

MODELADO DE FALLA EN UNIONES TIPO CLAVIJA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE MADERA SOMETIDAS A CORTE

Pablo A. Lacourt^a, Francisco J. Crisafulli^b, Anibal E. Mirasso^c

^a*Becario de CONICET, Carrera de Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Parque Gral. San Martín, 5500 Campus Universitario, Mendoza, Argentina, placourt@mendoza-conicet.gob.ar,*

^b*Dirección de estudios tecnológicos IMERIS, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Parque Gral. San Martín, 5500 Campus Universitario, Mendoza, Argentina, fcrisafulli@fing.uncu.edu.ar*

^c*Facultad de Ingeniería e ITIC, Universidad Nacional de Cuyo, Centro Universitario, M5502JMA, Mendoza, Argentina, aemirasso@uncu.edu.ar*

Palabras clave: MEF, madera, unión tipo clavija, falla.

Resumen:

Se presenta en este trabajo una metodología para modelar la falla en uniones tipo clavija de miembros estructurales de madera sometidas a corte simple. Se utilizó un código comercial de elementos finitos para la construcción del modelo, en el que se incluyeron elementos hexaédricos isoparamétricos de 20 nodos para la geometría y elementos superficiales de 8 nodos para representar los pares de contacto friccionales. Se asignaron las propiedades de los materiales definiendo la ley constitutiva de los tensores elásticos según la simetría de cada material: transversalmente isotrópico para la madera e isotrópico para el acero. Se propone una estrategia para representar el aplastamiento de la madera en la cercanía a la unión por medio de una zona de transición que plastifica isotrópicamente. En el modelo de elementos finitos se utilizó un algoritmo de contacto tipo Lagrange Aumentado entre la clavija y la madera el cual se calibró ajustando el factor de rigidez normal así como también el coeficiente de fricción de Coulomb. Los modelos así construidos reproducen los patrones de carga-desplazamiento típicos para este tipo de uniones así como los valores de carga en el límite proporcional y carga de fluencia según las ecuaciones provistas por la norma NDS Wood Construction 2005. Adicionalmente fue posible representar el mecanismo de formación de rótulas plásticas en el elemento metálico y el aplastamiento en la madera según los modos de falla que predice el Modelo Europeo de Fluencia. El modelo desarrollado en este trabajo constituye un marco de referencia adecuado para el estudio de problemas estructurales y constructivos que se presentan en las uniones mecánicas tipo clavija de las estructuras de madera.

1 INTRODUCCIÓN

Las conexiones entre los miembros de una estructura son elementos críticos en el diseño ya que deben transferir cargas y proveer integridad estructural. Un diseño adecuado de uniones incorpora factores de seguridad para disminuir la probabilidad de falla bajo cargas de diseño, además de realizarse siguiendo guías desarrolladas en las normativas constructivas de cada región.

El Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 (Piter, 2011), adopta como base para el cálculo de valores nominales de resistencia al corte de elementos de fijación la norma National Design Specification (NDS) for Wood Construction norteamericana (AF&PA, 2005), la cual a su vez incorpora ecuaciones adaptadas del modelo Europeo de Fluencia (Soltis y Wilkinson, 1991).

Existe una gran cantidad de parámetros que influyen en el desempeño de las uniones clavadas entre los que se destacan parámetros del elemento de fijación (tipo de conexión, tamaño, ductilidad, rigidez, elasticidad, resistencia a tracción, etc.), parámetros de la madera (densidad, fricción, resistencia a compresión, elasticidad de la madera, etc.) y parámetros de la configuración de la unión (tipo de corte, espesor de los miembros, profundidad de penetración, espaciado entre elementos, etc.), véase Ehlbeck, 1979. Las fallas de resistencia ocurren usualmente debido a un mal diseño o a malas prácticas constructivas, como es el caso cuando no se respetan los espaciados mínimos recomendados en las uniones mecánicas de múltiples elementos de fijación.

En las últimas casi cuatro décadas el método de elementos finitos (MEF) se ha convertido en la técnica prevalente usada para el análisis de fenómenos físicos en el campo de la mecánica estructural y de sólidos. El MEF puede estudiar uniones tipo clavija con contacto deformable de deslizamiento finito donde los efectos friccionales de la distribución de carga en cada superficie de contacto son incluidos. Los estudios de conexiones tipo clavija son complejos porque los modelos deben ser tridimensionales ya que las soluciones bidimensionales dan resultados más rígidos y resistentes (Mackerle, 2003), y tomar en consideración muchos factores tales como las no-linealidades geométricas y de los materiales, el contacto, la fricción, el deslizamiento y la fractura. La calidad de los resultados computados también depende en el tipo de elemento utilizado, la discretización, ecuaciones constitutivas, tamaño de paso, descripción cinemática, etc.

El propósito de este trabajo es desarrollar y calibrar un modelo de elementos finitos que permita representar el comportamiento de falla de las uniones mecánicas tipo clavija en el problema de referencia conocido de las uniones en corte simple, a fin de poder estudiar posteriormente el comportamiento de configuraciones más complejas tales como uniones con múltiples elementos de fijación que no respetan los criterios de diseño recomendados.

2 MODELO DE FALLA

El Modelo Europeo de Falla (EYM) fue adoptado por la NDS para determinar la capacidad de carga lateral de las fijaciones mecánicas (Williamson, 2002). Este modelo es bastante preciso y conservador en la predicción del comportamiento real de las fijaciones. Los modos de falla que plantea el modelo involucran el fenómeno de aplastamiento de la madera en la zona de contacto del elemento de fijación, tanto en el elemento principal como en el elemento lateral; la formación de una o más rotulas plásticas en el elemento de fijación o bien una combinación de ambos mecanismos (ver figura 1).

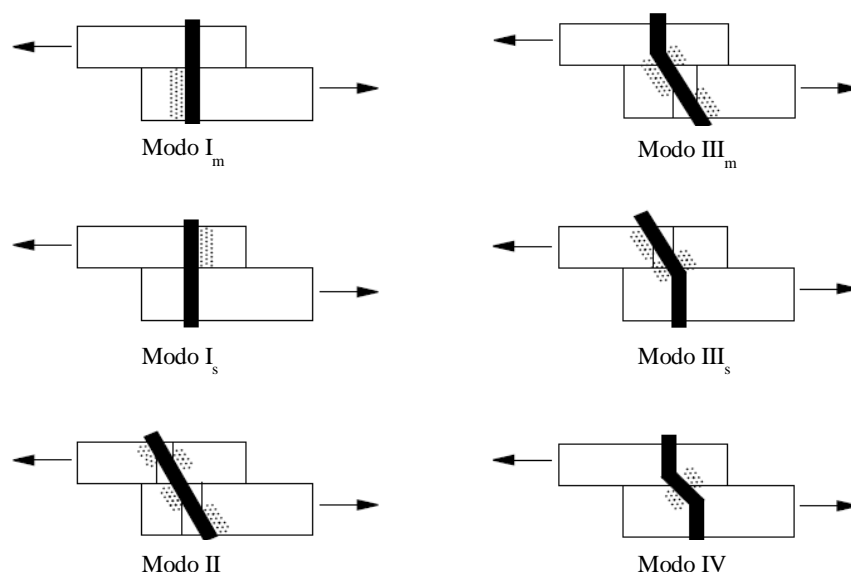


Figura 1: Modos de falla del EYM para elementos de fijación tipo clavija en carga lateral (Williamson, 2002)

Este modelo está basado en las ecuaciones de equilibrio resultantes del diagrama de cuerpo libre de una clavija en un elemento de madera. Hay una buena correlación entre los valores estimados por el EYM y resultados experimentales. El EYM asume que la capacidad de una unión tipo clavija se alcanza ya sea que la resistencia compresiva de la madera en contacto con la clavija es alcanzada (Modos I y II de fluencia) o que una o más rótulas plásticas se desarrollan en la clavija (Modos III y IV de fluencia). Las ecuaciones generales para calcular valores de resistencia lateral de fijaciones tipo clavija para cada modo se muestran en el [Apéndice I](#).

