

INCERTIDUMBRES DE LOS MODELOS PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD RESISTENTE DE UNIONES DE MADERA

Uncertainties in models for calculating the load-bearing capacity of timber joints

Carlos Lara Sarache^a, Peter Tanner^b, José Manuel Cabrero Ballarín^c y Borja Iñaki

Iraola Sáenz^d

^a Dr. Ingeniero Civil. Instituto de C. C. Eduardo Torroja CSIC. carloslara@ietcc.csic.es

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Instituto de C. C. Eduardo Torroja CSIC. tannerp@ietcc.csic.es

^c Dr. Arquitecto. Cátedra Madera Onesta, Universidad de Navarra. jcabrero@unav.es

^d Dr. Arquitecto. Cátedra Madera Onesta, Universidad de Navarra. bisaenz@unav.es

RESUMEN

En el presente trabajo, se ha llevado a cabo una revisión de los modelos para el dimensionado de las uniones de madera disponibles tanto en la normativa en vigor como en la literatura especializada. La mayoría de los modelos existentes han sido obtenidos como resultado de estudios experimentales y suelen basarse en una combinación de principios mecánicos y relaciones empíricas. Empleando tres modelos diferentes, se han calculado las capacidades de carga teóricas de una serie de uniones con múltiples conectores tipo clavija sometidas a ensayos con cargas en dirección paralela a la fibra y seleccionadas entre las existentes en la literatura. Los resultados obtenidos se han comparado con los experimentales, con el propósito de cuantificar las incertidumbres de los modelos considerados.

ABSTRACT

The study reviews existing models for joint design, including those in current regulations and specialized literature. Most of the existing models have been obtained as a result of experimental studies and are usually based on a combination of mechanical principles and empirical relationships. Using three different models, the theoretical load capacities of some tested connections with multiple dowel-type fasteners loaded in the parallel-to-grain direction and selected from the literature, have been calculated. The results obtained have been compared with the experimental ones, in order to quantify the uncertainties of the models considered.

PALABRAS CLAVE: uniones de madera, fallo frágil, fiabilidad, modelos probabilistas, incertidumbres.

KEYWORDS: timber connections, brittle failure, reliability, probabilistic models, uncertainties.

1. Introducción

Los edificios de madera en altura son cada vez más populares al tiempo que desafían nuestro sorprendentemente escaso conocimiento científico de las estructuras de madera. De hecho, los enfoques de diseño actuales todavía se basan en la experiencia y la tradición, y no son

eficientes ni confiables. La descripción precisa del comportamiento estructural de las uniones de madera estructural sigue siendo un tema abierto, que plantea muchos desafíos sin resolver. Casi el 25% de los colapsos recientes de estructuras de madera estaban relacionados con

fallos en las uniones. Para explotar el extraordinario potencial ecológico y permitir la expansión del uso estructural de la madera, se requiere una mejor comprensión del comportamiento hasta rotura de las uniones de madera.

Las incertidumbres asociadas con un determinado modelo de resistencia se obtienen comparando unos resultados experimentales con los valores obtenidos mediante el mismo modelo, teniendo en cuenta los valores medidos de las dimensiones y las propiedades específicas de los materiales para cada espécimen ensayado. En el presente trabajo, se ha llevado a cabo una revisión de los modelos para el dimensionado de las uniones, disponibles tanto en la normativa en vigor como en la literatura especializada. La mayoría de los modelos existentes han sido obtenidos como resultado de estudios experimentales y suelen basarse en una combinación de principios mecánicos y relaciones empíricas. Algunos de ellos consideran los modos de fallo dúctiles, frágiles o la combinación de ambos. Empleando el modelo incluido en el actual Eurocódigo 5 [1] para el proyecto de estructuras de madera, además de un modelo más evolucionado, recientemente desarrollado en la Universidad de Navarra [2-4], y del incorporado en el borrador del nuevo Eurocódigo 5 [5], se han calculado las capacidades de carga teóricas de una serie de uniones ensayadas, que se han seleccionado entre las existentes en la literatura. Los resultados obtenidos se han comparado con los experimentales, con el propósito de cuantificar las incertidumbres de los modelos considerados. La determinación de estas incertidumbres para los diferentes modelos destinados al dimensionado de las uniones, así como el cálculo de las probabilidades de ocurrencia de los diferentes modos de fallo, especialmente los frágiles, proveerán un conjunto de herramientas que podrán ser empleadas con diferentes propósitos, tales como la calibración de coeficientes parciales para el dimensionado

estructural, la verificación de la robustez estructural, o la aplicación de métodos más avanzados como son los análisis probabilistas o de riesgos.

