

TEST DEL MODELO CONSTITUTIVO ORTOTRÓPICO DE HILL GENERALIZADO APLICADO A MADERAS ESTRUCTURALES

José A. Santelli^a, Ricardo Marino^b y Esteban Morales^b

^aGrupo GITEVE, Depto. Mecánica, UTN-FRGP, Av. Hipólito Yrigoyen 288, 1617 Gral. Pacheco, Buenos Aires, Argentina, jsantelli@docentes.frgp.utn.edu.ar, <http://www.frgp.utn.edu.ar/giteve>

^bLaboratorio de Maderas, Depto. Civil, UTN-FRGP, Av. Hipólito Yrigoyen 288, 1617 Gral. Pacheco, Buenos Aires, Argentina, ramarino@docentes.frgp.utn.edu.ar, <http://www.frgp.utn.edu.ar>

Palabras clave: Norma EN 383, uniones con pernos, elementos finitos, modelo de Hill, correlación, función objetivo.

Resumen. Se desarrolló una metodología numérica para la caracterización de uniones en maderas laminadas y uniones con pernos en maderas macizas para el Álamo Australiano 129 y Álamo Stoneville 67/72 cultivados en el Delta del Paraná. Esta metodología se basa en la correlación entre ensayos a plena escala con el ajuste de parámetros en modelos numéricos. El primer modelo numérico propuesto fue el ensayo virtual según Norma EN 383, cuyos resultados se muestran en el presente trabajo. Dicho ensayo se implementó en ANSYS Mechanical utilizando un modelo constitutivo que, al computar deformaciones elásticas, utiliza ortotropía lineal, con sus respectivas constantes en las direcciones cartesianas, y al computar las deformaciones plásticas, las mismas se adicionan a las elásticas, siendo basadas en la plasticidad anisotrópica (R. Hill), con una generalización que tenga en cuenta la distorsión de la superficie de fluencia (C.F. Shih), lo cual hace que dicho modelo sea apto para materiales naturales del tipo madera. Las constantes plásticas anisótropas son difíciles de obtener en ensayos, por lo que se implementó un código en MATLAB con una optimización multi-objetivo de dichas constantes, que obtuvo unos resultados compatibles con las restricciones que impone el modelo de Hill Generalizado. Los resultados de la simulación se correlacionan con los experimentos y se discuten durante el trabajo.

Keywords: EN 383 Standard, bolted joints, finite elements, Generalized Hill model, correlation, objective function.

Abstract. A numeric methodology had been developed for the characterization of joints in laminated Woods and pinned joints in solid Woods for the Australian Poplar 129 and Stoneville Poplar 67/72 grown in Parana's River Delta. This methodology is based on correlation between full-scale testing and parameter adjustment on numerical models. The first numerical model proposed was the virtual test according to EN 383 Standard, whose results are shown in the present work. That virtual test was implemented in ANSYS Mechanical using a constitutive model that, when computing elastic deformations, uses linear orthotropy, with the corresponding constants in the Cartesian direction, and when computing plastic deformation separately, and added to the elastic afterwards, they are based on anisotropic plasticity (R. Hill) with a generalization that accounts for the distortion of the plastic surface (C.F. Shih), which makes the model suitable for natural materials, such as wood. The anisotropic plastic constants are difficult to obtain in tests, the reason why a MATLAB code was implemented with a multi-objective optimization of such constants, which obtained results compatible with the restrictions that the Generalized Hill model imposes. Modelization results and correlation with tests are shown and discussed in the present work.

1 INTRODUCCIÓN

Los modelos constitutivos lineales ortotrópicos resultan insuficientes para modelar el comportamiento de uniones de madera estructural, debido a que la madera se aplasta, y este fenómeno es de naturaleza plástica. Por lo tanto, se deben buscar modelos elasto-pástico-ortótropos para estudiar el comportamiento de uniones de fijación de madera estructural.

La capacidad portante en uniones de fijación de tipo clavija en madera estructural, es una propiedad que se estudia ensayando probetas en laboratorio, determinando (entre otras) una curva carga-desplazamiento elasto-plástica; esta curva está estrechamente relacionada con los límites elásticos de la madera (Strength Properties en inglés). En el laboratorio se ensayan probetas rectangulares agujereadas, en donde se coloca un perno de acero, que es quien aplica la fuerza.

En el presente trabajo, posterior a los ensayos de laboratorio, se realizó la modelización numérica de la resistencia al aplastamiento en un modelo con las propiedades elasto-plástico-ortótropas de *Populus deltoides*, cultivado en el delta del Río Paraná.

El objetivo del trabajo fue obtener un modelo numérico correlado con los ensayos de laboratorio, y así estudiar cómo se comporta la madera desde el punto de vista del modelo constitutivo.

1.1 Contexto del material bajo estudio: madera Álamo del Delta (*populus deltoides*)

El Delta del Río Paraná, descripción tomada de **Referencia Borodowski, E. y Suárez, R (2004)**, es una gran área verde de 1.750.000 hectáreas junto al mayor conglomerado urbano de la República Argentina (más de 12 millones de habitantes). Recibe su nombre por el Río Paraná, un largo río de 4.000 km que en su desembocadura al Río de la Plata conforma un exuberante delta de aguas dulces. Este valle fluvial soporta regularmente inundaciones producidas por los Ríos Paraná y Uruguay conformando un vasto mosaico de ambientes como respuesta a la dinámica de su formación y al régimen hidrológico. Las Salicáceas, principalmente álamos y sauces, son las especies forestales más difundidas en la región. Las características de las mismas las ponen en situación de ventaja con respecto a cualquier otra alternativa productiva.

Sin ninguna duda, el aprovechamiento forestal en el Delta, comenzó en el siglo XIX utilizando las formaciones espontáneas del denominado “saucecriollo” o “sauce colorado” (*Salix humboldtiana* Willd).

Actualmente, de las catorce introducciones de “álamos stonevilles” se encuentran principalmente en cultivo en el Delta el “Stoneville 67”, y el “Stoneville 71”.

Los “álamos australianos”, merced a la difusión realizada, principalmente de los “australiano 129/60”, “australiano 106/60” y el “stoneville 67”, son incorporados por un importante número de productores, siendo actualmente, los tres principales clones de álamos preferidos por los productores forestales del Delta.

En cuanto a las características físicas particulares en *Populus Deltoides*, la albura es de color blanco y el duramen blanco amarillento, teniendo en ocasiones poca diferenciación.

En los últimos años se ha incrementado el uso estructural de esta madera. Los productores e industriales que cultivan y procesan esta madera han impulsado estudios a cargo de grupos de investigación, con el objetivo de ampliar el conocimiento de sus propiedades. Así mismo, los investigadores junto al IRAM se han desarrollado normas de clasificación y caracterización mecánica de esta especie con el fin de tipificar y ordenar las técnicas de fabricación de vigas de madera laminada encolada destinada a la construcción de estructuras de madera. Este estudio sobre el comportamiento de las uniones con pernos, realizados con la

madera de esta especie, contribuye a un mayor conocimiento de esta madera.

En las imágenes siguientes se puede apreciar el material bajo estudio en su origen, tanto en el tronco como en el bosque.



Figura 1. Albura y Duramen de Populus Deltoides.



Figura 2. Cultivo de Alamos y Sauces en el Delta del Paraná.

1.2 Ensayos de aplastamiento en laboratorio

En la Referencia [Marino, R. \(2014\)](#) se realizaron una serie de ensayos de aplastamiento de conexiones de madera basados en la norma EN 383, que aquí resumiremos en sus aspectos de mayor interés, y utilizaremos como base del trabajo de modelización.

En este trabajo se cita al modelo de Johansen, Referencia [Johansen, K. W. \(1949\)](#), que ha sido adoptado por las reglas de diseño de numerosos países para estimar la capacidad portante de este tipo de conexiones. Este modelo está basado -además de la configuración geométrica de la unión- sobre dos propiedades de los materiales que la integran: la resistencia al aplastamiento de la madera y el momento plástico de los elementos de fijación (INTI CIRSOC 2013; EN 1995-1-1 2005; NDS 2005; NCh 1198 2007).

A continuación, se muestran los modos de rotura posibles en una conexión de tipo clavija según el modelo de Johansen. Conexiones con una sección de corte (arriba), conexiones con dos secciones de corte (abajo).

