

RESISTENCIA AL ARRANQUE DE TORNILLOS ESTRUCTURALES TODO ROSCA PERPENDICULARES A LA FIBRA. ANÁLISIS EXPERIMENTAL EN ELEMENTOS DE MADERA DE ROBLE EUROPEO*

WITHDRAWAL STRENGTH OF FULLY THREADED STRUCTURAL SCREWS PERPENDICULAR TO THE GRAIN. EXPERIMENTAL ANALYSIS ON EUROPEAN OAK TIMBER ELEMENTS

Pablo González-Serna¹

<https://orcid.org/0009-0005-6087-3342>

Josu Benito-Ayúcar¹

<https://orcid.org/0000-0001-9337-3065>

Daniel Luengas-Carreño^{2,*}

<https://orcid.org/0000-0003-1297-5545>



RESUMEN

Los tornillos estructurales todo rosca presentan una gran variedad de posibles aplicaciones en la intervención en estructuras de madera, entre ellas el desarrollo de soluciones de colaboración estructural entre elementos preexistentes de madera de frondosa y elementos de madera laminada encolada o paneles contralaminados de madera de conífera. Sin embargo, las formulaciones recogidas en las normativas europeas pueden no estimar con precisión la capacidad de estos tornillos cuando se utilizan en maderas de frondosa de alta densidad. Por esto, se ha diseñado un plan de ensayos para caracterizar el funcionamiento de estos tornillos en algunas de las especies de frondosas más habituales en edificios existentes de algunas regiones de Europa y poder desarrollar soluciones técnicas que combinen distintos tipos de madera de forma más precisa. En este artículo se recogen los resultados obtenidos en las dos primeras campañas experimentales realizadas, en las que se ha ensayado la resistencia al arranque de tornillos perpendiculares a la fibra en madera de *Quercus robur* (roble europeo) y *Quercus petraea* (roble albar). En estos ensayos se ha estudiado la influencia del diámetro del tornillo y del pretaladro, la profundidad de penetración, la densidad del material y el ángulo de inserción respecto a los anillos de crecimiento. Los resultados obtenidos aportan evidencia experimental de que el comportamiento al arranque de tornillos estructurales todo rosca en madera de roble europeo no está plenamente representado por el modelo actual del Eurocódigo 5, y permiten identificar variables relevantes para el diseño y la ejecución de este tipo de uniones.

Palabras clave: Resistencia al arranque, tornillos estructurales, todo rosca, roble europeo, estructuras de madera existentes, rehabilitación.

¹TECNALIA. Basque Research and Technology Alliance (BRTA). Construction Materials – Lab Services. San Sebastián, España.

²University of the Basque Country UPV/EHU. Department of Architecture. San Sebastián, España.

*Autor de correspondencia: daniel.luengas@ehu.es

* Este artículo es una versión ampliada y revisada por pares del trabajo presentado previamente en el III Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción (CIMAD), celebrado en Madrid, España en Junio de 2024. Editora Asociada: Laura Moya-Silva

Recibido: 18.09.2024 Aceptado: 28.07.2026

ABSTRACT

Structural fully threaded screws have a wide variety of possible applications in the intervention of timber structures, including the development of composite structural solutions connecting pre-existing hardwood elements with softwood glued-laminated or cross-laminated timber elements. However, the formulations of current standards may not accurately estimate the capacity of these screws in high-density hardwoods. A test campaign has been developed to characterize the performance of these screws on the most common hardwood species found in existing buildings in Europe and to develop technical solutions that combine different types of wood in a more accurate way. This work presents the results obtained in the first two experimental campaigns carried out, in which the withdrawal strength of screws perpendicular to the grain in *Quercus robur* (European oak) and *Quercus petraea* (sessile oak) has been tested. During the tests, the influence of screw and predrill diameter, penetration depth, material density and insertion angle on the growth rings have been studied. The results provide experimental evidence that the withdrawal behaviour of fully threaded structural screws in European oak is not fully represented by the current Eurocode 5 model, and identify relevant design and execution variables for this type of connection.

Keywords: Withdrawal strength, structural screws, fully threaded screws, European oak, existing timber structures, structural rehabilitation.

INTRODUCCIÓN

A la hora de acometer una obra de rehabilitación de un edificio histórico suele ser necesario realizar una intervención en su estructura existente, bien por la existencia de lesiones o daños en la misma, o bien porque el cambio de uso puede conllevar un aumento de la carga de servicio. De acuerdo al tipo de elemento y material, hoy en día existen numerosas técnicas para reparar y reforzar las estructuras existentes. En el caso de los forjados de madera, su mayor problema suele ser su baja rigidez, que provoca grandes deformaciones por flexión y vibraciones bajo cargas de servicio (Gubana 2015).

