiento mecánico asumido en 5.3.3.3, de dos “coronas” sometidas a rotación, no obedecen a la realidad.

Con respecto al K_{rot} obtenido en estos ensayos, su valor medio 103,42 kN·m/rad es muy superior al obtenido en los ensayos de determinación del módulo de rotación, apartado 6.3.2.2. *Determinación de la rigidez a la rotación: K_{rot}* , cuyo valor es 4,37 kN·m/rad. Sin embargo, estos datos no se pueden comparar, ya que el primero de ellos corresponde al comportamiento de una unión compleja con dos filas de camones y 10 tirafondos, y el segundo a la rigidez a la rotación de un par de tirafondos. Parece lógico pensar, que, en este ensayo, los valores sean más altos.

En el anexo F.3. *Caracterización de uniones*, se recogen los gráficos de los seis ensayos de las vigas encamionadas rectas utilizados para obtener los valores expuestos en la tabla 21, necesarios para determinar los valores de K_{ser} y K_{rot} de la junta central entre camones.

6.3.2.4. Rigidez efectiva global del encamonado

En el apartado 5.2.3.3 se ensayaron uniones rectas entre camones registrando la relación entre carga y desplazamiento vertical en el centro del vano. La sección completa de la pieza estaba formada por dos piezas de 40x200 mm, dando lugar a una escuadría total de 80x200 mm. En el ensayo se obtiene un módulo de elasticidad medio aparente de 1518 N/mm², obtenido para una sección de 80x200 mm, tabla 23. En la tabla se incluyen además la tensión de flexión, σ_r , correspondiente a la carga última y el módulo de elasticidad y la resistencia a flexión de la madera aserrada (según apartado 6.3.1.3).

Tabla 23. Comparación de resultados entre las piezas de madera aserrada y encamonadas planas.

	VIGAS MACIZAS		VIGAS ENCAMONADAS	
	$E_{m,g}$ (N/mm ²)	σ_r (N/mm ²)	$E_{m,g}$ (N/mm ²)	σ_r (N/mm ²)
Media	10001,9	62,9	1518,1	15,1
D.E.	2603,0	17,7	182,8	1,5
C.V. (%)	26,0	28,1	12,0	9,7

En este apartado se obtiene la rigidez eficaz de la pieza encamonada (con la sección completa) a partir de las propiedades mecánicas de la madera obtenidas en los ensayos de flexión descritos en el apartado 5.3.2.3. *Ensayo de flexión de las piezas de madera maciza.*

La rigidez eficaz de la pieza encamonada es:

$$(E \cdot I)_{ef} = 1.518 \cdot 80 \cdot 200^3 / 12$$

Y la rigidez teórica de la pieza con escuadría de 80x200 mm:

$$(E \cdot I) = 10.001 \cdot 80 \cdot 200^3 / 12$$

La rigidez relativa es, por tanto, $(EI)_{rel} = (E \cdot I)_{ef} / (E \cdot I) = 0,152$. Es decir, la rigidez eficaz de la pieza encamonada es 6,5 veces inferior a la de la pieza maciza. Por tanto, la rigidez del conjunto de 2 piezas encamonadas es muy inferior a la rigidez de una de sus piezas.

Si se repite esta comparación con la capacidad de momento resistido se puede deducir su resistencia relativa.

El momento resistido (momento máximo) por la pieza encamonada es:

$$M_{ef} = 14,32 \cdot 80 \cdot 200^2 / 6$$

El momento teórico de la pieza con escuadría 80x200 mm:

$$M = 62,90 \cdot 80 \cdot 200^2 / 6$$

De donde se deduce una relación entre resistencias de $14,32/62,90 = 0,228$. Es decir, la pérdida de capacidad portante en el encamonado es menor que la pérdida de rigidez.

6.3.3. Ensayos mecánicos del modelo de una estructura encamonada

6.3.3.1. Ensayo bajo carga constante con duración media

El ensayo descrito en el apartado 5.2.5.1. *Ensayo bajo carga con duración media*, tuvo una duración de 15 días. Para estudiar el comportamiento general del mismo, en el gráfico 15, se muestra el desplazamiento vertical en la clave del arco (LVDT 13). Al cabo del primer día, se observó un desplazamiento de 24,1 mm, que a lo largo del ensayo se fue estabilizando hasta alcanzar un valor de 27,6 mm. Se observa una ligera inflexión en la línea del gráfico, aproximadamente a los 10 días (240 horas), debido a la rotura de uno de los bidones de agua que fue rápidamente sustituido. Después de la descarga, el desplazamiento disminuye de 9,4 a 7,4 mm (valor permanente) en 4 días.

Gráfico 15. Desplazamiento medido en la clave del arco (carga y descarga).

La flecha de la clave del arco aumentó desde la inicial 23 mm hasta 27,6 mm, al cabo de 15 días, lo que supone un factor de aumento de 1,2. Después de la descarga y al cabo de 4 días, queda una flecha remanente de 7,4 mm, lo que supone un 32% de la deformación instantánea inicial. Puede observarse, que existe una importante parte de la deformación que no es recuperable (comportamiento viscoso), debido a los aplastamientos y deslizamientos en los medios de unión.

6.3.3.2. Resultados del ensayo de agotamiento del arco encamonado

Los resultados obtenidos en los dos ensayos de agotamiento, relativos a los puntos indicados en la figura 179, se muestran en los gráficos siguientes (gráficos 16, 17 y 18).

Figura 179. Localización de los giros y desplazamientos comparados indicando el número de LVDT utilizado.

En el primer ensayo, la fuerza última fue de 18,80 kN, para un desplazamiento en la clave de 97,13 mm, en el segundo ensayo la fuerza máxima alcanzada fue de 16,91 kN para un desplazamiento de la clave de 87,12 mm (gráfico 16).

El comportamiento del primer arco ensayado es más rígido que el del segundo. En el primer tramo, hasta llegar a la zona más plástica, se observa aproximadamente un desplazamiento vertical del orden de un 60% menor que el del segundo arco. Hay que recordar que el segundo arco estuvo montado durante 3 años antes de su ensayo y que el primero se sometió a una carga de duración media antes del ensayo.

Gráfico 16. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento en la clave del arco en los dos ensayos de agotamiento realizados.

Lo mismo sucede en los desplazamientos medidos en los riñones de los arcos, como se observa en el gráfico 17. En el ensayo 1, se aprecia que, hasta una carga aproximada de 5 kN, el desplazamiento de los riñones fue prácticamente nulo. El tramo plástico de ambos gráficos es muy similar, solo existen diferencias en el tramo elástico, del orden del 40%.

Gráfico 17. Comparación de los gráficos de Fuerza-desplazamiento en la zona de los riñones de los dos ensayos realizados.

Al comparar los giros registrados, se vuelve a observar mayor rigidez en los datos procedentes del primer ensayo. En el gráfico 18, se han comparados los giros 1 y 2, figura 179.

Gráfico 18. Comparación de los gráficos Fuerza-giro en el camón central en los dos ensayos de rotura realizados.

A medida que el giro se acerca más a la zona de los riñones del arco, los giros son mayores, debido a que la deformación y, por lo tanto, la abertura entre camones es mayor (figura 180 y 181).

En la figura 182 se observa el estado inicial y final del arco encamonado ensayado hasta la carga última, se observa un descenso en la clave y un levantamiento en la zona de los riñones. El colapso de la estructura encamonada se produjo en la zona próxima a los riñones debido a la tracción perpendicular a la fibra.

Figura 180. Estado inicial y final del ensayo de agotamiento del arco encamonado y detalles de rotura debido a tracción perpendicular a la fibra en zonas próximas a los riñones.

Figura 181. Deformación del arco ensayado a agotamiento.

Figura 182. Deformación del arco, estado inicial y estado final con fotografías en las juntas indicando su abertura.

En el anexo F.4. *Estudio de las juntas entre camones del arco encamonado*, se recogen los datos relativos a las holguras entre camones previo y posterior ensayo de agotamiento.

6.3.4. Análisis dinámico. Frecuencias propias de vibración

6.3.4.1. Pieza encamionada recta y comparación con el modelo teórico

- Frecuencias longitudinales y transversales medidas con acelerómetros**

Los valores obtenidos (más repetidos) con los acelerómetros, para los diferentes ensayos realizados (véase apartado 5.3.6.1.), son los siguientes, tabla 24:

Tabla 24. Valores obtenidos de frecuencias propias en Hz del ensayo realizado.

APOYOS EN EXTREMOS						APOYOS A 0,224-L					
CENTRO		LATERAL DERECHO		LATERAL IZQUIERDO		CENTRO		LATERAL DERECHO		LATERAL IZQUIERDO	
Y	Z	Y	Z	Y	Z	Y	Z	Y	Z	Y	Z
58,92	12,17	38,19	10,68	57,45	12,78	62,35	12,17	48,00	11,21	68,77	12,17
98,52	40,11	54,71	37,57	145,82	29,89	85,04	50,41	82,31	13,64	79,66	48,79
160,85	57,45	57,48	61,34	215,85	39,46	106,67	92,28	103,47	48,79	85,04	72,22
219,40	96,92	100,14	160,85	370,11	55,61	132,21	234,22	163,50	71,05	114,13	87,87
250,04	158,54	127,96	192,52		219,40	168,93	319,50	358,21	242	153,15	110,48
530,22	262,61	192,52	355,55		376,21	530,22	575,36	435,54	341,08	289,66	150,67
	358,11	215,85	566,03		530,22				538,96	442,99	219,4
	428,75									513,17	238,08

Centro, lateral derecho y lateral izquierdo: localización de los puntos de golpeo.
y, z: vibración longitudinal y trasversal.

En cada toma de datos se anotaron los valores de las mayores amplitudes de la transformada de Fourier, en algunos ensayos los picos detectados eran más numerosos que en otros ensayos, por ello, en la tabla 24, se observa que no siempre aparecen el mismo número de datos registrados.

Con respecto a los resultados obtenidos, se destaca que:

- Existe un **5,0%** de repeticiones de un valor comprendido entre 12,17 y 12,78 Hz en dirección z (vibración transversal). Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **12,32 Hz**.
- Existe un **5,0%** de repeticiones de un valor comprendido entre 37,57 y 40,11 Hz en dirección z (vibración transversal). Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **38,83 Hz**.
- Existe un **6,3%** de repeticiones de un valor comprendido entre 48,00 y 54,71 Hz en dirección y (vibración longitudinal). Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **50,14 Hz**.
- Existe un **5,0%** de repeticiones de un valor comprendido entre 57,45 y 58,92 Hz en dirección y (vibración longitudinal). Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **57,83 Hz**.

- Existe un **6,3%** de repeticiones de un valor comprendido entre 79,66 y 85,04 Hz, en dirección y (vibración longitudinal). Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **83,98 Hz**.
- Existe un **7,5%** de repeticiones de un valor comprendido entre 98,52 y 114,13 Hz, en dirección y (vibración longitudinal). Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **105,57 Hz**.
- Existe un **5,0%** de repeticiones de un valor comprendido entre 158,54 y 160,85 Hz, en dirección y (vibración longitudinal). Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **160,14 Hz**.
- Existe un **6,3%** de repeticiones de un valor comprendido entre 215,85 y 219,40 Hz, en dirección y (vibración longitudinal). Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **217,98 Hz**.
- Existe un **3,8%** de repeticiones de un valor comprendido entre 355,55 y 358,21 Hz, en dirección z (vibración transversal). Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **357,39 Hz**.

- **Frecuencias longitudinales y transversales medidas con PLG**

Los valores medios obtenidos mediante el PLG relativos a la vibración longitudinal y transversal son los mostrados en la tabla 25:

Tabla 25. Valores de frecuencia propia para las vibraciones longitudinal y transversales.

		Pieza 1 (Hz)	Pieza 2 (Hz)
Longitudinal		249,3	241,2
Transversal	Canto 1	65,1	25,1
		182*	70,5*
	Canto 2	64	72,8
		182,1*	
	Tabla 1	52,8	49,5
	Tabla 2	52,8	47,7
Canto 1 y 2: Aplicación de los impactos en la cara de menor sección Tabla 1 y 2: Aplicación de los impactos en la cara de mayor sección (véase figura 128) *En algunos casos se detectaron dos frecuencias de similar amplitud.			

En el anexo *F.5. Análisis dinámico. Frecuencias propias de vibración*, se recogen los gráficos obtenidos mediante el programa informático del PLG relativo a las dos piezas ensayadas en este apartado.

- **Frecuencias calculadas mediante fórmulas matemáticas**

El cálculo manual realizado para conocer las frecuencias propias de la viga en estudio proviene de la solución planteada por Ross & Pellerin (1994), basada en la planteada por Blevins en 1979, tabla 26:

Tabla 26. Frecuencias teóricas calculadas mediante fórmulas matemáticas (Ross & Pellerin, 1994).

	Modelo Teórico (Ross & Pellerin, 1994) (Hz)
Modo 1	11,31
Modo 2	20,77
Modo 3	31,98
Modo 5	58,75

Aunque la solución planteada por Ross & Pellerins aporta los valores de las frecuencias de arcos continuos y no tiene en cuenta el efecto de las uniones, se considera que puede aportar información sobre el rango de frecuencias relativas a los diferentes modos.