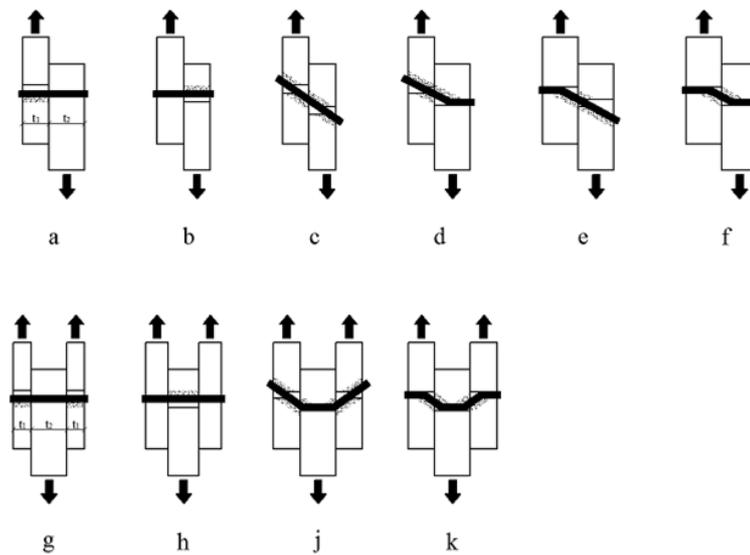


Figura 3. Modos de rotura de la unión tipo clavija de madera estructural. Obsérvese en particular los casos a, b, g, h en donde se produce el pleno aplastamiento de la madera y el perno no se deforma.

A continuación se muestran imágenes de tensión vs. deformación aplicada al encastre. Se puede apreciar cómo las curvas carga-desplazamiento terminan en una línea horizontal, esto es, una condición plástica:

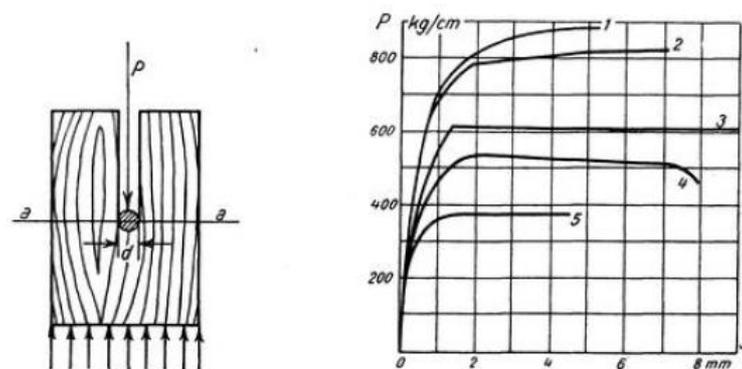


Figura 4. Probeta encastrada con un perno al cual se aplica una carga P . Esquema y resultados para distintas maderas. Fuente: Johansen49

A continuación, se transcribirán los resultados de ensayos de laboratorio realizados (para más detalle véase Referencia Marino, R. (2014)).

Resultados de resistencia al aplastamiento (f_h) y la densidad (ρ) correspondientes a 172 probetas con clavo rígido diámetro 5.7 mm.

Sub-muestra clavo			f_h			$\rho^{(2)}$		
Dirección del esfuerzo	Esfuerzo	n	Medio	COV	$f_{h,k}^{(1)}$	Medio	COV	$\rho_k^{(3)}$
			N/mm ²	%	N/mm ²	kg/m ³	%	kg/m ³
Paralelo	Tracción	51	37,9	18	----	495,7	9.4	----
	Compresión	69	30	11	----	485,8	6.8	----
Perpendicular	Compresión	52	34,1	19	----	479,4	6.3	----
Todas PT		172	33,6	19	23,9	487	8	426

PT: orificios pre-taladrados; n: número de cuerpos de prueba.

(1) valor característico calculado acorde a la EN 14358 (2007).

(2) Valor de la densidad ajustado al contenido de humedad de referencia del 12% acorde

Resultados de resistencia al aplastamiento (f_h) y la densidad (ρ) correspondientes a 131 probetas con bulón rígido diámetro 12.7 mm.

Sub-muestras bulones			f_h			$\rho^{(2)}$		
Dirección del esfuerzo	Esfuerzo	n	Medio	COV	$f_{h,k}^{(1)}$	Medio	COV	$\rho_k^{(3)}$
			N/mm ²	%	N/mm ²	kg/m ³	%	kg/m ³
Paralelo	Tracción	48	25,3	13	----	483,1	8,5	----
	Compresión	30	21,7	12	----	465,8	7,7	----
Todas paralelo		78	23,9	15	18,2	476	8	411
Perpendicular	Compresión	53	20,1	19	14	476	10	400

n: número de probetas;

(1) valor característico calculado según EN 14358 (2007);

(2) valores de densidad ajustados a un contenido de humedad del 12 % conforme a EN 384 (2004);

(3) valor característico calculado conforme a EN 384 (2004)

En particular, el caso de dos secciones de corte “g” y “h” (Ver Figura 3) de compresión perpendicular a la fibra, es el caso que se modelizó numéricamente en este trabajo.

A continuación, presentamos la imagen de una de las probetas ensayadas en el laboratorio:

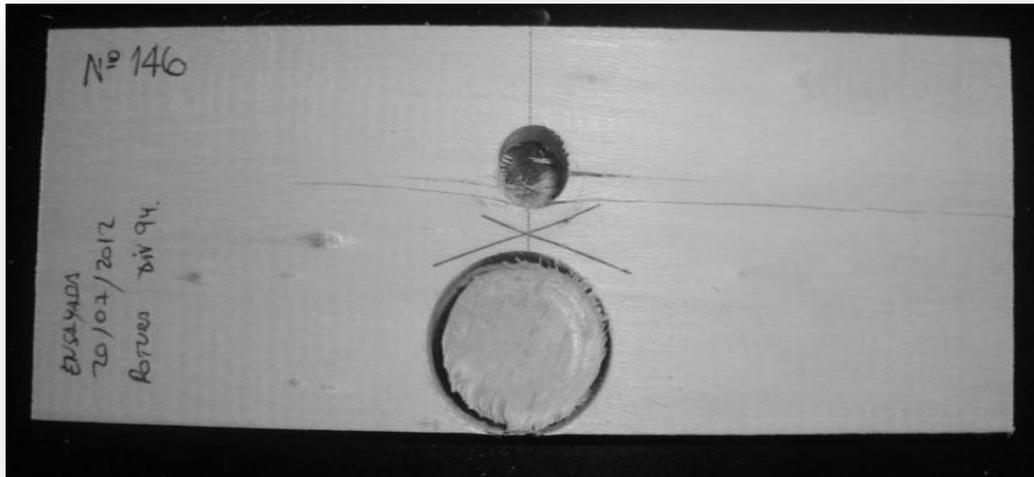


Figura 5. Cuerpo de prueba después del ensayo.

A continuación, se muestra una imagen de los resultados de las probetas ensayadas, en particular, la que resulta de interés para la modelización:

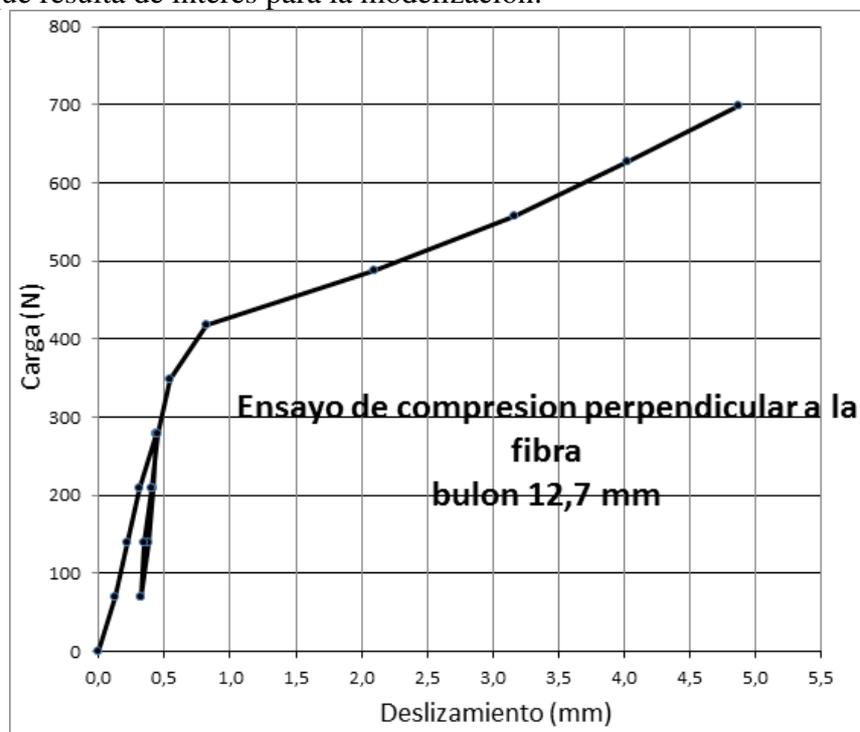


Figura 6. Ensayo de laboratorio compresión perpendicular a la fibra.