Una de las técnicas de intervención más utilizadas para reforzar este tipo de forjados consiste en hacer colaborar una capa de hormigón armado con la solivería existente (Benito-Ayúcar *et al.* 2014, Clouston and Schreyer 2008, Natterer *et al.* 1996). No obstante, aunque es una técnica sencilla y eficaz, conlleva un aumento considerable de las cargas permanentes, lo que puede suponer llevar al agotamiento los elementos de la estructura vertical (pilares, muros y/o tabiques de carga). Además, la insuficiente reversibilidad del sistema, así como el impacto que puede tener en la autenticidad e integridad del sistema estructural del edificio, provoca que muchas veces no se pueda emplear en edificios históricos y patrimoniales (ICOMOS-ISCARSAH 2003). Como alternativa a estas limitaciones, han ido tomando presencia otro tipo de técnicas más ligeras, reversibles y menos invasivas, como los forjados colaborantes madera-madera. Esta técnica consiste en unir mediante tornillería metálica u otro tipo de conectores la solivería existente con nuevos elementos de madera, frecuentemente con vigas de madera laminada o paneles de madera contraminada (CLT) (Bjørnfot 2017, González-Serna *et al.* 2024, Roensmaens *et al.* 2021). En este ámbito, los tornillos estructurales todo rosca presentan distintas ventajas a nivel de operativa en obra frente a otras técnicas en intervención en estructuras de madera (Dietsch and Brandner 2015). Permiten su inserción con diferentes ángulos y, cuando son de cabeza cilíndrica, pueden ser embutidos dentro de la madera hasta llegar a la profundidad de penetración deseada, lo que a su vez facilita el replanteo in situ de las soluciones diseñadas ante todo tipo de singularidades (gemas, fendas, cajeados, escuadrías diferenciales o piezas con curvatura). Además, su aplicación a 45° y/o en parejas cruzadas permite realizar uniones con una gran rigidez. Todo esto hace que con el mismo tipo de tornillo se puedan ejecutar diferentes actuaciones de reparación o refuerzo, como la consolidación de uniones carpinteras o refuerzos a cortante. En el caso de los forjados colaborantes madera-madera, los tornillos estructurales son dimensionados y situados para maximizar su trabajo a tracción.

Aunque existen en el mercado algunos modelos de tornillos estructurales todo rosca específicos para madera de frondosas, la mayor parte de los tornillos que se encuentran en los catálogos en la actualidad están orientados a su uso en madera de coníferas, al ser la madera predominante en la construcción de nueva planta. El comportamiento al arranque de tornillos estructurales todo rosca y los diferentes parámetros geométricos que influyen en el diseño de tornillos en distintas especies de madera de coníferas están ampliamente documentados (Hoelz *et al.* 2021). El modelo del Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1: 2016) es capaz de predecir la capacidad en este tipo de maderas con una precisión suficiente, incluso en productos más industrializados como el CLT, donde este modelo presenta una desviación del 12 % (Khai and Young 2022).

No obstante, puesto que las ecuaciones de diseño de tornillos en madera recogidas en las normas de construcción como el Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1: 2016) o el Código Técnico de la Edificación de España (CTE-DB-SE-M 2019) están basadas en campañas de ensayo realizadas con madera de coníferas (Brandner *et al.* 2019, Hübner 2013), estas formulaciones no hacen distinción entre diferentes tipos de madera, más allá de la posibilidad de corregir la resistencia de cálculo con la densidad de la especie en cuestión. Circunstancia que puede sugerir que todavía exista un amplio margen de optimización de las prestaciones que este tipo de tornillos estructurales pueden conseguir en maderas frondosas.

En este sentido, distintos estudios (Brandner *et al.* 2019, Hübner 2013) han documentado una capacidad a extracción de tornillos todo rosca en madera de frondosa significativamente superior a los valores de diseño obtenidos con el Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1:2016), proponiendo modelos teóricos de diseño de uniones a extracción separados para coníferas y para distintos grupos de especies de frondosa. Además, alguno de estos trabajos (Brandner *et al.* 2019) ha llegado a identificar que, dentro del grupo de frondosas de alta densidad, la madera de roble destaca por ofrecer mejores prestaciones al arranque y al aplastamiento que el resto.

Precisamente, el roble europeo, en sus variedades de roble común (*Quercus robur* L.) y roble albar (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), es una de las maderas frondosas más frecuentes en las estructuras de los edificios históricos de Europa, sobre todo en edificaciones de entramado pesado y ligero anteriores al siglo XX, como palacios y construcciones señoriales (Benito-Ayúcar *et al.* 2024, Luengas-Carreño *et al.* 2021), caseríos (Hoffsummer 2002, Susperregi *et al.* 2017) o casas de villa y otras edificaciones urbanas (Haneca *et al.* 2009, Harris 1979). Aunque la densidad del roble europeo puede llegar incluso a duplicar a la del abeto, es común que en los trabajos de intervención estructural derivados de los proyectos de rehabilitación se acaben utilizando modelos de tornillo más generalistas, diseñados para maderas coníferas.

Este trabajo se enmarca dentro de una línea de investigación más amplia dirigida a caracterizar en profundidad el comportamiento de tornillos estructurales todo rosca trabajando a tracción en maderas de frondosa de alta densidad. El trabajo desarrollado constituye un estudio experimental inicial con un doble objetivo. Por un lado, se ha buscado comparar la capacidad de extracción de tornillería estructural comercial en madera de roble europeo con la capacidad estimada según el modelo de cálculo del Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1:2016), con el propósito de optimizar el diseño y el dimensionado de estas uniones en su aplicación en refuerzos y actuaciones de colaboración estructural. Por otro lado, se ha analizado la influencia del diámetro de pretaladro en la capacidad de extracción, dadas las dificultades que presenta la instalación de tornillos estructurales de gran tamaño en maderas de alta densidad, como pueden ser la necesidad de equipos de atornillado de elevada potencia o los riesgos de rotura de los propios tornillos por torsión.

Materiales y métodos

Se han realizado dos campañas experimentales de arranque de tornillos perpendiculares a la fibra en muestras de roble europeo procedente del norte de España, analizándose la influencia del diámetro del tornillo, el pretaladro, la profundidad de penetración, la densidad del material y el ángulo de inserción respecto a los anillos de crecimiento. En la campaña inicial (a), se ha analizado la resistencia al arranque para estudiar la influencia del pretaladro. En la segunda de las campañas (b), se ha investigado la resistencia al arranque de tornillos con diferentes rangos de profundidad de penetración y un diámetro de pretaladro fijo para cada tipo de tornillo. Para la primera de las campañas (a), se empleó un modelo de tornillo (T2) de 8 mm de diámetro exterior. Para la segunda campaña (b), se utilizaron tres modelos diferentes de tornillo todo rosca: un primer tornillo (T1) de 6,5 mm de diámetro exterior, un segundo tornillo (T2) de 8 mm de diámetro exterior, y un tercer tornillo (T3) de 10 mm de diámetro exterior, todos ellos con cabeza avellanada de 90°. La Tabla 1 recoge las características geométricas y mecánicas de los tornillos estudiados de acuerdo con el ETA-11/0024 (2023).

