

Análisis de Tensiones en Uniones de Tres Barras de Cerchas Ligeras de Madera Realizadas con Placas-Clavo

José G. Fueyo, José A. Cabezas, Manuel Dominguez y Manuel P. Rubio

Universidad de Salamanca, Departamento de Ingeniería Mecánica, Avda. de Requejo Nº 33, 49022 Zamora-España (e-mail: fueyo@usal.es)

Resumen

Este trabajo presenta un estudio de las tensiones que aparecen en una unión de tres barras, de una cercha ligera de madera, realizada con placas-clavo. El objetivo fue determinar el efecto de las variables más significativas, como el porcentaje de esfuerzo transmitido por contacto directo entre piezas que trabajan a compresión, el espesor de la placa, el nivel de cargas y el diseño de la unión. Para realizar el estudio, se desarrollaron modelos paramétricos de elementos finitos de la unión. Del análisis de los resultados, se concluye que existe un valor de la holgura entre piezas a partir del cual el contacto aparece, y otro por debajo del cual el porcentaje de la contribución de la transmisión de esfuerzo por contacto se estabiliza. También se observa que estos valores no se ven afectados por el espesor de la placa o el diseño de la unión.

Palabras clave: análisis de tensiones, madera, cercha, elementos finitos, placas-clavo

Stress Analysis of Three Elements Joints Made with Punched Metal Plates in Light Timber Frames

Abstract

This paper presents a study on the stresses in a joint of three structural timber elements made with punched metal plates. The aim of the work was to determine the effect of significant variables, such as contact between pieces working in compression, thickness of the plate, load levels and the joint design. Parametric finite element models of the joint were developed. The analysis showed that there is a value of the gap between timber pieces over which the contact begins, and another value under which the percentage of contribution of the force transmission by contact keeps constant. These values are independent of the thickness of the plate or the joint design.

Keywords: stress analysis, timber, truss, finite elements, punched metal plates

INTRODUCCIÓN

Los métodos usados para unir elementos estructurales de madera han ido evolucionando, desde los primitivos clavos y pernos, hasta sistemas más avanzados, como los conectores de anillo o placa. De todos ellos, ninguno es tan económico y fácil de realizar como las denominadas placas-clavo. Este tipo de enlace se emplea principalmente en estructuras ligeras y para realizar techos y suelos, gracias a su bajo coste, así como a su alta eficiencia comparada con otros tipos de conectores.

Las placas-clavo aparecieron en los Estados Unidos después de la segunda guerra mundial (Karadelis y Brown, 2000), y rápidamente se extendieron a todo el mundo, revolucionando la industria de las estructuras de madera. Desde su invención, su diseño ha experimentado notables mejoras, en la mayoría de los casos encaminados a ahorrar la mayor cantidad posible de madera. Se estima que los diseños existentes actualmente de placas-clavo permiten reducir la cantidad de madera necesaria para construir una estructura entre un 20 y un 30%.

Se fabrican a partir de placas, normalmente de acero galvanizado o inoxidable con espesores que varían entre 0,9 y 2,5 mm, a las que se extrae, a través de un proceso de estampación, un alto número de puntas perpendiculares al plano de la placa. Las uniones se realizan con dos placas-clavo dispuestas simétricamente a ambos del enlace, embutiendo sus puntas contra las superficies de las piezas a unir mediante prensas. Su uso permite la unión de dos o más elementos de la estructura formando un ángulo cualquiera dentro del plano de la misma. El empleo de este tipo de conexiones presenta ventajas con respecto a otros métodos de unión. Por ejemplo, no condiciona las dimensiones de las piezas a unir. Además, como se emplean en cerchas de pequeñas escuadrías, es posible realizar los ensamblajes en taller, transportando la estructura final entera hasta su posición de trabajo (USDA, 1998). La figura 1 muestra una placa y su posible colocación dentro de la estructura.

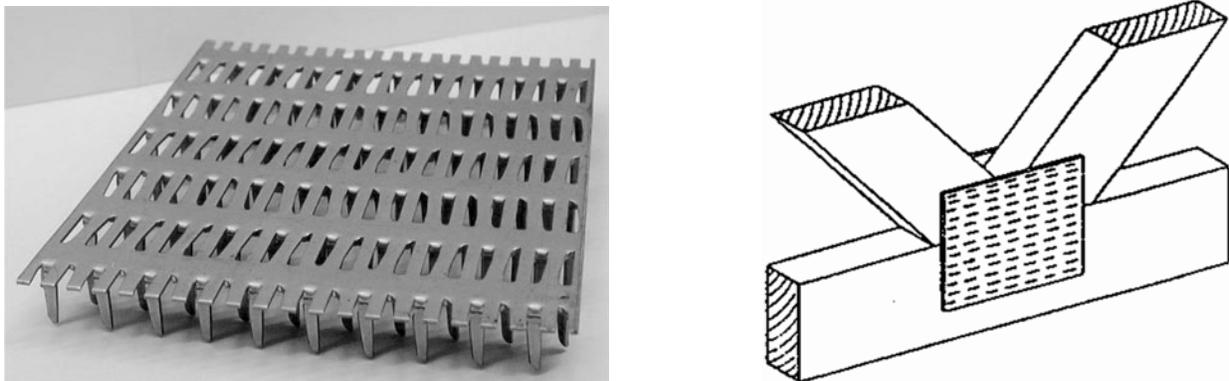


Fig. 1: Placa dentada y ejemplo de aplicación.

En los diversos países existen normas que regulan los procedimientos de diseño de estructuras de madera. Así, en Europa, la norma correspondiente es el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1, 2004), de la cual proceden las adaptaciones que se utilizan en cada uno de sus estados miembros. Esta norma, en relación al diseño de uniones mediante placas-clavo, establece una serie de comprobaciones respecto al nivel de tensiones en las placas y en las superficies de los elementos de madera, con objeto de prevenir las posibles situaciones de fallo: por falta de anclaje de la placa a la superficie de madera (Stehn y Borjes, 2004), o por rotura de la placa en la línea que se encuentra sobre la frontera entre dos piezas de madera (Argüelles et al., 2003).

Si la fuerza que se transmite entre las piezas de madera es de compresión y la holgura entre ellas pequeña, puede producirse un contacto directo entre las piezas, transmitiéndose a través de él parte del esfuerzo. El Eurocódigo 5 recoge esta posibilidad, indicando que, siempre que la holgura tenga un valor medio que no sea superior a 1,5 mm, y con un máximo de 3 mm, pueden calcularse las placas con un valor mínimo de la fuerza de compresión del 50% de la carga total aplicada.