Estas suposiciones proporcionan varios modos de falla en función de las dimensiones y resistencia de los miembros de madera y de la clavija. Para una dada conexión, el valor nominal de carga lateral de diseño será el menor valor de los modos de falla posibles.

2.1 Resistencia al aplastamiento de la madera

Para uniones con elementos de fijación de tipo clavija sometidos a carga lateral la NDS provee ecuaciones para calcular la resistencia al aplastamiento (Dowel Bearing Strength, DBS) en la zona de contacto de la madera. Para diámetros de clavija menores a 1/4" no se distingue entre la dirección transversal y paralela a las fibras, la resistencia al aplastamiento F_e se calcula según la [ecuación 1](#):

$$F_e = 114 \times G^{1.84} \text{ [MPa]}. \quad (1)$$

donde G es la gravedad específica anhidra de la madera.

Para diámetros mayores o iguales a 1/4" la dirección de carga tiene influencia en el comportamiento mecánico de la unión y se distingue entre la resistencia al aplastamiento bajo carga paralela a las fibras, $F_{e\parallel}$, y resistencia al aplastamiento bajo carga perpendicular a las fibras, $F_{e\perp}$, que se calculan según la [ecuación 2](#):

$$\begin{aligned} F_{e\parallel} &= 77.2 \times G \text{ [MPa]}, \\ F_{e\perp} &= 212 \times G^{1.45} / \sqrt{D} \text{ [MPa]}. \end{aligned} \quad (2)$$

donde D es el diámetro del elemento de fijación en [mm].

2.2 Ocurrencia de los modos de falla

Para conocer la frecuencia de aparición de los distintos modos de falla se calcularon los valores de nominales de resistencia al corte simple lateral y su modo de falla asociado para un rango de combinaciones de parámetros. Se tomaron como parámetros geométricos del elemento de fijación el diámetro y longitud de clavos según norma IRAM 5123 Clavos de punta París (Tabla 1), los cuales se encuentran disponibles online.

L [mm]	25.4	38.1	50.8	63.5	76.2	88.9	101.6	127	152.4	177.4	203.2
D [mm]	2.15	2.45	2.87	3.33	3.76	4.11	4.88	5.5	5.5	6.65	6.65

Tabla 1: Dimensiones de clavos según norma IRAM 5123 Clavos de punta París. L: longitud, D: diámetro.

Se tomaron como parámetros físicos y geométricos de la configuración de la unión la densidad de la madera, asumida igual para el miembro principal y el miembro lateral, y el espesor del miembro lateral (Tabla 2).

Densidad [g/cm ³]	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
Espesor del miembro lateral [mm]	19.05	25.4	31.75	38.1	44.45

Tabla 2: Densidad y espesor de miembro lateral utilizados para determinar el valor nominal de resistencia al corte simple lateral y modo de falla asociado.

Los valores nominales para el rango de parámetros estudiado se muestran en el Apéndice II. La frecuencia de aparición de los modos de falla para este rango de parámetros se presenta en la figura 2.

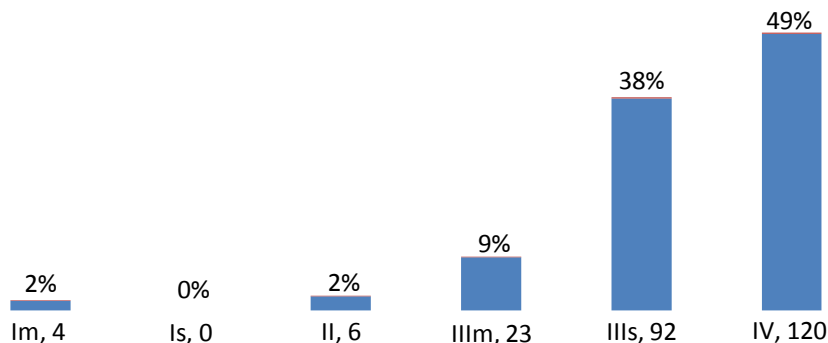


Figura 2: Frecuencia de aparición de los modos de falla según la NDS para el rango de parámetros estudiado.

Se observa que para el rango de parámetros estudiado los modos con mayor ocurrencia son IIIs y IV. Estos modos se caracterizan por la formación de una (IIIs) o dos (IV) rótulas plásticas en el elemento de fijación. Esta característica de la falla ha sido considerada por muchos investigadores como una forma posible de disipación de energía aportada por acciones dinámicas (Chui y otros, 1998).

3 MODELADO DE FALLA BAJO CARGA LATERAL

3.1 Descripción del modelo

Un modelo de elementos finitos tridimensional fue construido para estudiar la falla en la unión de dos miembros de madera con un elemento de fijación tipo clavija bajo carga lateral.

Se utilizó el código comercial de elementos finitos ANSYS Workbench. El modelo fue construido usando las capacidades de lenguaje de diseño paramétrico de ANSYS Mechanical - lenguaje APDL. Tanto los miembros de madera como la clavija de acero fueron modelados usando elementos hexaédricos isoparamétricos de 20-nodos (SOLID186).

La Zona Cercana a la Clavija (ZCC) se representó geoméricamente como un cuerpo cilíndrico hueco independiente, con el fin de asignar las propiedades de plastificación en la región de interés. El contacto entre la clavija y la ZCC fue modelado a partir de elementos superficiales de 8 nodos para representar el par de contacto friccional (CONTA174 y TARGE170) entre las superficies de contacto y objetivo, asumiendo ambas superficies como flexibles. El contacto entre la ZCC y los miembros de madera fue modelado a partir de un par de contacto tipo adherido, sin deslizamiento ni separación, de modo tal que se garantiza la continuidad mecánica de las solicitaciones (ANSYS Inc., 2009).

La figura 3 muestra una vista general de la malla de elementos utilizada (a) junto a un detalle la configuración en la zona cercana a la clavija (b).

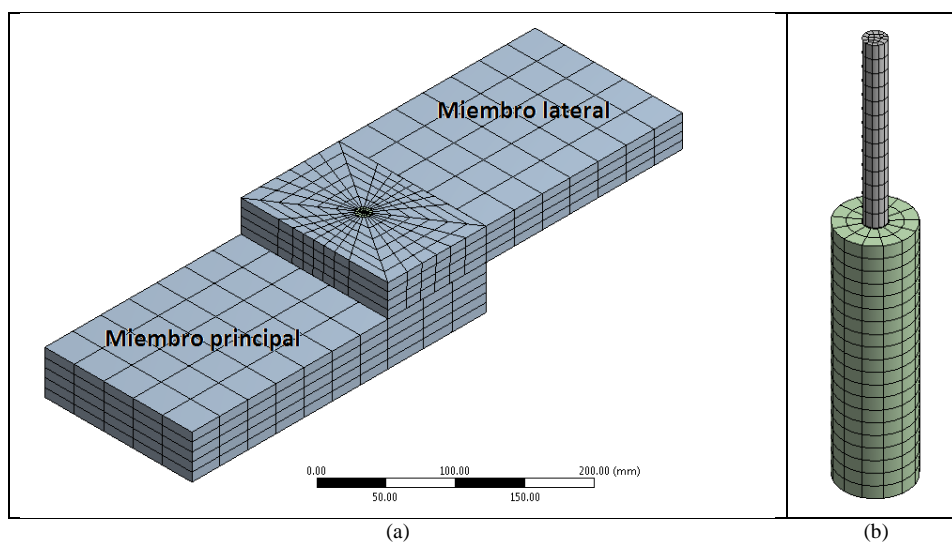


Figura 3: Vista general de la malla de elementos utilizada (a), detalle de la zona cercana a la clavija (b).