Tabla 1: Características geométricas y mecánicas de los tornillos estudiados.

Tornillo	Diámetro exterior	Diámetro interior	Diámetro cabeza	Ángulo filete	Paso de rosca	Ángulo de avellanado de cabeza	Capacidad a tracción acero	Capacidad a torsión acero
	d (mm)	d _i (mm)	d _h (mm)	α (°)	P (mm)	β (°)	f _{t,k} (kN)	f _{tor} (Nm)
T1	6,5	4,5	12	40	3	90	17	19
T2	8	5,2	14,5	40	3,8	90	25	28
T3	10	6	17,8	40	4,6	90	33	48

Se ha utilizado una partida de roble europeo aserrado con un contenido de humedad en torno al 13 %. Para la preparación de las probetas de arranque, se ha realizado una selección de la madera siguiendo los criterios de la norma de clasificación visual de madera de frondosas alemana DIN 4074-5 (2008), descartándose aquellas piezas o partes con nudos, acebolladuras o fendas excesivas (Figura 1). Los pretaladros se han realizado con un taladro vertical de columna para garantizar la mayor precisión posible, salvo en las piezas con una altura de más de 100 mm, donde el tramo final del pretaladro ha tenido que realizarse con un taladro eléctrico de mano. Por su parte, la inserción de los tornillos se ha realizado en su totalidad con una atornilladora eléctrica de mano con limitador de torque.



Figura 1: Lote de madera de roble empleado, selección de elementos y preparación de probetas.

Para la realización de los ensayos, se ha utilizado la configuración definida en la norma para la determinación de la resistencia al arranque de elementos de fijación en madera UNE-EN 1382 (2016) (Figura 2). Se han utilizado las distancias de separación entre tornillos y a borde de pieza definidas en dicha norma, aplicando una carga con velocidad de deformación constante hasta el fallo, buscando que éste se produzca dentro de los (60 ± 15) s que establece la norma. En cuanto a las dimensiones de las piezas de madera, se han utilizado elementos de entre 30 cm y 60 cm de longitud y espesores entre 30 mm y 120 mm. En este sentido, en cada pieza se han ensayado varios tornillos, alternando diámetros. Estos tornillos se han insertado dejando la punta fuera de la madera, para que toda la longitud de tornillo dentro de la madera tenga una rosca homogénea y se pueda considerar una longitud de penetración igual al espesor de la pieza de roble.



Figura 2: Dispositivo de aplicación de carga (izquierda) y probeta tras el fallo por arranque (derecha).

Para una medición lo más precisa posible de la densidad y humedad en el entorno del tornillo, se han dividido las probetas de madera en una retícula con cuadrantes de una dimensión aproximada de 40 x 40 mm. Se han calculado el contenido de humedad y la densidad local de la madera en el punto de inserción del tornillo como el promedio de la humedad y la densidad de las piezas correspondientes a los cuadrantes inmediatamente anterior y posterior al ensayado, siguiendo la dirección de la fibra (Figura 3). Para ello se ha seguido el procedimiento de las normas de determinación del contenido de humedad mediante secado en estufa (UNE-EN 13183-1: 2002) y determinación del peso específico de la madera (UNE 56531: 1977). Todos los ensayos se han realizado en el interior de los laboratorios de Tecnalia (Azpeitia), bajo condiciones controladas de temperatura de 18-24 °C y humedad relativa de 55-68 %.

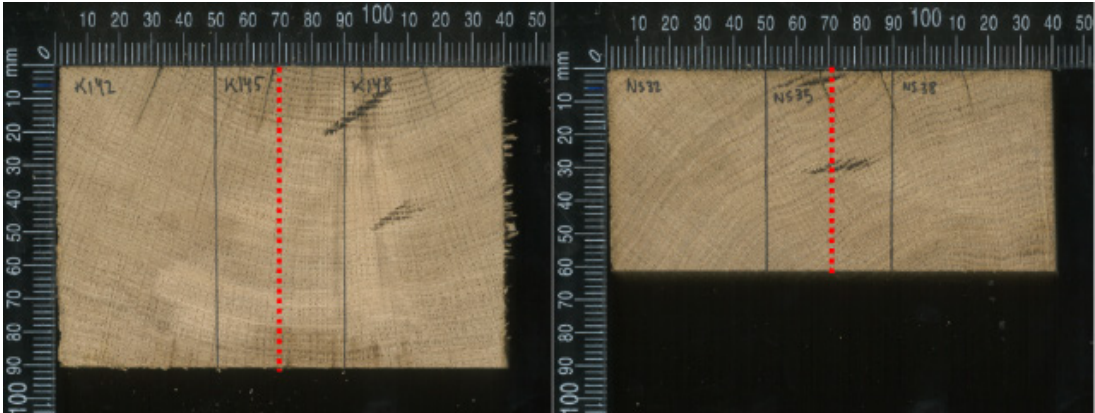


Figura 3: Probetas marcadas (izquierda) y corte de cuadrantes para la determinación de humedad y densidad (derecha).

Tras el corte de las probetas, se ha medido el ángulo entre la directriz del tornillo y los anillos de crecimiento (Figura 4), con el objetivo de evaluar una posible diferencia de comportamiento entre tornillos introducidos en la dirección radial o tangencial de la sección de madera.

