



## TEST DE MODELO CONSTITUTIVO ORTOTRÓPICO DE HILL GENERALIZADO APLICADO A MADERAS ESTRUCTURALES.

### TEST OF GENERALIZED HILL CONSTITUTIVE MODEL APPLIED TO STRUCTURAL TIMBERS

José A. Santelli <sup>(1)</sup> \*; Esteban Morales <sup>(2)</sup>; Ricardo Marino<sup>(2)</sup>, Leandro Serraiocco<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo GITEVE, Depto. Mecánica, UTN-FRGP, Av. Hipólito Yrigoyen 288, 1617 Gral. Pacheco, Buenos Aires, Argentina, <http://www.frgp.utn.edu.ar/giteve>

<sup>(2)</sup> Grupo MADERAS, Depto. Civil, UTN-FRGP, Av. Hipólito Yrigoyen 288, 1617 Gral. Pacheco, Buenos Aires, Argentina

\* Contacto: [jsantelli@docentes.frgp.utn.edu.ar](mailto:jsantelli@docentes.frgp.utn.edu.ar), [ramarino@docentes.frgp.utn.edu.ar](mailto:ramarino@docentes.frgp.utn.edu.ar)

CÓDIGO: 4604286

#### Resumen

Las conexiones con pernos juegan un papel importante en estructuras de madera. Entonces su rendimiento tiene que ser estimado con una alta confiabilidad. El comportamiento de estas conexiones ha sido exhaustivamente caracterizado hoy en día. Se desarrolló una metodología 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 ensayos no destructivos y la predicción del comportamiento estructural por correlación de ensayos a plena escala con el ajuste de parámetros en modelos numéricos, de los cuales la estimación del rendimiento se puede beneficiar mucho, en el sentido de conocer más en profundidad el comportamiento que tiene la madera, debido a que en los ensayos de las maderas citadas no se haría necesario contar con el instrumental para medir la deformación en todas las direcciones, y el modelado numérico permite visualizar dichas deformaciones.

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 correlan con los experimentos y se discuten durante el trabajo. *Palabras-clave: máximo de 4 palabras o 1 línea.*

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



## 1. INTRODUCCIÓN

La resistencia al aplastamiento en uniones de fijación tipo clavija, es una propiedad que se mide ensayando probetas de madera en laboratorio, determinando una curva carga-desplazamiento elasto-plástica; esta curva está estrechamente relacionada con los límites elásticos de la madera (Strength Properties en inglés), en particular Compresión Perpendicular a la fibra y Compresión Paralela a la fibra.

Los ensayos de tracción y compresión de la madera se realizan con probetas estandarizadas, con las cuales se determinan las propiedades elásticas como módulos de Young y de Poisson, además de los límites citados, entre otros.

En cambio, en la resistencia al aplastamiento, se ensayan probetas rectangulares agujereadas, en donde se coloca un perno de acero, que es quien aplica la fuerza.

En el presente trabajo se realizó un ensayo virtual de resistencia al aplastamiento en una probeta de madera de Pópulus deltoides, clones Australiano 129/60 y Stonville 67, álamo cultivado en el delta del Río Paraná.

Los resultados se analizan tanto por ensayo real como ensayo virtual por elementos finitos.

## 2. MADERA ALAMO DEL DELTA (POLULUS DELTOIDES)

El Delta del Río Paraná (ver Referencia #Bodorowski04) 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 con respecto a su posibilidad de propagación por vía agámica, su resistencia a períodos de anegamiento, su rápido crecimiento, su madera apta para diversos usos, su capacidad de rebrote, la facilidad de lograr híbridos por ser diclino dioicas, 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 “sauc criollo” o “sauc colorado” (*Salix humboldtiana* Willd).

Actualmente, de las catorce introducciones de “álamos stonevilles” se encuentran principalmente en cultivo en el Delta el “Stoneville 67”, un clon de sexo masculino altamente resistente a roya y el “Stoneville 71”, clon masculino altamente resistente a cancrisis (*Septoria musiva* Peck.), pero que en los últimos años, especialmente a partir de 1997-98 ha sido afectado por la roya.

Los “álamos australianos”, ambos clones de sexo femenino, de muy buenos rendimientos volumétricos y resistentes a roya y a cancrisis (*Septoria musiva* Peck.), inicialmente no fueron llevados a cultivo comercial por su dificultad en el enraizamiento de las estacas y su irregular cicatrización ante la poda.