El objetivo del presente trabajo ha sido analizar con más detalle la influencia de la holgura entre las piezas de madera y de otras variables significativas, como el espesor de las placas y el nivel de cargas, en un ejemplo representativo de estas uniones. En concreto, se ha estudiado un nudo intermedio sobre el tirante de una celosía en W; dado que al mismo llegan tres barras, el tirante y las dos barras de celosía, en las que aparecen fuerzas de distinto signo para las posibles combinaciones de cargas. El estudio se ha realizado mediante el método de los elementos finitos, empleando el software comercial ABAQUS. Con él se han preparado varios modelos de tipo paramétrico, que han permitido realizar un análisis detallado de la distribución de tensiones en las placas y en los elementos de madera (Mackerle, 2003). Relacionados con el tema en estudio, existen trabajos de diferentes autores que han servido de referencia. Por ejemplo, Ellergaard (2002, 2007) ha realizado estudios de cómo rompen este tipo de uniones, Kevarinmaki (2000) estudia la relación esfuerzos-deformaciones en las mismas, y Kathleen y Sashi (2003) y Larsen y Jensen (2000) analizan el efecto de la semirigidez de los nudos sobre el resto de la estructura.

METODOLOGÍA

Al plantear el estudio de este tipo de uniones, el primer problema que se presenta es que, dentro de una configuración concreta, existen muchas variables en juego (geométricas, de carga, de material, etc.), que pueden adquirir infinitos valores diferentes. Se hace, por tanto, necesario tomar unos valores específicos, que deben ser elegidos de forma que se obtenga un caso lo más representativo posible (Herzog et al., 2003). Está claro que la modificación de las variables mencionadas alterará los resultados obtenidos pero, en cualquier caso, se obtendrán las tendencias de los mismos, y además quedarán diseñados los procedimientos de cálculo que se podrán aplicar a otras combinaciones de variables.

Aunque la finalidad del trabajo es analizar cómo influyen en el valor de las tensiones las variables más significativas de la unión, como paso previo para tener unos resultados de referencia, el estudio se realizó para unos valores concretos de dichas variables, teniendo así lo que se ha denominado modelo inicial. A partir del mismo, se fueron modificando las variables de interés, para determinar su influencia. En este apartado se detallan los valores adoptados en el modelo inicial.

Materiales

El comportamiento mecánico de la madera viene determinado por su estructura microscópica, en la que destaca la presencia de fibras colocadas paralelamente a la dirección longitudinal del tronco, que hace que el material presente buena resistencia en la dirección de las fibras pero bastante menor en las perpendiculares. Además, entre estas últimas, por ser distinta la densidad en diferentes direcciones en un plano transversal del tronco, las características mecánicas también varían, provocando que se trate en realidad de un material anisotrópico (Thelandersson y Larsen, 2003). No obstante, a la hora de realizar los cálculos, se permite la simplificación de considerar que el material es ortotrópico, es decir, que presenta tres direcciones principales: axial (L), radial (R) y tangencial (T). Además, se supone que tiene un comportamiento elástico lineal, descrito por la ley de Hooke mediante nueve constantes, cuyos valores dependen del tipo de madera. La estructura considerada en este estudio se ha supuesto realizada con madera de clase C18, de acuerdo a la normativa europea (EN 338, 2003), de manera que dichas constantes adoptan los siguientes valores: módulos elásticos longitudinales $E_L = 9000 \text{ N/mm}^2$, $E_R = 562 \text{ N/mm}^2$, $E_T = 562 \text{ N/mm}^2$, módulos elásticos transversales $G_{LR} = 560 \text{ N/mm}^2$, $G_{LT} = 560 \text{ N/mm}^2$, $G_{RT} = 83,6 \text{ N/mm}^2$, y coeficientes de Poisson $\nu_{LR} = 0,41$, $\nu_{LT} = 0,41$ y $\nu_{RT} = 0,51$.

Geometría y cargas

Se ha elegido para el estudio una cercha de las denominadas en W y, de todos los nudos que contiene, uno de los dos que aparecen en la parte central del tirante (figura 2). La razón de esta elección radica en que en este nudo concurren tres barras, el propio tirante y dos barras de celosía, siendo por tanto más complicado, pero a la vez más interesante. La cercha tiene, como valores geométricos significativos, una pendiente de los pares de $18,44^\circ$ y una sección en todos sus elementos de $89 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}$. Las barras de celosía se han colocado de tal manera que todas

forman 45° con la horizontal. Para poder determinar los correspondientes coeficientes de cálculo, debe tenerse en cuenta la situación ambiente en la que se encuentra la madera. En este caso se ha supuesto una clase de servicio 2 (EN 1995-1-1, 2004).

En cuanto a las cargas que actúan sobre la estructura, se han considerado las debidas al peso propio, sobrecarga de uso, viento y nieve. Todas ellas han sido calculadas siguiendo las indicaciones del Eurocódigo 1 (EN 1991, 2001). Una vez determinadas las cargas simples, éstas se combinan siguiendo las indicaciones de la normativa citada, y se procede a determinar los máximos esfuerzos en los distintos elementos. Como la estructura cumple las condiciones indicadas en el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1, 2004) para suponer que los nudos son articulados, sobre el nudo en estudio solamente actúan cargas axiales, cuyos valores en la combinación más desfavorable son los indicados en la figura 2.

La unión entre las tres barras que concurren al nudo se realiza mediante dos placas-clavo, montadas a ambos lados de la estructura, de dimensiones 79,36 mm por 71,4 mm y un espesor de 1,25 mm, como puede observarse también en la figura 2.

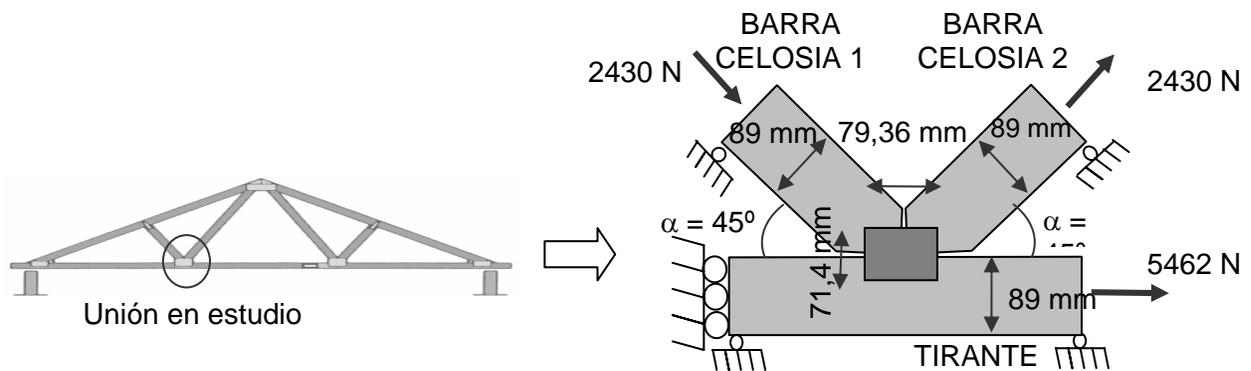


Fig. 2: Nudo seleccionado para el estudio: geometría y cargas.