En el presente trabajo se busca estudiar numéricamente esta curva elasto-plástica, ensayo perpendicular a la fibra, en particular cuál es la influencia de la dirección de los anillos de crecimiento sobre el resultado de los ensayos:

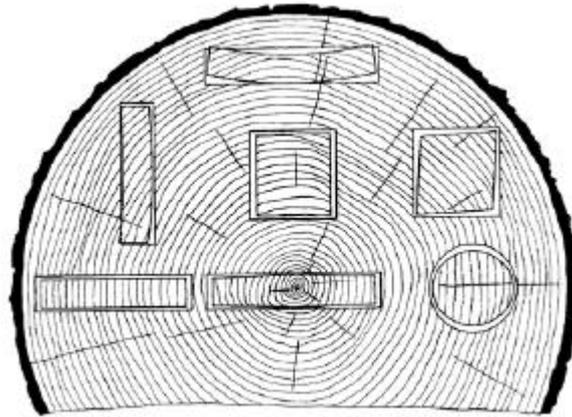


Figura 7. Distintos tipos de corte de madera estructural. Se pueden apreciar a los lados anillos transversales, en la parte superior anillos longitudinales, y entre los dos anillos inclinados (semicorte).

Como se puede apreciar en la figura anterior, existe una gran variabilidad en la distribución de los anillos de crecimiento de la madera, por lo tanto, se estudió la influencia de esta variabilidad sobre los resultados de los ensayos.

2 MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE ENSAYO DE APLASTAMIENTO

Para la construcción de un modelo numérico representativo del comportamiento plástico de este ensayo empírico, se utilizó el software ANSYS Mechanical para la parte de simulación mecánica, y el software MATLAB para obtener unos límites elásticos compatibles con los requerimientos del modelo numérico. En el caso del ANSYS, se utilizó el elemento finito SOLID95 con la opción de NLGEOM activada, y el modelo de material TB, ANISO que corresponde al modelo de Hill Generalizado, y en el caso del MATLAB, se utilizó para optimizar las propiedades de materiales, mediante la función fgoalattain, que permite resolver funciones multi-objetivo.

2.1 Propiedades mecánicas de la madera

Las propiedades mecánicas de la madera estructural, en su formato convencional, están descritas en detalle en la referencia Ross, R. J., et al.(2010), el Handbook(manual) de maderas del Departamento de Agricultura de los EEUU. En ella se describen la naturaleza ortotrópica de estos elementos estructurales, las características físicas y las propiedades mecánicas, siempre entendidas como un material ingenieril. Si bien en el mencionado manual podemos encontrar 12 constantes elásticas, en realidad mediante fórmulas se pueden reducir a 9 constantes elásticas, que son necesarias para un cálculo de tensiones.

A continuación se establecen los ejes de referencia para la ortotropía de la madera:

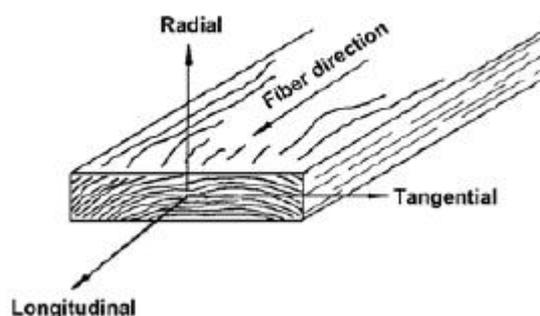


Figura 8. Ejes de referencia para la madera. Imagen extraída de (#Ross10).

Si bien el eje Tangencial no es cartesiano (teóricamente sería un sistema cilíndrico), en este trabajo se hará la hipótesis de que el citado eje es cartesiano y se trabajará asumiéndolo así.

Por lo tanto, en el modelo numérico, se tomará la siguiente terna de referencia:

X=RADIAL
Y=TANGENCIAL
Z=LONGITUDINAL

Así pues, un material lineal ortótropo u ortotrópico, tendrá las siguientes 9 constantes elásticas:

- Módulo de Elasticidad: EX,EY,EZ.
- Módulo de Poisson: PRXY, PRYZ, PRXZ (Los módulos de Poisson son dos ternas de 3, o sea seis valores distintos, de distinto valor; la otra terna puede obtenerse a partir del cociente entre los Módulos de Elasticidad. Sólo se necesita una de estas ternas).
- Módulo de Rigidez: GXY, GYZ, GXZ (los módulos de Rigidez no se relacionan a través de una fórmula con los parámetros anteriores, y hay que obtenerlos mediante ensayos).

Los límites elásticos ya específicos para el material madera, se definen de la siguiente manera:

- Contenido de Humedad: Aunque no sea un límite elástico en sí, se debe mantener constante para evitar variaciones de los mismos. En el caso que nos ocupa se toma un valor de 12%.
- Módulo de Ruptura: Equivale a la Tensión de fluencia según la dirección Z (dirección de la fibra)
- Tensión Perpendicular a la Fibra: Tensión de fluencia en cualquier dirección perpendicular
- Tensión de Corte paralela a la Fibra: Tensión de corte a la que el material comienza a fluir en la dirección de la fibra
- Compresión Paralela a la Fibra: Tensión de fluencia de compresión (sería en la dirección opuesta al Módulo de Ruptura).
- Compresión Perpendicular a la Fibra: Tensión de fluencia de compresión en cualquier dirección perpendicular al eje Z (fibra). Suele ser un valor distinto de la tensión.

2.2 Mediciones de límites elásticos de forma adaptada para el modelado por elementos finitos

En este trabajo, se realizaron ensayos de laboratorio de manera de establecer un desglose de los límites elásticos, tal como se describe a continuación:

- Tensión Perpendicular a la Fibra: Desglose en Tensión Perpendicular-Radial, y Tensión Perpendicular-Tangencial (ver [Figura 8](#))
- Compresión Perpendicular a la Fibra: Idem anterior, Compresión Perpendicular-Radial, Compresión Perpendicular-Tangencial.

De ésta manera, se obtienen los siguientes límites elásticos no definidos convencionalmente en los manuales de maderas:

- Tensión Perpendicular-Radial
- Tensión Perpendicular-Tangencial
- Compresión Perpendicular-Radial
- Compresión Perpendicular-Tangencial

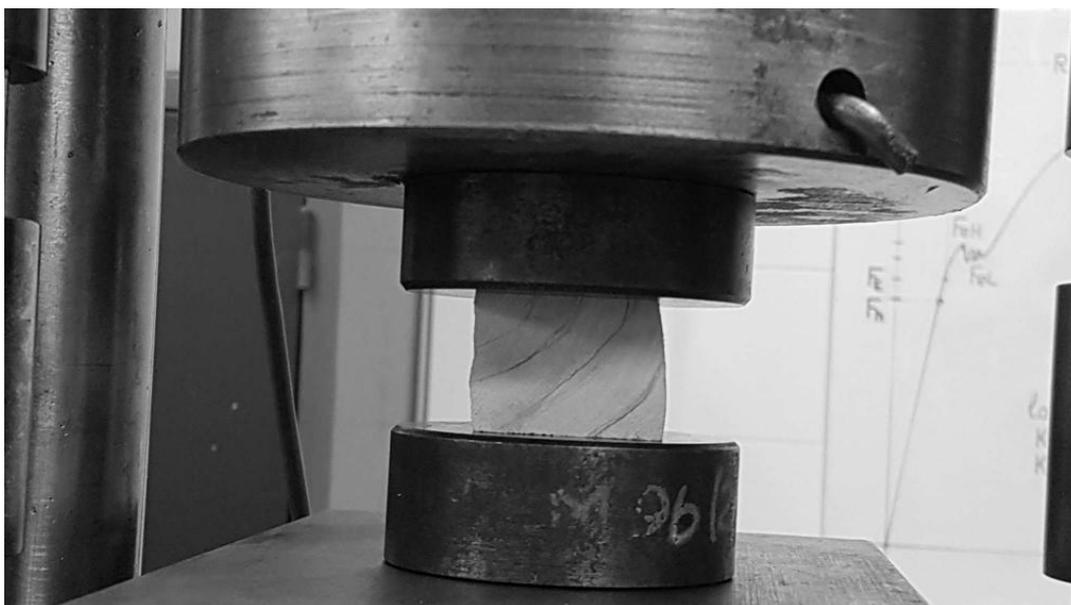


Figura 9. Ensayo de compresión de un taco de madera de 40 mm de canto. Las fibras están orientadas perpendicularmente al papel. La diferente forma que se aprecia a la izquierda y a la derecha, dan cuenta de la diferencia de límites elásticos entre la dirección tangencial y radial.