2. Modos de fallo frágil de las uniones con conectores tipo clavija

2.1 Antecedentes

La madera presenta un fallo frágil cuando está sometida a esfuerzos de tracción o cortante. La consideración de estos modos de fallo es particularmente importante para las uniones con elementos de fijación tipo clavija, tales como pernos, pasadores o tirafondos. Las uniones de madera pueden presentar un comportamiento dúctil, caracterizado por el aplastamiento de la madera y la flexión del conector, o un comportamiento frágil, en el que la madera falla a cortante y/o tracción con una deformación plástica mínima. Los modos de fallo dúctil de las uniones con elementos de fijación tipo clavija se describen mediante el denominado *European Yield Model*, EYM, basado en la teoría de Johansen [6]. Este modelo ha sido incorporado a normas de diseño como el Eurocódigo 5 [1] desde hace décadas [7].

Cuando un grupo de elementos de fijación se carga en dirección paralela a la fibra, pueden producirse varios modos de fallo frágil en función de la geometría de la conexión, incluidos las dimensiones del elemento, el diámetro del conector, la profundidad de penetración y la separación entre conectores. Estos modos (Figura 1) incluyen la rotura por tracción perpendicular o *splitting*, el cortante en fila (*row shear*), cortante en bloque (*block shear*), cortante por desgarró (*plug shear*) y tracción longitudinal (*net tensile*).

Tradicionalmente, los modos de fallo frágil de las uniones con conectores de gran diámetro cargados en dirección paralela a la fibra se han abordado utilizando factores de efecto de grupo. La tracción perpendicular a la fibra se

tiene en cuenta implícitamente en la versión del Eurocódigo 5 [1], aún en vigor, mediante requisitos de separación mínima entre conectores y el número eficaz de estos.

De acuerdo con [7], el último borrador del nuevo Eurocódigo 5, prEN1995 [5], actualmente en desarrollo, integra unas reglas de diseño revisadas para los modos de fallo frágil de las uniones con elementos de fijación tipo clavija. Estas reglas se basan en el modelo desarrollado por Yurrita y Cabrero en la Universidad de Navarra [2-4]. Sin embargo, investigaciones recientes [8,9], basadas en un análisis paramétrico del modelo del borrador del Eurocódigo 5 [5], pusieron de manifiesto varios inconvenientes, como la ambigüedad acerca de la profundidad plástica eficaz, $t_{ef,pl}$, y la ausencia de un límite superior para la profundidad eficaz, t_{ef} . La profundidad plástica eficaz se define en [4] como la distancia entre la rótula plástica y el plano de cortadura más una distancia adicional que considera el contacto entre el elemento de madera y la zona no plastificada del conector.

A partir de estas investigaciones se propusieron modificaciones a la formulación que se incorporaron en el borrador más reciente de la norma prEN1995 [5].

2.2 Disposiciones de diseño para los modos de fallo frágil en el borrador del nuevo Eurocódigo 5

El último borrador de prEN1995 [5] trata los modos de fallo frágil de las uniones con elementos de fijación tipo clavija cargados en dirección paralela a la fibra. Establece que el fallo frágil causado por los modos de fallo representados en la Figura 1 deben tenerse en cuenta en el diseño de uniones acero-madera y madera-madera con múltiples conectores. Se considera que la rotura a tracción perpendicular se puede evitar si se cumplen los requisitos de separación mínima y considerando el número de medios de fijación eficaz, n_{ef} . El borrador del

prEN1995 [5] contempla, además, una simplificación que permite descartar por completo los modos de fallo frágil de las uniones siempre que la flexión en el elemento de fijación, con la formación de dos rótulas plásticas en él, rija el diseño dúctil y se cumplan las separaciones mínimas, incrementando las separaciones entre los conectores, a_1 y a_2 , en dirección paralela y perpendicular a la fibra, respectivamente, y la distancia a la testa cargada, a_3 , mediante el factor k_{br} . Esta simplificación aún se está debatiendo y puede que se modifique o sustituya en la versión final [7].