Modelo de elementos finitos

Para efectuar los análisis planteados, se preparó un modelo de elementos finitos mediante el programa comercial ABAQUS. El modelo tiene como característica significativa el ser paramétrico. Esto permite modificar alguna de sus variables y proceder rápidamente a hacer un nuevo cálculo, determinando el efecto del cambio realizado.

Con objeto de representar adecuadamente las cargas que transmite el nudo (figura 2), en el modelo se han definido los tramos de las barras más cercanos al nudo, distribuyendo uniformemente las cargas sobre las superficies transversales de las piezas, como representa la parte izquierda de la figura 3. Así mismo, se han impedido los desplazamientos de los nodos de acuerdo con los apoyos indicados en la figura 2.

En cuanto a la malla de elementos finitos, para las piezas de madera se tomaron elementos tridimensionales con denominación "C3D20" de la biblioteca de elementos del programa (ABAQUS, 2006), definiendo un comportamiento mecánico del tipo elástico, ortótropo y lineal, con las constantes mecánicas indicadas más arriba. Por su parte, las placas-clavo se consideraron sólidos bidimensionales de material elástico, isótropo y lineal, mallándose con elementos tipo cáscara de código "S4R".

Respecto al tamaño de la malla, hay que tener en cuenta que, cuanto más fina sea, dará lugar a mejores resultados, pero implicará un mayor tiempo de cálculo. Debe mencionarse en este punto que, en cada uno de los estudios paramétricos, el cálculo del modelo se repitió 192 veces. Dadas las circunstancias, el primer paso fue realizar un estudio de convergencia, llegando a determinarse que una malla con elementos de 8 mm de lado permitía obtener unos resultados suficientemente buenos.

Este tamaño de malla sólo afecta a la parte del modelo correspondiente a la madera, ya que para la placa se tomaron elementos rectangulares de modo que sus nodos, tanto en número como en posición, coincidieran con las puntas de la placa real propuesta. Sin embargo, no hace falta que los nodos de la placa y los de la madera coincidan. Simplemente basta con indicar que las superficies de ambas quedan unidas, y el programa se encarga de acoplar los desplazamientos de los grados de libertad de los nodos de la primera con los de la superficie exterior de la segunda.

Al mallar las piezas de madera, un punto importante a tener en cuenta es la correcta definición de los sistemas coordenados que definen las direcciones principales del comportamiento mecánico ortótropo. Por ello, se definieron, además de un sistema global, otros locales en cada una de las tres piezas, con el eje x paralelo a la correspondiente dirección de las fibras. La figura 3 muestra el modelo con sus partes, cargas, condiciones de contorno, sistemas coordenados y malla.

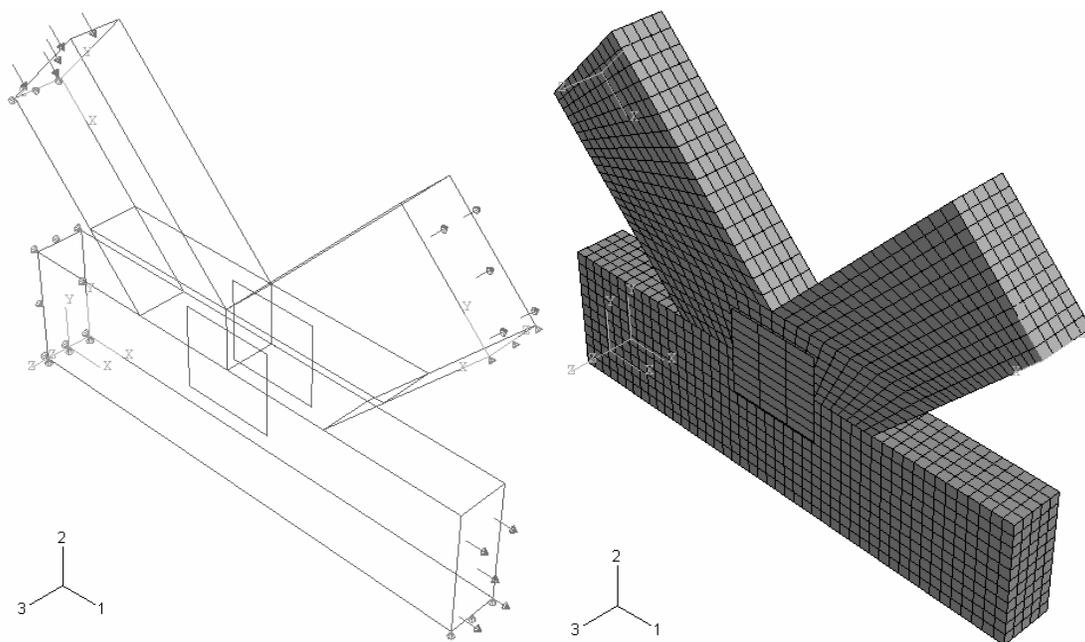


Fig. 3: Modelo de elementos finitos con sus partes, cargas, condiciones de contorno y malla.

Por otra parte, en relación a las placas-clavo, aunque su espesor nominal es de 1,25 mm, en el modelo se le asignó un valor menor para tener en cuenta la presencia de los huecos correspondientes a los clavos obtenidos por estampación. Dicho espesor, denominado efectivo, se calculó con la condición de que la placa de espesor nominal con huecos tuviera el mismo volumen que una maciza de espesor efectivo, resultando para éste un valor de 0,815 mm. Además, siguiendo las indicaciones del Eurocódigo 5, se redujo el área de las placas, disminuyendo sus dimensiones reales en 5 mm alrededor de todo el perímetro, para tener en cuenta que esta zona no contribuye al esfuerzo de transmisión por no haber clavos trabajando. Así las cosas, las dimensiones iniciales de 79,36 mm de ancho por 71,4 mm de largo pasaron a ser de 69,36 mm por 61,4 mm.

Finalmente, hay que indicar que el modelo desarrollado tiene en cuenta la posible transmisión directa de fuerzas entre las piezas de madera, si se produce el contacto entre ellas. En el caso de que, bajo los esfuerzos a los que está sometida la unión, alguna de las superficies de los elementos de madera intentase penetrar en otra, se impediría tal circunstancia y aparecerían los correspondientes esfuerzos de compresión por contacto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de los estudios realizados en este trabajo de investigación. En primer lugar, se describen los correspondientes al modelo inicial, que sirven de referencia para analizar en los siguientes subapartados cómo afecta la variación de las variables más significativas (holgura entre las piezas de madera, espesor de las placas-clavo y cargas sobre el nudo) a las tensiones en las placas y elementos de madera.