De acuerdo a los valores medidos en el laboratorio, se tomó un límite a la compresión de 3 MPa cuando la madera se comprime en la dirección Y (paralela a los anillos de crecimiento), y de 6 MPa cuando la madera se comprime en la dirección X (perpendicular a los anillos de crecimiento).

3 MODELO NUMÉRICO DE APLASTAMIENTO

El modelado numérico del ensayo de aplastamiento consiste en, literalmente, realizar un ensayo “virtual” en una computadora en lugar del laboratorio. Este ensayo virtual tiene que contar con hipótesis lo suficientemente aproximadas al caso de la madera, de manera que a la hora de la correlación la misma sea aceptable. Dichas hipótesis podrían enumerarse en: Modelo Constitutivo (modelo de comportamiento de material), Modelo Mecánico (malla y tipo de elementos finitos), y Condiciones de borde (apoyos, metodología de contacto, cargas). En cuanto a la metodología de contacto, cabe destacar que en el caso de un ensayo físico de aplastamiento, siempre se registra una holgura entre el perno y la probeta, mientras que en el caso del modelo numérico, dicha holgura se consideró como cero (contacto perfecto).

3.1 Modelo constitutivo de Hill Generalizado

El Modelo de Hill utilizado, ver referencia [Hill, R \(1998\)](#), que se activa en Ansys mediante la opción TB, HILL, es una extensión del criterio de Von Mises, que puede ser utilizado en materiales cuya microestructura influencia el comportamiento macroscópico del material, como p. ej. el caso de metales en un proceso de laminado. Sin embargo, este criterio no es suficiente para analizar maderas, cuyo comportamiento ortotrópico, si bien tiene tres planos de referencia, observa un diferente comportamiento a la tracción y a la compresión.

Para las maderas, se utiliza una extensión del Criterio de Hill (opción TB, ANISO en Ansys), conocida como Criterio de Hill Generalizado, véase referencia [Shih, C. F et al.](#)

(1978), que permite tener en cuenta la diferencia entre límites a la tracción y a la compresión:

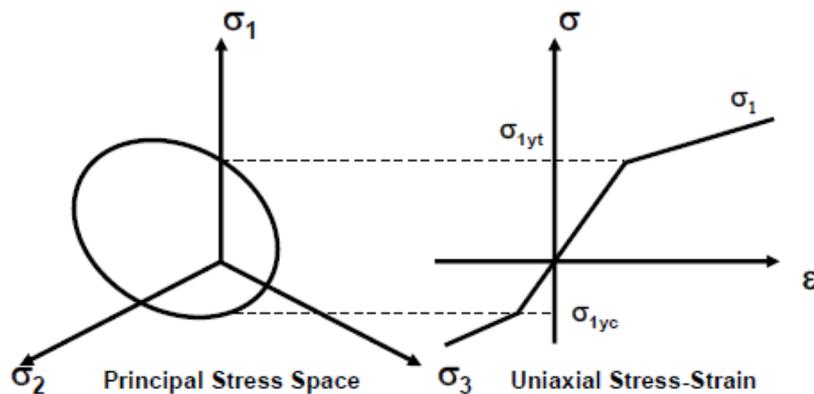


Figura 10. Superficie de fluencia para el modelo de Hill Generalizado.

En la figura anterior, en la imagen de la izquierda, se ve la superficie de fluencia cilíndrica de Hill, caracterizada por estar desplazada según tres planos normales. A la derecha, en la imagen 2D, se ve que, además de desplazada, dicha superficie está distorsionada porque tiene distinta resistencia a la tracción que a la compresión.

Se definen los siguientes coeficientes ortotrópicos:

$$M_{ii} = \frac{K}{\sigma_i^+ \sigma_i^-} \quad (1)$$

En donde K es la tensión de fluencia en una dirección dada.

$$L_i = M_{ii} (\sigma_i^+ - \sigma_i^-) \quad (2)$$

Estos coeficientes, K y L, y M, están definidos de tal manera que si la tensión a la compresión es igual a la de tracción los L_i se igualan a cero. Además, si el material es ortotrópico, todos los coeficientes M_{ii} de esfuerzo normal serán igual a uno, los coeficientes al corte serían igual a tres, y la superficie de fluencia se reduciría a la de Von Mises.

En Ansys, el modelo de Hill Generalizado está programado como una ley de endurecimiento isotrópico bilineal, con diferentes valores a la tensión y a la compresión, que se pueden definir tanto para la tensión de fluencia como para el módulo elástico tangente en las tres direcciones ortogonales.

En un trabajo similar, referencia [Moses, D. M et al. \(2002\)](#), en el cual se basó la utilización del modelo anisotrópico para este trabajo, así como en la teoría citada, se da cuenta de dos condiciones que tiene que cumplir la superficie de fluencia, para poder asegurar la convergencia del cálculo:

- La superficie de fluencia siempre debe permanecer cerrada, caso contrario no tendría sentido físico alguno

$$M_{11}^2 + M_{22}^2 + M_{33}^2 - 2(M_{11}M_{22} + M_{22}M_{33} + M_{11}M_{33}) < 0 \quad (3)$$

- Se debe satisfacer la condición de consistencia, esto es, la incompresibilidad

plástica (o sea que las deformaciones plásticas no contribuyan a ningún cambio volumétrico).

$$\frac{\sigma_x^+ - \sigma_x^-}{\sigma_x^+ \sigma_x^-} + \frac{\sigma_y^+ - \sigma_y^-}{\sigma_y^+ \sigma_y^-} + \frac{\sigma_z^+ - \sigma_z^-}{\sigma_z^+ \sigma_z^-} = 0 \quad (4)$$

Las tensiones de fluencia anisotrópicas y los módulos tangentes no son independientes para este modelo. Estos criterios deben ser satisfechos, caso contrario el código de elementos finitos, en sus chequeos previos al análisis, arroja mensajes de error.

3.2 Compatibilización entre los datos de material y el modelo de Hill Generalizado

Se realizó una compatibilización de los datos obtenidos de laboratorio y de las referencias como para que puedan ser utilizados en el código de elementos finitos Ansys. Ello se realizó utilizando la optimización multivariable mediante el código MATLAB.

Básicamente, se definió una optimización multi-objetivo sin restricciones, de manera de cumplir simultáneamente con las ecuaciones (3) y (4). A continuación, se muestra la variación en las propiedades:

OLD Orthotr stress limits		NEW Orthotr stress limits		Difference
XTEN	3	XTEN	2,9497	-1,68%
YTEN	6	YTEN	5,9874	-0,21%
ZTEN	70	ZTEN	69,9999	0,00%
XCMP	6	XCMP	6,0126	0,21%
YCMP	3	YCMP	3,0504	1,68%
ZCMP	38,2	ZCMP	38,2003	0,00%
XY	4,1	XY	4,1	0,00%
XZ	4,1	XZ	4,1	0,00%
YZ	8,2	YZ	8,2	0,00%

Tabla 1. Optimización multi-objetivo para compatibilizar los valores de las propiedades (OLD) de manera que se puedan utilizar en un análisis de elementos finitos (NEW).