Por otra parte, para un elemento de madera con una sola fila de conectores, la resistencia a la rotura frágil debería determinarse por la resistencia mínima a a) la rotura por tracción perpendicular (a través de n_{ef}); b) la rotura por cortante en fila; y d) la rotura por tracción longitudinal. Para uniones con más de una fila de elementos de fijación, la resistencia a la rotura frágil debe determinarse considerando, además: c) la rotura por cortante en bloque (para elementos con penetración total de los conectores); y e) por cortante por desgarró (para elementos con penetración parcial).

Las cláusulas propuestas difieren en varios aspectos del modelo original propuesto por Yurrita y Cabrero [2-4]. Las mayores diferencias están relacionadas con el cálculo de la profundidad eficaz, t_{ef} . La simplificación lineal para t_{ef} propuesta por Yurrita y Cabrero [2] se ha modificado de tal manera que se ajusta mejor a los resultados originales del modelo analítico de viga sobre una base elástica utilizado en el trabajo original [2].

En el borrador del nuevo Eurocódigo 5 [5] se adopta una forma diferente de presentar los factores para el cortante, k_v , y la tracción, k_t , en comparación con la propuesta original [3]. En lugar de ofrecer una fórmula general, se indican unos valores específicos para los tipos de madera incluidos en la base de datos de validación [8,9].

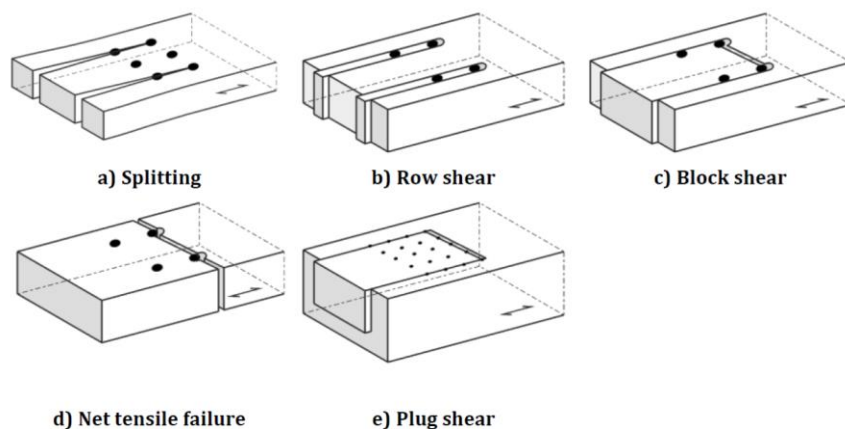


Figura 1. Modos de fallo frágil en uniones con conectores tipo clavija contemplados en el borrador del Eurocódigo 5 [3]

Aunque el modelo original para el fallo por cortante en bloque [3] combinaba la resistencia de todos los planos de fallo, en el borrador del del Eurocódigo 5 [5] se propone un enfoque más conservador. Debido a la escasa información sobre el comportamiento a largo plazo de las uniones, y a la posible influencia de las fisuras en los elementos de madera sobre la resistencia de la unión, se decidió considerar la mayor entre las resistencias de los planos de cortante lateral y de tracción perpendicular, tomándolas por separado, en el caso de uniones no reforzadas. Para las uniones reforzadas, se permite combinar la resistencia de estos dos planos.

Así mismo, la profundidad del plano de tracción del bloque se ha modificado para que tenga la misma profundidad eficaz que la considerada para los planos de cortante, mientras que en el modelo original se tomaba como el espesor total del elemento. Esto hace que el modelo incluido en el borrador [5] sea más fácil de aplicar y menos propenso a errores, puesto que se considera la misma profundidad eficaz tanto para los cálculos de la resistencia del plano de tracción del bloque como para los de la resistencia del plano de cortante lateral [7].

En el caso del cortante por desgarro (*plug shear*), se considera la anchura total de la conexión para obtener el área del plano inferior. El modelo original de Yurrita y Cabrero [4]

proponía utilizar en su lugar la anchura neta, lo que conducía a una reducción poco realista. La profundidad eficaz, t_{ef} , también se ha modificado para el *plug shear*.

3. Incertidumbres de los modelos de resistencia

Según el código modelo probabilista [10], un fenómeno físico se puede modelar mediante diferentes aproximaciones que van desde una descripción puramente científico-matemática hasta una descripción puramente empírica, basada en observaciones y ensayos. En principio, para cualquiera de estos niveles de aproximación es posible establecer modelos probabilistas para las características inciertas de las cargas y de las resistencias.