Merced a la difusión realizada, principalmente de los “australiano 129/60”, “australiano 106/60” y el “stoneville 67”, los mismos 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 abura es de color blanco y el duramen blanco amarillento, teniendo en ocasiones poca diferenciación.



*Figura 1. Albura y Duramen de Populus Deltoides.*



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

### 3. ENSAYOS DE APLASTAMIENTO EN LABORATORIO

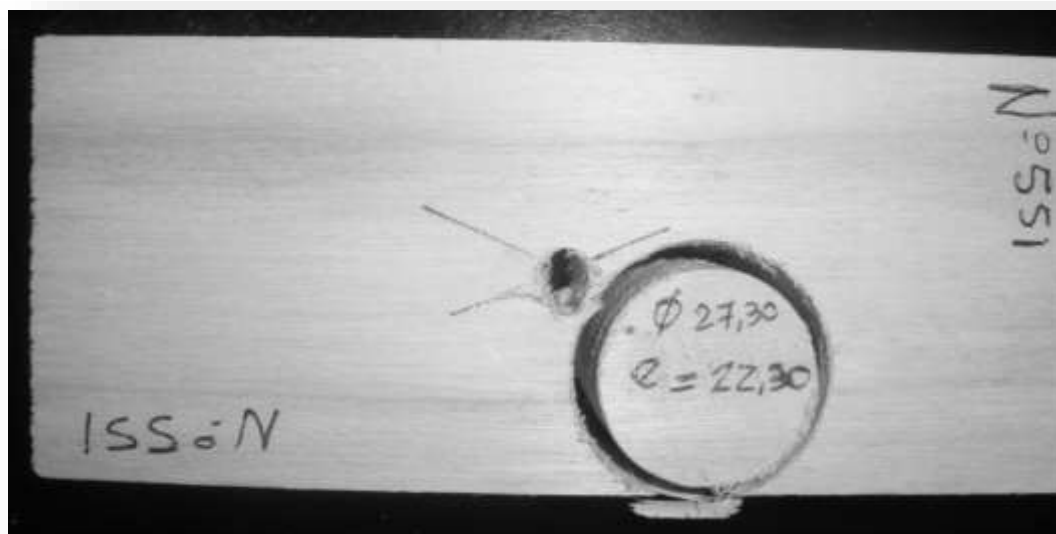
En la Referencia (Marino2014) se realizó una serie de ensayos de aplastamiento en laboratorio basados en la norma EN 383, que aquí resumiremos en sus aspectos de mayor interés, y utilizaremos como base del trabajo de modelización.

El modelo de Johansen (Johansen49) 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). El comportamiento dúctil es preferido frente al frágil porque el primero permite el desarrollo de articulaciones plásticas que facilitan la distribución de los esfuerzos dentro de los elementos de la conexión, incrementando la capacidad portante de la misma y maximizando la disipación de energía. Contrariamente, la presencia de una rotura frágil, caracterizada por el desarrollo de fisuras y bloques de corte a niveles de carga inferiores a la máxima capacidad potencial de una unión múltiple, reduce su resistencia y su capacidad de disipar energía. Esta reducción ocurre



porque las fisuras y los bloques de corte impiden una completa redistribución del esfuerzo entre los elementos de fijación. En particular, el criterio de diseño adoptado en Brasil (ABNT 2010) considera dos posibles modos de rotura de la conexión, estando uno caracterizado por el aplastamiento de la madera y el otro por la flexión del elemento de fijación. Este criterio, que redundaba en una mayor facilidad para el cálculo, no contempla la totalidad de los modos de rotura previstos en el modelo de Johansen antes mencionado.

A continuación, presentamos algunas imágenes de las probetas ensayadas en el laboratorio:



*Figura 3. Cuerpo de prueba después del ensayo.*

De esta manera, para el modo de rotura por aplastamiento de la madera, se encontraron valores característicos para los Alamos del Delta, comparándose con los valores europeos. Más adelante en este trabajo se hará una comparativa entre los ensayos de laboratorio con los ensayos virtuales del modelo numérico.