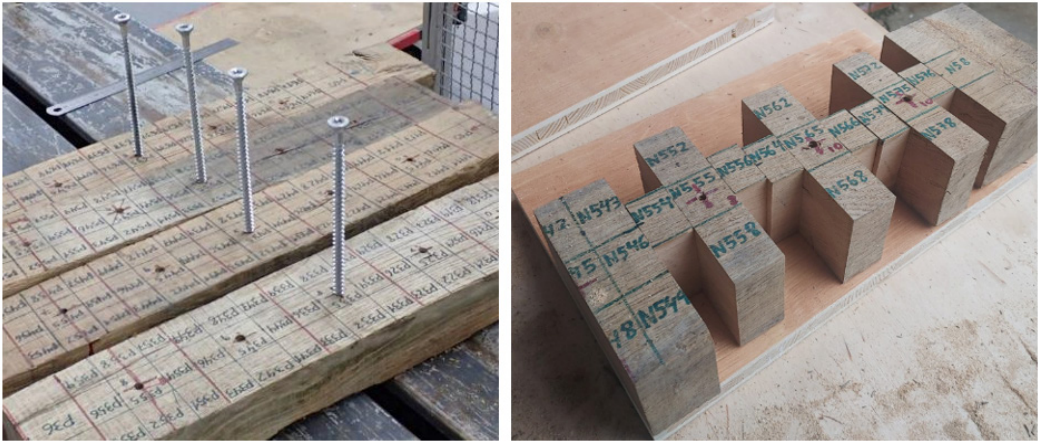


Figura 4: Fotografías tomadas tras el ensayo de las probetas para la medición del ángulo entre la directriz del tornillo y los anillos de crecimiento.

A partir de los resultados de capacidad obtenidos en los ensayos, se ha calculado la resistencia al arranque f_{ax} según UNE-EN 1382 (2016), con la Ecuación 1.

$$f_{ax} = \frac{F_{max}}{d \, t} \tag{1}$$

Donde F_{max} = fuerza de rotura, d = diámetro exterior del tornillo y t = profundidad de penetración del tornillo.

Para la evaluación de los resultados experimentales, se ha realizado una comparativa con la capacidad teórica calculada según el modelo de determinación de la capacidad del arranque del Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1: 2016), usando los valores de densidad obtenidos experimentalmente en cada probeta de ensayo. Para ello, se ha calculado la resistencia al arranque teórica $f_{ax,est}$, con la Ecuación 2.

$$f_{ax,est} = 0,52 \, d^{-0,5} \, t^{-0,1} \, \rho_{exp}^{0,8} \tag{2}$$

Donde ρ_{exp} = densidad de la probeta, obtenida experimentalmente según método de secado en estufa (UNE 56531 1977).

Para la obtención de la capacidad teórica $F_{max,est}$ (EC5), se ha utilizado la Ecuación 3.

$$F_{max,est} \left(EC5 \right) = f_{ax,est} \, d \, t \, k_d \tag{3}$$

Donde el factor k_d se calcula según la Ecuación 4.

$$k_d = min. \left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{8} \\ 1 \end{array} \right. \tag{4}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 y Tabla 3 recogen los resultados de fuerza máxima, densidad y resistencia al arranque según UNE-EN 1382 (2016), obtenidos en los ensayos realizados en la campaña de estudio de la influencia del pretaladro (a) y de estudio de la resistencia al arranque (b), respectivamente.

Tabla 2: Relación de ensayos realizados, parámetros y resultados en la campaña de estudio de la influencia del pretaladro (a).

Tornillo	Diámetro exterior	Diámetro pretaladro	Prof. nominal	nº de réplicas	Valor medio de fuerza de rotura	Valor medio de resistencia al arranque	Densidad media
	d (mm)	dPD (mm)	t (mm)	n (-)	F _{max} (N) (COV %)	f _{ax} (MPa) (COV %)	ρ _m (kg/m³) (COV %)
T2	8	3	65	5	18347,47 (6,69)	34,48 (6,65)	756,21 (0,65)
		4	65	5	19273,95 (6,75)	36,74 (6,02)	764,84 (4,29)
		4,5	65	5	19026,25 (4,46)	35,73 (4,65)	768,73 (4,66)
		5	65	5	19000,04 (5,35)	35,63 (5,41)	783,83 (5,41)
		5,5	65	5	17878,14 (4,48)	34,07 (3,61)	729,38 (2,69)
		6	65	5	18351,50 (3,96)	34,46 (3,96)	756,38 (3,15)
		7	65	5	15986,78 (8,06)	30,32 (8,61)	765,68 (4,96)
		7,5	65	5	7982,27 (11,64)	15,17 (12,29)	733,33 (2,23)

Tabla 3: Relación de ensayos realizados, parámetros y resultados obtenidos en la campaña de estudio de la resistencia al arranque (b).