En ingeniería, el modelado físico, que consiste en la construcción de un modelo teórico (matemático) para un sistema o proceso físico, corresponde normalmente a un nivel intermedio entre ambos extremos. Por este motivo, los análisis de fiabilidad se basan normalmente en un conocimiento físico del problema, pero debido a diferentes simplificaciones y aproximaciones, en mayor o menor medida, son semi-empíricos, ya que también contienen parámetros determinados experimentalmente. Esto significa que, si se comparan los resultados

experimentales con las previsiones obtenidas mediante un modelo físico, se observa una falta de ajuste entre ambos. Esta falta de ajuste introduce la denominada incertidumbre del modelo que está asociada con el nivel de aproximación de la formulación física del problema (Figura 2).

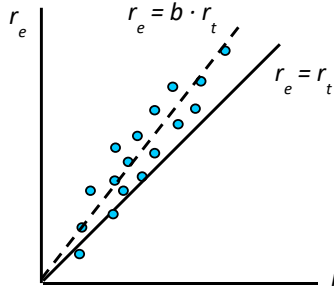


Figura 2. Diagrama de resultados experimentales r_e vs. resultados teóricos r_t (adaptado de [11] Anejo D).

La incertidumbre del modelo puede estimarse mediante una variable aleatoria que tiene en cuenta las desviaciones entre los resultados teóricos y de los ensayos debidas a:

- efectos aleatorios que no se tienen en cuenta en los modelos;
- simplificaciones en las relaciones matemáticas.

Para cuantificar las incertidumbres de los modelos para el cálculo de la capacidad resistente de uniones de madera sometidas a tracción paralela a la fibra, se establece para cada uno de los modelos considerados, la ratio m_i para todos los casos i , mediante la expresión (1). La evaluación estadística de estos datos resulta en los parámetros de las variables del modelo $\theta_{R,mod}$. Los valores de m_i que se emplearán para la determinación de los parámetros estadísticos de las variables de los modelos considerados (Tabla 2), serán aquellos en los que el mecanismo de fallo teórico coincide con el experimental.

$$m_i = \frac{r_{e,i}}{r_{t,i}} \quad (1)$$

m_i ratio entre el valor de la carga experimental y el de la carga teórica obtenida mediante el modelo para el ensayo i ,

$r_{t,i}$ valor de la carga de rotura teórica para el ensayo i [kN],

$r_{e,i}$ carga de rotura del ensayo i [kN].

Los valores de $r_{t,i}$ deben determinarse mediante valores medidos en la muestra i de todos los parámetros (propiedades de los materiales, geometría, etc.) que intervienen en el modelo empleado para su cálculo. De acuerdo con la norma [11] Anexo D, los resultados de los ensayos experimentales conducen a una dispersión, representada por el coeficiente de variación, CoV y un sesgo b . Un sesgo positivo indica que el modelo está en el lado seguro. Para la evaluación de las incertidumbres de los modelos de resistencia el JCSS PMC [10] recomienda emplear una distribución de tipo Lognormal.

4. Evaluación de la capacidad resistente teórica de las uniones

4.1 Ensayos experimentales empleados

Como se ha mencionado antes, la descripción precisa del comportamiento de las uniones de madera estructural sigue siendo un tema abierto, que plantea muchos desafíos sin resolver. Por este motivo, desde hace varias décadas se han llevado a cabo numerosos estudios que incluyen ensayos experimentales de las uniones. Los estudios realizados incluyen diferentes configuraciones de las uniones, tipos de madera y sus propiedades mecánicas, así como la variación de parámetros como el número de conectores, su tipo, el diámetro, la separación entre ellos, etc., con el propósito de determinar su efecto en la respuesta de la unión. También se estudian los diferentes mecanismos de fallo de las uniones.

Para cuantificar las incertidumbres de los tres modelos considerados, entre los numerosos ensayos descritos en la literatura se ha escogido un grupo representativo. En su selección se ha tenido en cuenta que cumpliesen con los siguientes requisitos:

- carga paralela a la fibra
- tipo de unión: acero-madera
- madera: GL, LVL
- placas de acero embebidas o vistas
- al menos dos planos de cortante
- más de una fila de conectores
- tipo de conectores: pasadores y pernos.

Las fuentes de los ensayos, su número y otras características se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de los ensayos empleados para la evaluación de las incertidumbres de los modelos.