Se ajustaron los parámetros de generación de malla de ANSYS para obtener una buena relación precisión-velocidad de convergencia. El número final de nodos fue de 34130 distribuidos en 6774 elementos. La configuración utilizada para el mallado fue: Physics Preferences, Mechanical; Relevance, -100; Relevance Center, Coarse. El tamaño de elemento en la zona de contacto entre el elemento de fijación y la ZCC se fijó en 1 mm. El tamaño de elemento en la interfaz entre la ZCC y los miembros principal y lateral se fijó en 2 mm. Se aplicó un mallado mapeado en la proximidad de la unión para los miembros principal y lateral y se utilizó el método de mallado Sweep.

3.2 Parámetros físicos y geométricos del modelo

Para estudiar el comportamiento de falla de la unión, se asumió igual resistencia al aplastamiento (Dowel Bearing Strength, DBS) para los miembros principal y lateral, y un espesor del miembro lateral, T_s , constante de 31.75 mm ($1\frac{1}{4}$ pulgadas). Se realizó una serie de simulaciones numéricas variando los parámetros diámetro (D) y longitud (L) del elemento de fijación, así como también el tensor elástico ortotrópico definido en función de la densidad (G) de los miembros de madera. Las seis combinaciones de parámetros utilizadas en las simulaciones numéricas se muestran en la [Tabla 3](#).

Simulación		1	2	3	4	5	6
D	[mm]	3.76	3.76	3.76	4.11	4.11	4.11
L	[mm]	76.2	76.2	76.2	88.9	88.9	88.9
G	[g/cm ³]	0.6	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4

Tabla 3: Configuraciones de parámetros utilizados en las simulaciones numéricas.

Los restantes parámetros geométricos que involucran las dimensiones de los elementos estructurales se fijaron en los siguientes valores: miembro lateral, 300 mm x 150 mm x 31.75 mm; miembro principal, 300 mm x 150 mm x (L-Ts); diámetro de la ZCC, 4xD.

3.2.1 Comportamiento elástico de la madera

La densidad o gravedad específica anhidra de la madera es un indicador del comportamiento elástico para cada especie, es decir, una madera densa será en general una madera más rígida. El tensor de compliancia S , también llamado matriz de flexibilidad, define las propiedades elásticas del medio expresada en términos de la ecuación 3, relacionado elásticamente las tensiones, σ , con las deformaciones, ε .

$$[\varepsilon] = [S][\sigma] \quad (3)$$

Se estableció un conjunto de siete constantes elásticas para cada valor de densidad (Tabla 4). Estas constantes conforman un tensor elástico ortotrópico tridimensional, estableciendo el módulo elástico E en las direcciones paralela, \parallel , y transversal, \perp , a las fibras; así como el módulo de corte G y coeficiente de Poisson ν en los planos que estas direcciones conforman ($\parallel\perp$, $\perp\perp$). La dirección paralela a las fibras se considera la dirección principal.

G	E_{\parallel}	E_{\perp}	$G_{\parallel\perp}$	$G_{\perp\perp}$	$\nu_{\perp\perp}$	$\nu_{\perp\parallel}$	$\nu_{\parallel\perp}$
0.6	13971	532	1029	192	0.596	0.0244	0.449
0.5	12406	473	914	170	0.596	0.0244	0.449
0.4	10728	409	790	147	0.596	0.0244	0.449

Tabla 4: Conjunto de constantes elásticas que conforman los tensores elástico ortotrópicos usados.

Utilizando las constantes elásticas de la Tabla 4, puede escribirse el tensor S de modo tal que se represente el comportamiento transversalmente isotrópico de la madera, de acuerdo a la ecuación 4.

Para cada una de las simulaciones numéricas se asignaron los tensores de compliancia S a los elementos principal y lateral de acuerdo a la densidad de madera usada en cada simulación (Tablas 3 y 4). Se estableció un sistema de coordenadas propio a cada cuerpo de modo tal que las constantes elásticas en cada elemento estén orientadas adecuadamente en función de la dirección principal.

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{\perp}} & -\frac{\nu_{\perp\perp}}{E_{\perp}} & -\frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\parallel}} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_{\perp}} & -\frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\parallel}} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_{\parallel}} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{\perp\parallel}} & 0 & 0 \\ & sim. & & & \frac{1}{G_{\perp\parallel}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{\perp\perp}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.2.2 Comportamiento mecánico del elemento de fijación

Para modelar el elemento de fijación tipo clavija se utilizó el material predefinido por ANSYS Mechanical de acero estructural, el cual posee una formulación isotrópica elástica con un módulo de Young de 2×10^5 MPa. Este material se configuró para permitir un comportamiento en el rango plástico de endurecimiento bilineal con una tensión de fluencia de 240 MPa, módulo tangente de 0.24 MPa y tensión última en tracción: 400 MPa.

3.3 Aplastamiento de la madera en la zona cercana a la clavija

El comportamiento fuera del rango elástico de la madera varía significativamente con la dirección en la se orientan las fibras respecto de las solicitaciones. En general bajo cargas compresivas, luego de superada la resistencia al aplastamiento, la tensión varía a medida que la deformación aumenta hasta un cierto punto en el cual ocurre un proceso de densificación causado por el aplastamiento de las celdas en las fibras (Holmberg y otros, 1999). Este proceso se caracteriza por un aumento súbito de la rigidez. El comportamiento plástico previo a la densificación es de especial interés en este estudio.

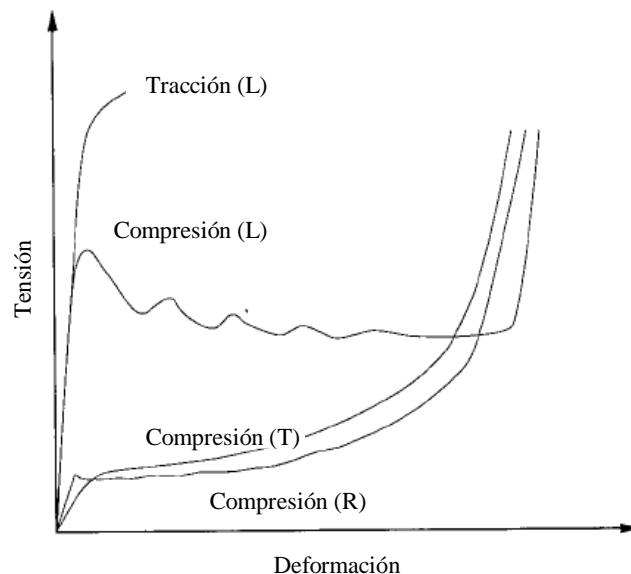


Figura 4: Curvas típicas de tensión-deformación para la madera cargada en compresión en las direcciones

longitudinal, radial y tangencial, y para tracción en la dirección longitudinal (Holmberg y otros, 1999).