- **Frecuencias modelo teórico SAP2000®**

Las frecuencias propias obtenidas mediante el programa informático de cálculo SAP2000®, procedentes del modelo tipo B de la pieza simple encamionada recta, explicado en el apartado 5.4.2., para la hipótesis de peso propio en la opción modal, son las siguientes, tabla 27:

Tabla 27. Captura de pantalla de los valores de las frecuencias propias del modelo teórico para los 20 primeros modos calculados por el programa informático SAP2000®

Original stiffness at shift : EV= 0.0000000E+00, f= .000000, T= -INFINITY-				
Number of eigenvalues below shift = 0				
Found mode	1 of	50:	EV= 4.9554126E+04, f= 35.429094, T= 0.028225	
Found mode	2 of	50:	EV= 5.8769819E+04, f= 38.583117, T= 0.025918	
Found mode	3 of	50:	EV= 5.7586975E+05, f= 120.776452, T= 0.008280	
Found mode	4 of	50:	EV= 7.8712025E+05, f= 141.201944, T= 0.007082	
Found mode	5 of	50:	EV= 9.5059793E+05, f= 155.173860, T= 0.006444	
Found mode	6 of	50:	EV= 3.2305464E+06, f= 286.060651, T= 0.003496	
Found mode	7 of	50:	EV= 3.6689818E+06, f= 304.854711, T= 0.003280	
Found mode	8 of	50:	EV= 4.0957916E+06, f= 322.098763, T= 0.003105	
Found mode	9 of	50:	EV= 5.3667890E+06, f= 368.703612, T= 0.002712	
Found mode	10 of	50:	EV= 7.0687351E+06, f= 423.146726, T= 0.002363	
Found mode	11 of	50:	EV= 1.4570514E+07, f= 607.515794, T= 0.001646	
Found mode	12 of	50:	EV= 1.9197442E+07, f= 697.335569, T= 0.001434	
Found mode	13 of	50:	EV= 4.7041688E+07, f= 1091.595, T= 0.000916	
Found mode	14 of	50:	EV= 4.9754525E+07, f= 1122.629, T= 0.000891	
Found mode	15 of	50:	EV= 4.9822415E+07, f= 1123.395, T= 0.000890	
Found mode	16 of	50:	EV= 7.4898645E+07, f= 1377.391, T= 0.000726	
Found mode	17 of	50:	EV= 8.3489568E+07, f= 1454.241, T= 0.000688	
Found mode	18 of	50:	EV= 1.0855124E+08, f= 1658.202, T= 0.000603	
Found mode	19 of	50:	EV= 1.3657618E+08, f= 1859.977, T= 0.000538	
Found mode	20 of	50:	EV= 2.7218875E+08, f= 2625.761, T= 0.000381

Como se observa en la tabla 27, el programa informático SAP2000® aporta la información de los primeros veinte modos, sin embargo, solo se han considerado los recuadrados en rojo porque el resto representaban formas de vibración que no corresponden con la realidad, como por ejemplo vibración de los elementos de unión.

En las figuras 183, 184, 185, 186 y 187, se observa la vibración del modelo para cada frecuencia propia de vibración seleccionada.

Figura 183. Vibración de la estructura correspondiente al modo 1. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 35,43 Hz.

Figura 184. Vibración de la estructura correspondiente al modo 2. Movimiento y giro en el plano xy. Valor frecuencia: 38,58 Hz.

Figura 185. Vibración de la estructura correspondiente al modo 3. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 120,78 Hz.

Figura 186. Vibración de la estructura correspondiente al modo 6. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 286,06 Hz.

Figura 187. Vibración de la estructura correspondiente al modo 11. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 607,52 Hz.

- **Comparación de resultados**

En la tabla 28, se observan las frecuencias propias obtenidas mediante los distintos métodos.

Tabla 28. Comparación de las frecuencias propias medidas y procedentes del análisis numérico.

Medición con acelerómetros (Hz)	Medición con PLG (Hz)	Modelo Numérico SAP 2000® (Hz)	Modelo Teórico (Ross & Pellerin, 1994) (Hz)
12,32		-	11,31
-	25,1	35,43	20,77
38,83		38,58	31,98
57,83	52,8; 65,1	-	58,75
83,98	70,5; 72,8	-	-
105,57		120,78	
160,94		-	
217,98	241,2; 249,3	286,06	
357,39			

La estructura en estudio, pieza encamionada plana está formada por numerosos elementos que producen “ruido” a la hora de estudiar las frecuencias propias.

No se observa una buena correlación de resultados de los modos. Este apartado sobre vibración debe considerarse simplemente como un trabajo exploratorio para intentar localizar las frecuencias propias de vibración de las piezas con uniones semirrígidas, con diferentes equipos (acelerómetros, análisis de frecuencias recogidas con micrófonos y análisis numérico). No fue posible encontrar coincidencias claras entre los diferentes métodos.

6.3.4.2. Arco encamonado y comparación con el modelo teórico

- Frecuencias medidas con acelerómetros**

Los valores obtenidos para los diferentes ensayos realizados son los siguientes, tabla 29:

Tabla 29. Valores obtenidos de frecuencias en Hz propias del ensayo realizado.

INDIVIDUALES																							
RIÑÓN TRASERO						RIÑÓN DEVANTERO						CLAVE DELANTERA						CLAVE TRASERA					
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
3,11	8,32	6,23	7,41	8,32	12,84	12,47	12,47	12,47	8,56	7,2	5,09	5,09	12,47	12,47	8,08	12,84	12,47	5,09	12,84	13,21	12,47	6,8	5,09
12,47	12,84	9,9	12,84	12,47	13,6	12,84	13,21	32,37	12,84	12,84	8,32	12,84	34,29	13,21	12,47	17,64	12,84	8,82	24,24	16,18	12,84	12,47	12,84
13,6	18,69	16,18	13,21	18,69	19,8	30,55	31,44	41,98	29,68	32,37	12,84	30,55	45,78	24,95	24,95	28,83	18,69	12,84	41,98	24,95	24,24	19,24	18,16
30,55	28,83	25,6	26,44	30,55	20,38	31,44	44,48	94,29	43,21	35,3	13,21	56,05	79,28	43,21	28,83	44,78	29,68	13,21	77,02	52,9	27,21	43,21	24,24
42,21	44,88	44,88	41,98	45,78	25,68	57,69			68,62	40,78	31,44	102,84	94,29	54,45	44,88	72,7	47,13	25,68	94,29	84	43,21	44,48	44,48
64,79	74,83	45,78			31,44					56,05	56,05			72,1	45,78	97,06	91,61	44,68		99	86,46	94,29	59,38
70,63		84			43,21						91,61			91,61				54,45					97,06
					47,13													97,06					

DOS A DOS																							
CLAVE + RIÑÓN DELANTERO						CLAVE + RIÑÓN TRASEROS						RIÑONES						CLAVES					
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
12,47	12,47	12,47	13,21	12,84	12,84	12,84	7,85	7	6,8	6,42	5,24	8,08	7,2	5,09	6,8	6,42	7,63	12,47	4,95	4,95	5,24	6,05	13,21
31,44	30,55	24,24	24,95	17,64	19,24	24,95	12,47	13,6	12,84	12,47	12,47	12,47	12,47	13,21	12,84	6,6	12,47	12,84	5,39	14	12,47	6,8	19,24
56,05	44,48	33,31	44,48	34,29	31,44	33,31	29,68	24,95	24,24	29,68	17,64	30,55	28,01	23,55	27,21	12,84	30,55	28,83	12,84	24,95	224,95	12,47	35,3
77,02	74,83	43,21	72,7	48,51	51,39	41,98	41,98	41,98	40,78	43,21	24,95	56,05	44,48	41,98	41,98	19,24	49,93	30,55	23,55	51,39	51,39	29,68	99,91
99,91	94,29	54,45		97,06	97,06	91,61	84	97,06	84	91,61	45,78	91,61	72,7	86,46	60,63	33,31	91,61	43,21	40,78	94,29	86,46	48,51	
		99,91											91,61			56,05		54,45	86,49			77,02	
																89,8		72,7					
																	97,06						

4 ACELEROMETROS					
1	2	3	4	5	6
6,8	7,2	5,24	6,42	6,05	6,32
12,47	12,84	15,27	12,47	6,32	12,62
31,44	28,83	22,88	23,55	7	17,83
41,98	40,78	45,78	28,83	12,84	28,76
54,45	84	81,61	43,21	18,3	46,39
77,02			84	31,14	95,05
94,29				43,99	
				76,85	

La nomenclatura utilizada en la tabla 29 corresponde a los valores de frecuencia medidos por los cuatro acelerómetros colocados según se detalla en la figura 129. Los valores correspondientes al grupo denominado “*individuales*” corresponden a los registrados por cada uno de los acelerómetros utilizados de forma individual y aplicando impactos de forma reiterada en cada una de las seis aplicaciones enumeradas en la figura 130. Los valores correspondientes a “*dos a dos*” son los registrados por dos acelerómetros activos, en cada una de las posibles combinaciones: *clave + riñón delantero*, *clave + riñón trasero*, *riñones* y *claves*, según lo detallado en la figura 130. En las casillas correspondientes a 4 acelerómetros se anotan los valores registrados por los cuatro acelerómetros activos al mismo tiempo a medida que se aplican los impactos en las seis localizaciones posibles.

En cada toma de datos se anotaron los valores de las mayores amplitudes de la transformada de Fourier. En algunos ensayos los picos detectados eran más numerosos que en otros ensayos; por ello, en la tabla Excel se observa que no siempre aparecen el mismo número de datos registrados.

Con respecto a los resultados obtenidos, se destaca que:

- Existe un **23%** de repeticiones de un valor comprendido entre 6,23 y 6,80 Hz. Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **6,55 Hz**.
- Existe un **92,6%** de repeticiones de un valor comprendido entre 12,47 y 12,62 Hz. Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **12,7 Hz**.
- Existe un **30%** de repeticiones de un valor comprendido entre 23,55 y 24,95 Hz. Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **24,47 Hz**.
- Existe un **50%** de repeticiones de un valor comprendido entre 28,83 y 31,44 Hz. Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **30,27 Hz**.
- Existe un **56%** de repeticiones de un valor comprendido entre 40,78 y 44,48 Hz. Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **42,80 Hz**.
- Existe un **22%** de repeticiones de un valor comprendido entre 54,45 y 56,05 Hz. Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **55,38 Hz**.
- Existe un **52%** de repeticiones de un valor comprendido entre 91,61 y 94,29 Hz. Realizando un valor ponderado de dichos valores con respecto al número de repeticiones que se han observado, el resultado es el siguiente: **95,32 Hz**.

En el anexo *F.5. Análisis dinámico. Frecuencias propias de vibración*, se recogen los gráficos obtenidos mediante el programa informático *vibraciones* relativo al primer arco ensayado.

• Resultados procedentes del modelo teórico realizado con SAP2000®

Para obtener los modos de vibración de la estructura encamionada se ha utilizado el modelo C, definido en el apartado 5.4.2.2. Arco encamionado. De los 21 modos de vibración diferentes obtenidos con el programa informático SAP2000®, sólo se han seleccionado 6, debido a que el resto correspondían con movimientos de la estructura que no corresponden con modos de vibración, como, por ejemplo, torsión de las barras Gewi sin movimiento de los arcos, o rotaciones del apoyo móvil de la estructura, (figura 188):

Figura 188. Representación de la vibración del modelo para las frecuencias desechadas.

Las frecuencias propias obtenidas mediante el programa informático de cálculo SAP2000® para la hipótesis de peso propio en la opción modal, son las siguientes, tabla 30:

Tabla 30. Valores de las frecuencias propias del modelo teórico para los 21 modo calculados por el programa informático SAP2000®

ALLOW AUTOMATIC FREQUENCY SHIFTING			=	YES		
Original stiffness at shift : EV= 0.0000000E+00, f= .000000, T= -INFINITY-						
Number of eigenvalues below shift = 0						
Found mode	1 of	21:	EV= 3.8905961E+01, f= 0.992723, T= 1.007330			
Found mode	2 of	21:	EV= 1.9588628E+02, f= 2.227523, T= 0.448929			
Found mode	3 of	21:	EV= 2.1398947E+02, f= 2.328179, T= 0.429520			
Found mode	4 of	21:	EV= 2.1542642E+02, f= 2.335983, T= 0.428085			
Found mode	5 of	21:	EV= 2.3078667E+02, f= 2.417828, T= 0.413594			
Found mode	6 of	21:	EV= 3.3264716E+02, f= 2.902766, T= 0.344499			
Found mode	7 of	21:	EV= 1.0787597E+03, f= 5.227361, T= 0.191301			
Found mode	8 of	21:	EV= 1.0909872E+03, f= 5.256903, T= 0.190226			
Found mode	9 of	21:	EV= 1.1403489E+03, f= 5.374512, T= 0.186063			
Found mode	10 of	21:	EV= 1.1406446E+03, f= 5.375208, T= 0.186039			
Found mode	11 of	21:	EV= 1.7695962E+03, f= 6.695102, T= 0.149363			
Found mode	12 of	21:	EV= 2.8635243E+03, f= 8.516685, T= 0.117417			
Found mode	13 of	21:	EV= 6.9919963E+03, f= 13.308243, T= 0.075141			
Found mode	14 of	21:	EV= 1.1031484E+04, f= 16.716183, T= 0.059822			
Found mode	15 of	21:	EV= 2.0542256E+04, f= 22.810993, T= 0.043839			
Found mode	16 of	21:	EV= 2.3613920E+04, f= 24.457056, T= 0.040888			
Found mode	17 of	21:	EV= 3.8539474E+04, f= 31.244460, T= 0.032006			
Found mode	18 of	21:	EV= 4.3979763E+04, f= 33.376944, T= 0.029961			
Found mode	19 of	21:	EV= 5.0590880E+04, f= 35.797793, T= 0.027935			
Found mode	20 of	21:	EV= 5.7751477E+04, f= 38.247379, T= 0.026146			
Found mode	21 of	21:	EV= 6.0879379E+04, f= 39.269488, T= 0.025465

En las figuras 189, 190, 191, 192, 193 y 194, se observa la vibración del modelo para cada frecuencia propia de vibración.

Figura 189. Vibración de la estructura correspondiente al modo 6. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 2,9 Hz.

Figura 190. Vibración de la estructura correspondiente al modo 11. Movimiento en el plano xy-z. Valor frecuencia: 6,7 Hz.

Figura 191. Vibración de la estructura correspondiente al modo 13. Movimiento en el plano xy-xz. Valor frecuencia: 13,3 Hz.

Figura 192. Vibración de la estructura correspondiente al modo 16. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 24,46 Hz.

Figura 193. Vibración de la estructura correspondiente al modo 17. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 31,24 Hz.

Figura 194. Vibración de la estructura correspondiente al modo 21. Movimiento en el plano xy. Valor frecuencia: 39,27 Hz.

• Comparación de resultados

Comparando los valores procedentes del modelo real y teórico, se obtiene la tabla 31:

Tabla 31. Comparación de las frecuencias propias del modelo real y del modelo teórico.

Mediciones (Hz)	Modelo numérico (Hz)
-	2,93
6,55	6,7
12,7	13,3
24,47	24,46
30,27	31,24
42,8	39,27
55,38	-
95,32	-

Se observa una buena correlación de resultados en algunos modos. Sin embargo, el método seguido para localizar los puntos de mayor amplitud en la transformada de Fourier en las mediciones con acelerómetros se considera poco exacto, ya que se realizaba de forma manual, por lo que se considera poco sistemático.