#### **4. 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.



#### 4.1. Propiedades mecánicas de la madera

Las propiedades mecánicas de la madera estructural, en su formato convencional, están descritas en detalle en la referencia (#Ross10), el Handbook 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 Handbook 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 estableceremos los siguientes ejes de referencia para la ortotropía de la madera:

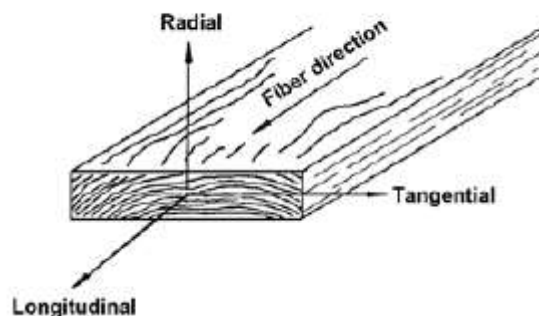


Figura 4. Ejes de referencia para la madera. Imagen extraída de (#Ross10).

Si bien el eje Tangencial no es estrictamente 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.

En el modelo numérico, se tomará la siguiente terna de referencia:

X=RADIAL

Y=TANGENCIAL

Z=LONGITUDINAL

Por lo tanto, un material lineal ortótropo u ortotrópico, tendrá las siguientes 9 constantes elásticas:

- Módulo de Elasticidad:  $E_x, E_y, E_z$
- Módulo de Poisson:  $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$  (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:  $G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}$  (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.

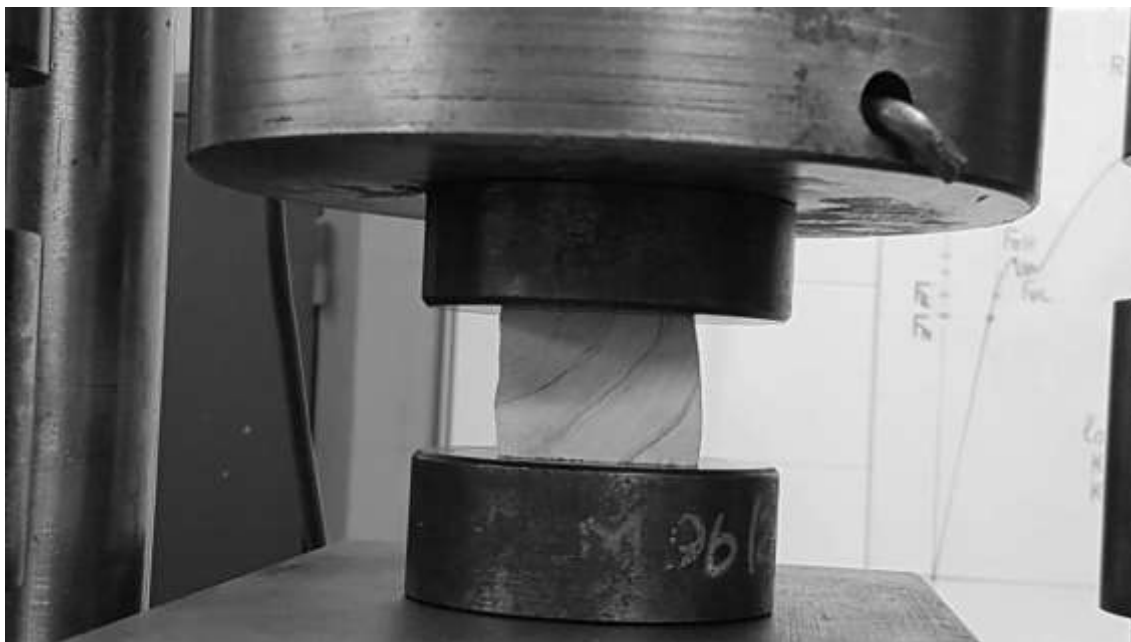
#### **4.2. Mediciones de límites elásticos de forma adaptada para el modelado por elementos finitos**

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 1)
- 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 5. 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).