La figura 4 esquematiza algunos de los comportamientos típicos de la madera en función de la orientación de la sollicitación. Si bien la compresión longitudinal muestra una degradación de la rigidez antes de la densificación, en el rango de cargas hasta el desplazamiento de fluencia de la unión (5% del diámetro del clavo), puede considerarse que existe un leve fenómeno de endurecimiento o aumento de la rigidez. Estudios anteriores realizados por otros investigadores han representado satisfactoriamente el aplastamiento de las fibras de la madera mediante una aproximación bilineal (Dias y otros, 2007).

La ZCC está definida con un diámetro igual a cuatro veces el diámetro del elemento de fijación, y sus propiedades materiales caracterizadas por elasticidad isotrópica con endurecimiento bilineal por deformación plástica. La figura 5 muestra el comportamiento plástico bilineal tensión-deformación asignado a la ZCC en la simulación.

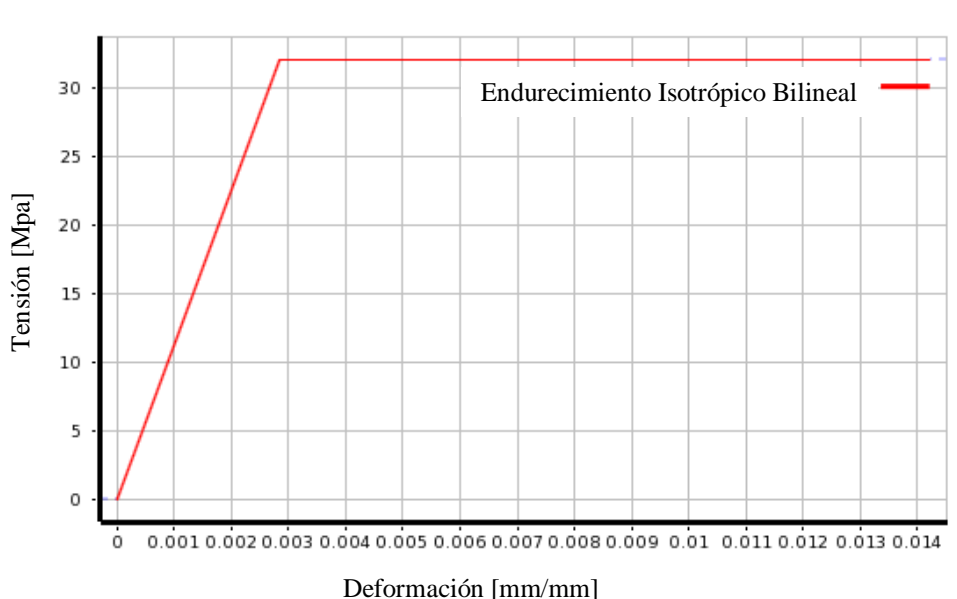


Figura 5: Comportamiento plástico bilineal tensión-deformación asignado a la ZCC en la simulación.

Los parámetros que definen el comportamiento bilineal son la tensión de fluencia, el módulo elástico o rigidez inicial y el módulo tangente o rigidez final. La tensión de fluencia se definió como igual a la resistencia al aplastamiento de la madera F_e , que está dada por las Ecs.1 y 2, la cual es función de la gravedad específica anhidra de la madera y del diámetro del elemento de unión. El módulo tangente se definió como el 0.1% del valor de la tensión de fluencia. Para los casos estudiados, los valores de F_e asignados en las simulaciones numéricas se muestran en la Tabla 5.

Simulación	1	2	3	4	5	6
G [g/cm ³]	0.6	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4
F_e [N/mm ²]	44.8	32.1	21.4	44.8	32.1	21.4
D mm	3.76	3.76	3.76	4.11	4.11	4.11

Tabla 5: Valores de G , F_e y D asignados en las simulaciones numéricas.

Las propiedades en el rango elástico de la ZCC se definieron como material de elasticidad isotrópica, tomando como constantes elásticas el módulo de Young en la dirección longitudinal a las fibras de acuerdo con la Tabla 4 y como coeficiente de Poisson 0.499.

3.4 Influencia de los parámetros de contacto

El modelo de contacto está gobernado por un importante número de parámetros entre los que se destacan la rigidez normal del contacto, el factor de penetración máxima, el modelo de fricción y el algoritmo de contacto utilizado. La definición de un par de contacto requiere la designación de superficies objetivo (mallada con elementos TARGE170) y de contacto (mallada con elementos CONTA174). Adicionalmente puede considerarse la separación (GAP) existente entre el elemento de fijación y el agujero.

3.4.1 Tipo de contacto

La tabla 6 resume los distintos tipos de contacto que pueden formularse en ANSYS Mechanical (ANSYS Inc., 2010).

Tipo de contacto	Iteraciones	Comportamiento Normal (Separación)	Comportamiento Tangencial (Deslizamiento)
Adherido	Simple	NO	NO
Sin separación	Simple	NO	SI
Sin fricción	Múltiples	SI	SI
Áspero	Múltiples	SI	NO
Friccional	Múltiples	SI	SI

Tabla 6: Tipos de contacto que pueden formularse en ANSYS Mechanical.

La formulación tipo friccional es la que mejor representa la interacción entre la madera y el elemento de fijación, dado que permite la separación de las superficies de contacto, el deslizamiento entre partes y toma en consideración las fuerzas de fricción que se desarrollan en la interfaz. Uno de los parámetros que es necesario conocer para poder modelar correctamente esta interacción es el coeficiente de fricción entre los dos elementos.

3.4.2 Modelo de fricción

El tipo de contacto friccional utiliza un modelo básico de fricción de Coulomb. En este modelo de fricción, las superficies en contacto pueden soportar esfuerzos de corte hasta cierta magnitud a lo largo de la interfaz antes de comenzar a deslizarse relativamente entre sí. Se determinó un coeficiente de fricción de 0.5 en base a la experiencia documentada en la literatura publicada (Ehlbeck, 1979).

3.4.3 Algoritmo de contacto y rigidez normal

Se utilizó un algoritmo de contacto tipo Lagrange Aumentado, el cual ha sido utilizado exitosamente por otros autores (Kharouf y otros, 2003). El método lagrangiano aumentado requiere la definición de la rigidez tangencial y normal del contacto. La relación de rigidez entre dos cuerpos debe establecerse para que ocurra el contacto ya que sin rigidez de contacto los cuerpos se atravesarían mutuamente. Esta relación es generada a través de un "resorte elástico" que se coloca entre los dos cuerpos.

La rigidez normal regula la cantidad de penetración o incompatibilidad entre las superficies de contacto y objetivo. Un alto valor de rigidez disminuye la cantidad de penetración pero puede ocasionar dificultades en la convergencia numérica por un condicionamiento de la matriz de rigidez global, mientras que un valor bajo de rigidez puede ocasionar una cantidad de penetración que produzca una solución inadecuada.

Idealmente, no debería haber penetración, pero esto implica rigidez infinita, lo que llevaría

a inestabilidades numéricas. El valor de rigidez de contacto que es computado por ANSYS depende de la rigidez relativa de los cuerpos en contacto (módulo de elasticidad volumétrico del elemento en contacto) existiendo la posibilidad de escalar esta rigidez a través del factor Normal Penalty Stiffness Factor, también llamado FKN. Comúnmente este factor va de un rango de 0.01 a 1.0, siendo el valor por defecto 1.0 apropiado para deformación volumétrica.

Santos y otros (2008) encontraron una relación directamente proporcional entre el parámetro FKN y el módulo fundacional (pendiente de la curva carga-desplazamiento en el rango lineal), e inversamente proporcional con la penetración del contacto, determinando que valores de FKN debajo de 1 dan buenas aproximaciones. Las simulaciones numéricas en este trabajo se realizaron con un valor de FKN de 0.1. Para todos los otros parámetros de contacto se utilizaron valores por defecto que provee ANSYS Mechanical.