El primer valor detectado en el modelo numérico (2,93 Hz) no corresponde con ningún pico de la gráfica de las mediciones con acelerómetros, sin embargo, otros autores han detectado valores similares como es el caso de Douglas R. Rammer, en su estudio sobre arcos de madera laminada con luces entre apoyos de 10 metros, cuyo modo 1 de vibración correspondía con 3,46 Hz (Rammer, 2016); o el de Cecilia Alonso, cuyas frecuencias fundamentales en los casos de vibración transversal y longitudinal correspondían con 2,75 y 5,77 Hz respectivamente (Alonso, 2012). Los valores más bajos detectados en las mediciones con acelerómetros se encuentran en torno a 5,2 Hz.

Con respecto a los últimos valores detectados por los acelerómetros (55,38 y 95,32 Hz), el modelo numérico no llegó a registrar frecuencias tan elevadas.

Un arco continuo posee unos modos identificados que permiten ser calculados con sencillas fórmulas, como se observa en las figuras 195 y 196, sin embargo, la estructura en estudio es compleja y está formada por numerosos elementos que producen “ruido” a la hora de estudiar sus frecuencias propias.

$$\omega_1 = \frac{0.157}{R} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$\omega_2 = \frac{0.687}{R} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Figura 195. Dos primeros modos de vibración de arco continuo con apoyos fijos.

Figura 196. Dos primeros modos de vibración de arco continuo con apoyos empotrados.

Calculando los valores de las frecuencias del arco, considerándolo continuo, los resultados serían los siguientes, tabla 32:

Tabla 32. Frecuencias propias relativas a arco continuo.

Apoyos articulados (Hz)	Apoyos empotrados (Hz)
25,19	6,96
110,24	33,74

Los valores expuestos en la tabla 32 poseen un rango similar a algunas frecuencias detectadas tanto por los acelerómetros como por el modelo teórico, sin embargo, corresponden a dos estructuras diferentes, una con uniones semirrígidas (modelo numérico y ensayo a escala real medido con acelerómetros) y otra en continuo. Estos valores se incluyen a título informativo para contrastar el rango de frecuencias en ambos tipos de estructuras.

6.3.5. Comparación de los resultados obtenidos de los ensayos de agotamiento y los modelos teóricos realizados en SAP2000®

6.3.5.1. Modelo de comportamiento lineal

En este modelo, los NLINK 1 y 2, se modelizaron introduciendo los valores de $K_{ser,0}$, $K_{ser,90}$ y K_{rot} , determinados en los ensayos descritos en el apartado 6.3.2.1. *Determinación del módulo de deslizamiento: K_{ser}* , en cada eje pertinente. El NLINK 3 ha sido representado mediante un elemento denominado "GAP", en SAP2000®, que representa la rigidez de la madera al entrar en contacto la testa de los dos camones, es decir, cuando la holgura de 1 mm desaparece, cuyo valor corresponde a la ecuación 22.

$$K_{\text{rigidez, madera}} = \frac{E \cdot A}{L} = \frac{10.002.000 \cdot 0,02 \cdot 0,04}{0,135} = 59.270 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{Ecuación 20}$$

20

El área corresponde a la zona de contacto entre camones cuando desaparece la holgura de 1 mm, cuyo valor medio es de 2 cm de altura y la anchura del camón de 4 cm, como se observa en la figura 197, procedente del ensayo de agotamiento del primer arco. La longitud considerada corresponde a la distancia horizontal entre los tirafondos de la unión $2 \cdot a_{3,c} = 2 \cdot 15d = 2 \cdot 67,5 = 135 \text{ mm}$ (figura 120).

Figura 197. Zona de contacto entre camones al entrar en carga la estructura y desaparecer la holgura inicial de 1 mm.

Las características de dichos sistemas de conexión entre camones se definen en la tabla 33.

Tabla 33. Datos relativos a los NLINK introducidos en Sap2000® y los valores correspondientes a cada eje.

Grados de libertad en ejes locales 1,2,3	NLINK 1	NLINK 2	NLINK 3
	Valor de la coacción ⁽¹⁾	Valor de la coacción ⁽¹⁾	Características asignadas ⁽²⁾
U1 ⁽³⁾	∞	∞	59270 kN/m
U2	4.810 kN/m	2.405 kN/m	0
U3	3.578 kN/m	1.789 kN/m	0
R1 ⁽⁴⁾	7,18 kN·m/rad	0 kN·m/rad	0
R2	∞	∞	0
R3	∞	∞	0

(1) Valores lineales en kN/m (valores relativos a la resistencia al desplazamiento Kser) y kN.m/rad (resistencia a la rotación Krot)

(2) Elemento no lineal (Gap)

(3) Desplazamiento en la dirección local (deslizamiento entre nodos)

(4) Rotación sobre la dirección local 1 (rotación relativa entre nodos) KN-m/rad

En el gráfico 19, se observa una buena correlación en el tramo elástico de la gráfica entre el modelo numérico lineal y los resultados procedentes del primer ensayo de agotamiento del arco encamonado.

Gráfico 19. Comparación del gráfico fuerza desplazamiento del modelo lineal y el ensayo 1 de agotamiento del arco.

6.3.5.2. Modelos de comportamiento no lineal

• Pieza simple encamionada recta

Para definir las propiedades de la madera, se usaron los valores obtenidos de los ensayos de caracterización de la madera, apartado 6.3.1., es decir, un módulo de elasticidad de $10.001.900 \text{ kN/m}^2$, peso por unidad de volumen de $4,8 \text{ kN/m}^3$ y un coeficiente de Poisson de 0,3.

Se crearon tres modelos diferentes, A, B y C, descritos en el apartado 5.4.2.1. *Pieza simple encamionada recta*.

- Para definir el comportamiento de la junta entre camones, del primer **modelo A**, se utilizó el NLINK 3, para introducir los valores de rigidez rotacional.

Las propiedades en cada uno de los ejes se resumen en la tabla 34.

Tabla 34. Datos relativos al NLINK introducido en el modelo teórico para representar el comportamiento de la junta.

Grados de libertad en ejes locales 1,2,3	NLINK 3
	Características asignadas ⁽²⁾
U1 ⁽³⁾	∞
U2	∞
U3	∞
R1 ⁽⁴⁾	∞
R2	∞
R3	MP-V ⁽²⁾

⁽¹⁾ Valores lineales en kN/m (valores relativos a la resistencia al desplazamiento Kser) y kN.m/rad (resistencia a la rotación Krot)
⁽²⁾ Elemento no lineal (Gap)
⁽³⁾ Desplazamiento en la dirección local (deslizamiento entre nodos)
⁽⁴⁾ Rotación sobre la dirección local 1 (rotación relativa entre nodos) KN.m/rad

El comportamiento de la junta se ha modelizado mediante la ecuación constitutiva MP-V, representada en el gráfico 20, cuyos valores proceden de los valores medios obtenidos en los seis ensayos explicados en el apartado 6.3.2.3. *Estudio de una unión encamionada*. La pendiente del primer tramo de la gráfica corresponde al valor medio de K_{rot} ($51,71 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$) correspondiente al giro total producido en la unión encamionada. El punto que determina el final de dicha recta es el correspondiente a los valores de momento y giro cambio rigidez ($M=1,64 \text{ kN}\cdot\text{m}$ y $\theta= 0,0317 \text{ rad}$). El último punto de la gráfica corresponde a los valores de momento relativo a la fuerza última y giro máximo ($M_u=3,96 \text{ kN}\cdot\text{m}$ y $\theta_u= 0,5278 \text{ rad}$), detallados en la tabla 21.

Gráfico 20. Representación del comportamiento de la junta entre camones, Multilinear Plastic V.

Los modelos tipo A.1 y A.2, reflejan resultados prácticamente similares, por lo que no se manifiesta el aumento de rigidez del modelo A.2, al aumentar la inercia de la pieza, gráfico 21. Por tanto, el efecto del grueso mayor de los camones laterales puede despreciarse.

Gráfico 21. Comparación de resultados Fuerza-desplazamiento de los dos modelos de SAP2000.

En el gráfico 22 se observa que, como se esperaba, los valores del K_{rot} introducidos, procedentes de los ensayos a flexión de las piezas encamionadas rectas, los resultados del modelo teórico son similares.

Gráfico 22. Comparación de los resultados de los modelos teóricos 1_A y 1_B de Momento frente a giro.

Gráfico 23. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento entre el modelo A y los resultados medios de los ensayos.

En el gráfico 23, se observa que el modelo teórico A, es mucho menos rígido que la realidad. En el tramo elástico el modelo es un 36% menos rígido y en el tramo plástico, un 30%. Esta diferencia, se debe en gran medida a que en el modelo numérico se registraron las medidas de desplazamiento en los nodos correspondientes al NLINK 3 (figura 137), encontrándose desplazados 134,5 cm con respecto al punto medio de la viga, lugar donde se registraron los desplazamientos con los LVDTs 9 y 10 (figura 115). Lógicamente en el punto central, el desplazamiento es mayor. Además, las medidas registradas por los dos LVDTs, 9 y 10, tienen una diferencia máxima entre ellos de 13 mm. Si se considerasen los valores medios correspondientes al LVDT 10, cuya forma de deformación es más próxima al modelo teórico, las diferencias en el tramo elástico disminuyen hasta el 5%, aunque el tramo elástico sigue siendo un 36% menos rígido. Además, en este modelo no se han introducido los módulos de deslizamiento K_{ser} paralelo y perpendicular a la fibra.

Se considera que el modelo es válido con respecto a su modelización de K_{rot} y siempre que la influencia de axiles y cortantes no sea elevada.

- Para definir las uniones del segundo **modelo B**, se utilizaron los NLINK 2 y 3, que permiten introducir valores de rigidez rotacional y deslizamiento en cada uno de los ejes 1,2, 3.

Las propiedades en cada uno de los ejes se resumen en la tabla 35.

Tabla 35. Datos relativos a los NLINK del modelo B.

Grados de libertad en ejes locales 1,2,3	NLINK 1	NLINK 3
	Ecuaciones constitutivas ⁽¹⁾	Ecuaciones constitutivas ⁽¹⁾
U1⁽³⁾	∞	∞
U2	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾	∞
U3	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾	∞
R1⁽⁴⁾	∞	∞
R2	∞	∞
R3	∞	MP-V ⁽²⁾
⁽¹⁾ Tipo de ecuación constitutiva de acuerdo con la nomenclatura de SAP2000® ⁽²⁾ Multilinear Plastic (MP), se explica a continuación ⁽³⁾ Desplazamiento en la dirección local (deslizamiento entre nodos) ⁽⁴⁾ Rotación sobre la dirección local 1 (rotación relativa entre nodos)		

El comportamiento de la junta se ha modelizado mediante las ecuaciones constitutivas MP-II (valores de K_{ser} correspondientes a dos tirafondos) y MP-V (valores de rigidez correspondientes al conjunto de la unión), representadas en el gráfico 24.

Gráfico 24. Representación del comportamiento de la junta entre camones, Multilinear Plastic II y V.

Los valores que definen el gráfico 24, proceden de los valores medios obtenidos en los ensayos descritos en los apartados 5.3.3.1. *Determinación del módulo de deslizamiento del tirafondo:* K_{ser} en el caso del MP-II (K_{ser} paralelo y perpendicular a la fibra respectivamente) y el apartado 6.2.2.3. *Estudio mecánico de una unión encamionada*, en el caso del MP-V (K_{rot} de la unión).

Gráfico 25. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento entre el modelo B y los resultados medios de los ensayos.

En el gráfico 25, se observa una mejoría con respecto al modelo anterior, aunque el modelo teórico B, es ligeramente más rígido que la realidad. En el tramo elástico el modelo coincide perfectamente con los valores medios procedentes de los ensayos y en el tramo plástico, posee la misma rigidez, pero se encuentra desplazado un 12%, esto puede deberse a que al determinar las ecuaciones constitutivas MP-II, el valor de Fuerza último se encuentre sobreestimado al calcularse de manera que el área bajo las gráficas sea el mismo (figura 198).

Figura 198. Representación de la simplificación de la ecuación constitutiva relativa al K_{ser} con respecto al gráfico correspondiente a los ensayos.

- Para definir las uniones del tercer y último **modelo C**, se utilizaron los NLINK 1, 2 y 3, que permiten introducir valores de rigidez rotacional y deslizamiento en cada uno de los ejes 1, 2, 3.

Las propiedades en cada uno de los ejes se resumen en la tabla 36.

Tabla 36. Datos relativos a los NLINK del modelo C.

Grados de libertad en ejes locales 1,2,3	NLINK 1	NLINK 2	NLINK 3
	Ecuaciones constitutivas ⁽¹⁾	Ecuaciones constitutivas ⁽¹⁾	Ecuaciones constitutivas ⁽¹⁾
U1 ⁽³⁾	∞	∞	∞
U2	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾	∞
U3	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾	∞
R1 ⁽⁴⁾	∞	0	∞
R2	∞	∞	∞
R3	∞	∞	MP-V ⁽²⁾
⁽¹⁾ Tipo de ecuación constitutiva de acuerdo con la nomenclatura de SAP2000® ⁽²⁾ Multilinear Plastic (MP), se explica a continuación ⁽³⁾ Desplazamiento en la dirección local (deslizamiento entre nodos) ⁽⁴⁾ Rotación sobre la dirección local 1 (rotación relativa entre nodos)			

El comportamiento de la junta se ha modelizado mediante las ecuaciones constitutivas MP-II (valores de K_{ser} correspondientes a dos tirafondos en el NLINK 1 y correspondientes a un tirafondo en el NLINK2) y MP-V (valores de rigidez correspondientes al conjunto de la unión), representadas en el gráfico 26.

Los valores que definen el gráfico 26, proceden de los valores medios obtenidos en los ensayos descritos en los apartados 5.3.3.1. *Determinación del módulo de deslizamiento del tirafondo: K_{ser}* y el apartado 6.2.2.3. *Estudio mecánico de una unión encamionada*.

Gráfico 26. Representación del comportamiento de la junta entre camones, Multilinear Plastic II y V.

Ecuaciones constitutivas del NLINK 1

Ecuaciones constitutivas del NLINK 2

Ecuación constitutiva del NLINK 3

En el gráfico 27, se observa una mayor rigidez del modelo C debido a la aportación del K_{ser} introducido en el tirafondo central. Este modelo, al igual que el anterior, posee una buena concordancia en el tramo elástico, sin embargo, la rigidez en el rango plástico se encuentra desplazada, posiblemente por sobreestimar el valor de Fuerza último como sucedía en el modelo B, en este caso incrementado al introducir el tirafondo central.

Gráfico 27. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento entre el modelo C y los resultados medios de los ensayos.