## 5. 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).

### 5.1. Modelo constitutivo de Hill Generalizado

El Criterio de Hill (opción TB, HILL en Ansys) es una extensión del Criterio de Falla 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. (Véase Referencia Hill98). 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 Shih78), que permite tener en cuenta la diferencia entre límites a la tracción y a la compresión:

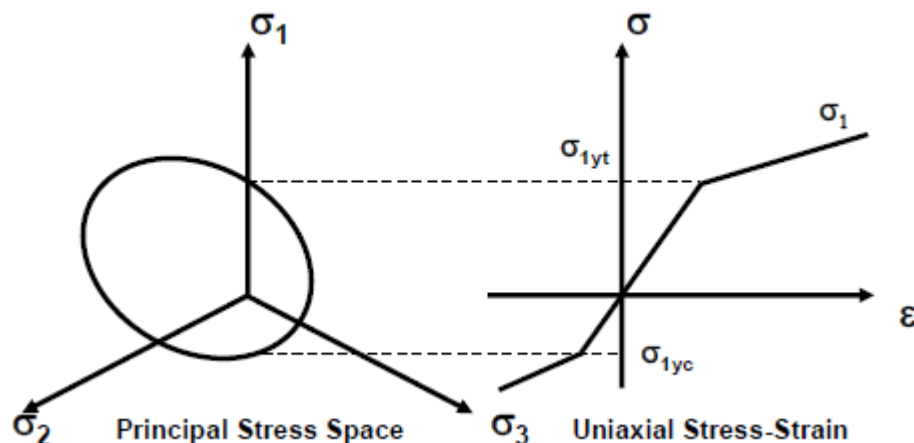


Figura 6. Superficie de fluencia para el modelo de Hill Generalizado.

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 #Moses02), 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).

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

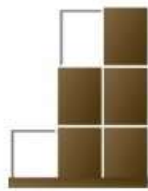
Las tensiones de fluencia anisotrópicas y los módulos tangentes no son independientes para este modelo. Estos criterios deben ser satisfechos, caso contrario el código de elementos finitos, en sus chequeos previos al análisis, arroja mensajes de error.

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.

## 5.2. 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:



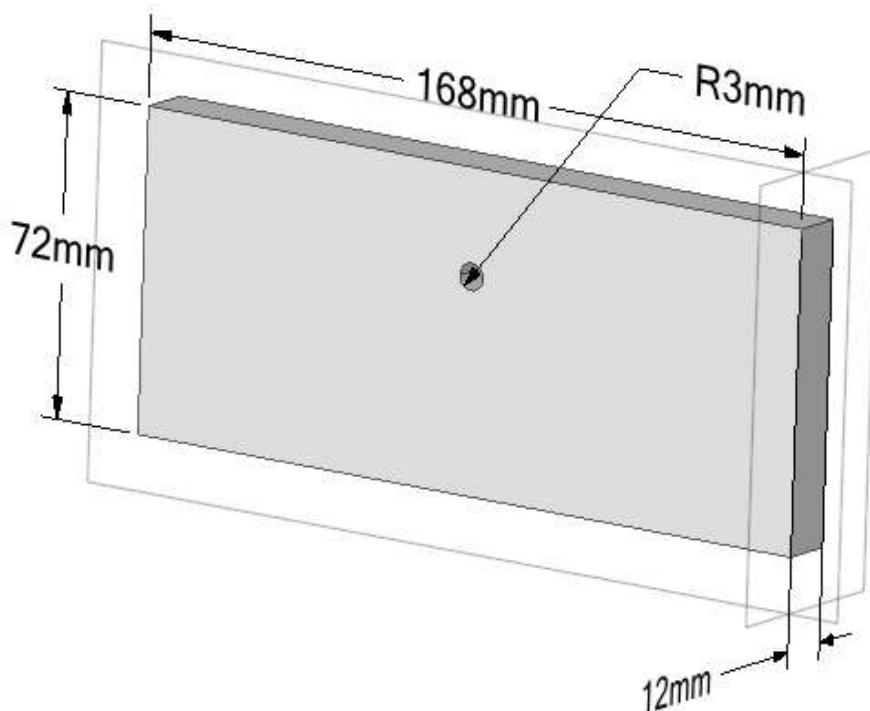
| OLD<br>Orthotr<br>stress limits |      | NEW<br>Orthotr<br>stress limits |         | Difference |
|---------------------------------|------|---------------------------------|---------|------------|
| XTEN                            | 3    | XTEN                            | 2,9497  | -1,68%     |
| 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).*