3.3 Modelo de elementos finitos

En el presente trabajo se mostrarán los resultados de uno de los modelos numéricos a modo de ejemplo. Los demás casos corridos en el software Ansys, varían en cuanto a las dimensiones. A continuación se muestra la geometría CAD con las dimensiones de una de las probetas utilizadas:

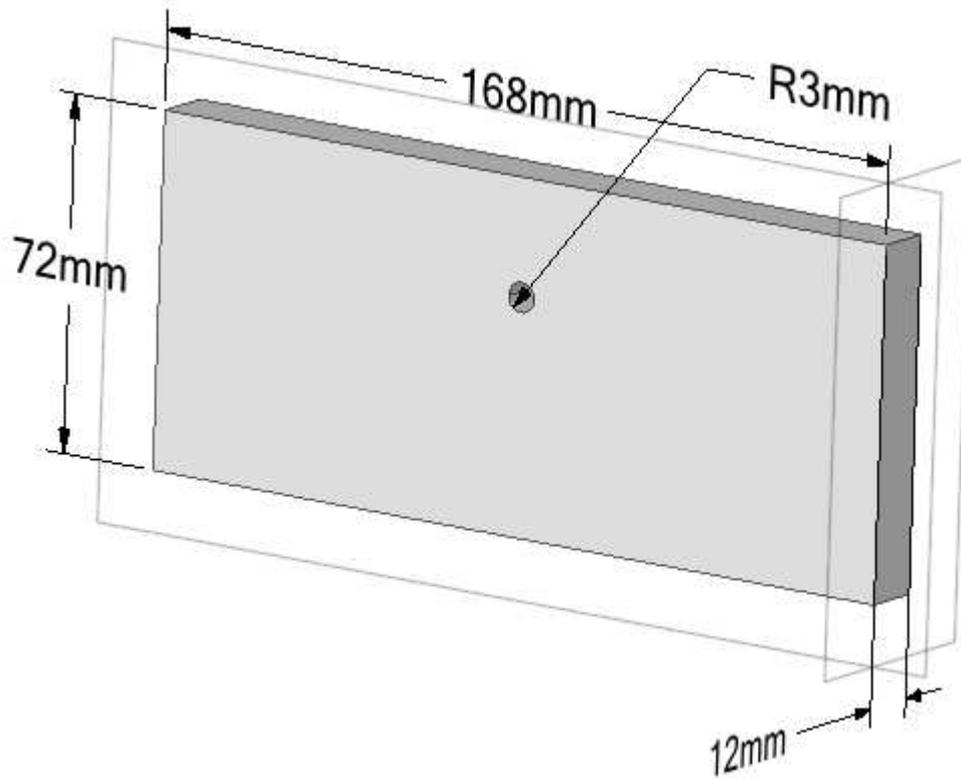


Figura 11. Geometría de una probeta virtual para modelo numérico. En particular, esta tiene 6 mm de diámetro de perno, y 12 mm de espesor, o sea, dimensiones mínimas.

Para el modelo numérico se utilizaron elementos 3D del tipo SOLID95, con la opción NLGEOM activada, tanto para la representación de la probeta de madera como para el perno de acero:

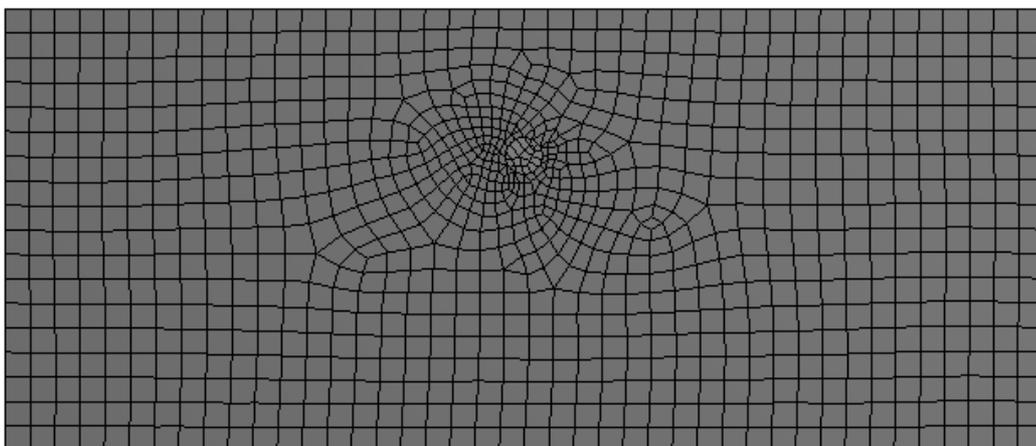


Figura 12. Malla de elementos finitos para el ensayo perpendicular a la fibra.

3.4 Condiciones de borde del modelo numérico

Se aplicaron apoyos simples en la parte inferior y lateral del modelo para estabilizar la solución, y se aplicó verticalmente un desplazamiento prescrito de 2 mm en los extremos del perno de acero, permitiéndole cierta flexibilidad, pero al ser las caras desplazadas de forma vertical, se comporta prácticamente como un elemento rígido respecto de la madera.

En el contacto perno-madera, se aplicó un coeficiente de fricción de 0,4; ver referencia [Johansen, K. W. \(1949\)](#).

4 DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO

A continuación, se presentan los resultados del modelo numérico. Se definirán tres casos de estudio:

- Perpendicular-Tangencial
- Perpendicular-Radial
- Perpendicular-Semicorte

Se muestran diferentes resultados para cada caso en particular. El área de estudio de interés, se muestra en la figura a continuación:

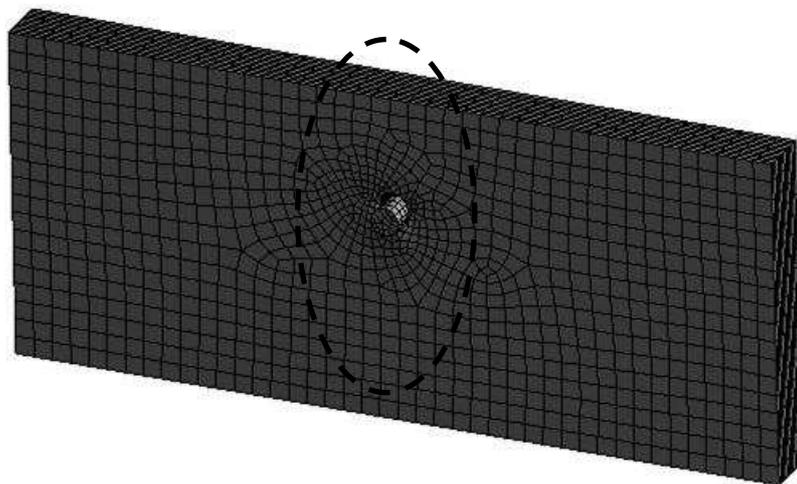
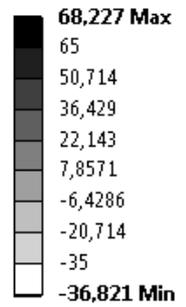


Figura 13. Modelo Perpendicular-Tangencial deformado, mostrando el área de interés para los resultados.

Se reitera que, a modo de ejemplo, en este trabajo se muestran los resultados únicamente de la probeta de diámetro de perno 6 mm y espesor 12 mm, o sea, las dimensiones mínimas de la normativa EN 383

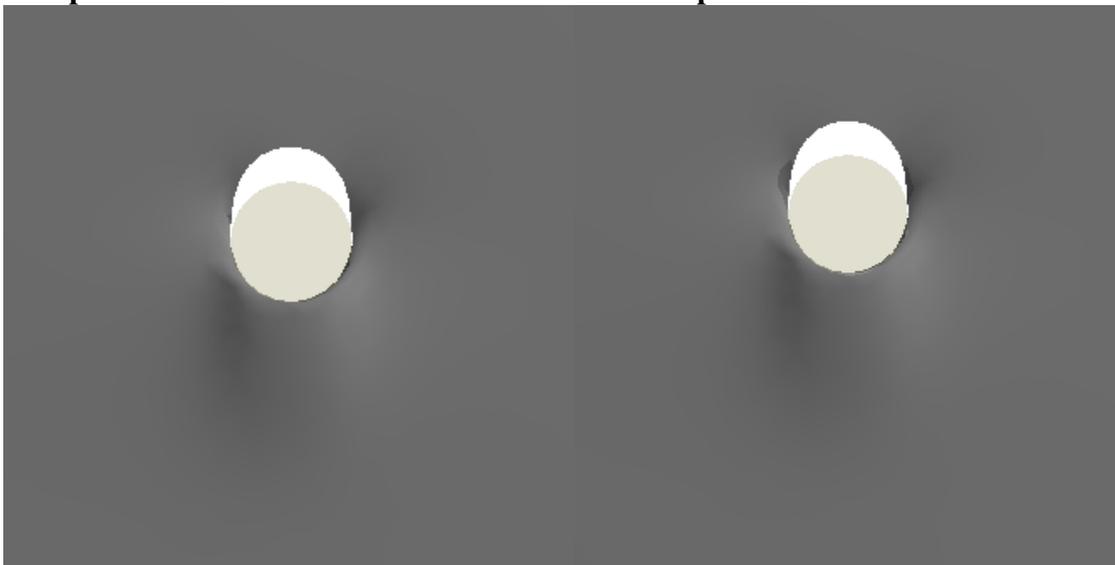
4.1 Caso 1. Aplastamiento Perpendicular-Tangencial