Fuente	No. Configs.	No. ensayos
Mischler 1998 [12]	20	60
Queneville and Mohammad, 2000 [13]	38	380
Mohammad and Queneville, 2001 [14]	13	130
Sjödin and Johansson 2007 [15]	6	60
Hanhijärvi and Kevarimäki 2008 [16]	48	144
Yurrita et. al, 2019 [17]	28	110

4.2 Cálculo de la capacidad resistente teórica

De forma general, para la evaluación de la capacidad resistente de una estructura o elemento estructural se deben identificar los posibles modos de fallo que se pueden producir en estado límite último. En particular, para la evaluación de la capacidad resistente de las uniones de acero-madera con múltiples conectores tipo clavija los modos de fallo frágiles que se consideran son los representados en la Figura 1.

Mediante los tres modelos escogidos: el incorporado en el actual Eurocódigo 5 [1], el propuesto por Yurrita y Cabrero [3], y el incluido en el borrador de la última versión del Eurocódigo 5 [5], se calcula la capacidad resistente teórica de las uniones cuyas configuraciones de ensayo y resultados obtenidos han sido publicados en las referencias enumeradas en la Tabla 1.

De acuerdo a lo mencionado en el apartado 3, a efectos de la determinación de la carga de rotura teórica, se han empleado para las propiedades mecánicas de los materiales los valores medidos, cuya información se incluye en las publicaciones respectivas. En los casos en los que estos no aparecen publicados se han obtenido de las correspondientes normas o especificaciones técnicas. Para las dimensiones geométricas se han adoptado los valores medidos, o en su defecto, los nominales especificados en las publicaciones.

Teniendo en cuenta que el objetivo del estudio es determinar las incertidumbres de los modelos y no verificar la seguridad estructural de la unión, para el cálculo de la resistencia teórica de las uniones no se emplean coeficientes parciales.

5. Estimación de las incertidumbres de los modelos

Tal como se explica en el apartado 3, una vez calculados los valores teóricos de la carga de rotura F_t , para cada uno de los ensayos, mediante la expresión (1) se establece la ratio m_i para todos los casos i correspondientes a cada uno de los ensayos cuya resistencia teórica se ha evaluado mediante los tres modelos estudiados. A partir de los valores de m_i obtenidos se determinan los parámetros estadísticos (valor medio, desviación típica y coeficiente de variación) para las variables de los modelos que se resumen en la Tabla 2. El porcentaje de coincidencia que se indica en dicha Tabla para cada modelo corresponde a la relación entre el número de ensayos en los que el mecanismo de fallo teórico coincide con el experimental y el número total de ensayos para los cuales se ha calculado F_t . Por tanto, estos porcentajes representan los resultados que se tienen en cuenta para la estimación de la incertidumbre de cada modelo.

De acuerdo con [18], para obtener las incertidumbres de los modelos de resistencia a emplear en los análisis de fiabilidad, se deberían

tener en cuenta las incertidumbres estadísticas, para lo cual se utiliza la aproximación bayesiana de los métodos estadísticos, asumiendo que no se dispone de información previa. Sin embargo, debido a que el tamaño de la muestra de resultados es suficientemente grande, los valores que se obtienen mediante la aplicación de esta aproximación difieren en menos del 1% de los obtenidos inicialmente y, en consecuencia, se mantienen estos últimos.

Como puede observarse, los valores medios de las variables para las incertidumbres de los tres modelos que se muestran en la Tabla 2 son mayores a la unidad, lo cual corresponde a estimaciones conservadoras de los resultados experimentales, siendo el modelo propuesto por Yurrita y Cabrero [3] el menos conservador con un valor medio cercano a la unidad (1.07), mientras que los del actual Eurocódigo [1] y el borrador del nuevo [5] presentan desviaciones bastante elevadas con respecto al valor medio (1.39 y 1.44, respectivamente). En cuanto a la dispersión de las variables, los tres modelos presentan coeficientes de variación elevados: 0.2 en el caso del modelo de Yurrita y Cabrero [3], 0.24, y 0.29, respectivamente para el del EN1995 [1] y el borrador prEN1995 [5].

Según [10], las incertidumbres de los modelos, definidas según el procedimiento indicado en el apartado 3, presentan un valor medio igual a la unidad en caso de ausencia de esvía. Si los modelos presentan un buen ajuste a la realidad, la variable del modelo tiene un coeficiente de variación del orden de 0.02 a 0.05.

A efectos comparativos, en la Tabla 3 se muestran los valores recomendados en el JRC Technical Report [19] para las incertidumbres asociadas al *European Yield Model*, incorporado, como se ha señalado antes, en la versión en vigor del Eurocódigo 5 [1].