Tornillo	Diámetro exterior	Diámetro pretaladro	Prof. nominal	n° de réplicas	Valor medio de fuerza de rotura	Valor medio de resistencia al arranque	Densidad media	Ratio capacidad exp. vs modelo
	d (mm)	d _{PD} (mm)	t (mm)	n (-)	F _{max} (N) (COV %)	f _{ax} (MPa) (COV %)	ρ _m (kg/m ³) (COV %)	F _{max} /F _{max,est} (EC5) (-)
T1	6,5	4	30	10	7559,34 (9,04)	34,96 (7,54)	710,34 (8,21)	157,28%
			40	10	10105,27 (23,57)	36,81 (17,46)	723,33 (12,24)	168,09%
			50	9	11566,05 (24,22)	36,62 (21,64)	724,62 (11,11)	169%
			60	10	13568,72 (10,48)	34,86 (8,58)	698,79 (9,09)	168,55%
T2	8	5	40	8	11260,65 (12,52)	34,07 (12,80)	734,77 (11,42)	137,06%
			60	9	18137,97 (9,70)	37,86 (10,07)	783,70 (8,54)	150,09%
			80	7	22636,86 (15,26)	37,35 (12,23)	777,55 (9,28)	152,75%
			100	7	24243,92 (12,04)	31,63 (8,91)	707 (5,42)	142,84%
T3	10	5	40	8	14905,19 (5,10)	35,85 (5,13)	762,06 (1,40)	156,59%
			80	7	29324,12 (16,71)	37,93 (14,27)	791,72 (10,68)	171,31%
			100	7	28501,18 (12,39)	30,65 (13,33)	692,37 (6,08)	156,31%
			120	7	38216,91 (3,78)	32,87 (3,70)	723,22 (7,80)	166,03%

Analizando los resultados de la campaña de estudio de la influencia del pretaladro (a), se observa que la variación del diámetro de pretaladro no altera significativamente la resistencia al arranque f_{ax} en diámetros de pretaladro por debajo o igual al 75 % del diámetro exterior del tornillo (lo que en el tornillo de 8 mm se corresponde con un pretaladro de 6 mm), proporción a partir de la cual se comienza a detectar una reducción de la resistencia (Figura 5). Otros estudios similares (Brandner *et al.* 2019) identifican esta proporción en un 80 % del diámetro exterior y el Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1: 2016) incluye una limitación al diámetro de pretaladro máximo igual a un 70 % del diámetro exterior del tornillo. Esta última limitación, aplicada al tornillo de 8 mm estudiado, se recoge en la gráfica de la Figura 5 como la línea 70 % P_{dmax} (EC5). No obstante, hay que considerar que la definición del diámetro de pretaladro como porcentaje del diámetro exterior del tornillo no tiene en cuenta la profundidad de rosca específica del modelo de tornillo, por lo que estos resultados deberán ser contrastados con futuros estudios que incluyan tornillos con diferente proporción entre diámetro interior y exterior.

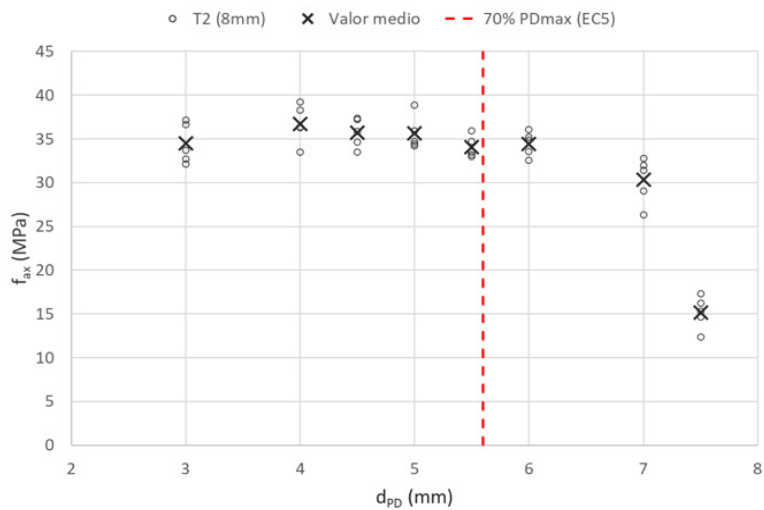


Figura 5: Influencia del diámetro de pretaladro (d_{PD}) en la resistencia al arranque (f_{ax}) del tornillo T2.

En la campaña de estudio de la resistencia al arranque (b), al estudiar el ángulo entre la directriz de inserción del tornillo y los anillos de crecimiento, no se ha detectado una influencia de este parámetro en la resistencia al arranque de los elementos (Figura 6), lo que concuerda con lo observado en estudios previos (Hübner 2013). En los resultados obtenidos se puede observar una cierta disminución de la resistencia al arranque en las probetas con una mayor profundidad de penetración, especialmente en los grupos de tornillos T2 y T3. Esta tendencia parece coincidir con la presencia de esta variable en la ecuación de determinación de la resistencia al arranque según el modelo del Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1: 2016), recogida en la Ecuación 2. Sin embargo, al hacer el análisis de este parámetro en cada grupo de tornillos por separado, el tornillo T1 parece presentar la tendencia inversa (Figura 7). Esta diferencia de tendencia en los tornillos de menor diámetro podría deberse a un fenómeno de distribución de las tensiones a lo largo del tornillo que no se manifiesta en profundidades de penetración reducidas. Aunque no se puede determinar con mayor exactitud dada la alta variabilidad de las muestras. Por su parte, según los datos obtenidos, la resistencia al arranque presenta un 75 % de correlación con la densidad en regresión lineal simple (Figura 8), con un error estándar de 3 N/mm².

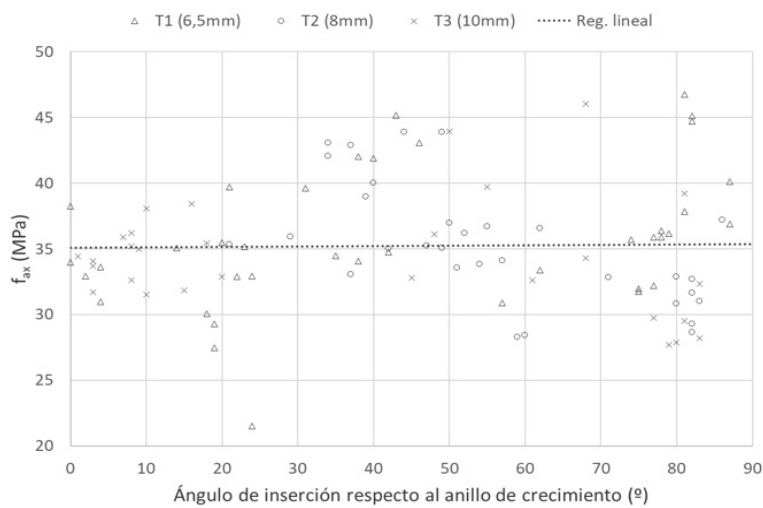


Figura 6: Resistencia al arranque frente a ángulo entre la directriz del tornillo y los anillos de crecimiento en la campaña de estudio de la resistencia al arranque (b).