En el gráfico 28 se comparan los resultados teóricos de los tres modelos numéricos planteados con los resultados medios de los ensayos.

Gráfico 28. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento de los modelos A, B y C y los resultados medios de los ensayos.

• Arco encamonado

Se han realizado tres modelos del sistema encamonado, A, B y C, empezando por el más sencillo, A, y terminando por el más complejo, C.

- El primero, **modelo A**, se ha modelizado con una sola línea de camones, representados mediante barras. Las uniones han sido modelizadas por NLINK 3 (tabla 37), cuyas ecuaciones constitutivas se representan en el gráfico 29, MP-II para simular la rigidez relativa al K_{ser} y el MP-V, para representar la rigidez entre las testas de los camones.

Tabla 37. Datos relativos al NLINK introducido en el modelo A para representar el comportamiento de la junta.

Grados de libertad en ejes locales 1,2,3	NLINK 3
	Ecuaciones constitutivas ⁽¹⁾
U1⁽³⁾	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾
U2	∞
U3	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾
R1⁽⁴⁾	∞
R2	∞
R3	MP-V ⁽²⁾
⁽¹⁾ Tipo de ecuación constitutiva de acuerdo con la nomenclatura de SAP2000® ⁽²⁾ Multilinear Plastic (MP), se explica a continuación ⁽³⁾ Desplazamiento en la dirección local (deslizamiento entre nodos) ⁽⁴⁾ Rotación sobre la dirección local 1 (rotación relativa entre nodos)

Gráfico 29. Representación del comportamiento de la junta entre camones: MP-II y MP-V.

Ecuaciones constitutivas MP-II (relativo al valor de $2,5 \cdot K_{ser}$)

Ecuación constitutiva del MP-V (Contacto entre testas donde se incluye la rigidez de la madera)

Los valores del MP-II, corresponden a los valores de $K_{ser,0}$ y $K_{ser,90}$ respectivamente, determinados en el apartado 5.3.3.1. *Determinación del módulo de deslizamiento del tirafondo: K_{ser}* , que permiten simular la primera fase hasta llegar el contacto entre camones. A partir de dicho instante, se produce el contacto entre camones y entrarían en funcionamiento los valores de rigidez descritos en el MP-V. Dichos valores de $K_{ser,0}$ y $K_{ser,90}$, corresponden al módulo de deslizamiento equivalente a 2,5 tirafondos, tanto en el caso de paralelo como perpendicular a la fibra, como se observa en la justificación matemática de la figura 199.

Figura 199. Determinación del número de tirafondos a considerar en la unión entre camones.

Los valores del MP-V, son los mismos que en los modelos anteriores, A y B, de la pieza encamónada recta, y corresponde con el valor de K_{rot} determinado con la media de los ensayos descritos en el apartado 6.2.2.3. *Estudio mecánico de una unión encamónada*, como se justifica en la figura 200. Para introducir el K_{rot} de la pieza encamónada recta (Modelo A) en el modelo del arco, se ha considerado una única unión semirrígida en cada junta entre dos camones con valor K_{rot} , que tiene prácticamente el mismo efecto que las dos uniones del modelo A del encamonado recto.

Figura 200. Justificación del valor de K_{rot} situado en la junta entre camones.

En el gráfico 30, se comparan los gráficos fuerza-desplazamiento del modelo numérico A, entre los valores procedentes de los dos ensayos de agotamiento realizados. Se observa que el modelo es mucho menos rígido que la realidad, en torno a un 49% con respecto al segundo ensayo en el tramo elástico y un 73% con respecto al primer ensayo. En el rango plástico la rigidez del modelo numérico es un 16% y 9% menos rígida con respecto al primer y segundo ensayo correspondientemente.

Este modelo no es capaz de predecir la realidad. Se trata de un modelo incompleto al no incluir el K_{ser} . A efectos de compresión, debería ser más rígido que la realidad, sin embargo, los resultados son contrarios.

Gráfico 30. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento en la clave del arco entre el modelo teórico A y los ensayos de agotamiento realizados.

- El segundo, **modelo B**, se ha modelizado con las dos filas de camones existentes en la realidad, y las uniones han sido modelizadas por un NLINK 3 (tabla 38), situado entre las testas de los camones, cuyas ecuaciones constitutivas se representan en el gráfico 31, MP-II para simular la rigidez relativa al K_{ser} y el MP-V, para representar la rigidez entre las testas de los camones.

Tabla 38. Datos relativos al NLINK introducido en el modelo B para representar el comportamiento de la junta.

Grados de libertad en ejes locales 1,2,3	NLINK 3
	Ecuaciones constitutivas ⁽¹⁾
$U1^{(3)}$	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾
$U2$	∞
$U3$	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾
$R1^{(4)}$	∞
$R2$	∞
$R3$	MP-V ⁽²⁾

⁽¹⁾ Tipo de ecuación constitutiva de acuerdo con la nomenclatura de SAP2000®
⁽²⁾ Multilinear Plastic (MP), se explica a continuación
⁽³⁾ Desplazamiento en la dirección local (deslizamiento entre nodos)
⁽⁴⁾ Rotación sobre la dirección local 1 (rotación relativa entre nodos)

Gráfico 31. Representación del comportamiento de la junta entre camones: MP-II y MP-V.

Ecuaciones constitutivas MP-II (relativo al valor de $2,5 \cdot K_{ser}$)

Ecuación constitutiva del MP-V (Contacto entre testas donde se incluye la rigidez de la madera)

Los valores del MP-II y MP-V son los mismos que el modelo anterior, modelo A, aunque se encuentran representados en cada unión de testas entre camones en cada uno de los dos arcos encamionados (figura 145).

En el gráfico 32, se comparan los gráficos fuerza-desplazamiento del modelo teórico B, entre los valores procedentes de los dos ensayos de agotamiento realizados. Se observa que el modelo es mucho menos rígido que la realidad, en torno a un 11% con respecto al segundo ensayo en el tramo elástico y un 53% con respecto al primer ensayo. Sin embargo, la fuerza última es mucho mayor que en la realidad, aunque la rigidez relativa al tramo plástico se ajusta más a la realidad, un 20% más rígida que el ensayo 1 de agotamiento y un 12% más rígida con respecto al segundo ensayo.

Este modelo, aunque más ajustado que el A, no es capaz de predecir con precisión la realidad.

Gráfico 32. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento en la clave del arco entre el modelo B y los ensayos de agotamiento realizados.

- El tercer y último modelo planteado, **modelo C**, se ha modelizado con las dos filas de camones existentes en la realidad, y las uniones han sido modelizadas por los NLINK 1, 2 y 3, tabla 39, cuyas ecuaciones constitutivas se representan en el gráfico 33.

Tabla 39. Datos relativos al NLINK introducido en el modelo C para representar el comportamiento de las uniones.

Grados de libertad en ejes locales 1,2,3	NLINK 1	NLINK 2	NLINK 3
	Ecuaciones constitutivas ⁽¹⁾	Ecuaciones constitutivas ⁽¹⁾	Ecuaciones constitutivas ⁽¹⁾
U1 ⁽³⁾	∞	∞	MP-III ⁽²⁾
U2	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾	∞
U3	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾	MP-I ⁽²⁾ o MP-II ⁽²⁾	∞
R1 ⁽⁴⁾	MP-IV ⁽²⁾	0	0
R2	∞	∞	0
R3	∞	∞	MP-IV ⁽²⁾

⁽¹⁾ Tipo de ecuación constitutiva de acuerdo con la nomenclatura de SAP2000®

⁽²⁾ Multilinear Plastic (MP), se explica a continuación

⁽³⁾ Desplazamiento en la dirección local (deslizamiento entre nodos)

⁽⁴⁾ Rotación sobre la dirección local 1 (rotación relativa entre nodos)

Gráfico 33. Representación del comportamiento de las uniones del modelo C.

Ecuaciones constitutivas del NLINK 1 (corresponden a los valores de 2 tirafondos)

Ecuaciones constitutivas del NLINK 2 (corresponden a los valores de 1 tirafondo)

Ecuaciones constitutivas del NLINK 3

El **NLINK 1** utiliza las ecuaciones de tipo MP- I o II y MP- III.

El MP- I se define discretizando los gráficos reales representados en la figura 136 a), definiendo cada uno de los cinco puntos que describen la ley, pero, como hay dos tornillos en una disposición en serie, se tienen en cuenta una doble rigidez.

El Tipo MP- II se define teniendo en cuenta una rigidez en la dirección paralela y perpendicular a la fibra de $2 \cdot K_{ser,0} = 4.810 \text{ N/mm}$ y $2 \cdot K_{ser,90} = 3.578 \text{ N/mm}$, respectivamente; con una carga última de $F_u = 2 \cdot 4,45 = 8,9 \text{ kN}$. El deslizamiento último se fijó en 15 mm de MP- I y II, según la norma UNE-EN 26891:1992.

El tipo MP- IV se llevó a cabo teniendo en cuenta una rigidez rotacional de $K_{rot} = 7,18 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ (tabla 20), un momento plástico $M_p = 0,32 \text{ kN}\cdot\text{m}$ y una rotación final de $\delta_u = 0,15 \text{ mm}$, es decir, $\theta_u \approx \frac{15}{z/2} = \frac{15}{73/2} = 0,4 \text{ rad}$, siendo z la distancia vertical entre el par de tirafondos (figura 201). Los valores proceden del ensayo de determinación de la rigidez rotacional K_{rot} de un par de tirafondos, apartado 5.3.3.2.

Figura 201. Vista frontal de los dos tornillos agrupados en el NLINK 1.

El **NLINK 2** usa las ecuaciones constitutivas MP- I o MP- II. No se considera capacidad de momento en este caso. Como se utiliza sólo un tirafondo, los otros valores de K_{ser} son la mitad de los mencionados para el NLINK 1.

El **NLINK 3** utiliza las ecuaciones de tipo MP- III y MP - IV.

El Tipo MP- III se llevó a cabo modelizando un espacio de separación entre camones inicial de $\delta_g = 1 \text{ mm}$ (valor medio medido en el ensayo del arco completo) y una zona de contacto entre camones igual a 10% de la longitud del camón, es decir, 20 mm, lo que conduce a una rigidez axial de $K_{rigidez,madera} = 59.270 \text{ N/mm}$, ecuación 22, apartado 6.3.5.1. La consideración de dicho valor se debe al estudio de las 46 juntas de contacto entre camones de la estructura de arcos encamonados antes y después del ensayo de agotamiento. Se midieron dichas zonas de contacto, que variaron entre el 5% y el 15% del canto de la sección (200 mm).

Además, se asumió un deslizamiento final de $\delta_u = 3 \text{ mm}$ para la carga de compresión y $\delta_u = 30 \text{ mm}$ para la zona de la tracción. Se consideró una tensión de compresión de 15 N/mm^2 , que corresponde con una fuerza última $F_u = 12 \text{ kN}$. También se realizó un análisis de sensibilidad de dicha variable, modificando dicha tensión de compresión dentro del rango de 10 y 20 N/mm^2 , pero apenas afectaron a los resultados finales.

El Tipo MP- IV fue implementado utilizando una carga última para un tirafondo de $F_u=4,45$ kN. Esto significa una rigidez rotacional de $K_{rot}=73,6$ kN·m/rad y un momento de plástico $M_p=1,1$ kN·m o $M_p=1,03$ kN·m, para un momento de flexión positivo o negativo, respectivamente. En aras de la simplicidad, se adoptó un valor intermedio de $M_p=1,07$ kN·m, que corresponde con un valor medio de la zona de contacto del 10% de la longitud del camón. Se realizó un análisis de sensibilidad variando dicho parámetro dentro del rango del 5% y 15% del canto de la sección, valores observados en el análisis de las juntas, sin embargo, este parámetro apenas cambia el resultado final.

La rotación final, θ_u , se definió en base a los resultados obtenidos al analizar las juntas entre camones, tras la realización del primer ensayo de agotamiento de los arcos encamionados. Suponiendo una separación máxima de 30 mm para ese caso, que conlleva a un $\theta_u \approx 30/200=0,15$ rad.

En aras de estudiar la influencia del módulo de elasticidad de la madera en el modelo teórico, se introdujeron variaciones en dicho valor sin apreciar influencia en los resultados, lo que demuestra la baja sensibilidad de dicha variable.

En el gráfico 34, se comparan los gráficos fuerza-desplazamiento del modelo teórico C con los valores procedentes de los dos ensayos de agotamiento realizados. Se observa que el modelo es mucho más rígido que la realidad, en torno a un 36% con respecto al primer ensayo en el tramo elástico y un 58% con respecto al segundo ensayo. Con respecto al rango plástico, es un 45% más rígido.

Gráfico 34. Comparación de los gráficos Fuerza-desplazamiento en la clave del arco entre el modelo C y los ensayos de agotamiento realizados.

En el gráfico 35 se comparan los resultados de los ensayos experimentales y de los tres modelos de arcos encamonados planteados.

El modelo C se adecua más al rango elástico del primer ensayo de rotura realizado, sin embargo, se aleja del segundo. El modelo A, es mucho menos rígido que la realidad y sería el más conservador de todos. El modelo que más corresponde con la realidad es el B, cuyo rango elástico es similar al del segundo ensayo de rotura realizado, aunque su rango plástico es un 30% más rígido.

Gráfico 35. Comparación de gráficos Fuerza-desplazamiento en la clave de los modelos teóricos y resultados experimentales.

Con solo dos ensayos experimentales no se puede establecer el comportamiento general de una estructura encamonada, sin embargo, se puede conocer su rango de pauta. Ambos ensayos de rotura poseen valores de fuerza última similares, 18,80 kN el primero y 16,91 kN el segundo, siendo más rígido el primero que el segundo. Los modelos teóricos no consiguen representar la realidad observada, aun introduciendo los resultados de rigidez rotacional y de deslizamiento procedentes de ensayos realizados. El modelo que parece aproximarse más a la realidad es el B, sin embargo, sigue siendo más rígido en el rango plástico, aproximadamente un 30%.

7. CONCLUSIONES

RESUMEN CONCLUSIONES:

Las conclusiones que se muestran en el siguiente capítulo están organizadas en torno a las dos líneas de investigación paralelas: el estudio histórico constructivo y el comportamiento estructural de las bóvedas encamonadas.

- Con respecto al estudio histórico constructivo

Las bóvedas encamonadas son un sistema que se adapta a las necesidades a cubrir. Utilizando una materia prima de pequeñas dimensiones y sin clasificación estructural, permiten la fabricación de elementos constructivos que soportan su propio peso, en el caso más desfavorable.