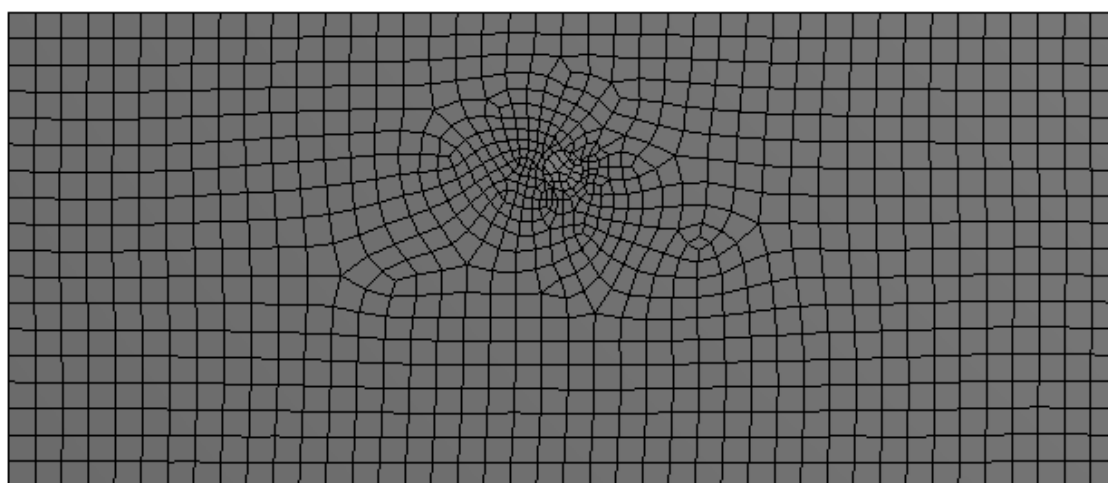
### 5.3. Malla de elementos finitos

A continuación se muestra la geometría CAD con las dimensiones de la probeta:



*Figura 7. Geometría de la probeta virtual para modelo numérico.*

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 8. Malla de elementos finitos para el ensayo perpendicular a la fibra.*



#### 5.4. 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.

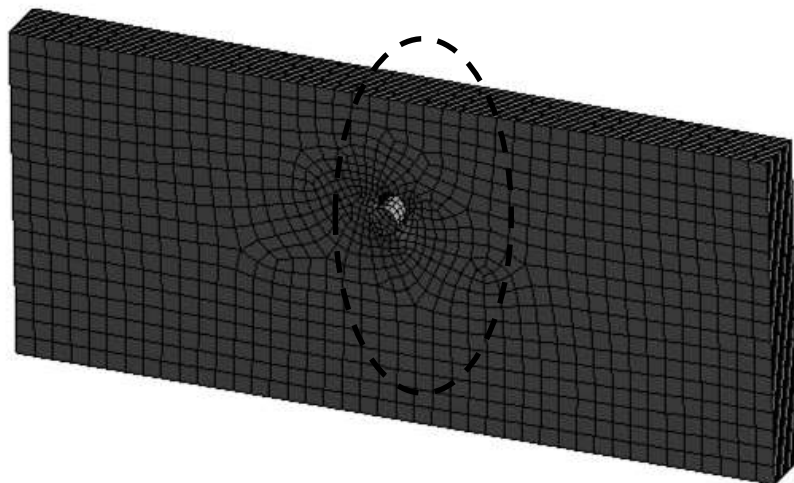
En el contacto perno-madera, se aplicó un coeficiente de fricción de 0,4 (Ver Referencia #Johansen49).

### 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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:

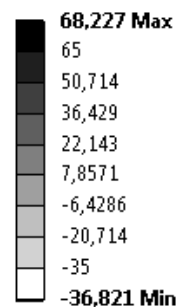


*Figura 9. Modelo Perpendicular-Tangencial deformado, mostrando el área de interés para los resultados.*