Campo de tensiones:
Unidades: MPa



Componente XX

Componente YY



Componente ZZ

Componente YZ

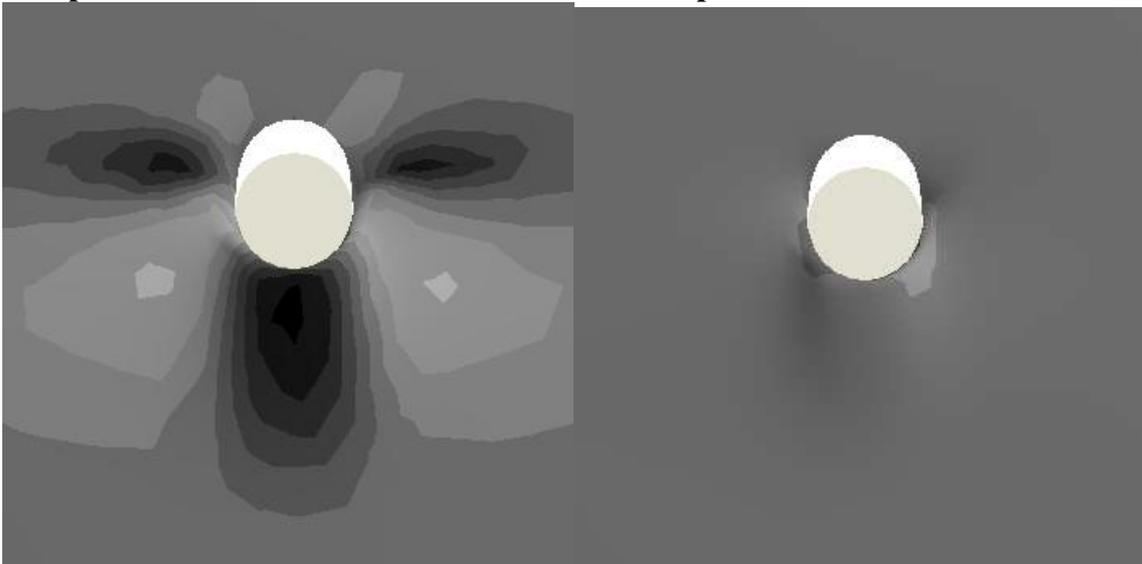


Figura 14.Caso 1. Componentes de la tensión en los tres ejes principales y tensión de corte en el plano XY.

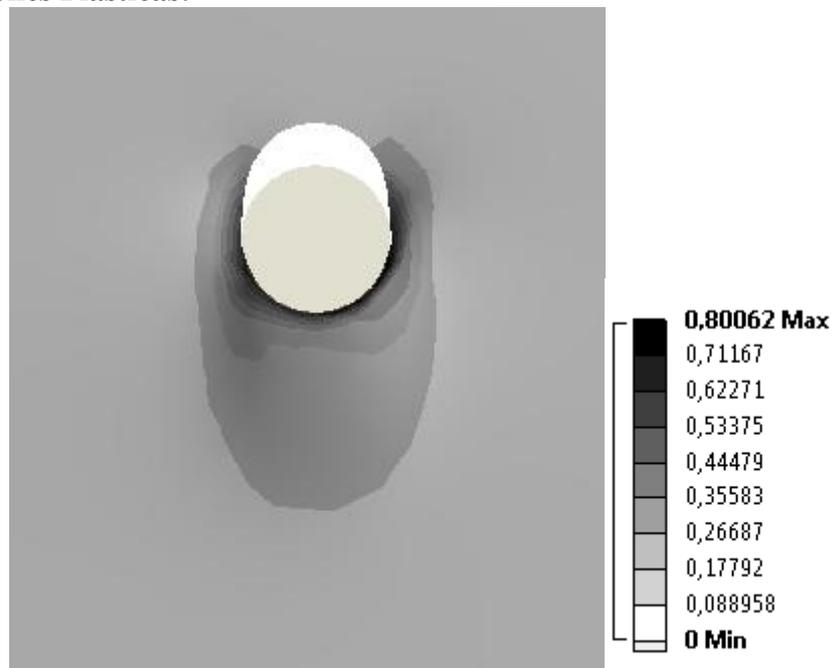
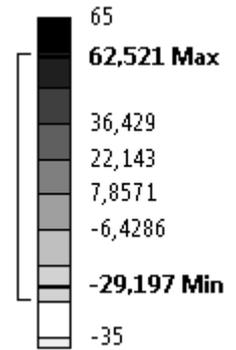
Deformaciones Plásticas:

Figura 15. Caso 1. Deformaciones plásticas.

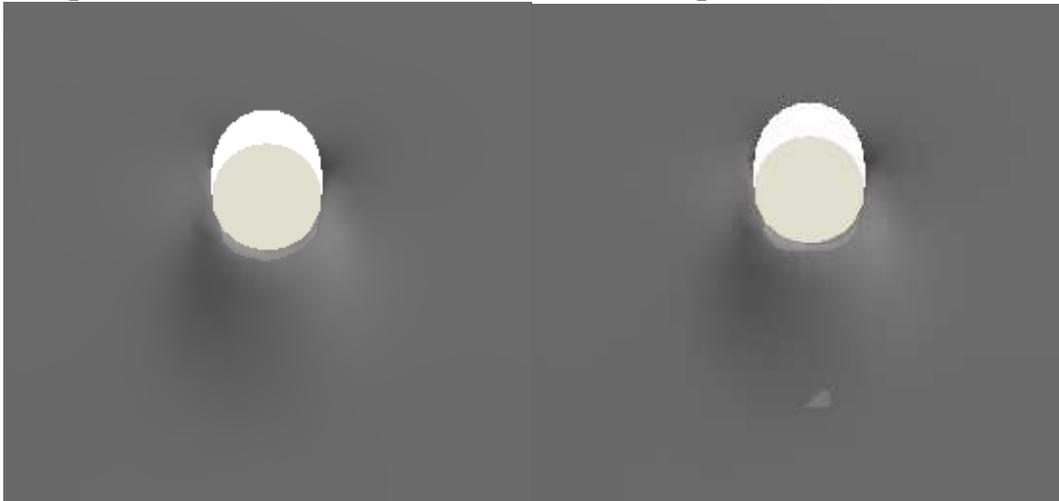
4.2 Caso 2. Aplastamiento Perpendicular-Radial

Campo de tensiones:
Unidades: MPa



Componente XX

Componente YY



Componente ZZ

Componente YZ

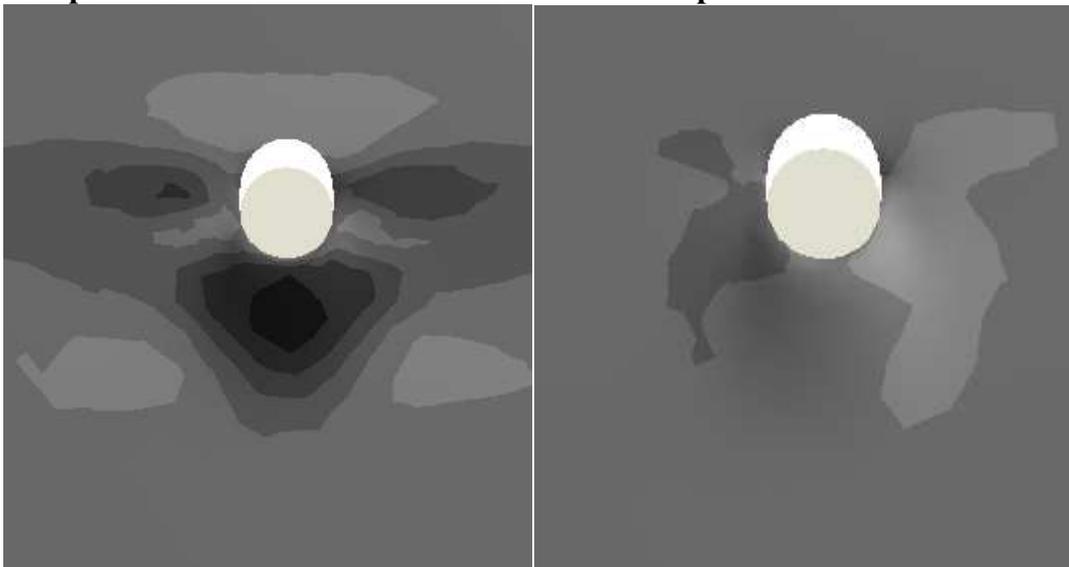


Figura 16.Caso 2. Componentes de la tensión en los tres ejes principales y tensión de corte en el plano XY.