Adaptándose al material existente en el mercado, dimensiones de las piezas de madera disponibles en el momento de la construcción y de la plantilla de trabajadores y dimensiones, los maestros carpinteros, decidían la configuración de dicho sistema constructivo.

Las bóvedas encamonadas son, por tanto, un sistema económico y de rápida ejecución.

Prácticamente una cuarta parte de los edificios visitados contienen dicho sistema constructivo. Todos ellos en un estado óptimo de conservación.

- Con respecto al estudio del comportamiento estructural

En la caracterización del material, se ha comprobado que las propiedades físico-mecánicas de la madera utilizada en los ensayos son superiores a las prescritas por la normativa.

En los ensayos no destructivos, se observó una gran influencia de la nudosidad en la predicción del módulo de elasticidad y la resistencia a flexión.

Con respecto a la determinación del comportamiento de la unión, los resultados obtenidos en los diferentes ensayos resultan del mismo orden con respecto a los obtenidos según el Eurocódigo 5.

En los análisis dinámicos, se ha realizado una aproximación para determinar las frecuencias propias de la estructura en estudio, sin embargo, la interpretación de los resultados es difícil de establecer.

El fallo de la estructura encamonada se alcanza por compresión paralela a la fibra en la madera, en las zonas de contacto de las piezas en la junta, y por tracción perpendicular a la fibra en la madera, como consecuencia del giro de los camones y su conexión con tirafondos. En el caso del ensayo realizado a carga constante con duración media se ha observado un importante efecto de la fluencia debido al comportamiento flexible de los medios de unión y una componente viscosa de la deformación producida por el aplastamiento de los medios de unión en la madera, cuya consecuencia es una importante deformación no recuperable tras la descarga del arco.

Se han estudiado tres modelos numéricos, de más simplificado a más complejo, consiguiendo mejores aproximaciones en los modelos más detallados.

7. CONCLUSIONES

7.1. Conclusiones histórico-constructivas

Las conclusiones obtenidas del presente estudio, acerca del sistema constructivo y su evolución en el tiempo, han sido las siguientes:

- Sobre el sistema constructivo de las bóvedas encamonadas
 - Se considera que el sistema constructivo de las bóvedas encamonadas no fue inventado por Philibert de l'Orme. La descripción de Vitrubio, de los enlucidos en las villas romanas, en su séptimo libro del Tratado de Arquitectura, coincide con el observado en las bóvedas colgadas visitadas, adecuado para las luces existentes en las villas romanas. Además, el hecho de que el sistema encamonado descubierto por Serlio en el Palacio de Tournelleses datase del siglo XVI y no fuese realizado por De l'Orme, parece corroborar dicha hipótesis.
 - Las bóvedas encamonadas son un sistema económico y de rápida ejecución. Se utilizaba cuando la propiedad no tenía suficiente presupuesto para ejecutar las estructuras en fábrica. Se podría decir que dichas bóvedas eran cimbras dispuestas como estructura principal, en vez de usarse como plantilla para generar bóvedas de fábrica. Por ello, suponían un ahorro de material, tiempo y ejecución.
 - No siguen reglas preestablecidas. Tras analizar las escuadrías de los camones, separación y su sistema de unión se llega a la conclusión de que no era un método reglado. Parece indicar que su construcción dependía de las instrucciones del maestro de obras o maestro carpintero, que, en función del material disponible y plantilla de trabajadores, planteaba una disposición u otra. El método descrito por De l'Orme, Lacase o fray Lorenzo de San Nicolás parece algo teórico y poco práctico.
 - Se pueden diferenciar dos tipos constructivos: las bóvedas suspendidas y las autoportantes. Las primeras son más frecuentes en los casos en los que se pretendía una renovación del estilo arquitectónico (generalmente del renacentista al barroco) como solución rápida y económica. Puede considerarse un tercer tipo, denominado estructural, en el que la bóveda soporta las cargas climáticas, pero no está presente en Madrid capital.
- Sobre el material utilizado
 - El 72% de la madera analizada es de pino silvestre o laricio, el 22% de pinaster y el 7 de piñonero, lo que nos indica que, la madera utilizada era la disponible en los aserraderos en el momento requerido en obra. Es por ello que se han encontrado varios edificios donde cada elemento constructivo estaba realizado en una especie de madera diferente. Sin embargo, la especie más utilizada es el pino silvestre o laricio, resultado lógico debido a que los montes madrileños, segovianos y abulenses poseen grandes masas de dicha especie. Se sospecha que también se han

podido usar otras especies, como el *Pinus halepensis* Mill, pese a no haber tenido constancia de ellos en las muestras analizadas, debido a que también existen masas naturales próximas a la capital.

- Los encamonados están formados por dos filas de piezas de madera en un 60% de los casos y por tres filas en el 20%. La escuadría de los camones tiene un grueso variable entre 30 y 50 mm y una anchura de 80 a 300 mm. Su longitud varía entre 40 y 200 cm, con casos extremos de 315 cm.
- El desuso de las bóvedas encamonadas corresponde con la aparición de las estructuras metálicas, que igualaban el tiempo de ejecución, como se ha podido corroborar en varias obras, como: la iglesia y asilo de San José de la Montaña, de 1890, o la Iglesia del Cristo de la Salud, construida en 1915, cuyas bóvedas están conformadas por perfiles rectos metálicos.
- Sobre su presencia en Madrid capital:
 - En Madrid capital quedan, al menos, veintiún edificios con bóvedas encamonadas.
 - El 17,6% de los edificios inspeccionados poseen bóvedas encamonadas. Dicho porcentaje aumenta al 24,2%, si se incluyen aquellos edificios estudiados en archivos históricos y documentación científica relevante, frente al 51,6% que corresponden con bóvedas tabicadas. Se considera que es un patrimonio histórico muy relevante.
 - La estructura de madera de la cubierta de los edificios con bóveda encamonada era, aproximadamente en un tercio de los casos, de cuchillo simple (pares y tirante) coincidiendo con luces pequeñas, y otro tercio de cuchillo español (pares, tirante, tornapuntas y pendolón) en luces mayores. La armadura de par y nudillo solamente estaba presente en un 20% de los casos.
- Sobre su estado de conservación:
 - Se han encontrado pequeños ataques de carcoma gruesa en algunos elementos estructurales, que debido a que no había acumulación de detritos, podrían tratarse de ataques antiguos. No se considera que haya disminución de la resistencia de dichas piezas, aunque no se han realizado ensayos no destructivos en las inspecciones realizadas. Se considera que dicho sistema constructivo, aun siendo un método económico y de rápida ejecución, ha perdurado en un estado óptimo hasta nuestros días.

7.2. Conclusiones sobre el comportamiento estructural

Las conclusiones obtenidas del presente estudio, acerca del comportamiento estructural, han sido las siguientes:

- Caracterización del material:

La madera utilizada en los ensayos de pino laricio presenta una calidad estructural visual ME-2 (con alguna pequeña proporción de ME-1) según la norma UNE 56544. La clase resistente correspondiente según la norma UNE-EN 1912 es una C18, cuyo módulo de elasticidad medio es de 9.000 N/mm^2 , su resistencia característica a flexión de 18 N/mm^2 y su densidad característica 320 kg/m^3 .

El valor medio del módulo de elasticidad obtenido en los ensayos era de 10.000 N/mm^2 , el valor mínimo de la resistencia a flexión de $37,5 \text{ N/mm}^2$ y el valor mínimo de la densidad de 488 kg/m^3 (referido al 12% del contenido de humedad). Por tanto, sus propiedades físico-mecánicas son superiores a las previstas según la normativa.

- Relación entre mediciones no destructivas y propiedades mecánicas

Las regresiones lineales simples realizadas entre el módulo de elasticidad mecánico y el dinámico, se vieron mejoradas al introducir la variable del factor nudosidad, CKDR. El valor de R^2 ajustado para los grados de libertad, mejora ligeramente, obteniendo un valor de 93,8 de R^2 con respecto a 90,8, procedente de la regresión lineal simple. La correlación existente entre el módulo de elasticidad mecánico y el dinámico (con o sin el parámetro CKDR) es muy elevada, y en general superior a la encontrada por otros autores (Íñiguez, 2007; Llana, 2016).

Con respecto a las regresiones lineales simples realizadas entre la tensión de rotura y el módulo de elasticidad dinámico, se obtienen R^2 muy bajos, siendo el mayor de ellos 6,8. Al realizarse solamente 10 ensayos, existe una dispersión de datos muy alta, y los modelos estadísticos no son consistentes estadísticamente. Esta correlación es menor que la obtenida por otros autores (Íñiguez, 2007; Llana, 2016). Introduciendo el factor nudosidad, se consigue un R^2 de 64,4, lo que indica que, la nudosidad de las piezas ha influido en mayor manera debido a su fuerte presencia en las piezas analizadas.

Estos resultados no son los habituales. La correlación existente entre tensión de rotura y nudosidad (CKDR) no es utilizada, en general, por otros autores. Cabe destacar que alcanza valores relativamente elevados.

Los ensayos no destructivos fueron realizados con pocas probetas, por lo que no se pueden extraer conclusiones muy fundamentadas. Sin embargo, se observó una muy fuerte influencia de la nudosidad (CKDR) en la predicción del módulo de elasticidad y la resistencia a flexión. Esta relación era mucho más marcada que en lo observado en la literatura científica.

- Determinación del comportamiento de la unión:

- Módulo de deslizamiento:

El módulo de deslizamiento obtenido por ensayo según la norma EN 26891 da lugar a valores del orden de los 2400 y 1800 N/mm en dirección paralela y perpendicular a la fibra, respectivamente.

El valor paralelo a la fibra es muy cercano al obtenido de acuerdo con la fórmula propuesta por el Eurocódigo 5 (sobre 2300 N/mm).

Por otro lado, del ensayo de rotación de una pareja de tirafondos, se dedujo un módulo de deslizamiento paralelo a la fibra de 2552 N/mm, también muy próximo al valor anterior.

Finalmente, el módulo de deslizamiento obtenido en el ensayo del encamonado recto daba lugar a un valor de 1404 N/mm para un ángulo con la dirección de la fibra de 77°. Este valor queda muy por debajo del que sería consistente con los anteriores valores (tabla 40).

Tabla 40. Comparación de los valores de K_{ser} de los diferentes ensayos realizados

Tipo de ensayo	Módulo deslizamiento UNE-EN 26891		Rotación pareja tirafondos	Encamonado recto	Eurocódigo 5
Tipo K_{ser}	$K_{ser,0}$	$K_{ser,90}$	$K_{ser,0}$	$K_{ser,\alpha}$	K_{ser}
(N/mm)	2.404,9	1.789,0	2.552,3	1.404,0	2.313,0

- Módulo de rigidez a la rotación:

El ensayo de flexión sobre piezas con doble vuelo permite obtener un módulo de rigidez a la rotación en un par de tirafondos. Además, también puede derivarse de este mismo ensayo el módulo de deslizamiento en dirección paralela a la fibra, que como se ha comentado anteriormente, resulta del mismo orden que el obtenido según la norma UNE-EN 26891.

- Ensayos sobre encamonado recto:

En los ensayos de flexión del encamonado recto, se puede deducir que el comportamiento mecánico de la unión con o sin tirafondo central difiere muy poco. En contra de lo esperable, la solución con tirafondo central se comporta con algo menos de rigidez.

El fallo se alcanza por compresión paralela a la fibra en la madera (en las zonas de contacto de las piezas en la junta) y por tracción perpendicular a la fibra de la madera, como consecuencia del giro de los camones y su conexión con tirafondos.

Como se ha comentado anteriormente los valores de módulo de deslizamiento deducidos en este ensayo no son consistentes con lo esperable. Parece lógico pensar que el mecanismo asumido como hipótesis de funcionamiento mecánico (dos “coronas” sometidas a rotación) no obedece a la realidad.

- Rigidez efectiva de las secciones compuestas encamonadas

Comparando la rigidez de una pieza encamonada con respecto a una maciza, se llega a la conclusión de que la rigidez eficaz de la pieza encamonada es 6,5 veces inferior a la de la pieza maciza. La rigidez efectiva es del orden del 15%.

Comparando el momento resistido de cada una de las piezas, se deduce que la pérdida de capacidad portante en el encamonado es menor que la pérdida de rigidez. La capacidad resistente a flexión es del orden del 23%.

- Ensayos mecánicos del modelo de una estructura encamonada

- Ensayos bajo carga constante con duración media. Fluencia y deformación remanente

Aunque la duración del ensayo bajo carga constante fue corto (15 días) se observó que existe un importante efecto de la fluencia, debido al comportamiento flexible de los medios de unión. También se comprobó que una parte muy importante de la deformación no es recuperable tras la descarga del arco. Por tanto, existe una componente viscosa en la deformación producida por el aplastamiento de los medios de unión en la madera.

- Resultados del ensayo de agotamiento del arco encamonado

En ambos modelos ensayados hasta el colapso de la estructura, se observó el fallo debido a tracción perpendicular a la fibra en zonas próximas a los riñones. La carga última alcanzada fue similar.

Se observan diferencias entre los valores de flecha máxima en la clave, y descenso en zonas de los riñones de ambos modelos ensayados, esto puede ser debido a que el segundo arco tardó 3 años en ensayarse, a la variabilidad de la madera y a que la construcción no fue realizada por las mismas personas. Además, dos ensayos son pocos para globalizar los resultados, aunque los resultados son bastante parejos y permiten conocer el rango de fuerza última.

Con los ensayos en el laboratorio, se ha corroborado que dichas estructuras cumplen su objetivo principal, ser autoportantes en el caso más exigente, utilizando una materia prima de pequeñas dimensiones y sin clasificación visual.

- Análisis dinámico. Frecuencias propias de vibración

se observa una buena correlación de resultados en algunos modos (tabla 41), entre el modelo teórico y las mediciones realizadas en los arcos encamonados. Sin embargo, el método seguido para localizar los puntos de mayor amplitud en la transformada de Fourier en los ensayos, se considera poco exacto, ya que se realizaba de forma manual y, por lo tanto, poco sistemático.