Así mismo, en diferentes estudios como el de Köhler (2006) [20] y el de Jockwer et al. [21] se reportan valores considerables para las incertidumbres de los modelos para el cálculo de la capacidad resistente de las uniones con conectores tipo clavija. Particularmente, en [20] se sugiere, para el caso de uniones con un solo conector, un valor medio para la variable del modelo comprendido entre $\mu_{\theta R} = 0.8-1.3$ y un coeficiente de variación entre $CoV_{\theta R} = 0.07-0.10$. Para uniones con múltiples conectores en [21] se estima para el valor medio $\mu_{\theta R} = 1.25$ y para el coeficiente de variación $CoV_{\theta R} = 0.2$. Si se comparan estos valores con los obtenidos en este estudio para los tres modelos, puede comprobarse que estos últimos no exceden demasiado los estimados en [21] en términos del $CoV_{\theta R}$, mientras que en términos del $\mu_{\theta R}$ la diferencia es significativa.

De acuerdo con [20], los valores elevados del $\mu_{\theta R}$ y del $CoV_{\theta R}$, en el caso de uniones con múltiples conectores, pueden explicarse por el hecho de que en la formulación de estos modelos intervienen parámetros determinados de forma semi-empírica, como el número eficaz de conectores, n_{ef} , y que, por tanto, introducen incertidumbres estadísticas en el modelo.

Tabla 2. Modelos probabilistas para las incertidumbres de los modelos de resistencia de las uniones acero-madera con conectores tipo clavija sometidas a tracción paralela a la fibra

Variable	Notación.	Tipo de distribución	No. ensayos	% coincidencia	Valor medio	Desv. típica	CoV
Incertidumbres del modelo del EN 1995-1-1:2004 [1]	$\theta_{R,EC5}$	Lognormal	153	47%	1.39	0.34	0.24
Incertidumbres del modelo de Yurrita y Cabrero 2020 [3]	$\theta_{R,Yurrita}$	Lognormal	153	64%	1.07	0.21	0.20
Incertidumbres del modelo del prEN 1995-1-1:2024 [2]	$\theta_{R,prEC5}$	Lognormal	127	58%	1.44	0.41	0.29

Tabla 3. Incertidumbres del modelo asociadas al European Yield Model [19].

Modo de fallo	Variable	μ_θ	CoV_θ
Por aplastamiento de la madera	$\theta_{R,mod}$	0.80	0.10
Con formación de dos rotulas plásticas en los conectores por plano de cortadura	$\theta_{R,mod}$	1.25	0.10

En cuanto al modelo del borrador prEN1995 [5], los resultados que se obtienen confirman que su enfoque es bastante más conservador que el propuesto en el modelo de Yurrita y Cabrero [6]. Este hecho puede explicarse por las simplificaciones que con el propósito de facilitar su aplicación se ha decidido adoptar. Además, se debe tener en cuenta que, como se afirma en [7], el borrador del prEN1995 [5] está aún en desarrollo y algunas decisiones adoptadas, relativas a la formulación del modelo, aún se están debatiendo, por lo que sus resultados no han sido suficientemente contrastados mediante la comparación con datos experimentales.

En la Figura 3 se muestran los diagramas de comparación de los valores de carga teórica, F_t , con los experimentales, F_e . En los diagramas se muestran las expresiones para F_e en función de F_t , a partir del sesgo b , definido en el apartado 3. Como puede observarse, la dispersión de los resultados con respecto a la correlación perfecta de ambas variables, en los casos de los modelos del Eurocódigo 5 actual [1] y del borrador de la nueva versión [2] es considerablemente mayor que en el de Yurrita y Cabrero [3]; aunque la mayor diferencia entre este último y los de las dos versiones del Eurocódigo reside en el sesgo.