Resultados del caso inicial

Como se indicó en la introducción, los fallos en las uniones mediante placas-clavo se producen debido a que las tensiones de adherencia entre la placa y la madera, o bien las tensiones en la placa en la línea que se encuentra sobre la frontera entre los elementos de madera a unir, sobrepasan unos determinados límites. Por esta razón, las tensiones que interesa conocer son, por un lado, las tensiones cortantes τ_{13} de adherencia en la madera y, por otro, las tensiones cortantes τ_{12} y normales σ_{22} en las placas justo en la línea frontera. La figura 4 muestra sus distribuciones para el caso inicial, tanto en las superficies de madera como en la placa entera. Debe indicarse que, mientras las tensiones σ_{22} y τ_{12} corresponden al sistema global de coordenadas, que coincide con el local de la placa; en cambio, las τ_{13} se refieren a los respectivos sistemas locales de las piezas de madera. En estos sistemas locales, la dirección principal 1 coincide con la longitudinal de la pieza que, a su vez, coincide con la dirección de las fibras.

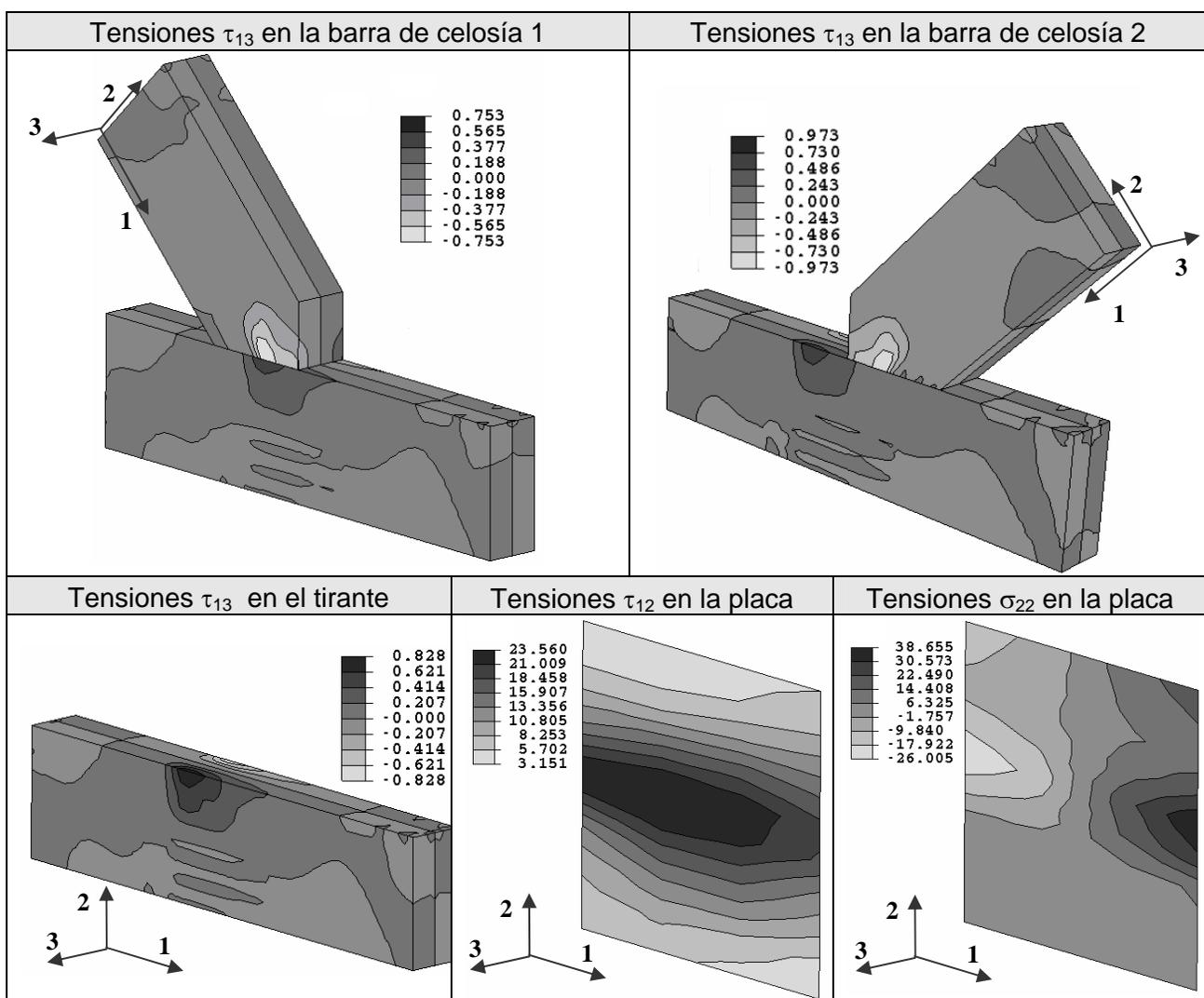


Fig. 4: Tensiones en el caso inicial en las piezas de madera y en la placa (N/mm^2).

Se puede observar, en las tensiones de adherencia τ_{13} , que las más altas se dan en la barra de celosía 2. Lo cierto es que ambas barras de celosía están sometidas a la misma magnitud de axil, solo que en un caso, en la barra de celosía 1, es de compresión y en cambio, en la barra de celosía 2, es de tracción. Al haber transmisión de esfuerzos por contacto, las tensiones de adherencia en la barra comprimida se ven descargadas, mientras que no pasa lo mismo en la traccionada. Esta es la razón por la cual las tensiones de adherencia en la barra 2 son algo mayores.

Por su parte, en la placa, tenemos las tensiones tangenciales τ_{12} , cuyo máximo valor de $23,56 \text{ N/mm}^2$ se alcanza justo en su centro, es decir, en la línea de frontera entre las piezas de madera. En las

tensiones normales σ_{22} se observan valores negativos o de compresión en la parte izquierda, donde llega la barra de celosía 1 que esta comprimida y empuja al tirante; mientras que en la parte derecha tienen valores positivos o de tracción, ya que la barra de celosía 2 tira del tirante. Las tensiones de compresión son ligeramente inferiores a las de tracción, debido a la existencia de transmisión de esfuerzo por contacto directo entre la barra 1 y el tirante, como ya se comentó. En cualquier caso, de nuevo la zona de mayores tensiones normales aparece justo sobre la línea frontera que limita el tirante.