Tabla 41. Comparación frecuencias propias modelo real vs teórico de los arcos encamonados

Mediciones (Hz)	Modelo numérico (Hz)
-	2,93
6,55	6,7
12,7	13,3
24,47	24,46
30,27	31,24
42,8	39,27
55,38	-
95,32	-

- Comparación de los resultados obtenidos de los ensayos de agotamiento y los modelos numéricos

Con respecto a los modelos de las piezas encamonadas rectas:

- El modelo A es mucho menos rígido que la realidad. En el tramo elástico el modelo es un 36% menos rígido y en el tramo plástico, un 30%. Se considera que es un modelo válido con respecto a su modelización del K_{rot} y siempre que la influencia de axiles y cortantes no sea elevada.
- El modelo B, se adecua mejor a la realidad que el A, aunque sigue siendo menos rígido. En el tramo elástico el modelo coincide perfectamente con los valores medios procedentes de los ensayos y en el tramo plástico, posee la misma rigidez, pero se encuentra desplazado un 12%, esto puede deberse a que al determinar las ecuaciones constitutivas MP-II, el valor de Fuerza último se encuentra sobreestimado.
- El modelo C posee mayor rigidez que el modelo anterior (B) debido a la aportación del K_{ser} introducido en el tirafondo central. Este modelo, al igual que el anterior, posee una buena concordancia en el tramo elástico, sin embargo, la rigidez en el rango plástico se encuentra desplazada, posiblemente por el mismo motivo que el modelo anterior (sobreestimación del valor de Fuerza última) en este caso incrementado al introducir el tirafondo central.

Con respecto a los tres modelos de arcos encamionados:

- Se ha observado que el modelo A es mucho menos rígido que la realidad, en torno a un 49% con respecto al segundo ensayo en el tramo elástico y un 73% con respecto al primer ensayo. En el rango plástico la rigidez del modelo numérico es un 16% y 9% menos rígida con respecto al primer y segundo ensayo correspondientemente. Este modelo no es capaz de predecir la realidad y se trata de un modelo incompleto, al no incluir el K_{ser} .
- El modelo B, es mucho menos rígido que la realidad, en torno a un 11% con respecto al segundo ensayo en el tramo elástico y un 53% con respecto al primer ensayo. Sin embargo, la fuerza última es mucho mayor que en la realidad, aunque la rigidez relativa al tramo plástico se ajusta más a la realidad, un 20% más rígida que el ensayo 1 de agotamiento y un 12% más rígida con respecto al segundo ensayo. Este modelo, aunque más ajustado que el A, no es capaz de predecir con precisión la realidad.
- El modelo C, presenta una buena concordancia en el rango elástico con respecto a los datos del primer ensayo de agotamiento y desviaciones del 60% para el rango plástico. Esto significa que se requiere un refinamiento adicional.

Con solo dos ensayos experimentales no se puede establecer el comportamiento general de una estructura encamionada, sin embargo, se puede conocer su rango de pauta. Ambos ensayos de agotamiento poseen valores de fuerza última similares, 18,80 kN el primero y 16,91 kN el segundo, siendo más rígido el primero que el segundo. Los modelos teóricos no consiguen representar la realidad observada, aun introduciendo los resultados de rigidez rotacional y de deslizamiento procedentes de ensayos experimentales realizados.

De todos los modelos estudiados, el que más se adecuaba a la realidad es el C correspondiente a la pieza simple encamionada recta. Sería necesario crear un nuevo modelo de arcos encamionados para conseguir la misma concordancia.

Se considera que la verificación de dichas estructuras mediante dichos modelos teóricos, permitirían una herramienta rápida y eficaz a la hora de evaluar el estado de las bóvedas encamionadas a rehabilitar.

8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, se plantean a continuación, algunas posibles líneas de trabajo futuro.

En relación con el estudio histórico constructivo, se plantea:

- Analizar el patrimonio histórico constructivo de otras ciudades españolas y/o europeas con el objetivo de poder comparar los tipos de bóvedas encamonadas, sus sistemas constructivos, su estado de conservación, incluso las especies de madera utilizadas y ver si guardan relación con esta investigación. Estudiar el porcentaje que representa dicho sistema constructivo en otras ciudades españolas y europeas. En Madrid, supone prácticamente el 25% de los edificios visitados. ¿Este porcentaje será similar en otras ciudades? ¿Habrá ciudades a las que no llegó el conocimiento de este sistema constructivo? ¿Sería posible encontrar la primera bóveda encamonada realizada o la más antigua conservada?

En relación con el estudio sobre el comportamiento estructural, se propone:

- Continuar la línea abierta de los modelos numéricos de comportamiento estructural, con el objetivo de pulir los resultados y obtener un modelo teórico fiable para utilizar en rehabilitaciones y verificar el estado estructural de las bóvedas encamonadas.
- Aplicar los modelos numéricos en estructuras existentes para analizar su estado estructural.
- Analizar el comportamiento sísmico de este tipo de estructuras mediante ensayos en laboratorio y modelos numéricos.
- Estudiar construcciones actuales que contengan un sistema constructivo con una filosofía similar al encamonado y aplicaciones nuevas de dicho sistema constructivo, es decir, la vigencia de este sistema (o derivado) en la actualidad. La utilización de piezas de madera de pequeñas dimensiones para generar estructuras que permitan medias y grandes luces de forma rápida y económica es una preocupación que sigue existiendo hoy en día.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abellán, J.L. 1981. *Historia crítica del pensamiento Español*, vol. III. Madrid, p.811.
- Alonso, C.; Kermani, A. 2012. Performance of a mechanically laminated timber arched suspension bridge. Word Conference of Timber Engineering. WCTE. Auckland, 16-19 July.
- Alvar Ezquerro, A. 1985. Felipe II, la Corte y Madrid en 1561. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC.
- Alvar Ezquerro, A. 1989. El nacimiento de una capital europea: Madrid entre 1561 y 1606. Turner Libros, Ayuntamiento de Madrid.
- Álvarez, R. 1674. Breve compendio de la carpintería y tratado de lo blanco, con algunas cosas tocantes a la geometría, y puntas del compás. Manuscritos españoles de la Biblioteca Lázaro Galdiano, Madrid: Ollero & Ramos: Fundación Lázaro Galdiano, 1998.
- Anh-Tuan Luu, Nam-Il Kim, Jaehong Lee. 2015. Bending and buckling of general laminated curved beams using NURBS-based isogeometric analysis. *European Journal of Mechanics A/Solids* 54, pp. 218-231.
- Ardant, P. 1840. Études théoriques et expérimentales sur l'établissement des charpentes à grande portée. Metz. S. Lamort, Imprimeur de l'École d'application.
- Argüelles Álvarez, R.; Arriaga Martitegui, F.; Esteban Herrero, M.; Íñiguez González, G.; Argüelles Bustillo, R. 2015. Estructuras de madera Uniones. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera. AITIM. Madrid.
- Arias y Scala, F. 1893. Carpintería antigua y moderna. Tratado general teórico-práctico para uso de carpinteros, ingenieros, arquitectos, maestros de obras, dibujantes, pintores, constructores, alumnos de escuelas y academias especiales, etc., etc. Tercera edición. Barcelona, F. Nacente, editor. Bruch, 89 y 91. Pp. 317- 331.
- Arriaga Martitegui, F. 1988. Precedentes históricos de la madera laminada. Boletín de información técnica. AITIM.
- Arriaga Martitegui, F. 1992. Bóveda en pabellón del Salón de baile del Palacio Seristori. Revista AITIM, nº 161, noviembre-diciembre, Madrid.
- Ayerza, R.; Barrio, J. A.; Gómez, J.; Santana, A. 1996. Las iglesias de madera en el País Vasco. *Ars Ligneá*. Madrid: S. E. Electa España S.A.
- Ayuntamiento de Madrid, 2003. Historia de Madrid. Crecimiento Urbano. Evolución de la ciudad. Dayfisa, UAM. www.madridhistorico.es (09/08/2016)

- Bails, B. 1802. Diccionario de Arquitectura Civil. Obra póstuma. Madrid, Vda. De Ibarra.
- Baño, V.; Santos, J. C.; Vivas, J.; Rodríguez, S.; Vega, A.; Crews, K. 2011. A study of the influence of different types of timber footbridges on the vibrational natural frequency. 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. September 14-16, 2011. Sopron Hungary. Editor: Ferenc Divos.
- Bechmann, R. 1991. Villard de Honnecourt. La pensée technique au XIIIe siècle et sa communication. Picard Éditeur, Paris.
- Bélidor, B. F. 1813. La Science des Ingénieurs, dans la conduit des travaux de fortification et d'architecture civile. Nouvelle edition, avec des Notes, par M. Navier, ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées. A Paris, chez firmin didot, imprimeur de l'institut, libraire pour les mathématiques, la marine, l'architecture hydraulique, etc. Rue Jacob, nº4.
- Benito Pradillo, M. A. 2011. Tesis Doctoral. La Catedral de Ávila: evolución constructiva y análisis estructural. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Bertolini-Cestari, C.; Invernizzi, S.; Spanò, A.; Mallamaci, L. 2012. Laser modeling and Structural assessment of a XVIIth century wooden dome. Journal of Heritage Conservation, 32, pp. 151-156.
- Bertolini-Cestari, C.; Chiabrando, F.; Invernizzi, S.; Marzi, T.; Spanò, A. 2013. Terrestrial Laser Scanning and Settled Techniques: a Support to Detect Pathologies and Safety Conditions of Timber Structures. Advanced Materials Research, July.
- Biblioteca digital hispánica. Biblioteca Nacional de España, 2016. (<http://bdh.bne.es/bnearch/biblioteca/Blondel,%20Jean%20Fran%C3%A7ois;jsessionid=9D95637D88EBAECA81A949B5DC9AE69E>). (19-08-2016).
- Blondel, F. 1771. Cours d'Architecture enseigne dans l'Academie Royale d'Architecture. A Paris, De L'Imprimerie de Lambert Roulland en la maison d'Antoine Vitré, ruë du Foin.
- Bonet Correa, A. 1984. Iglesias madrileñas del siglo XVII. 31 y ss. Madrid: C.S.I.C., Inst. Diego Velazquez.
- Blunt, A. 1983. Art et architecture en France 1500-1700. Paris, ed. Macula, pp.108.
- Bullet, P. 1691. L'Architecture pratique, qui comprend le detail du Toifié, & du Devis des Ouvrages de Maffonnerie, Charpenterie, Menuiserie, Serrurerie, Plomberie, Vitrierie, Ardoife, Tuille, Pavé de Graís & Impreffion. A Paris, Chez Estienne Michallet, premier Imprimeur du Roy, ruë S. Jacques, à l'image S. Paul.

- Bustamante, R; Monjo, J. 2012. La solución constructiva de la bóveda encamonada del salón de plenos del palacio del Senado en Madrid (España). Informes de la Construcción, vol. 64, nº extra, 109-120, diciembre 2012.
- Calatrava, J.; Sambricio, C. 2008. Christian Rieger y la teoría de la arquitectura en la España de mediados del siglo XVIII. Elementos de Arquitectura civil. Sevilla, Junta de Andalucía, pp. 87-110.
- Campi, M. R. 2009. Les Nouvelles inventions di Philibert De l'Orme. Roma, ARACNE editrice.
- Candelas Gutiérrez, A. L. 1998. La carpintería de armar en los tratados de los ss. XVI y XVII. Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción. A Coruña, 22-24 octubre. Edf. F. Bores, J. Fernández, S. Huerta, E. Rabassa, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Coruña, CEHOPU.
- Carpentieri, G.; Tornabene, F.; Ascione, L.; Fraternali, F. 2015. An accurate one-dimensional theory for the dynamics of laminated composite curved beams. Journal of Sound and Vibration 336, pp. 96-105. ELSEVIER.
- Ceccotti, A. 1995. Timber-concrete composite structures. Timber Engineering-STEP 2, Ed. by H. J. Blass, P. Aune, B. S. Choo, R. Görlacher, D. R. Griffiths, B. O. Hilson et al. Centrum Hout, The Netherlands, pp. E13/1-12.
- Çevik, M. 2010. In-plane Vibration Analysis of Symmetric Angle-ply Laminated Composite Arches. Gazi University Journal of Science (GU J Sci) 23, pp- 187-199.
- COAM, 1984. Guía de Arquitectura y Urbanismo de Madrid. Tomo 1: El casco antiguo. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
- Conti, R. 1996. El desarrollo tecnológico de las bóvedas de madera en la experiencia de Lemer. Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Madrid 19-21 septiembre. Eds. A. de las Casas, S. Huerta, E. Rabasa, Madrid: I. Juan de Herrera, CEHOPU.
- Cuesta Hernández, L. J. 2008. La teoría de la Arquitectura en la Nueva España. La Arquitectura mecánica conforme a la práctica de esta ciudad de México en su contexto. Revista destiempos, México, Distrito Federal. Marzo-abril. Año 3. Número 14. Publicación bimestral, pp. 442-459.
- D'Amico, B. 2015. Timber Grid-shell Structures: form-finding, analysis and optimisation. Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of Edinburgh Napier University for the award of Doctor of Philosophy August 2015.
- D'Aviler, A. C. 1738. Cours d'architecture qui comprend les ordres de Vignole, avec des commentaires, les figures & les Defcriptions de fes plus beaux Bâtimens, & de ceux de Michel-Ange, des instructions et des precepts & plufieurs nouveaux Deffeins concernans la Diftribution & la Décoration, la Matiere & la Confrtution des Edifices, la Maconnerie, la Charpenterie, la Couverture,

- la Serrurerie, la Menuiserie, le Jardinage, & généralement tout ce qui regarde. L'Art de bastir. A Paris, chez Jean Mariette, rue S. Jacques, aux Colonnes d'Hercules.
- De Honnecourt, V. 1235. Cuaderno. Siglo XIII. Manuscrito conservado en la Biblioteca Nacional de París. Facs. Ed. Madrid: Ediciones Akal S.A., traducción Yago Batja de Quiroga, 1991.
 - De L'Orme, P. 1561. Traités d'architecture Nouvelles Inventions pour bien bastir et à petits fraiz. Premier Tome de l'Architecture. Paris. Ed. Paris: Léonce Laget, Libraire-Éditeur, 1988.
 - Diccionario Enciclopédico Vox 1. © 2009 Larousse Editorial S.L.
 - Diccionario jurídico-administrativo. 1858. Real Orden de 9 de diciembre de 1852, por la que se determinan las tablas de correspondencia recíproca entre las pesas y medidas métricas y las actualmente en uso. Madrid.
 - Domingo, R.M. 2014. Por qué Felipe II descartó Barcelona y eligió Madrid como capital de España. Periódico ABC, Madrid, 27/11/2014.
 - Duhamel du Monceau, H. L. 1758. Éléments de l'Architecture navale ou Traité pratique de la construction des vaisseaux. Seconde Edition revue, corrigée par l'Auteur. Paris, rue Dauphine. Chez Charles-Antoine Jombert, Imprimeur-Libraire du Roi pour l'Artillerie & le Génie, à l'Image Notre-Dame, pp. 50.
 - Emy, A. R. 2010. Dibujos de carpintería en volúmenes anteriores al 1900: Tratado de arte de la carpintería "Emy Armand Rosee editado en Paris 1837-41". Instituto Juan de Herrera.
 - Fabbri, F. 2010. Analisi numerica di volte in camorcanna e gesso rinforzate con material RPF. Tesi di Laurea. Boloña: Università di Bologna, Facoltà di Ingegneria Civile.
 - Fachinetti, F.; Carrara, F. 1990. La volta a padiglione del salone da ballo di Palazzo Serristori: un'ardita e inusuale struttura lignea. De Il Restauro del Legno. G. Tampone. Editorial Nardini, vol. II. Florencia, pp. 85-98.
 - Faggiano, B.; Marzo, A. 2010. The ancient timber structures of the Royal Palace of Naples: diagnosis, analysis and retrofitting. World Conference on Timber Engineering (WCTE).
 - Feletti, I. et al. 1992. Volta lignea del salone delle feste a Palazzo Serristori. Documentación del Curso Diagnosi, patologie i reparació d'estructures de fusta, Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Barcelona- Colegio de Ingenieros de la Toscana. Octubre.
 - Fernandez-Cabo, J.L.; Fernandez-Lavandera, J; Diez-Barra, R; Avila-Jalvo, J. 2012. Timber composite beams with a discrete connection system. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings 166(2): 57–72.