6. Conclusiones

A partir de los resultados experimentales de un grupo representativo de ensayos descritos en la literatura existente, en el presente estudio

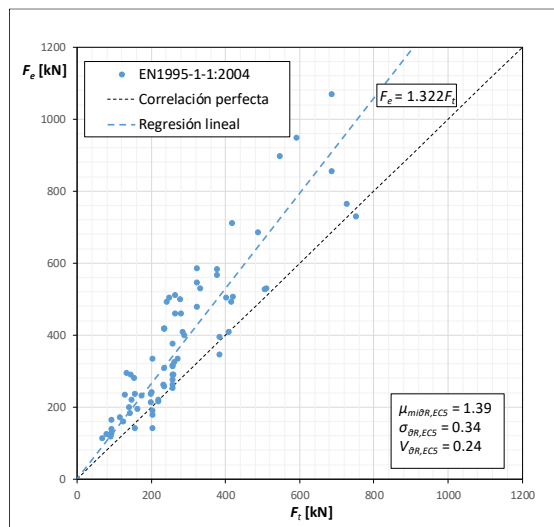
se han obtenido los modelos probabilistas que tienen en cuenta las incertidumbres asociadas a tres modelos para el cálculo de la capacidad resistente de uniones con conectores tipo clavija cargadas en dirección paralela a la fibra.

Para determinar los parámetros de los modelos probabilistas se efectuó una evaluación estadística de las ratios entre las cargas de rotura obtenidas en los ensayos experimentales y las teóricas calculadas mediante los modelos escogidos. Se han deducido las incertidumbres asociadas a los tres modelos escogidos. Los resultados demuestran que los tres modelos proponen enfoques que llevan a estimaciones conservadoras de la capacidad de las uniones con valores medios para las variables de las incertidumbres asociadas a cada uno de ellos superiores a la unidad, siendo el de Yurrita y Cabrero [3] el menos conservador. Los tres modelos muestran, además, dispersiones elevadas. Sin embargo, estos resultados no están muy alejados de los recomendados en otros estudios como los citados [19-21]. De acuerdo con lo anterior, el modelo desarrollado en la Universidad de Navarra por Yurrita y Cabrero [3] sería el más apropiado de los tres para ser empleado en un análisis de fiabilidad de uniones con conectores tipo clavija sometidos a cargas paralelas a la fibra. Aunque para su empleo debería tenerse en cuenta que los modelos probabilistas deducidos en este estudio corresponden a un tipo particular de unión con unas características específicas.

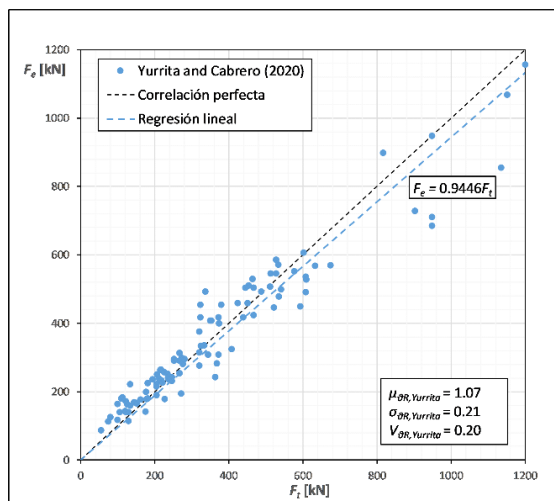
Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo financiero brindado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional mediante los contratos PID2020-118569GB-C21 y PID2020-118569GB-C22 MINECO/FEDER UE, correspondientes al Proyecto “REACT Hacia un análisis fiable y eficiente de las uniones de

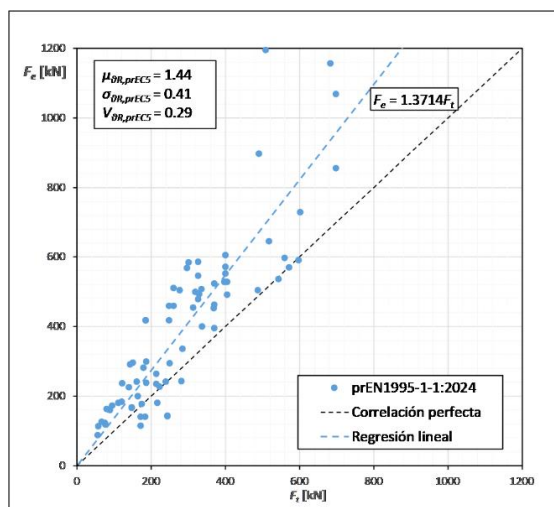
madera: ensayos de uniones y análisis de fiabilidad”.



a) Eurocódigo 5 (2004) [1]



b) Yurrita and Cabrero (2020) [3]



c) Borrador Eurocódigo 5 (2024) [5]

Figura 3. Diagrama de resultados experimentales F_e vs. resultados teóricos F_t , obtenidos mediante los tres modelos estudiados