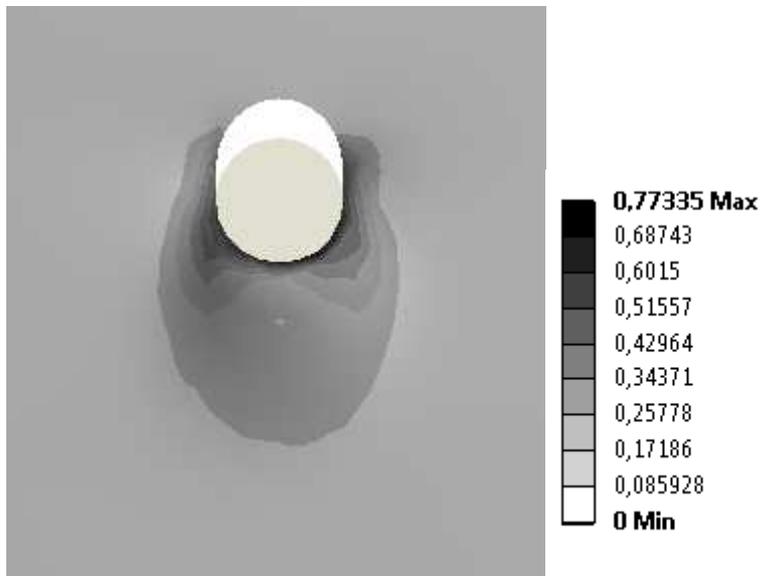
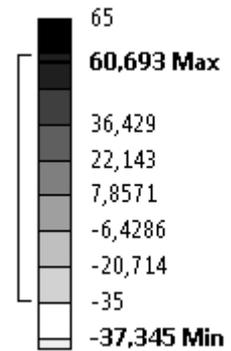
Deformación Plástica:

Figura 17. Caso 2. Deformaciones plásticas.

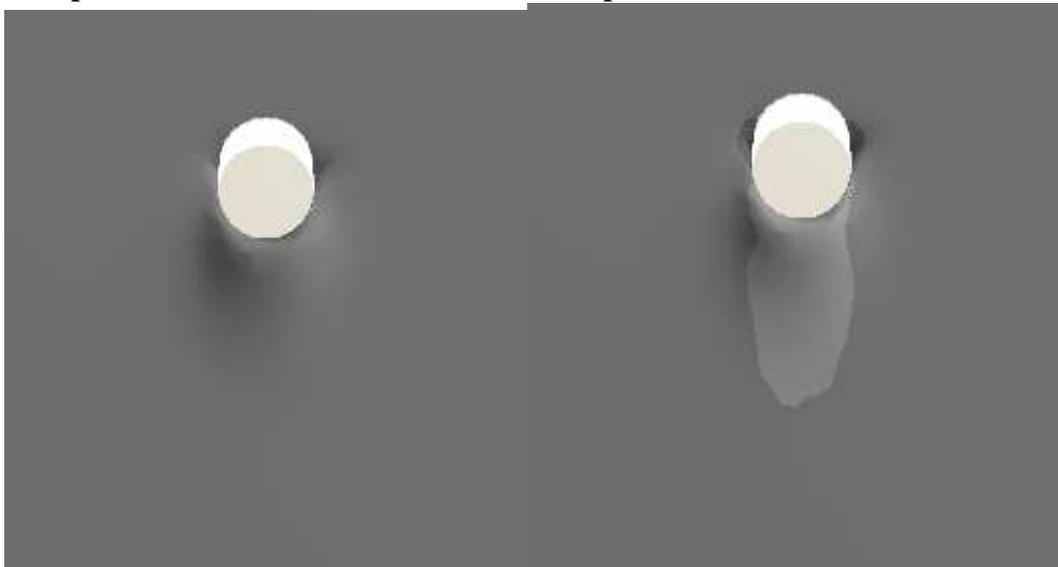
4.1 Caso 3. Aplastamiento Perpendicular-Semicorte

Campo de tensiones:
Unidades: MPa



Componente XX

Componente YY



Componente ZZ

Componente YZ

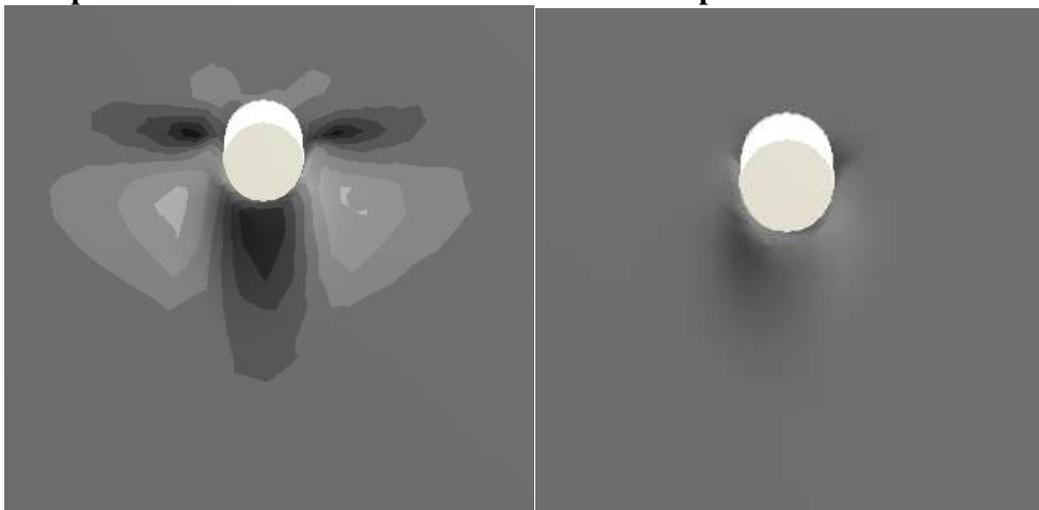


Figura 18.Caso 3. Componentes de la tensión en los tres ejes principales y tensión de corte en el plano XY.

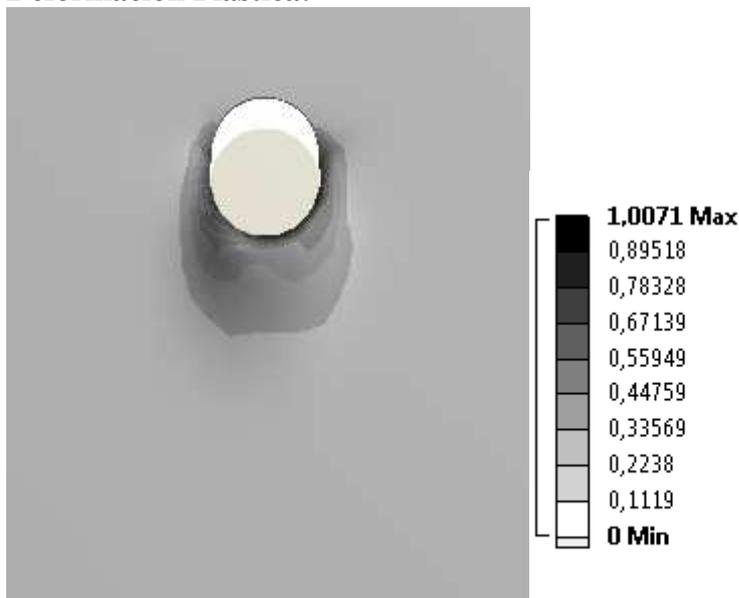
Deformación Plástica:

Figura 19. Caso 2. Deformaciones plásticas.