## 6.1. Caso 1. Aplastamiento Perpendicular-Tangencial

**Campo de tensiones:**  
**Unidades: MPa**



**Componente XX**



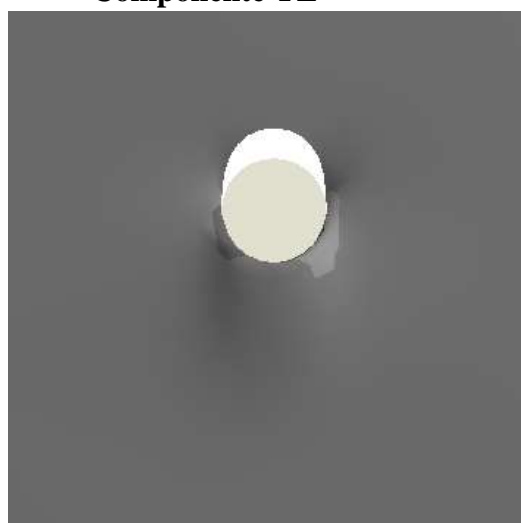
**Componente YY**



**Componente ZZ**



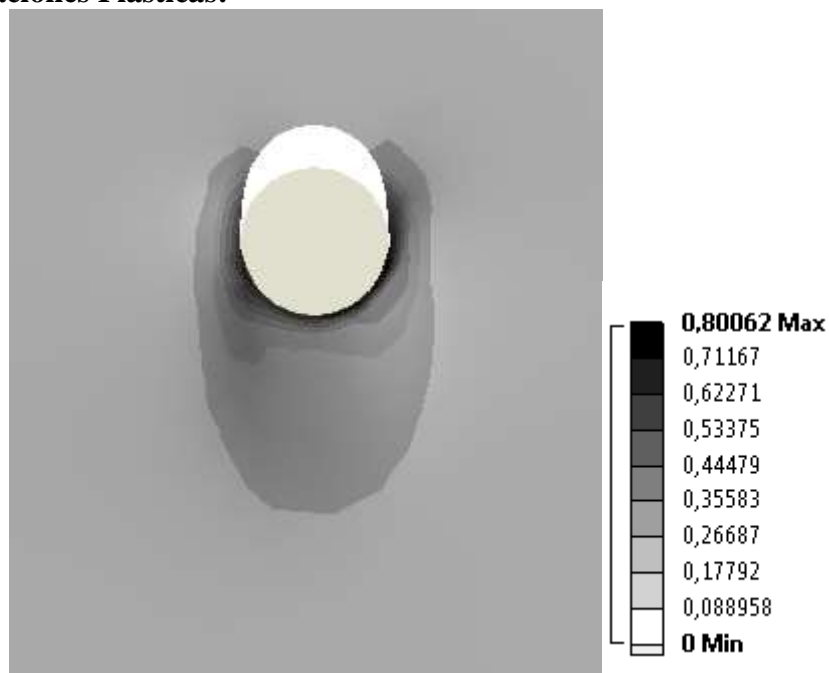
**Componente YZ**



*Figura 11. Caso 1. Componentes de la tensión en los tres ejes principales y tensión de corte en el plano XY.*