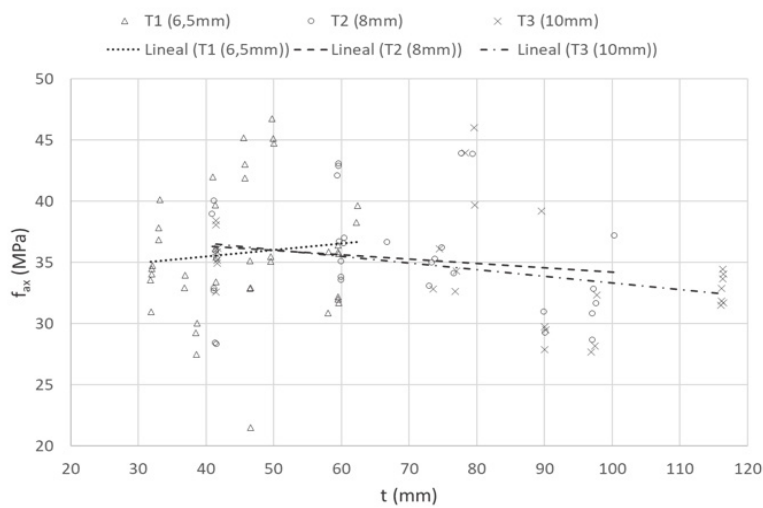


Figura 7: Resistencia al arranque frente a profundidad de penetración y regresión lineal simple de cada tipo de tornillo en la campaña de estudio de la resistencia al arranque (b).

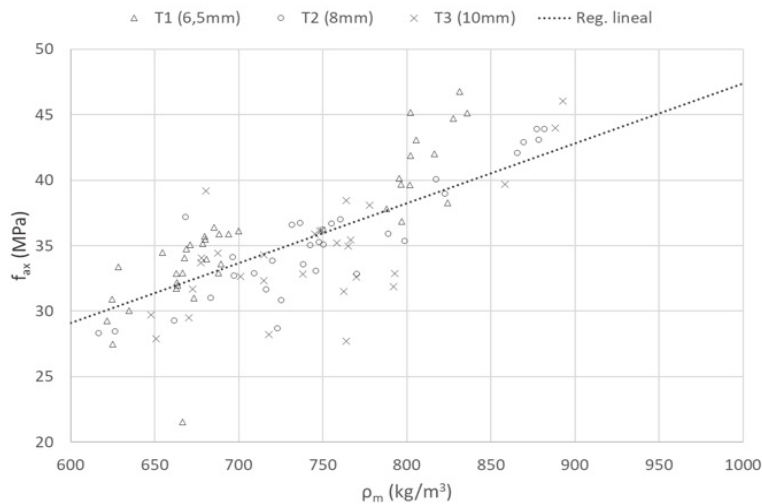


Figura 8: Resistencia al arranque frente a densidad en campaña de estudio de la resistencia al arranque (b).

La capacidad F_{max} obtenida en todo el rango de profundidades de penetración ensayado es, de media, un 58 % superior a la estimada con el modelo del Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1:2016), ajustando con los valores de densidad obtenidos experimentalmente (Figura 9). Aunque esta proporción es relativamente constante en todo el rango estudiado, en uniones con tornillos de gran diámetro y longitud de penetración puede significar un aumento de carga neta considerable desde el punto de vista del diseño.

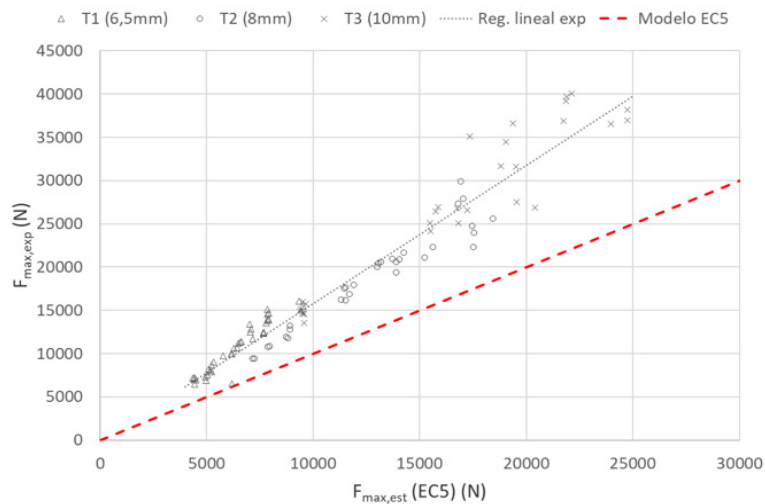


Figura 9: Evaluación de la predicción de la capacidad al arranque en la campaña b según formulación del Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1: 2016).