Para calibrar los parámetros de modelado se realizó una serie de simulaciones numéricas con diferentes configuraciones de contacto, las cuales se indican en la tabla 7.

Configuración	ZCC	Contacto	Coef. Fricción	FKN	Actualiza rigidez
A	NO	Adherido	N/A	N/A	N/A
B	NO	Friccional	0.2	1	NO
C	SI	Friccional	0.2	1	NO
D	SI	Friccional	0.5	1	NO
E	SI	Friccional	0.5	0.1	NO
F	SI	Friccional	0.5	0.1	SI

Tabla 7: Configuraciones de parámetros de contacto utilizadas para la calibración del modelo.

La figura 6 muestra diferentes curvas carga-deformación obtenidas en las simulaciones numéricas para las configuraciones de parámetros de contacto indicadas en la Tabla 7.

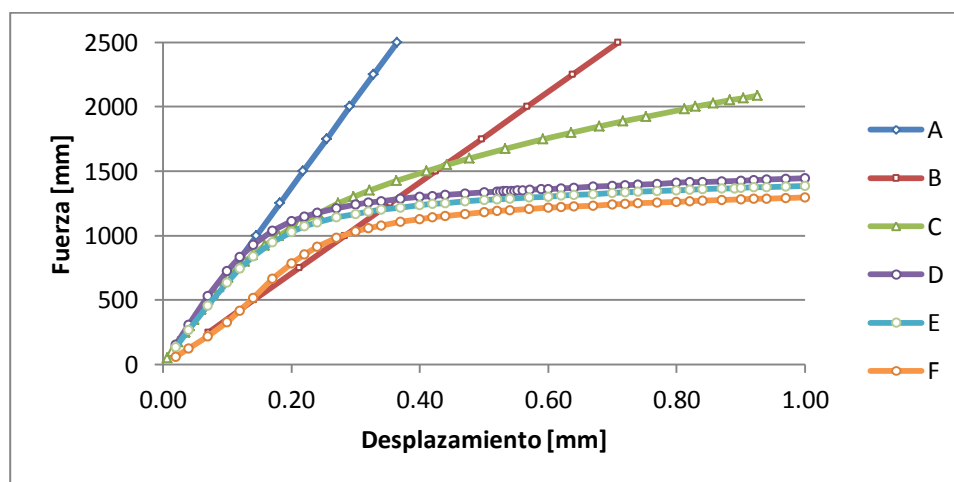


Figura 6: Curvas carga-deformación obtenidas en las simulaciones numéricas para distintas configuraciones de parámetros de contacto.

La curva correspondiente a la configuración F (Fig. 6) es la que mejor representa el comportamiento carga-desplazamiento típico observado en los ensayos de uniones en corte simple.

3.5 Solicitaciones y vínculos

Para garantizar la estabilidad de los cuerpos involucrados en el modelo, se restringió el

movimiento de los miembros principal (MP) y lateral (ML) de la unión aplicando apoyos sin fricción en las caras: superior de ML, inferior de MP, laterales de ML y MP, de modo tal que sólo pudieran desplazarse en la dirección principal, evitando rotaciones y otros movimientos de cuerpo rígido. El apoyo fijo se ubicó en la cara anterior del MP y la fuerza se aplicó distribuida sobre la cara posterior del ML (ver figura 7). La carga se aplicó en 20 incrementos, siendo la carga máxima aplicada en cada simulación superior a la carga de fluencia estimada según la NDS para cada configuración a fin de garantizar la formación de un mecanismo de falla.

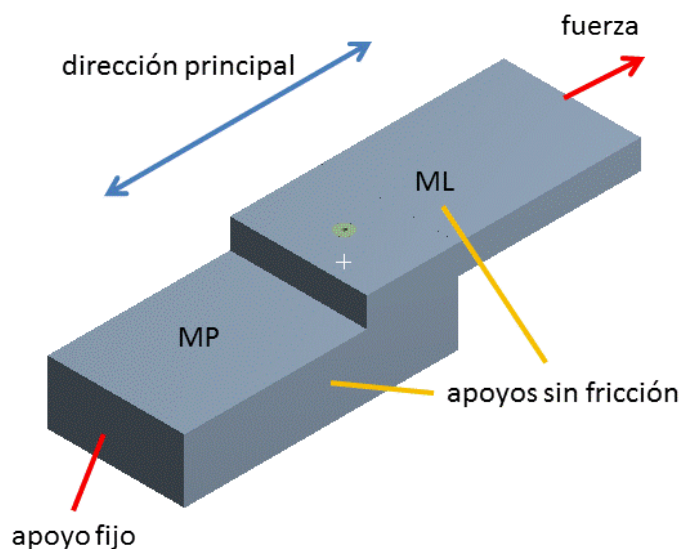


Figura 7: Configuración de vínculos y solicitaciones de las simulaciones numéricas.

4 RESULTADOS

4.1 Modo de falla

Los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas logran reproducir efectivamente el modo de falla dominante para la configuración de ensayo representada. En la figura 8 pueden observarse las dos rótulas plásticas formadas en el elemento de fijación tanto en la zona inserta en el miembro lateral como en el miembro principal, para la simulación N°2.

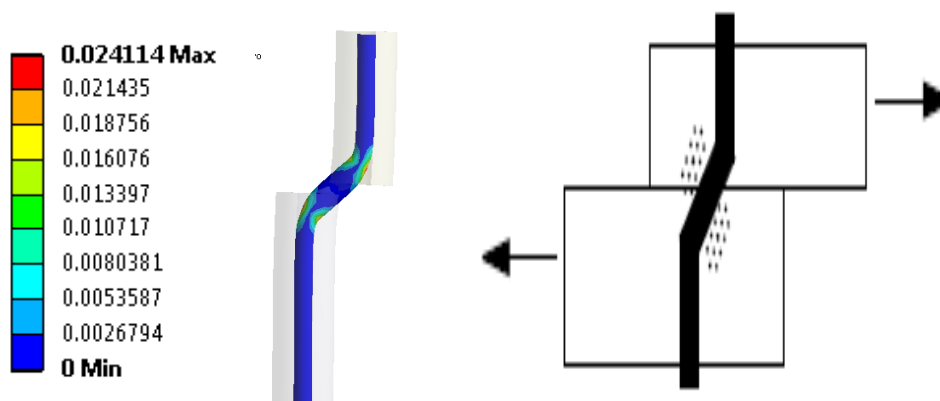


Figura 8: Izq., Deformación plástica en la clavija (aumento x18); Der., Modo de falla IV del EYM.

En la figura 9 se muestra el estado, tensión, presión y deformación de las superficies en

contacto para la simulación N°2.