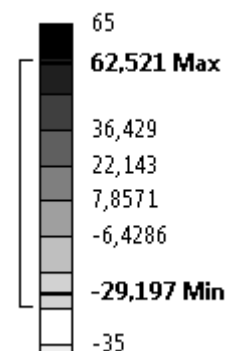
**Deformaciones Plásticas:**



*Figura 12. Caso 1. Deformaciones plásticas.*

**6.2. Caso 2. Aplastamiento Perpendicular-Radial**

**Campo de tensiones:**  
**Unidades: MPa**





**Componente XX**



**Componente YY**



**Componente ZZ**



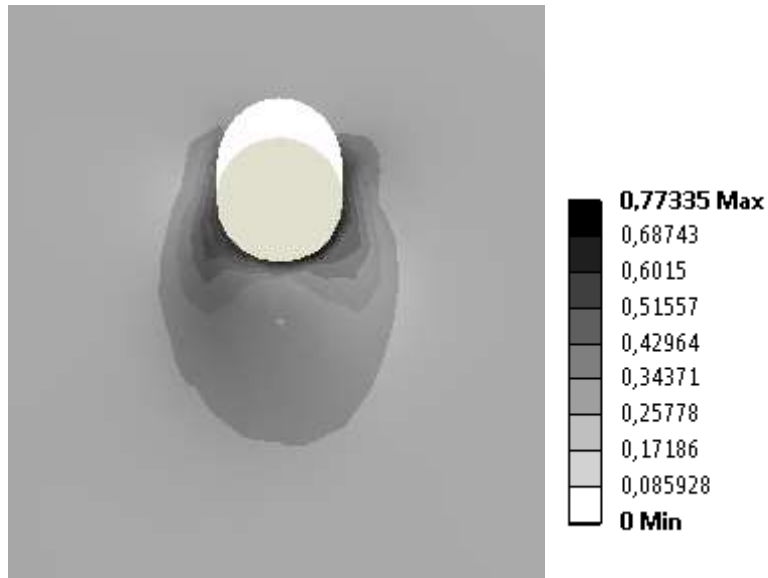
**Componente YZ**



*Figura 13. Caso 2. Componentes de la tensión en los tres ejes principales y tensión de corte en el plano XY.*



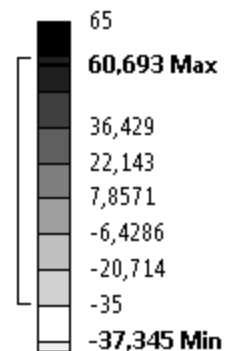
**Deformación Plástica:**



*Figura 14. Caso 2. Deformaciones plásticas.*

**6.3. Caso 3. Aplastamiento Perpendicular-Semicorte**

**Campo de tensiones:**  
**Unidades: MPa**







**Componente XX**



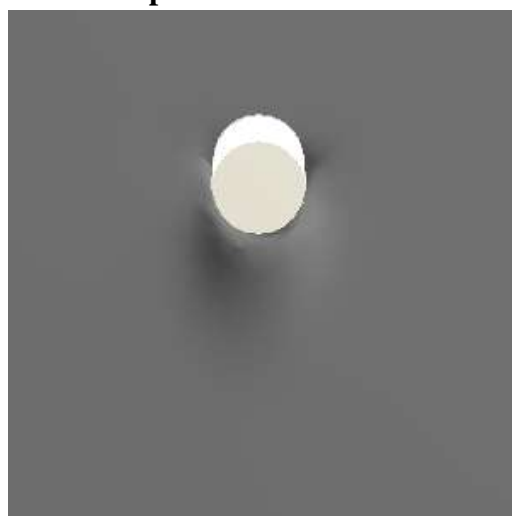
**Componente YY**



**Componente ZZ**



**Componente YZ**



*Figura 15. Caso 3. Componentes de la tensión en los tres ejes principales y tensión de corte en el plano XY.*



### Deformación Plástica:

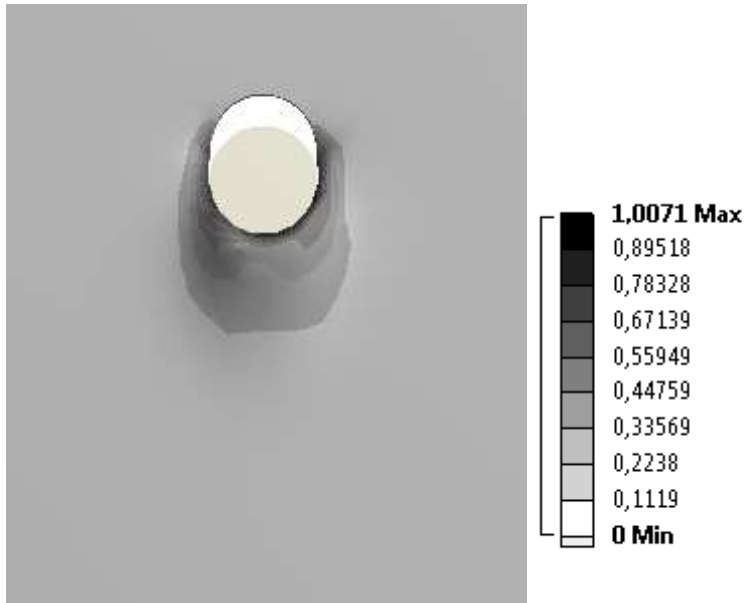


Figura 16. Caso 2. Deformaciones plásticas.

#### 6.4. Caso 1A – Aplastamiento Perpendicular-Tangencial diámetro 12,7 mm

Para este caso, se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

#### 6.5. Caso 1B – Aplastamiento Perpendicular-Tangencial diámetro 8 mm

Para este caso, se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

#### 6.6. Discusión de los resultados

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

Tabla 1. 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 17. Iso-Superficies de la región plástica para el Caso 3 (semicorte).