Durante la campaña de ensayos, se han podido observar cinco especímenes en los que se ha producido un fallo por rotura del acero del núcleo del tornillo, en probetas con profundidades entre 80 mm y 100 mm en tornillos de 8 mm de diámetro exterior (T2), y entre 90 y 100 mm en tornillos de 10 mm de diámetro exterior (T3). Todas las probetas correspondientes a los fallos por acero presentaban además una densidad por encima

de la media y superior a 900 kg/m³ (Tabla 4). También se ha observado que, en una probeta donde el tornillo atravesaba una fenda horizontal a media altura de la pieza de madera, la capacidad obtenida se ha visto reducida a aproximadamente la mitad respecto al resto de repeticiones de esa configuración. Los resultados de las probetas con rotura por el tornillo y de la probeta con el tornillo atravesando una fenda han sido considerados valores atípicos y han sido excluidos del conjunto de datos para el estudio estadístico de la resistencia al arranque.

Tornillo	Diámetro exterior	Diámetro pretaladro	Prof.	Fuerza de rotura	Resistencia al arranque	Densidad	Ratio capacidad exp. vs modelo
	d (mm)	d _{PD} (mm)	t (mm)	F _{max} (N)	f _{ax} (MPa)	ρ _m (kg/m ³)	F _{max} /F _{max,est} (EC5) (-)
T2	8	5	93,59	29488,28	39,38	912,29	144,51%
			94,34	29619,06	39,25	983,50	135,70%
			87,47	29679,56	42,42	923,17	153,17%
T3	10	5	92,95	42751,78	45,99	940,40	184,02%
			93,89	40848,34	43,51	963,32	170,93%

CONCLUSIONES

Este estudio ha servido para comprobar las limitaciones y la influencia del diámetro de pretaladro sobre la capacidad a arranque, caracterizar la capacidad última de tornillos todo rosca insertos en madera de roble europeo y comparar los resultados con la capacidad estimada según el modelo del Eurocódigo 5. Comprender la influencia del pretaladro es un aspecto clave a la hora de definir tolerancias en obra y optimizar tanto el diseño como los procesos constructivos, especialmente considerando la dificultad que implica la inserción de tornillos en maderas de alta densidad.

El estudio demuestra que, dentro del rango de tornillos estudiados, los diámetros de pretaladro inferiores al 75 % del diámetro nominal del tornillo no producen diferencias significativas en la resistencia al arranque, proporcionando un criterio útil para el diseño y la ejecución de uniones en línea con las reglas de diseño habituales en tornillería estructural para madera. Asimismo, evidencia que la orientación radial o tangencial del tornillo en la sección de madera de roble no modifica significativamente la capacidad al arranque, lo que sugiere que esta variable no requeriría ser incorporada en futuros modelos de cálculo para madera de roble europeo.

Se ha identificado que la rotura por acero del núcleo de los modelos de tornillo estudiados se produce a partir de profundidades superiores a 10 veces el diámetro nominal, aportando un criterio práctico para el dimensionamiento y optimización de este tipo de uniones. Aun así, se debe considerar la posibilidad de la presencia de fendas, ya que éstas pueden afectar a la capacidad a arranque del elemento. Asimismo, estos resultados deberán contrastarse con futuros estudios que se realicen en diferentes lotes de madera de roble y otros modelos de tornillo de diferentes casas comerciales.

Finalmente, los resultados muestran que las expresiones actuales del modelo del Eurocódigo 5 subestiman en más de un 50 % la resistencia al arranque observada experimentalmente, lo que pone de manifiesto la necesidad de revisar o adaptar los modelos de cálculo para maderas frondosas de alta densidad.

Este estudio se enmarca dentro de una campaña experimental más amplia cuyo objetivo es caracterizar el comportamiento de tornillos estructurales comerciales en distintas especies de madera, con especial atención a las maderas de frondosas y a la madera existente en edificaciones históricas. Esta primera fase se ha limitado al estudio de tornillos insertados perpendicularmente a la fibra en madera seca de roble europeo, por ser la especie más habitual en las estructuras existentes del entorno geográfico del estudio. Los resultados obtenidos se refieren a la capacidad de los tornillos trabajando con una zona de fuste roscado uniforme en la madera, con

la punta fuera, por lo que no se recoge la posible influencia que pueda tener la propia punta y su geometría sobre la capacidad al arranque final.

A su vez, en el estudio no se incluye el análisis del comportamiento de los tornillos en otras especies de madera ni la influencia sobre la capacidad de arranque del ángulo de inserción del tornillo respecto de la fibra o del contenido de humedad en la madera. El análisis de estas variables de diseño, entre otras, será incluido en futuras campañas experimentales.

En conjunto, los resultados obtenidos aportan evidencia experimental de que el comportamiento al arranque de tornillos estructurales todo rosca en madera de roble europeo presenta características que no son plenamente representadas por las formulaciones actuales del Eurocódigo 5. Asimismo, los resultados permiten identificar variables relevantes para el diseño y la ejecución de este tipo de uniones, proporcionando una base experimental que puede contribuir al desarrollo y la validación de modelos de cálculo más representativos para maderas frondosas de alta densidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con la financiación del Gobierno Vasco, en el marco del programa de ayudas EMAITEK 2023, destinado al apoyo de la actividad de investigación y transferencia de los agentes de la Red Vasca de Ciencia, Tecnología e Innovación (RVCTI).

Contribución de autoría

P. G.-S.: Conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, curación de datos, visualización, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición. J. B.-A.: Conceptualización, metodología, investigación, administración del proyecto, supervisión, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición. D. L.-C.: Conceptualización, investigación, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

REFERENCIAS

Asociación Española de Normalización (AENOR). 1977. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del peso específico. Norma UNE 56531:1977. AENOR: Madrid, España.

Asociación Española de Normalización (AENOR). 2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa. Norma UNE-EN 13183-1:2002. AENOR: Madrid, España.

Asociación Española de Normalización (AENOR). 2016. Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Resistencia al arranque de los elementos de fijación en la madera. Norma UNE-EN 1382:2016. AENOR: Madrid, España.