- Fernández Llana, D. 2016. Influencia de factores físicos y geométricos en la clasificación estructural de la madera mediante técnicas no destructivas. Tesis Doctoral. Departamento: Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental. ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural, UPM.
- Fernández Paradas, A. 2016. Escultura Barroca Española: Nuevas lecturas desde los Siglos de Oro a la Sociedad del Conocimiento. ExLibric.
- Fernández-Shaw Toda, M. 2002. Tesis doctoral: Carpintería de lo Blanco en la provincia de Ávila (Arquitectura religiosa). Facultad de geografía e Historia. Departamento de Historia del Arte I (Medieval). Universidad Complutense de Madrid.
- Ferreira, C.F.; D'Ayala, D.; Fernández Cabo, J.L.; Díez, R., 2013. Numerical Modelling of Historic Vaulted Timber Structures, *Advanced Materials Research*, Vol. 778, pp. 517-525.
- Florensa i Ferrer, A. 1948. Los «Elementos de toda la Arquitectura Civil» del Padre Cristian Rieger, S.I., traducidos al español por el P. Miguel Benavente, S.I. Cuadernos de arquitectura, número 9.
- Foschi, R.O. 1974. Load-slip characteristics of nails. *Wood Science* 7(1): 69–76.
- Fragiaco, M.; Lukaszewska, E. 2011. Development of prefabricated timber concrete composite floor systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and buildings*, vol. 164, n°2, p. 13.
- Funk, F. E. T. 1812. Abhandlung über die vorzügliche Anwendbarkeit der Bohlenbogen zu hölzernen Brücken, die große Öffnungen überspannen, Rinteln: Steuber.
- García Alcázar, S; González Moreno, F. 2014. Las vistas de ciudades de Anton van den Wyngaerde. Albacete: Universidad de Castilla-La Mancha. Departamento de Historia del Arte.
- García Salinero, F. 1968. Léxico de alarifes del siglo de oro. Real Academia española.
- Gaztelu, L. 1899. Pequeña Enciclopedia práctica de construcción. Nº 4. Carpintería de armar. Madrid. Librería Editorial de Bailly-Bailliere e hijos. Plaza de Santa Ana, núm.10, pp.113-116.
- Gil, L.; López, R. A.; García-Nieto, M. E. 2003. *Historia de los olmos en la Península Ibérica*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. pp. 69-114.
- Gilly, D. 1797. Ueber Erfindung, Construction und Vortheile der Bohlen-Dächer mit besonderer Rücksicht auf die Urschrift ihres Erdinders. Berlin, bei Friedrich Vieweg dem Aelteren.
- Girardon, S.; Bocquet, J. F.; Bleron, L.; Triboulot, P. 2014. Mechanical performances of timberconnections, improvement by mechanical preparation of the interfaces: its application to

- structural member. WCTE: World Conference on Timber Engineering. Quebec city Canada. August 10-14.
- Girhammar, U. A.; Pan, D. H. 2007. Exact static analysis of partially composite beams and beam-columns. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 49, n°2, pp. 239-255.
 - Gliniorz, K. U.; Mosalam, K. M.; Natterer, J. 2002. Modeling of layered timber beams and ribbed shell frameworks. *Composites: Part B* 33, 367–381. 2002.
 - Gómez, J. L. et al. 2003. Comportamiento estructural de la iglesia de la Compañía de Jesús. Modelo de diseño conceptual. *Em, W*, n°6, pp. 83-88. Montevideo.
 - Gómez Sánchez, I.; Huerta Fernández, S. 2000. Las armaduras de cubierta en los tratados del siglo XVII francés. *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Octubre, Sevilla, pp. 405-415.
 - Gómez Sánchez, I. 2006. Las estructuras de madera en los Tratados de Arquitectura (1500-1810). Asociación de Investigación Técnica de Industrias de la Madera y Corcho (AITIM). Artes Gráficas Palermo, S.I.
 - Gómez Sánchez, M. I. 2007. El proyecto de armaduras de madera en los tratados franceses hasta el siglo XIX. *Actas del Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Burgos, 7-9 junio. Eds. M. Arenillas, C. Segura, F. Bueno, S. Huerta, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, CICCOP, CEHOPU.
 - Gómez Sánchez, M. I. 2013. La carpintería práctica en el tratado de construcción con madera de James Newlands. *Actas del Octavo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid, 9-12 de octubre. Instituto Juan de Herrera.
 - González González de Linares, V. M.; Santamarta, J. 1999. Historia de los bosques: el significado de la madera en el desarrollo de la civilización. Gaia Proyecto 2050.
 - Griggs, F. Jr. 2013. Picataqua Bridge. Dist. M. ASCE, D. Eng., P.E., P.L.S. In *Articles, Historic Structures Aug*, <http://www.structuremag.org/?p=543> (14/10/16)
 - Grippa, M.R.; Marzo, A.; Faggiano, B.; Mazzolani, F.M. 2010. Complex Covering Timber Structures in Monumental Buildings: a Study Case. *Advanced Materials Research Vols. 133-134*, pp. 543-548. Trans Tech Publications, Switzerland.
 - Hahmann, L. 2006. How stiff is a curved timber plank? Historical discussions about curved-plank structures. *Proceedings of the Second International Congress on Construction History, Vol.2: 1501-1516*. Cambridge: Malcom Dunkeld, James Campbell, Hentie Louw, Michael Tutton, Bill Addis y Robert Thorne, ed.

- Hart, V. 2011. Inigo Jones: The Architect of Kings. Yale University Press for The Paul Mellon Centre for Studies in British Art.
- Heyman, J. 2004. Análisis de estructuras: un estudio histórico. Instituto Juan de Herrera.
- Hurtado Valdez, P. 2006. Un recorrido por la evolución, en el Virreinato del Perú, de las estructuras abovedadas europeas y su progresiva utilización en medios sísmicos. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid. Revista BIA, aparejadores de Madrid, nº 246, pp. 99-114.
- Hurtado Valdez, P. 2011. Tesis doctoral: Bóvedas encamonadas: origen, evolución, geometría y construcción entre los siglos XVII y XVIII en el Virreinato de Perú. Departamento de Estructuras de Edificación.
- Íñiguez González, G. 2007. Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de conífera de gran escuadría para uso estructural. Tesis doctoral. Departamento Construcción y Vías Rurales. ETSI Montes, UPM.
- Jaksch, S.; Maftoon, M.; Winter, W. 2012. Refurbishment of a 200-year-old cupola in Vienna. Modeling and repair of a spatial timber construction. WCTE. World Conference on Timber Engineering. 15-19 july, Auckland New Zealand.
- Jasieńko, J.; Nowak, T.P.; Bednarz, Ł.. 2014. Baroque Structural Ceiling Over the Leopoldinum Auditorium in Wrocław University: Tests, Conservation, and a Strengthening Concept. International Journal of Architectural Heritage. Conservation, Analysis and Restoration, 8, pp. 269-289.
- Jombert, C. A. 1728. Architecture moderne ou l'art de bien bâtir pour toutes sortes de personnes. Paris, chez Claude Jombert, rue S. Jacques, au coin de la rue des Mathurins, à l'Image Nôtre-Dame, pp. 81.
- Jousse, M. 1751. L'Art de Charpenterie. Corrigé augmenté de ce qu'il y a plus curieux dans cet Art, et des Machines les plus néceffaires à un Charpentier. Troisieme edition. A Paris, Rue Dauphine, chez Charles-Antoine Jombert, Libraire du Roy puor l'Artillerie & le Génie, à l'image Notre-Dame.
- Jutila, A.; Salokangas, L. 2010. Wood-Concrete Composite Bridges Finish Speciality in the Nordic Countries. In Proceedings of the Int. Conference on Timber Bridges, Lillehammer, Norway. Edited by Malo, K.A.; Kleppe, O. and Dyken T. pp. 383-392.
- Karsten, J. C. G. 1805. Anwendbarkeit und Construction des Bohlendaches theoretisch und praktisch untersucht auch mit Rückblicken auf die Geschichte desselben versehen. Berlin: Heinrich Frölich.

- Krafft, J. C. 1805. Plans, coupes et élévations des diverses productions de l'art de la charpente, exécutées tant en France que dans les pays étrangere, (Part two), Paris and Stasbourg.
- Kermani, A.; Freedman, G. 2005. Performance of a stress-laminated-timber arch bridge. Proceedings of the Institution of Civil Engineers (ICE). Bridge Engineering 158. December 2005, pp. 155-164.
- Kermani, A.; Freedman, G. 2008. Stress-laminated arch construction for foot-bridges. Internationales Holzbau-Forum 08.
- Kovács, B. 2013. Vibration analysis of layered curved arch. Journal of Sound and Vibration. Volumen 332, pp. 4223-4240.
- Kreuzinger, H. 1999. Flächentragwerke: Platten, Scheiben und Schalen; Berechnungsmethoden und Beispiele. Informationsdienst Holz: Brücken aus Holz, pp. 43- 60.
- Kreuzinger, H. 2001. Mechanically Jointed Beams. Possibilities of Analysis and Some Special Problems. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Venice, Italy, CIB-W18.
- Le Camus de Mézières, N. 1781. Le guide de ceux qui veulent bâtir. París: Benoît Morin.
- Le Camus de Mézières, N. 1782. Traité de la force des bois. Paris, Chez l'Auteur, rue du Foin Saint-Jacques, au Callege de Maître Gervais. Chez Benoît Morin, Imprimeur-Libraire, rue Saint-Jacques, à la Verité.
- Le Muet, P. 1681. Manière de bien bastir pour toutes sortes de personnes. Contenant les moyens d'élever des baftimens de toutes grandeurs, d'y faire tous les ornemens, commoditex & détachemens qui s'y peuvent fouhaiter. Enfemble des deffeins pour baftir regulierement fur toute forte de place. Reveue, augmentée & enrichie en cette Edition, de plufieurs Figures, Plans, & Elevations des plus beaux Baftimens & Edifices de France. A Paris, chez François Jollain, ruë Saint Jacques, a la Ville de Cologne.
- León Vallejo, F. J. 1996. Tratados españoles del siglo XIX: Carpintería antigua y moderna de Federico de Arias. Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Madrid, 19-21 septiembre. eds. A. de las Casas, S. Huerta, E. Rabasa, Madrid: I. Juan de Herrera, CEHOPU.
- López de Arenas, D. 1867. Carpintería de lo blanco y tratado de alarifes. Capítulo XX: De cómo sacarás las reglas altas y baxas de los paños ochauados. Biblioteca de El Arte en España. Madrid. Imprenta de Manuel Galiano.

- Lukaszewska, E. 2009. Development of prefabricated timber-concrete composite floors. Doctoral Thesis. Lulea University of Technology. Department of Civil, Mining and Environmental Engineering. Division of Structural Engineering. Sweden.
- Macchioni, N.; Mannucci, M.; Todorow, A. 2013. How an accurate surface observation can help in the interpretation of an ancient timber structure: the example of the Valdese church in Florence. *Advanced Materials Research* 778, pp. 105-112.
- Madruga Real, A. 1983. *Arquitectura barroca salmantina. las Agustinas de Monterrey*. Centro de Estudios Salmantinos. CSIC, Salamanca, pp. 95.
- Malekzadeh, P. 2009. A two-dimensional layerwise-differential quadrature static analysis of thick laminated composite circular arches. *Applied Mathematical Modelling* 33, pp. 1850-1861. ELSEVIER.
- Maltese, C. 1978. Leonardo Da Vinci. Frammenti sull'Architettura. En *Scritti Rinascimentali di Architettura*, pp. 277-317. Milan: Edizioni il Polifilo.
- Manned, A.; Muccini, T.; Alessandri, C. 1993. A laminated wood arch in the Church of S. Firenze: historical and structural aspects. *Transactions on the Built Environment*, vol. 4.
- Marinoni, A. 1975. Leonardo da Vinci, 1452-1519. *Il Codice atlantico Della Biblioteca Ambrosiana di Milano*. Firenze: Giunti-Barbera, vol12.
- Martínez de la Torre, F.; Asensio, J. 1800. *Plano de la Villa y Corte de Madrid en sesenta y quatro láminas, que demuestran otros tantos barrios en que está dividida; con los nombres de todas sus plazuelas y calles, números de las manzanas, y casa que comprehende cada uno; con otras curiosidades útiles á los naturales y forasteros*. Imprenta de Don Joseph Doblado, Madrid.
- Marussi, F. 1986. "Bóvedas a base de quincha en las edificaciones monumentales del Virreinato del Perú". *Informes de la Construcción*, vol. 37, n. 377, pp.59-66.
- Marzo, A. 2006. *Analisi e recupero de strutture lignee antiche*. Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Costruzioni. Naples: Università degli Studi di Napoli Federico II, Facoltà di Ingegneria.
- Matsunaga, H. 2004. Free vibration and stability of laminated composite circular arches subjected to initial axial stress. *Journal of Sound and Vibration*. Volumen 271, número 3-5, pp. 651-670.
- Maure Rubio, L. 1998. Christopher Wren. La aportación inglesa al desarrollo de la Arquitectura Moderna. *Goya: Revista de arte*. Nº 265-266, pp. 289-302.
- Mazzolani, F.M; Faggiano, B.; Marzo, A.; Grippa, M.R. 2010. The ancient timber structures of the Royal Palace of Naples: Diagnosis, analysis and retrofitting. *World Conference on Timber Engineering (WCTE)*.