### 6.7. 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:

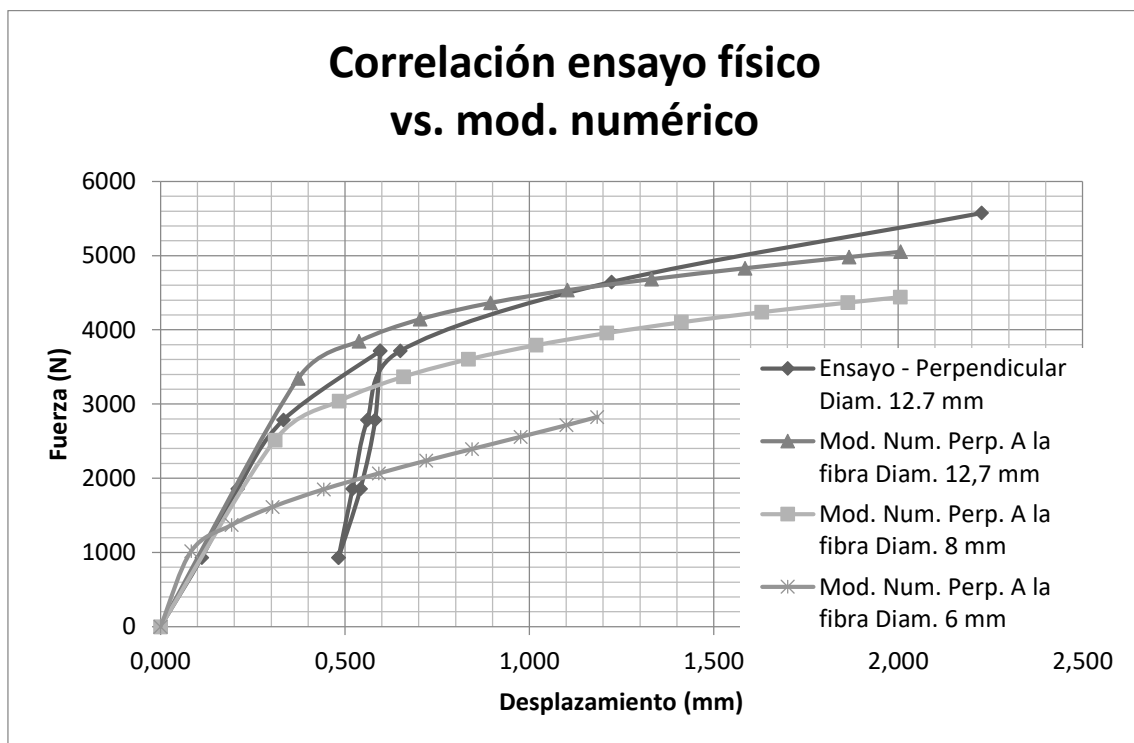


Figura 10. Correlación Fuerza-Desplazamiento para el ensayo vs. Modelo, para un diámetro de bulón de 12,7 mm. Adicionalmente, se muestra el efecto de reducción de diámetro en el ensayo virtual.



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.

## 7. CONCLUSIONES

El modelo constitutivo de Hill Generalizado presenta un comportamiento bilineal, 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.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Borodowski, E. y Suárez, (2004), El cultivo de álamos y sauces: su historia en el Delta del Paraná, SAGPyA Forestal,

Marino, Ricardo, (2014), Resistencia al aplastamiento para dos diámetros de elementos de fijación tipo clavija, Memorias 2014 Segundas jornadas de investigación en Ingeniería Civil,

Ross, Robert J., et al. (2010), Wood handbook: wood as an engineering material. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010: 509 p. 1 v., vol. 190.

Hill, Rodney (1998), The mathematical theory of plasticity. Vol. 11. Oxford university press,.

Shih, C. F., & Lee, D. (1978). Further developments in anisotropic plasticity. Journal of Engineering Materials and Technology, 100(3), 294-302.

Moses, D. M., & Prion, H. G. (2002). Anisotropic plasticity and failure prediction in wood composites. Ansys. net (online).

Johansen, K. W. (1949). Theory of timber connections. Int Assoc Bridge Struct Eng, 9, 249-262.