Influencia de la holgura entre las piezas

En este apartado se analiza el efecto sobre las tensiones de la holgura entre las piezas de madera, considerando las tres líneas frontera que se indican en la figura 5. Se planteó el estudio de la unión variando la holgura entre piezas entre 3,5 y 0,0001 mm. Los resultados del valor medio de la tensión de adherencia τ_{13} en cada una de las piezas de madera se muestran en la figura 6. Aunque en las dos barras de celosía tienen valores negativos y en el tirante positivos, para una mejor interpretación, se han representado los valores absolutos; dado que, por tratarse de tensiones cortantes, lo relevante es su valor numérico y no el signo que tienen. Para poder observar el efecto sobre las tensiones causado por el contacto directo entre piezas, por cada ensayo, se realizó otro paralelo donde en el modelo de elementos finitos se eliminaba la condición de contorno de contacto, permitiendo así que unas piezas penetrasen en otras.

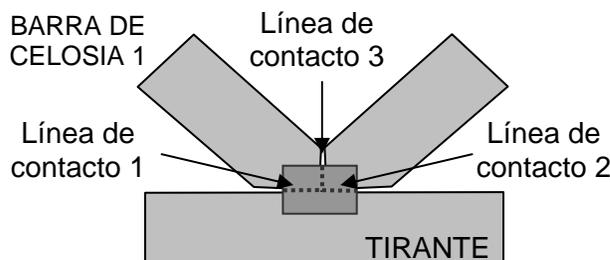


Fig. 5: Líneas frontera entre las tres piezas donde puede haber transmisión de esfuerzo por contacto.

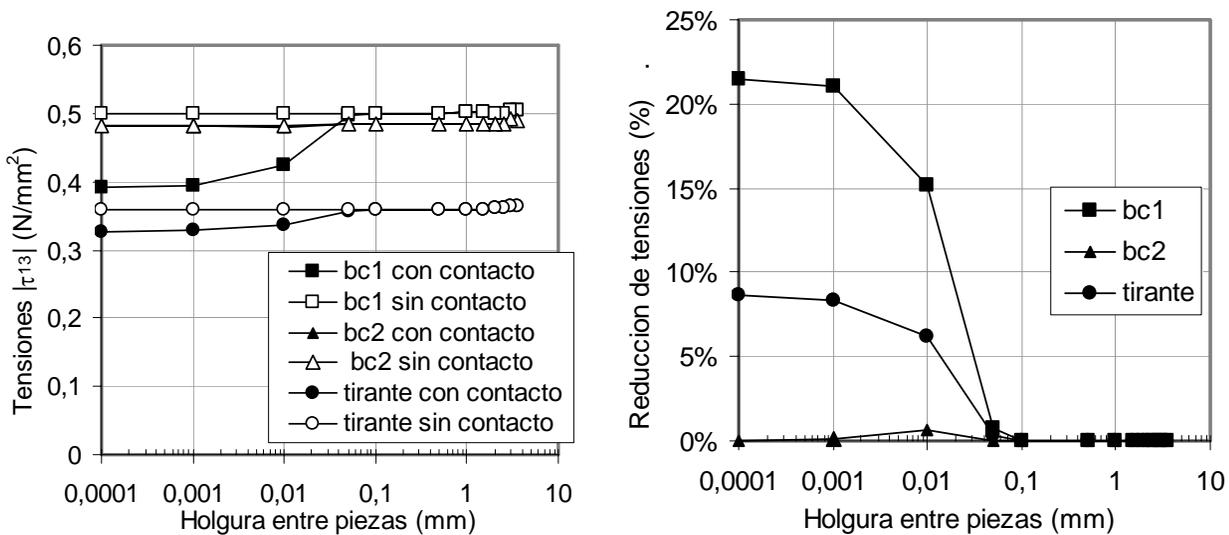


Fig. 6: Tensiones de adherencia $|\tau_{13}|$ en las tres piezas según la holgura y la existencia de contacto.

En la figura 6 se comprueba que en la barra de celosía 2 no existe diferencia entre los resultados con o sin contacto, puesto que esta pieza está sometida a tracción y, por tanto, el tirante y la barra no llegan a tocarse. En cambio, sí se nota el efecto del contacto en las tensiones medias de adherencia, tanto del tirante como de la barra de celosía 1. El efecto en la barra de celosía 1 es mayor que en el tirante, puesto que en ella la superficie de unión placa-madera es más reducida. Además toda ella

está sometida a compresión; mientras que en el tirante sólo lo está la zona izquierda, a la que llega la barra 1; dado que la parte derecha, donde llega la barra 2, trabaja a tracción. Por todo esto, mientras que el contacto en la barra de celosía puede suponer unas reducciones en las tensiones rozando el 22%, en cambio en el tirante no llega a alcanzar un 9%, como se puede ver en la gráfica de la derecha de la figura 6.

Por otro lado, se observa que las tensiones comienzan a reducir su valor a partir de 0,05 mm, que se encuentra lejos de límite de 1,5 mm indicado por el Eurocódigo 5. Hay que tener en cuenta que el modelo desarrollado tiene una geometría perfecta y se ha considerado un comportamiento elástico lineal. En la realidad, la deformación plástica local que se produce en la madera en las zonas en que se encuentran los dientes de las placas posibilita el contacto directo para holguras mayores, como tiene en cuenta el Eurocódigo 5. No obstante, superada esta discrepancia, los resultados obtenidos mediante elementos finitos proporcionan una información muy interesante. En primer lugar, confirman que efectivamente existe un valor de la holgura a partir del cual aparece la reducción de tensiones y, en segundo lugar, muestran que dicha reducción comienza a estabilizarse a partir de un segundo valor. En la gráfica se observa que este último valor está alrededor de 0,001 mm.

Se analiza a continuación los resultados de las tensiones normales σ_{22} y tangenciales τ_{12} medias en las placas. La figura 7 nos muestra la variación de los valores medios de dichas tensiones en las tres líneas frontera, tanto con contacto como sin él. En ambos casos, para una mejor interpretación, se muestran los valores absolutos.