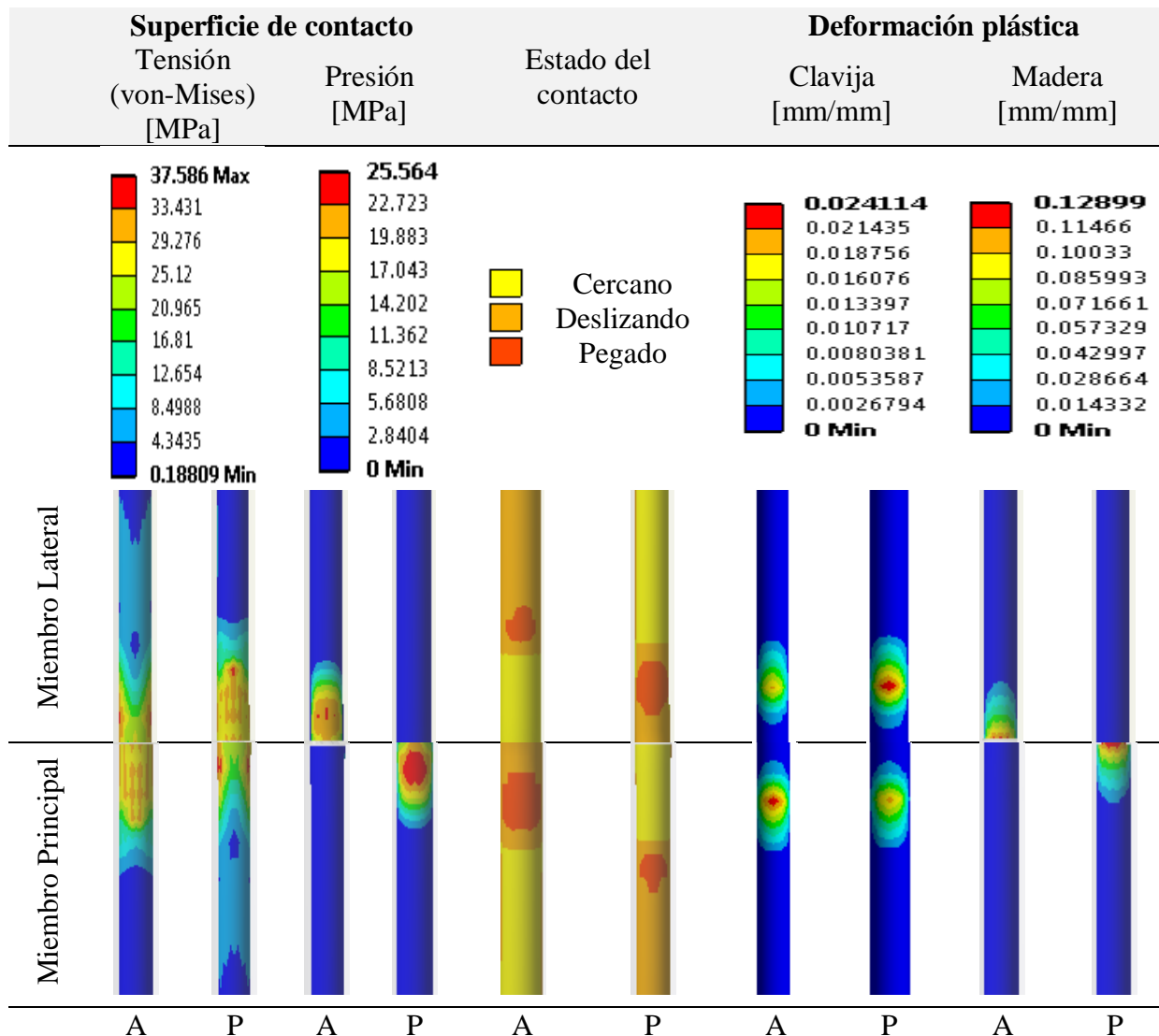


Figura 9: Tensión, Presión, Estado de contacto y Deformación de plástica de las superficies en contacto. Vistas anterior (A) y posterior (P). Simulación N°2.

4.2 Valores nominales y curva carga-desplazamiento

El valor nominal de resistencia al corte lateral para elementos de unión tipo clavija se calcula multiplicado por un factor de reducción (coeficiente de seguridad) al valor de fluencia de la unión obtenido a partir de las ecuaciones de los modos de falla (NDS 2005). En los ensayos de corte simple, la carga de fluencia se obtiene de hallar el punto en el cual la curva fuerza-desplazamiento interseca a una recta paralela a la tangente del rango elástico desplazada un 5% del diámetro del elemento de unión.

Para calcular la carga en el límite proporcional se realizó un ajuste lineal para los valores de la porción lineal de la curva carga-desplazamiento, omitiendo los valores iniciales correspondientes a la precarga. La pendiente de la recta paralela al rango lineal también se conoce como módulo de deslizamiento de la unión. La figura 10 muestra la curva carga-desplazamiento obtenida en la simulación para la simulación N°2.

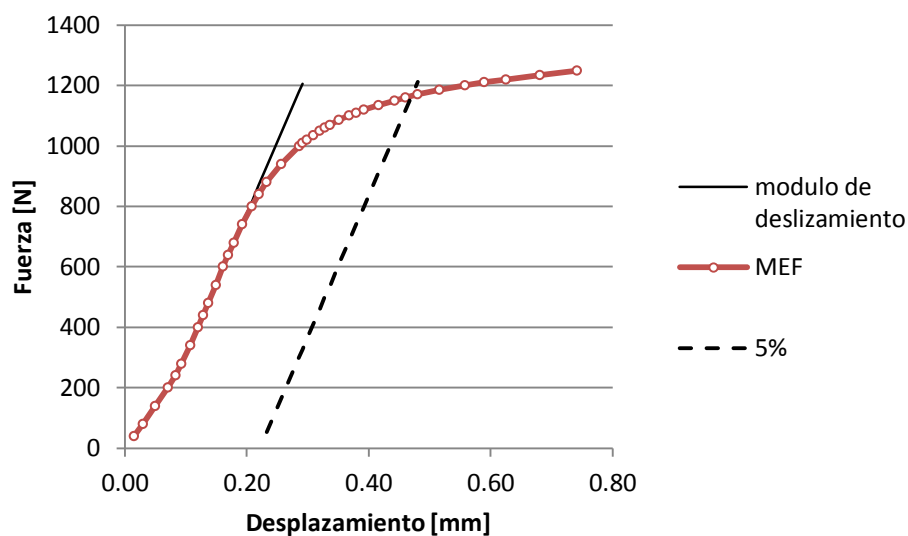


Figura 10: Curva carga-desplazamiento obtenida en la simulación N°2. $D=3.76$ mm, $G=0.5g/cm^3$

El Reporte Técnico N°12 de la American Forest & Paper Association proporciona ecuaciones y tablas para predecir las cargas en el límite proporcional, carga de fluencia y carga última (AF&PA, 1999). En la tabla 8 se comparan los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas por el método de elementos finitos (MEF) con los especificados por la NDS para la carga en el límite proporcional (LP) y la carga de fluencia (5%), todos los valores están expresados en N.

	1		2		3		4		5		6	
	MEF	NDS	MEF	NDS	MEF	NDS	MEF	NDS	MEF	NDS	MEF	NDS
LP	850	805	740	730	620	648	985	955	870	866	770	769
5%	1400	1360	1170	1150	935	936	1650	1624	1400	1374	1120	1119

Tabla 8: Resultados de las simulaciones numéricas y los especificados por AF&PA (AF&PA, 1999).

Los resultados de la tabla 8 se muestran gráficamente en la figura 11.