Referencias

- [1] EN 1995-1-1:2004 Eurocode 5. Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium.
- [2] M. Yurrita, J. M. Cabrero, Effective Thickness of the Wood Member in a Timber-to-steel Connection with Large Diameter under Brittle Failure. INTER 52-7-5, Tacoma, USA (2019).
- [3] M. Yurrita, J.M. Cabrero, New design model for brittle failure in the parallel-to-grain direction of timber connections with large diameter fasteners, Engineering Structures, 217 (2020).
- [4] M. Yurrita, J.M. Cabrero, E. Moreno-Zapata, Brittle failure in the parallel-to-grain direction of timber connections with small diameter dowel-type fasteners: A new design model for plug shear, Engineering Structures, 241 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112450>
- [5] CEN/TC250/SC5/WG5 (ed.) (unpublished) N619 prEN 1995-1-1 v0 to v1A. Connections, in Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General rules – General rules and rules for buildings. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium. Status: July 2024.
- [6] K.W. Johansen, Theory of timber connections. International Association for Bridge and Structural Engineering, 9 (1949), pp. 249–262.
- [7] J.M. Cabrero, N. López Rodríguez, T. Tannert, A. Salenikovich, Y.H. Chui, Brittle Failure Modes of Connections with Dowel-Type Fasteners Loaded Parallel to the Grain: A Comparison between Eurocode 5 and CSA O86, INTER 57-7-8, Padova, Italy (2024).

- [8] S. Teichmann, Summary of the main results of the Master's thesis: Brittle failure modes in timber connections with laterally loaded fasteners. A comparison of design proposals, KIT (2023).
- [9] S. Teichmann, Analysis of the corrected Draft: Brittle failure modes in timber connections with laterally loaded fasteners. Comparison of the EC5, the Draft and the corrected Draft (2024).
- [10] JCSS Probabilistic Model Code, Joint Committee on Structural Safety, 2001. <https://www.jcss-lc.org/jcss-probabilistic-model-code/>
- [11] EN 1990:2023 Eurocode - Basis of structural and geotechnical design, CEN, Brussels, Belgium 2023.
- [12] A. Mischler, Bedeutung der Duktilität für das Tragverhalten von Stahl-holzbolzenverbindungen, ETH Zürich (1998).
- [13] J. Quenneville, M. Mohammad, On the failure modes and strength of steel-wood-steel bolted timber connections loaded parallel-to-grain. Canadian Journal of Civil Engineering, 27, 761–773 (2000).
- [14] M. Mohammad, J.H.P. Quenneville, Bolted wood-steel and wood-steel-wood connections: Verification of a new design approach. Canadian Journal of Civil Engineering, 28(2) (2001) 254–263.
- [15] J. Sjödin, C.J. Johansson, Influence of initial moisture induced stresses in multiple steel-to-timber dowel joints. Holz Als Roh - Und Werkstoff, 65(1) (2007) 71–77.
- [16] A. Hanhijärvi, A. Kevälinmäki, Timber failure mechanisms in high-capacity dowelled connections of timber to steel. VTT Technical Research Centre of Finland (2008).
- [17] M. Yurrita, J.M. Cabrero, P. Quenneville, Brittle failure in the parallel-to-grain direction of multiple shear softwood timber connections with slotted-in steel plates and dowel-type fasteners. Construction and Building Materials, 216 (2019) 296–313.
- [18] ISO 2394:2015 General Principles on Reliability for Structures”, International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland 2015.
- [19] European Commission, Joint Research Centre, T. Vrouwenvelder, S. Dimova, M.L. Sousa, J. Marková, G. Mancini, U. Kuhlmann, A. Taras, R. Jockwer, W. Jäger, T. Schneckendiek, P. Franchin, D. Skejić, J.D. Sørensen, P. Spehl, M. Stacy, M. Feldmann, P. Croce, B. Zhao, P. Tanner, J. Knippers, M. Mollaert, J. André, R. Steenbergen, J. Kohler, T. Bakeer, J. Maljaars, D. Allaix, and J. Spross, Reliability background of the Eurocodes, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/9482837,JRC139110>
- [20] J. Kohler, Reliability of Timber Structures, PhD Thesis Nr. 16378, Zurich, Switzerland: IBK ETH Zurich, 2006.
- [21] R. Jockwer, G. Fink, and J. Köhler, Assessment of the Failure Behaviour and Reliability of Timber Connections with Multiple Dowel-Type Fasteners, Engineering Structures 172 (2018) 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.081.d>.