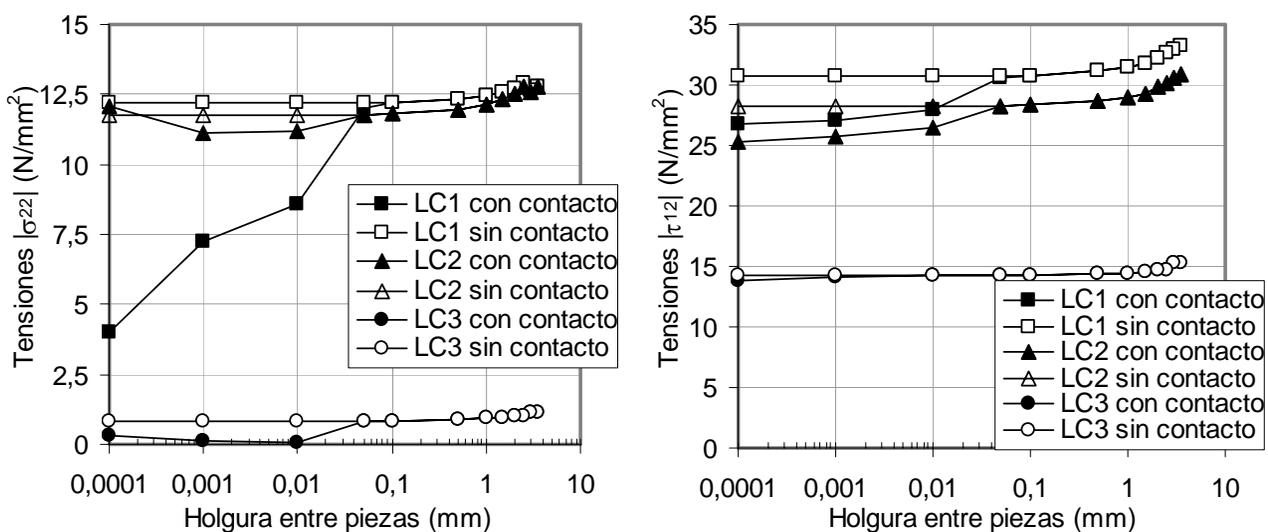


Fig. 7: Tensiones normales $|\sigma_{22}|$ y tangenciales $|\tau_{12}|$ en las tres líneas frontera con y sin contacto.

Se observa que las tensiones σ_{22} son altas en las líneas frontera horizontales 1 y 2, la primera sometida a compresión y la segunda a tracción, mientras que son muy pequeñas en la 3, que está sometida a una ligera tracción. Esto último se debe a que las componentes horizontales de las fuerzas que llegan al nudo a través de las barras de celosía tienen el mismo sentido. Si tuvieran sentidos contrarios, provocarían tracción o compresión sobre la línea frontera, pero como no es así la línea queda prácticamente descargada.

En cuanto a las tensiones tangenciales τ_{12} , vemos que, al igual que en el caso de las tensiones normales σ_{22} , la línea frontera 3 es la más descargada de las tres. No obstante, en esta ocasión los niveles de tensión sí son más apreciables, ya que las componentes verticales de las fuerzas que llegan a través de las barras de celosía son ahora de sentidos contrarios, dando lugar a la aparición de cortadura sobre la línea.

Para todas las tensiones, se observa que el efecto del contacto aparece para una holgura mínima de 0,05 mm. Dicho efecto es muy significativo en las tensiones σ_{22} de la línea frontera 1, que es la sometida a compresión, y mucho menos llamativo en el resto de casos.

Influencia del espesor de las placas y del nivel de cargas

En el apartado anterior se ha estudiado el efecto de la holgura entre las piezas de madera sobre las tensiones, observándose que existe un valor (0,05 mm) a partir del cual la transmisión de esfuerzo por contacto comienza a tener lugar, y otro (0,001 mm) por debajo del cual el porcentaje de esfuerzo transmitido se estabiliza. Para profundizar más en este punto, ha parecido interesante comprobar si la variación adicional de otras variables significativas puede suponer alguna influencia sobre estos valores. Concretamente, se han tenido en cuenta variaciones en el espesor de las placas y en el nivel de cargas.

En relación a la primera de ellas, se ha analizado la evolución de las tensiones con la holgura entre piezas, para ocho modelos de unión con placas de espesores variando entre 0,25 y 2 mm. En la figura 8 se presentan los resultados de las tensiones de adherencia τ_{13} en la barra de celosía 1, apreciándose de manera inmediata que esta tensión es prácticamente independiente del espesor de las placas, y que el efecto del contacto aparece en todos los casos en 0,05 mm y se estabiliza en 0,001 mm. Se concluye, por tanto, que estos valores no dependen del espesor de las placas. A la misma conclusión se llega con las tensiones σ_{22} y τ_{12} en la placa; aunque ahora, lógicamente, éstas disminuyen al aumentar el espesor.

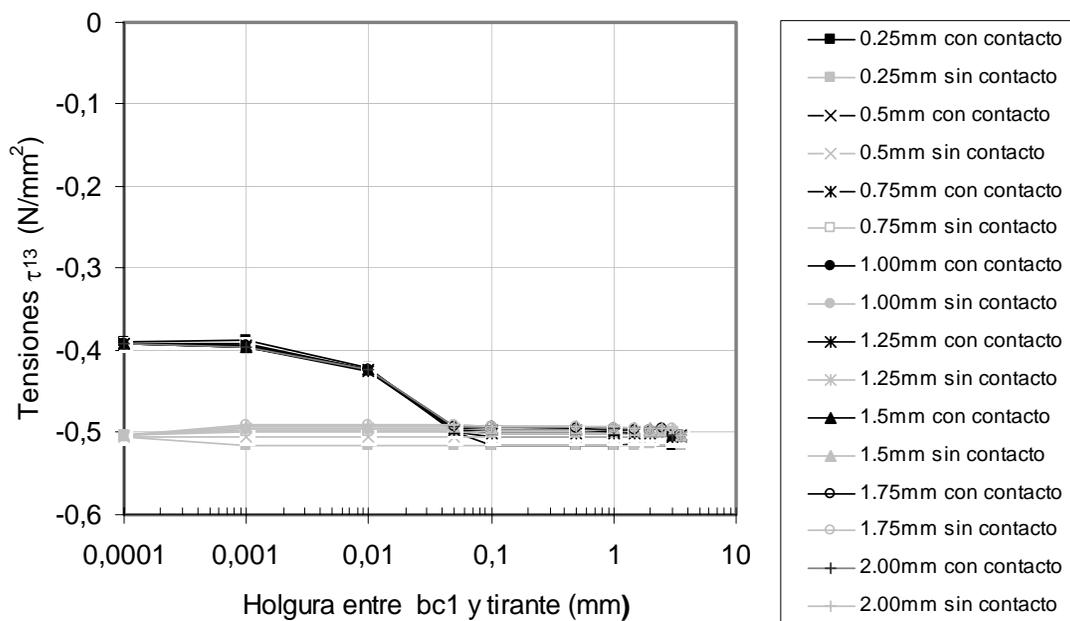


Fig. 8: Tensiones tangenciales τ_{13} en la barra de celosía 1 en función del espesor de la placa.