A continuación, se enumeran otros 2 casos con diámetro de perno mayor, pero por una cuestión de espacio, sólo se mostrarán resultados en la gráfica comparativa. Los casos son los siguientes:

4.2 Caso 1A – Aplastamiento Perpendicular-Tangencial diámetro 12,7 mm

Para este caso, se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento en Figura 21.

4.3 Caso 1B – Aplastamiento Perpendicular-Tangencial diámetro 8 mm

Para este caso, se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento en Figura 21.

4.4 Discusión de los resultados

	Máx SX [MPa]	Máx SY [MPa]	Máx SZ [MPa]	Máx SYZ [MPa]	MáxDef. Plast.
Caso 1	70,774	74,11	68,227	12,156	0,80062
Caso 2	52,601	55,158	65,521	17,189	0,77335
Caso 3	8,3954	31,166	60,693	1,6695	1,0071

Tabla 2. Resultados de tensión y deformación para los tres casos bajo estudio.

De acuerdo a las imágenes, las zonas de máximas tensiones significativas en la probeta, se dan siempre en la dirección Z (que es la dirección de la fibra con mayor resistencia). En los resultados se puede apreciar que siempre las probetas romperán perpendicularmente a esta dirección.

En el Caso 3 (semicorte), la caída de la tensión cortante es significativa.



Figura 20. Iso-Superficies de la región plástica para el Caso 3 (semicorte).

En la figura anterior se puede observar la diferencia en plasticidad producida por la inclinación de los anillos de crecimiento. Si bien en la gráfica se nota dicha diferencia, a efectos prácticos, en cuanto a los resultados de resistencia al aplastamiento, dicha diferencia es muy baja.

4.4.1 Correlación con el ensayo de laboratorio

A continuación se muestran los resultados del ensayo virtual vs. ensayo real, para las propiedades de material optimizadas, entendidos como fuerza vs. desplazamiento:

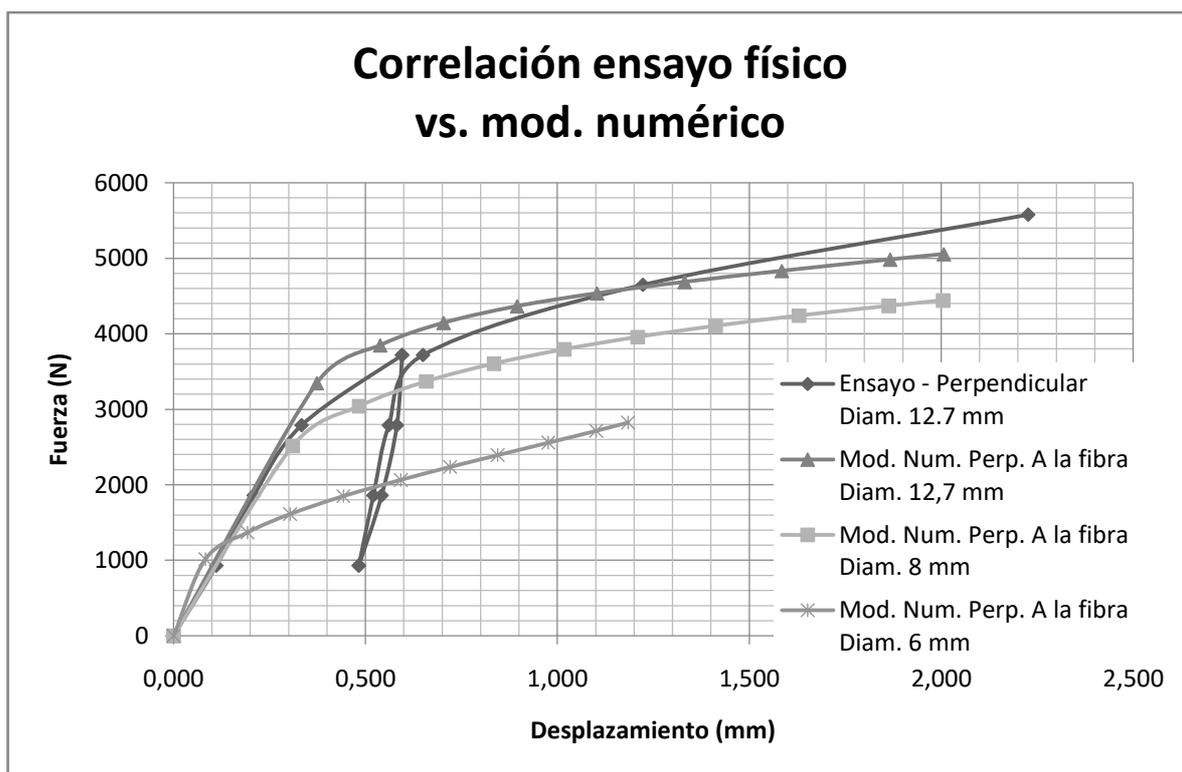


Figura 21. Correlación Fuerza-Desplazamiento para el ensayo vs. Modelo, para un diámetro de bulón de 12,7 mm. Adicionalmente, se muestra el efecto de reducción de diámetro en el ensayo virtual.

En la figura anterior se observa una correlación modelo-experimento, que presenta diferencias en cuanto a pendientes, tanto de módulos elásticos como de módulos tangentes (plasticidad). También el coeficiente de fricción entre perno-madera y los valores de la tensión de fluencia en sí, influyen en el resultado de esta curva.

Sin embargo, a pesar de estas diferencias, se puede observar un comportamiento aceptablemente similar al caso de laboratorio.

5 CONCLUSIONES

El modelo constitutivo de Hill Generalizado presenta un comportamiento elastoplástico, cuyos valores pueden ajustarse hasta hacerlos coincidir aceptablemente con los de un ensayo real, respetando todas las pautas correspondientes del caso.

En la correlación se observa que la parte plástica podría ajustarse mediante valores de modulo tangente ajustados para que coincidan de forma más precisa con el ensayo.

La visualización del campo de tensiones en el modelo numérico, permite observar la influencia de cada componente de la tensión. En particular, se observa la alta tensión en la dirección de la fibra (dirección ZZ).

Las deformaciones plásticas observadas en el modelo numérico, sobre todo las observadas en el semicorte, muestran que prácticamente las propiedades en la dirección paralela-tangencial y paralela-radial, no presentan grandes diferencias. A pesar de la mayor resistencia en la dirección paralela-radial, la otra dirección no presenta un comportamiento sensiblemente diferente.

Los ensayos de laboratorio y los ensayos virtuales han sido coordinados, y el laboratorio representa la base para futuras conclusiones que puedan sacarse del modelo de Hill Generalizado utilizado en este trabajo.

El trabajo de modelación presenta dificultades en cuanto a su implementación, debido

principalmente a la gran dispersión que presentan las propiedades mecánicas de la madera, lo cual contrasta con la modelización de elementos finitos, que precisa datos muy deterministas.

A partir de esta modelización, se espera investigar a futuro en encontrar una teoría de fallo elasto-plasto-ortótropa, que pueda describir el comportamiento observado.

También se abrió la línea para investigar no sólo el aplastamiento, sino también el daño-grieta que sufre el material madera, numéricamente dentro de las posibilidades del software disponible.

REFERENCIAS

- Borodowski, E. y Suárez, R., El cultivo de álamos y sauces:su historia en el Delta del Paraná, SAGPyA Forestal, 2004.
- Marino, R., *Resistencia al aplastamiento para dos diámetros de elementos de fijación tipo clavija*, Memorias 2014 Segundas jornadas de investigación en Ingeniería Civil, 2014.
- Ross, R. J., et al. *Wood handbook: wood as an engineering material*. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010.
- Hill, R.,*The mathematical theory of plasticity*. Vol. 11. Oxford university press, 1998.
- Shih, C. F., & Lee, D. *Further developments in anisotropic plasticity*. Journal of Engineering Materials and Technology, 100(3), 294-302, 1978.
- Moses, D. M., & Prion, H. G. *Anisotropic plasticity and failure prediction in wood composites*. Ansys. net (online), 2002.
- Johansen, K. W. *Theory of timber connections*. Int Assoc Bridge Struct Eng, 9, 249-262, 1949.