Asociación Española de Normalización (AENOR). 2016. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. Norma UNE-EN 1995-1-1:2016. AENOR: Madrid, España.

Benito-Ayucar, J.; Abascal Muro, J.M.; Arana Bollar, M.; Lorenzo Fouz, D. 2014. Rehabilitación de la estructura de madera del ayuntamiento de Berastegi (Gipuzkoa) mediante forjados colaborantes madera-hormigón. En: *Actas del Congreso Latinoamericano REHABEND 2014: Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio*. Santander, España, 1-4 abril 2014. Universidad de Cantabria, Santander, España. 1843–1850. ISBN 978-84-616-8863-0

Benito-Ayucar, J.; Gonzalez-Serna, P.; Luengas-Carreño, D.; Uribe-Rus, E. 2024. Ejecución de injerto de madera para la reparación de vigas en el palacio Zabala de Ordizia. En: *Actas del X Congreso Latinoamericano REHABEND 2024: Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*. Gijón, España, 7-10 mayo 2024. Universidad de Cantabria, Santander, España. 1918–1925. ISBN 978-84-09-58989-0

Bjørnfot, A.; Boggian, F.; Nygård, A.; Tomasi, R. 2017. Strengthening of traditional buildings with slim panels of cross-laminated timber (CLT). En: *Proceedings of the 4th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures (SHATIS'17)*. Estambul, Turquía, 20-22 septiembre 2017. Hasan Kalyoncu University, Gaziantep, Turquía. 369-377 ISBN 978-605-62703-7-6

Brandner, R.; Ringhofer, A.; Reichinger, T. 2019. Performance of axially-loaded self-tapping screws in hardwood: Properties and design. *Engineering Structures* 188: 677–699. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.018>

Clouston, P.; Schreyer, A. 2008. Design and use of wood–concrete composites. *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 13(4): 167–174. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0680\(2008\)13:4\(167\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0680(2008)13:4(167))

CTE-DB-SE-M. 2019. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-M: Seguridad estructural, Madera. Ministerio de Fomento, España. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-M.pdf>

Dietsch, P.; Brandner, R. 2015. Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements – A state-of-the-art report. *Construction and Building Materials* 97: 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.028>

DIN 4074-5:2008-12. 2008. Strength grading of wood – Part 5: Sawn hardwood. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlín, Alemania.

ETA-Danmark A/S. 2023. European Technical Assessment ETA-11/0024 of 2023/01/27.

González-Serna, P.; Benito-Ayucar, J.; Luengas-Carreño, D. 2024. Rehabilitación estructural mediante forjados colaborantes madera-madera en el ayuntamiento de Itsaso. En: *Actas del X Congreso Latinoamericano REHABEND 2024: Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*. Gijón, España, 7-10 mayo 2024. Universidad de Cantabria, Santander, España. 1926–1934. ISBN 978-84-09-58989-0

Gubana, A. 2015. State-of-the-art report on high reversible timber-to-timber strengthening interventions on wooden floors. *Construction and Building Materials* 97: 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.035>

Haneca, A.; Cufar, K.; Beeckman, H. 2009. Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe. *Journal of Archaeological Science* 36: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.07.005>

Harris, R. 1979. *Discovering Timber-Framed Buildings*. 2nd Edition. Shire Publications, Princes Risborough, Reino Unido. ISBN 978-0-85263-481-3

Hoffsummer, P. 2002. *Les charpentes du XIe au XIXe siècle: typologie et évolution en France du Nord et en Belgique*. Cahiers du patrimoine 62. Monum, Éditions du Patrimoine, París, Francia. ISBN 978-2-85822-303-9

Hoelz, K.; Kleinhans, L.; Matthiesen, S. 2021. Wood screw design: Influence of thread parameters on the

withdrawal capacity. *European Journal of Wood and Wood Products* 79(5): 773–784. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01668-4>

Hübner, U. 2013. Withdrawal strength of self-tapping screws in hardwoods. En: Proceedings of the 46th International Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB W18 Meeting. Vancouver, Canadá, 26-29 agosto 2013. Timber Scientific Publishing KIT Holzbau und Baukonstruktionen, Karlsruhe, Alemania. 127–140.

ICOMOS-ISCARSAH. 2003. Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage. International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). <https://www.icomos.org>

Khai, T.D.; Young, J.G. 2022. Withdrawal capacity and strength of self-tapping screws on cross-laminated timber. *Structures* 37: 772–786. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.033>

Luengas-Carreño, D.; Crespo de Antonio, M.; Sánchez-Beitia, S. 2021. Pre-Renaissance manor houses in the Basque Country, España: analysis of the Loyola Tower Palace. *International Journal of Historical Archaeology* 25: 297–314. <https://doi.org/10.1007/s10761-020-00554-8>

Natterer, J.; Hamm, J.; Favre, P. 1996. Composite wood-concrete floors for multi-story buildings. En: 4th Proceedings of the International Wood Engineering Conference (IWEC 1996). Nueva Orleans, LA, Estados Unidos, 28-31 octubre 1996. Omnipress, Madison, WI, EEUU,: 3431–3435.

Roensmaens, B.; Avez, C.; Van Parys, L.; Descamps, T. 2021. Refurbishment of timber floors with screwed CLT panels: tests on floor elements and connections. *International Journal of Architectural Heritage* 15(2): 334–348. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1836530>

Susperregi, J.; Telleria, I.; Urteaga, M.; Jansma, E. 2017. The Basque farmhouses of Zelaa and Maiz Goena: new dendrochronology-based findings about the evolution of the built heritage in the northern Iberian Peninsula. *Journal of Archaeological Science: Reports* 11: 695–708. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.12.035>