Para analizar el efecto del nivel de cargas, se ha estudiado la evolución de las tensiones con la holgura entre piezas, pero ahora para otros ocho modelos en los que todas las cargas del modelo inicial se multiplican por un coeficiente de carga que varía entre 0,1 y 5,0. La figura 9 vuelve a mostrar las tensiones τ_{13} en la barra de celosía 1, considerando que se ha permitido o no la transmisión de esfuerzo por contacto. En este caso, se observa el lógico incremento de tensiones al aumentar el nivel de carga; y se aprecia que, al crecer las cargas, el efecto del contacto comienza con mayores holguras. Así, puede verse que, para un coeficiente de carga de 5,0 (es decir, cargas 5 veces mayores que las del modelo inicial), el efecto del contacto se nota a partir de una holgura entre piezas de 0,5 mm (10 veces mayor que antes).

Influencia del ensamblaje del nudo

Finalmente, se ha realizado un último análisis para completar el estudio, con objeto de determinar hasta qué punto el alejarse del diseño ideal del nudo (que supone que los ejes de las tres barras deben ser concurrentes para evitar momentos en la unión) puede provocar una variación del nivel de

tensiones. El ensamblaje se ha caracterizado por la altura h_1 indicada en la imagen izquierda de la figura 10, que varía entre las situaciones extremas representadas a continuación en la misma figura.

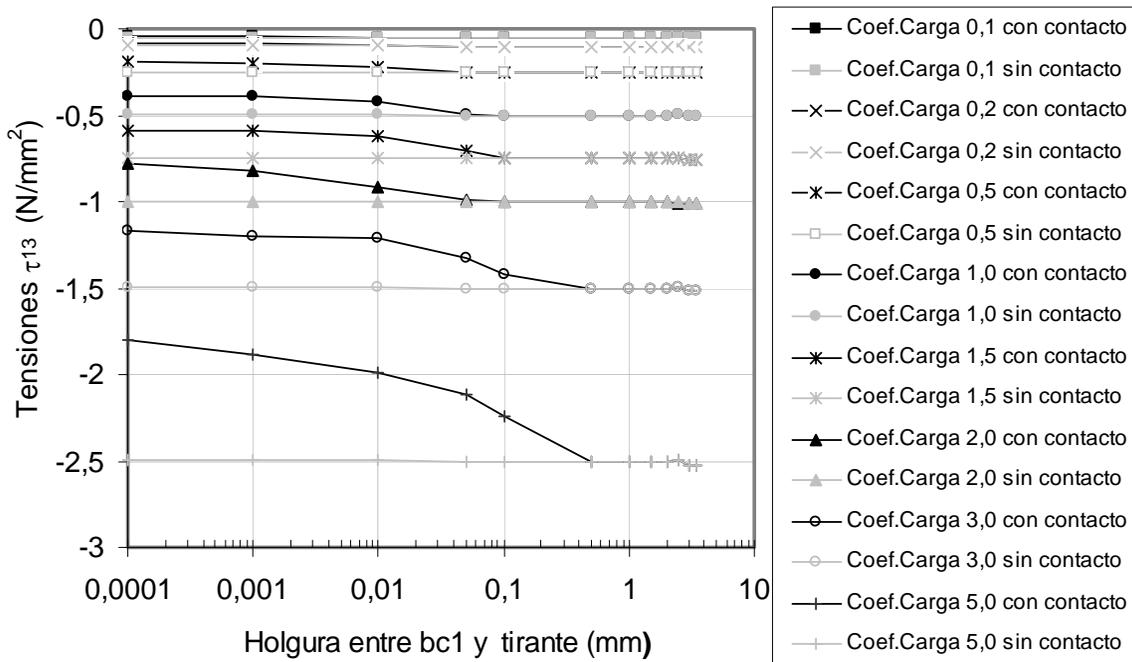


Fig. 9: Tensiones tangenciales τ_{13} en la barra de celosía 1 en función del nivel de carga.

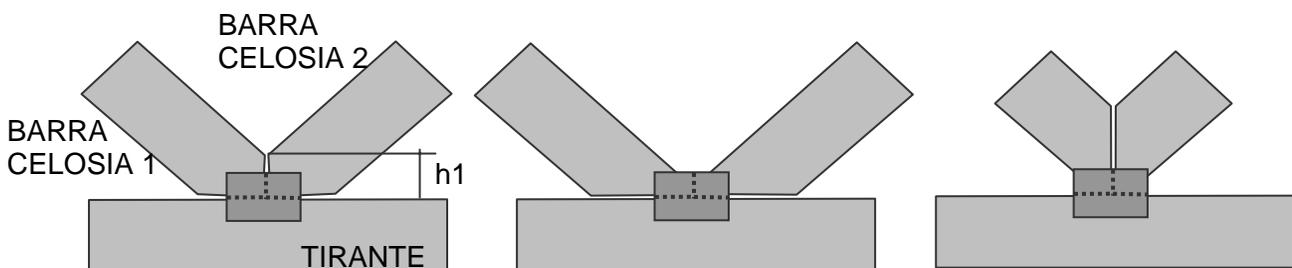


Fig. 10: Distintas posibilidades de ensamblaje en función de la variable h_1 .

Más concretamente, teniendo en cuenta que la altura eficaz de las placas es de 61,4 mm, el intervalo de variación de h_1 para un ensamblaje adecuado del nudo debe estar comprendido entre 35 mm (algo mayor que la semialtura de las placas) y 70 mm. Se ha repetido el estudio para ensamblajes en ese rango, mostrándose en la gráfica izquierda de la figura 11 los resultados de las tensiones τ_{13} en la barra de celosía 1, en función de la altura h_1 . Dicha gráfica muestra una variación poco significativa de las tensiones τ_{13} , atribuible al procedimiento que se utiliza en el método de los elementos finitos para realizar las uniones entre sólidos. Este procedimiento consiste en acoplar los desplazamientos entre cada nodo de la superficie del primer sólido, con los nodos más próximos de la superficie del segundo sólido. Al variar h_1 , se modifica la posición de los nodos en las barras de celosía, pero no así los de las placas. De este modo, los nodos que se acoplan para cada altura h_1 son distintos, ocasionando la ligera variación observada.

Se quiso también estudiar qué es lo que ocurre cuando la modificación de h_1 es tan extrema que lleva a las situaciones representadas en el centro y derecha de la figura 10. El rango de variación de h_1 se estableció entonces entre 5 y 105 mm, obteniéndose la gráfica de la derecha de la figura 11. El incremento de tensiones que se observa en los extremos del intervalo de h_1 es debido a que en

estos casos hay clavos de la placa que no quedan unidos a la madera, disminuyendo, por tanto, el área de anclaje.