- Meschke, H. J. 1989. Baukunst und technik der hölzernen Wölbkonstruktionen Vom Bogentragwek zum Stabnetzwerk-. Ph. D. Thesis. Aachen: Fakultät für Architektur der Rheinidch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- Mesoneros Romanos, R. 1815. Paseo por Madrid ó guía del forastero en la corte. Imprenta de Repullés, Madrid.
- Miller, T. E.; Knapp, R. G. 2014. America's Covered Bridges: Practical Crossings-Nostalgic icons. Tuttle Publishing.
- Mongelli, A. 2006. A New Wood Roofling System: Marac's Barracks and Colonel Armand Rose Emy's Innovative System. Proccedings of the Second International Congress on Construction History, Queens' College, Cambridge University, 29 march-2 april. Volume 2, pp. 2241-2260. Editeur Short Run Press.
- Montes Serrano, C. 1994. Algunas anécdotas sobre la utilización de maquetas en Inglaterra en los siglos XVII y XVIII. Separata de ACADEMIA. Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Número 78, primer semestre 1994.
- Nanda, N.; Kapuria, S. 2015. Spectral finite element for wave propagation analysis of laminated composite curved beams using classical and first order shear deformation theories. Composite Structures, Volumen 132, pp. 310-320.
- Navascués Palacio, P. 1983. Estudio crítico de la Arquitectura Civil de Benito Bails. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia. Artes gráficas Soler, S.A., Valencia.
- Newlands, J. 1869. The Carpenters & Joiner's Assistant Being a Comprehensive Treatise of the Selection, preparation & strength of materials and the mechanical principles of framing with their application in carpentry. First Edition. Published by Blanckie and Son.
- Norma UNE-EN 26891:1992. Estructuras de madera. Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. Principios generales para la determinación de las características de resistencia y deslizamiento.
- Norma UNE-EN 13183-2:2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.
- Norma UNE-EN 56544:2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.
- Norma UNE-EN 408:2011+A1:2012. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.

- Norma UNE-EN 1912:2012. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.
- Norma UNE-EN 338:2016. Madera estructural. Clases resistentes.
- Nuere, E. 1990. La Carpintería de Lazo. Lectura dibujada del manuscrito de fray Andrés de San Miguel. Colegio de Arquitectos de Madrid, Colección el oficio de construir, pp. 128-129.
- Nuere Matauco, E. 2000. La carpintería de armas española. Madrid: Editorial Munilla-Lería, p.288.
- Ortega Vidal, J. 2000. Los planos históricos de Madrid y su fiabilidad topográfica. Documadrid, Madrid.
- Oslet, G. 1890. Traité de Charpente en bois. Paris, H. Chairgrasse fils, éditeur, rue de grenelle.
- Palladio, A. 1570. I Quattro Libri dell'Architettura di Andrea Palladio. Venecia: Dominico de' Franceschi, facs. Ed. Madrid: Ediciones Akal, 1988, L.II, cap. VI, p.51.
- Peraza, F. 2008. Los puentes de madera en la historia. Boletín de Información Técnica. AITIM septiembre-octubre. Nº 255, pp 48.
- Pirazzi, C. 2005. Zur Berechnung von holzschaln in brettrippenbauweise mit elastischem verbundquerschnitt. Thèse présentée à la faculté environnement naturel, architectural et construit. Institut de structures section de génie civil. École Polytechnique fédérale de Lausanne. Lausanne, EPFL.
- Pirner, M.; Náprstek, J. 1988. A Large Span Timber Dome. First Published June 1, 1988. International Journal of Space Structures
- Plá y Ravé, E. 1880. Tratado de maderas de construcción civil y naval. Imprenta, estereotipia y galvanoplastia de Aribau y Cia. (Suc. De Rivadeneyra).
- Qian, H.; Zhou, D.; Liu, W.; Fanf, Hai, F.; Lu, W. 2015. Elasticity solutions of simply supported laminated cylindrical arches subjected to thermos-loads. Composite Structures 131, pp. 273-281. ELSEVIER.
- Wang, Q.; Hei Chui, Y.; Ni, C.; Smith, I.; Asiz, A. 2010. An empirical model to predict load-slip response of laterally loaded nailed joint. WCTE 2010. World Conference on Timber Engineering. June 20-24, 2016. Riva del Garda.
- Quagliarini, E.; Esposito, E.; Del Conte, A. 2012. The combined use of IRT and LDV for the investigation of historical thin vaults. Journal of Cultural Heritage. ELSEVIER.

- Quagliarini, E.; Revel, G. M.; Lenci, S.; Seri, E.; Cavuto, A.; Pandarese, G. 2014. Historical plasters on light thin vaults: State of conservation assessment by aHybrid ultrasonic method. *Journal of Cultural Heritage* 15, pp. 104-111.
- Rammer, D. R.; Line, P. 2016. Lateral testing of glued laminated timber tudor arch. WCTE 2016. World Conference on Timber Engineering. August 22-25, 2016. Vienna, Austria.
- Rieger, P. C. 1763. Elementos de toda la arquitectura civil, con las más singulares observaciones de los modernos. Traducidos al castellano, por el P. Miguel Benavente. Madrid, por Joachin Ibarra, calle de las Urofas. Pp. 243.
- Rita Campa, M. 2009. "Le Nouvelles Inventions pour Bien Bastir et a Petits Fraiz" by Philibert de l'Orme: a New Way to Conceive Wood Roof Covering.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. 2006. Fin y epílogo del retablo barroco. *ArteHistoria*.
- Rondelet, J. 1810. *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. Tome Quatrième, première partie. Charpente avec 60 planches. Paris, Chez l'Auteur, enclos du Panthéon.
- Rusconi, A. 1590. Della architettura, con centosettanta figure diseguate dal medesimo, secondo u precetti di Vitruvio. Venecia: I Gioliti.
- San Nicolás, F. L. 1796. *Arte y Uso de Arquitectura*. Con el primer Libro de Euclides traducido en Castellano. Quarta Impresión. Madrid, por D. Placido Barco López.
- Sanz Martín, I. 2000. *Etnografía segoviana*. Segovia Sur. Segovia.
- Savot, L. 1624. *L'Architecture françoise des bastimens particuliers*. París. Segunda edición (1685)
- Scamozzi, V. 1714. Dell'idea della architettura universale. In Venezia, per Girolamo Albrizzi.
- Serlio, S. 1600. *Tutte l'opere d'architettura et prospetiva*, di Sebastiano Serlio Bolognese, dove si mettono in disegno tutte le maniere di edifice, e si trattano di quelle cose, che sono più necessarie a sapere gli Architetti...Diviso in sette libri. Seconda parte. Venecia. Ed. Oviedo: Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias, 1986.
- Tampone, G. 2001. Acquaintance of the ancient timber structures. En *Proceedings of Historical Constructions*, pp. 117-143. Guimaraes: P.B. Lourenço & P. Roca, ed.
- The Pennsylvania Magazine of History and Biography. To increase the comforts of Life. Charles Willson Peale and the Mechanical Arts. Open Journal Systemas. <https://journals.psu.edu/pmhb/article/download/44140/43861>

- Theodore, D. M. 2000. "Aprouted on myself". Inbetween the Sheets of Inigo Jones's Palladio. Thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in partial fulfilment of the requirements of the degree of Masters in Architecture. Scholl of Architecture. McGill University.
- Toajas Roger, M. A. 1989. Un manuscrito inédito de arquitectura y carpintería del siglo XVII: El «Breve compendio y tra(ta)do de lo blanco» de Rodrigo Álvarez (1674). Anales de Historia del Arte. Universidad Complutense, Madrid, pp- 181-195.
- Tomasz P.; Bednarz, Ł. 2010. Wrocław University's Leopoldinum Auditorium - Tests of Its Ceiling and a Conservation and Strengthening Concept. Advanced Materials Research, October.
- Tongtong S. 1997. Failure Prediction of Spatial Wood Structures: Geometric and Material Nonlinear Finite Element Analysis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Civil Engineering, Doctoral Dissertation, 185 p.
- Tormo, Elías, 1985. Las Iglesias de Madrid. Reedición de los dos fascículos publicados en 1927. Instituto de España. Artes Gráficas Soler, S.A. Valencia.
- Tredgold, T. 1885. Elementary principles of carpentry. London, Crosby Lockwood and Co. Stationers Hall Court, Ludgate Hill.
- Velasco Sayago, J. P. 2015. De la Granja al Pául (Juan de Contreras, 1912). Luna llena, Segovia.
- Venturi, L. 1965. La pintura italiana (Vol.I). Los creadores del Renacimiento. Del Caravaggio a Modigliani. Ed. Carroggio, S.A. de Ediciones.
- Villanueva, L. 2005. "Bóvedas de madera". Actas del Cuarto Congreso de Historia de la Construcción, Cádiz, pp 1105 y 1109.
- Vitruvius, M. 1999. Ten books on architecture. Commentary and illustrations by Thomas Noble Howe with additional commentary of D. Rowland and Michael J. Dejar. Cambridge: Cambridge University Press.
- Widmann-Miguel, E. F. 2013. Comuneros de Castilla. El pueblo castellano y la lucha por las libertades. IberInfo-Buenos Aires.
- Wiebenson, D. 1982. Architectural Theory and Practice from Alberti to Ledoux. Charlottesville.
- Wilhelm, J. 1668. Architectura Civilis (1649). Nuremberg: Paul Fürst.
- Woodworth, C. H. 1954. United States Patent RIGID ARCH JOINER Charles H. Woodworth, Portland, reg., assignor to Timber Structures, Inc., Portland, Oreg., a corporation of Oregon Application September 27, 1954, Serial No. 458,396.

- Wotton, H. 1903. The Elements of Architecture. Longmans, Green, and CO. 39, Paternoster Row, London, New York & Bombay.
- Yeomans, D. 1984. Structural Understanding in the Eighteenth Century: James Essex and the Roof of Lincoln Cathedral Chapter House. Design Studies, 5, Nº1, January, pp. 41-48.
- Zimmermann. 1830. "Bemerkungen über das Tragvermögen der Bögen aus eichenen Bohlen und über ihre Anwendung zu Brücken, nach Versuchen ", Crelle's Journal der Baukunst, volume four, pp.367-395.

ARTÍCULOS

ARTÍCULOS:

Algunas publicaciones derivadas de esta tesis son las siguientes:

- Fernández-Cabo, J.L.; Arce-Blanco, M.; Diez-Barra, R.; Hurtado-Valdez, P.A. *Theoretical and experimental structural studies of historical latin-american laminated planked timber arches*. Proceedings of the World Conference of Timber Engineering. ISSN: 9781622763054. Published: 19-06-2012.

Abstract: This article describes a first group of theoretical and experimental works undertaken at the Polytechnic University of Madrid. One major purpose is to obtain a structural model for the assessment of historical Latin-American vertically laminated planked timber arches built by the Spanish, mainly in the XVII and XVIII centuries. Many of those constructions still stand and represent a notable historical heritage. Pedro Hurtado recently presented his Ph. D. thesis on historical and construction topics. A structural study was then undertaken. This step of the structural research focussed on static analysis, most especially the deformation in the connection system. This article describes part of this first structural research. Even though it is still at a basic level, it shows reasonable agreement with the experimental results. Further static analytical models are been now developed and implemented. The next stage will address the dynamic problem, even though improvements will be made also in the constitutive equations.

- Fernández-Cabo, JL; Widmann, R.; Arce-Blanco, M.; Crocetti, R.; Xavier, J.; Majano-Majano, A. *Assessment of wire-frame analysis models of a historical planked timber arch*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings. ISSN: 0965-0911. Factor de impacto: 0,494. DOI: 10.1680/stub.14.00049. Accepted:12/05/2015.

Abstract: This paper describes theoretical and experimental work undertaken to obtain a structural model for assessment of historical Latin-American vertically laminated planked timber arches, as built by the Spanish, mainly in the seventeenth and eighteenth centuries. Many such arches still stand, and represent an important historical heritage. Following initial historical and construction studies, a structural analysis is being undertaken; the first stage is described here. Two wire frame analysis models are developed and assessed: a finite-element model using elastoplastic constitutive equations (implemented in SAP2000), and another model using limit analysis. An experimental programme is also conducted. The structure presents elasto-plastic behaviour with an important plastic range, which is a relevant and favourable property for a structure. The numerical elasto-plastic model shows good agreement with experimental results for the elastic range and deviations around 60% for the plastic range. The plastic model shows a deviation of around 40%, which is an important outcome at this stage. The models show the key problem of the structure: the transference of the bending moment along planks is poor, restricting its overall load-bearing capacity. Additional tests and more complex material models (including failure in tension perpendicular to the grain), using two dimensional and three-dimensional finite elements, are now under development to recalibrate the models presented.

- Fonseca-Ferreira, C.; D'Ayala, D.; Fernández-Cabo, J.L.; Arce-Blanco, M.; Diez-Barra, R.; Hurtado-Valdez, P.A. *Numerical Modeling and Seismic Assessment of Historic Timber Arches*. International Journal of Architectural Heritage. ISSN: 1558-3058. Factor de impacto: 0,714. DOI: 10.1080/15583058.2015.1041194. Published online:15-05-2015.

Abstract: Historic timber structures forming vaulted roofs of public and ecclesiastical buildings are present worldwide. The structural response of these constructions is usually governed by the structural performance of the joints, the interaction between the timber structure and the masonry parts, and the current condition of both joints and timber members. At present, numerical approaches, such as finite element method-based approaches are well-established tools for investigating the global response of complex historic structures. Using a FE-based software package, the authors developed a numerical model of a portion of an existing historic vaulted timber structure, which is part of the roof of the Cathedral of Ica in Peru, considering the in-plane semi-rigid response of the planked arches in the elastic range. For this purpose, the rotational and shear stiffness of the joints and the properties of the materials, which are assumed in good conditions, are calibrated by comparing the numerical outputs with experimental results available in literature. The aim of the work presented here is to compare the response of the same vault assuming either continuous (planks continuously connected) or discontinuous arches (modelling of the semi-rigid response of the joints which connect the planks together).