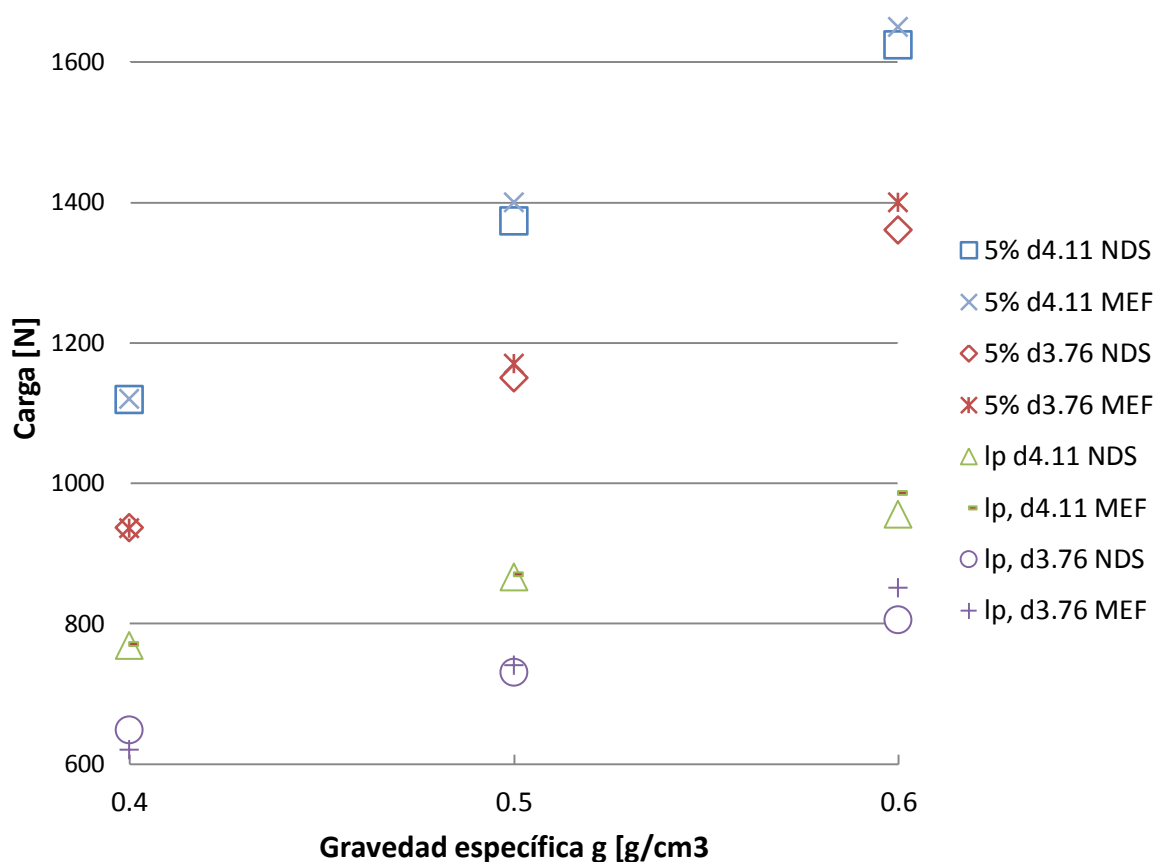


Figura 11: Carga en el límite de proporcionalidad (Ip) y de fluencia (5%) según MEF y NDS.

El error relativo absoluto máximo encontrado entre los valores que predice la NDS y los valores obtenidos por el MEF tanto para carga en el límite proporcional y como para carga de fluencia es inferior al 6%.

5 CONCLUSIONES

La buena correlación entre los valores obtenidos por el MEF y las ecuaciones de la NDS demuestran que las hipótesis asumidas en el desarrollo del modelo son correctas así como también que las propiedades mecánicas determinadas para la zona elástica y plástica representan correctamente el campo de tensiones y deformaciones que se desarrolla en los distintos componentes de la unión.

El modelo construido reproduce los patrones de carga-desplazamiento típicos para este tipo de uniones y permite estimar los valores de diseño con precisión (carga en el límite proporcional y carga al 5% de deformación según las ecuaciones provistas por la norma NDS Wood Construction 2005). Adicionalmente fue posible representar correctamente el modo de falla que predice el Modelo Europeo de Fluencia que involucra un mecanismo de formación de rótulas plásticas en el elemento metálico y el aplastamiento en la madera.

El modelo desarrollado en este trabajo constituye un marco de referencia adecuado para el estudio de problemas estructurales y constructivos que se presentan en las uniones mecánicas tipo clavija de las estructuras de madera, si bien no contempla los modos de falla propios de la mecánica de fractura aplicada a este material.

6 REFERENCIAS

- American Forest & Paper Association (AF&PA), *NDS National Design Specification for Wood Construction*, American Wood Council, 2005
- American Forest & Paper Association (AF&PA), *General Dowel Equations For Calculating Lateral Connection Values*, Technical Report 12, 1999
- ANSYS® Workbench, Release 12.0, *Help System, Mechanical User's Guide*, ANSYS Inc., 2009
- Chui Y.H., Ni C., Jiang L., Finite element model for nailed wood joints under reversed cyclic load, *Journal of Structural Engineering*, ASCE 124(1):96–102, 1998
- Dias, A.M.P.G., Van de Kuilen, J.W., Lopes, S., Cruz, H., A non-linear 3D FEM model to simulate timber–concrete joint, *Advances in Engineering Software*, 38:522-530, 2007
- Ehlbeck, J., Nailed joints in wood structures, Virginia Polytechnic Institute and State University - Wood Research and Wood Construction Laboratory, 1979
- Holmberg S., Persson K., Petersson H., Nonlinear mechanical behaviour and analysis of wood and fibre materials, *Computers and Structures*, 72:459-480, 1999
- Kharouf N., McClure, G., Smith, I., Elasto-plastic modeling of wood bolted connections, *Computers and Structures*, 81:747–754, 2003
- Mackerle, J., Finite element analysis of fastening and joining: A bibliography (1990–2002), *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 80:253–271, 2003
- Piter, J.C., *Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601*, INTI-CIRSOC, 2011
- Ross, R.J., *Wood handbook - Wood as an engineering material*, Forest Products Laboratory, 2010
- Santos, C.L., de Jesus, A.M.P., Morais, J.J.L., Lousada, J.L.P.C., A Comparison Between the EN 383 and ASTM D5764 Test Methods for Dowel-Bearing Strength Assessment of Wood: Experimental and Numerical Investigations, *Strain, An International Journal for Experimental Mechanics*, 46:159–174, 2008
- Soltis, L.A., Wilkinson, T.L., United states adaptation of European Yield model to large-diameter dowel Fastener specification, *Proceedings of the 1991 International Timber Engineering Conference*, 3:43-49, 1991
- Williamson, T.G., *APA Engineered Wood Handbook*, McGraw-Hill, 2002

7 APÉNDICE I: ECUACIONES GENERALES PARA CALCULAR VALORES DE RESISTENCIA LATERAL DE FIJACIONES TIPO CLAVIJA

Se muestra en la Tabla II las ecuaciones generales para el cálculo de valores de resistencia laterela de fijaciones tipo clavija, basados en el reporte técnico N°12 de la American Forest & Paper Association (AF&PA, 1999). Se muestra en la Tabla A2 los valores de entrada A, B y C para los modos de falla II-IV.

Modo	Corte simple	Corte doble	Descripción
l_m	$P=q_m l_m$	$P=q_m l_m$	Aplastamiento del miembro principal
l_s	$P=q_s l_s$	$P=2q_s l_s$	Aplastamiento del miembro lateral
II-IV	$P = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$	$P = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$	Ecuación general para el aplastamiento en un miembro y la fluencia de la clavija

Tabla I2: Ecuaciones generales para cálculo de resistencia lateral de fijaciones tipo clavija.