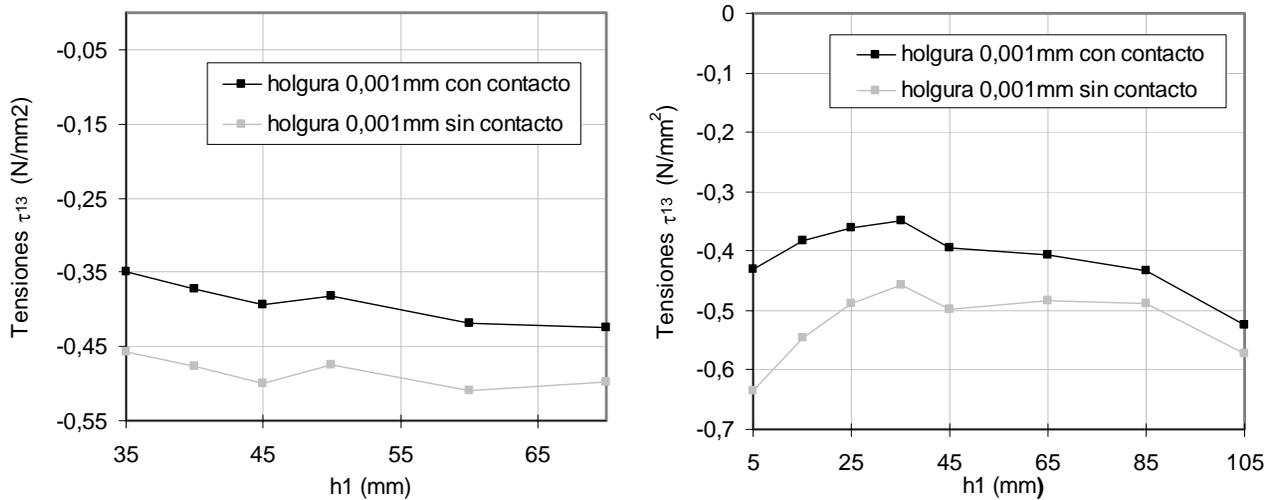


Fig. 11: Tensiones tangenciales τ_{13} en la barra de celosía 1 en función de la altura h_1 .

CONCLUSIONES

Del análisis de las tensiones de adherencia τ_{13} en las piezas de madera y de las tensiones normales σ_{22} y tangenciales τ_{12} en las placas metálicas, se han obtenido las conclusiones que se enumeran a continuación.

Como referencia para posteriores resultados, se estudió un modelo inicial, en el que se observó que la barra de madera sometida a mayor tensión de adherencia τ_{13} es la que trabaja a tracción, dado que en la que trabaja a compresión parte del esfuerzo se transmite por contacto directo entre las piezas. En cuanto a las tensiones en las placas, tanto σ_{22} como τ_{12} tienen sus máximos valores justo en la línea que se encuentra sobre la frontera entre las piezas de madera, siendo de nuevo ligeramente inferiores en la zona sobre la barra de celosía sometida a compresión, debido a la transmisión de esfuerzo por contacto.

En relación a la influencia de la holgura entre las piezas, los resultados confirman que existe un valor constante de la misma a partir del cual comienza a producirse la transmisión de esfuerzo con contacto a compresión, y otro valor por debajo del cual el porcentaje de esfuerzo transmitido se estabiliza. Estos valores están alejados de los que indica el Eurocódigo 5, debido a que el modelo desarrollado no tiene en cuenta la deformación plástica local que se produce en la madera en las zonas en que se encuentran los dientes de las placas.

Como era de esperar, los resultados confirman que los valores de la holgura comentados en el párrafo anterior, que marcan el inicio y la estabilización de la transmisión por contacto, no parecen verse afectados por el valor del espesor de las placas. Sin embargo, el primero de ellos sí depende de la magnitud de las cargas: cuanto mayores son éstas, mayor deformación provocan, de manera que el contacto lógicamente se produce con una holgura más amplia.

Finalmente, se ha comprobado que, aunque el ensamblaje del nudo no cumpla la condición de concurrencia entre los ejes de las tres barras para evitar momentos en la unión, esto no tiene una influencia significativa sobre las tensiones tangenciales de adherencia en las barras.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a dos proyectos subvencionados por las convocatorias de ayudas a proyectos de investigación de la Universidad de Salamanca código KAPB y de la junta de Castilla y León código SA066A08.

REFERENCIAS

ABAQUS User's Manual, versión 6.6., Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., Pawtucket, USA (2006).

Argüelles, R., F. Arriaga, y J.J. Martínez; *Estructuras de Madera. Diseño y Cálculo*, Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho (AITIM), Madrid, España (2003).

Ellegaard, P.; *Analysis of Timber Joints with Punched Metal Plate Fasteners – With Focus on Knee Joints*. Ph.D. Thesis: ISSN 1395-7953-R0206, University of Aalborg, Denmark (2002).

Ellegaard, P.; *Effect of Chord Splice Joints on Force Distribution and Deformations in Trusses with Punched Metal Plate Fasteners*, Holz und Roh als Werkstoff: 65, 469-475 (2007).

EN 1991 Eurocode 1, Actions on Structures, European Committee for Standardization, Bruselas, Belgica (2001).

EN 338; Structural Timber Strength. Classes, European Committee for Standardization, Bruselas, Belgica (2003).

EN 1995-1-1 Eurocode 5, Design of Timber Structures. Part 1-1, European Committee for Standardization, Bruselas, Belgica (2004).

Karadelis, J.N. y P. Brown; *Punched Metal Plate Timber Fasteners under Fatigue Loading*. Construction and Building Materials: 14, 99-108 (2000).

Kathleen, A.W.R. y K.K. Sashi; *Deflection of Metal Plate Connected Wood Trusses with Nontriangulated Openings*, J. Struct Eng.: 129(11), 1546-1558 (2003).

Kevarinmaki, A.; *Semi-rigid Behaviour of Nail Plate Joints*, Ph.D. Thesis, Helsinki University of Technology TKK-TRT-109 (2000).

Herzog, T. y otros cuatro autores; *Construire en Bois*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suiza (2003).

Larsen, H.J. y J.L. Jensen; *Influence of Semi-rigidity of Joints on the Behaviour of Timber Structures*, Prog. Struct. Engng. Mater.: 2, 267-277 (2000).

Mackerle, J.; *Finite Element Analysis of Fastening and Joining: A Bibliography (1990–2002)*, International Journal of Pressure Vessels and Piping: 80, 253-271 (2003).

Stehn, L. y K. Borjes; *The Influence of Nail Ductility on the Load Capacity of a Glulam Truss Structure*, Engineering Structures: 26, 809–816 (2004).

Thelandersson, S. y H.J. Larsen; *Timber Engineering*, Wiley & Sons (2003).

USDA; Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI (1998).