II	$A = \frac{1}{4q_s} + \frac{1}{4q_m}$	$B = \frac{l_s}{2} + g + \frac{l_m}{2}$	$C = -\frac{q_s l_s^2}{4} - \frac{q_m l_m^2}{4}$	Aplastamiento de miembro lateral y principal
III _m	$A = \frac{1}{2q_s} + \frac{1}{4q_m}$	$B = g + \frac{l_m}{2}$	$C = -M_s - \frac{q_m l_m^2}{4}$	Aplastamiento en miembro principal y fluencia de clavija en miembro lateral
III _s	$A = \frac{1}{4q_s} + \frac{1}{2q_m}$	$B = \frac{l_s}{2} + g$	$C = -\frac{q_s l_s^2}{4} - M_m$	Aplastamiento en miembro lateral y fluencia de clavija miembro principal
IV	$A = \frac{1}{2q_s} + \frac{1}{2q_m}$	$B = g$	$C = -M_s - M_m$	Fluencia de clavija en miembro lateral y principal

Tabla I2: Valores de entrada A,B y C para los modos de falla II-IV.

P = valor nominal de la conexión, lbs
 l_s = longitud de soporte de miembro lateral, in
 l_m = longitud de soporte de miembro principal, in
 q_s = resistencia al aplastamiento de miembro lateral = $F_{es}D$, lbs/in
 q_m = resistencia al aplastamiento de miembro principal = $F_{em}D$, lbs/in
 F_{es} = resistencia al aplastamiento del miembro lateral, psi
 F_{em} = resistencia al aplastamiento del miembro principal, psi

g = separación entre los miembros, in
 D = diámetro de la clavija, in
 F_b = resistencia a flexión de la clavija, psi
 D_s = diámetro de la clavija en la máxima tensión en miembro lateral, in
 D_m = diámetro de la clavija en la máxima tensión en miembro principal, in
 M_s = resistencia al momento en la clavija, miembro lateral, in-lbs = $F_b \left(\frac{D_s^3}{6}\right)$
 M_m = resistencia al momento en la clavija, miembro lateral, in-lbs = $F_b \left(\frac{D_m^3}{6}\right)$

Para los modos II y III_m no aplican a conexiones de corte doble. Para valores de limite proporcional, $M_s = F_{b,pl} \left(\pi \frac{D_s^3}{32}\right)$ y $M_m = F_{b,pl} \left(\pi \frac{D_m^3}{32}\right)$

8 APÉNDICE II: VALORES NOMINALES DE RESISTENCIA PARA UNIONES CLAVADAS EN CORTE SIMPLE SEGÚN NDS 2005

Ts: espesor del miembro lateral [in], D: diámetro del clavo [mm], L: longitud del clavo [mm], N: carga nominal [N], G: gravedad específica anhidra [g/cm³].

ts	D		L		G = 0.7		G = 0.6		G = 0.50		G = 0.40		G = 0.3	
	[in]	[mm]	[mm]		N	Modo	N	Modo	N	Modo	N	Modo	N	Modo
0.75		2.15	25.4		214	IIIIm	181	IIIIm	149	IIIIm	120	IIIIm	77	II
		2.45	38.1		319	IV	277	IV	234	IV	188	II	109	II
		2.87	50.8		437	IV	380	IV	321	IV	237	IIIIs	160	IIIIs
		3.33	63.5		588	IV	512	IV	402	IIIIs	297	IIIIs	205	IIIIs
		3.76	76.2		712	IV	610	IIIIs	469	IIIIs	349	IIIIs	244	IIIIs
		4.11	88.9		850	IV	691	IIIIs	536	IIIIs	403	IIIIs	286	IIIIs
		4.88	101.6		984	IIIIs	793	IIIIs	622	IIIIs	474	IIIIs	342	IIIIs
		5.5	127		1040	IIIIs	846	IIIIs	672	IIIIs	520	IIIIs	382	IIIIs
		5.5	152.4		1040	IIIIs	846	IIIIs	672	IIIIs	520	IIIIs	382	IIIIs
		6.65	177.4		1060	IIIIs	950	IIIIs	843	IIIIs	733	IIIIs	614	IIIIs
1		6.65	203.2		1060	IIIIs	950	IIIIs	843	IIIIs	733	IIIIs	614	IIIIs
		2.45	38.1		319	IV	277	IV	223	IIIIm	170	IIIIm	119	II
		2.87	50.8		437	IV	380	IV	321	IV	262	IV	170	II
		3.33	63.5		588	IV	512	IV	433	IV	345	IIIIs	228	IIIIs
		3.76	76.2		712	IV	619	IV	523	IV	401	IIIIs	267	IIIIs
		4.11	88.9		850	IV	739	IV	625	IV	456	IIIIs	309	IIIIs
		4.88	101.6		1036	IV	901	IV	715	IIIIs	526	IIIIs	363	IIIIs
		5.5	127		1170	IV	982	IIIIs	757	IIIIs	565	IIIIs	398	IIIIs
		5.5	152.4		1170	IV	982	IIIIs	757	IIIIs	565	IIIIs	398	IIIIs
		6.65	177.4		1224	IIIIs	1082	IIIIs	945	IIIIs	806	IIIIs	658	IIIIs
1.25		6.65	203.2		1224	IIIIs	1082	IIIIs	945	IIIIs	806	IIIIs	658	IIIIs
		2.45	38.1		270	IIIIm	230	IIIIm	192	IIIIm	151	Im	87.8	Im
		2.87	50.8		437	IV	380	IV	321	IV	255	IIIIm	176	IIIIm
		3.33	63.5		588	IV	512	IV	433	IV	353	IV	247	II
		3.76	76.2		712	IV	619	IV	523	IV	427	IV	297	IIIIs
		4.11	88.9		850	IV	739	IV	625	IV	511	IV	339	IIIIs
		4.88	101.6		1036	IV	901	IV	762	IV	591	IIIIs	393	IIIIs
		5.5	127		1170	IV	1017	IV	859	IIIIs	625	IIIIs	423	IIIIs
		5.5	152.4		1170	IV	1017	IV	859	IIIIs	625	IIIIs	423	IIIIs
		6.65	177.4		1290	IV	1191	IV	1068	IIIIs	898	IIIIs	719	IIIIs
1.5		6.65	203.2		1290	IV	1191	IV	1068	IIIIs	898	IIIIs	719	IIIIs
		2.87	50.8		437	IV	364	IIIIm	289	IIIIm	224	IIIIm	165	IIIIm
		3.33	63.5		588	IV	512	IV	433	IV	353	IV	248	IIIIm
		3.76	76.2		712	IV	619	IV	523	IV	427	IV	326	IV
		4.11	88.9		850	IV	739	IV	625	IV	511	IV	375	IIIIs
		4.88	101.6		1036	IV	901	IV	762	IV	622	IV	428	IIIIs
		5.5	127		1170	IV	1017	IV	860	IV	693	IIIIs	456	IIIIs
		5.5	152.4		1170	IV	1017	IV	860	IV	693	IIIIs	456	IIIIs
		6.65	177.4		1290	IV	1191	IV	1089	IV	976	IV	790	IIIIs
		6.65	203.2		1290	IV	1191	IV	1089	IV	976	IV	790	IIIIs
1.75		2.87	50.8		363	IIIIm	312	IIIIm	262	IIIIm	177	Im	103	Im
		3.33	63.5		588	IV	512	IV	431	IIIIm	323	IIIIm	229	IIIIm
		3.76	76.2		712	IV	619	IV	523	IV	427	IV	319	IIIIm
		4.11	88.9		850	IV	739	IV	625	IV	511	IV	389	IV
		4.88	101.6		1036	IV	901	IV	762	IV	622	IV	468	IIIIs
		5.5	127		1170	IV	1017	IV	860	IV	702	IV	493	IIIIs
		5.5	152.4		1170	IV	1017	IV	860	IV	702	IV	493	IIIIs
		6.65	177.4		1290	IV	1191	IV	1089	IV	976	IV	842	IV
	6.65	203.2		1290	IV	1191	IV	1089	IV	976	IV	842	IV	