

MODELACIÓN NUMÉRICA DE UNIONES CLAVADAS DE MADERA CAPACES DE DISIPAR DE ENERGÍA

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

- (a) Ingeniero en Materiales, Becario de CONICET, placourt@mendoza-conicet.gob.ar,
(b) Ing. Civil, PhD, Facultad de Ingeniería, UN Cuyo fcrisafulli@fing.uncu.edu.ar
(c) Dr. Ing. Civil, Facultad de Ingeniería, UN Cuyo aemirasso@uncu.edu.ar

RESUMEN

En el diseño sismorresistente de estructuras de madera las uniones clavadas son de interés particular debido a su comportamiento histerético bajo cargas cíclicas reversibles que les permite actuar como disipadores de energía. Utilizando modelos de elementos finitos se realizó un modelo detallado de la unión simple, calibrado con resultados de ensayos experimentales, que representó adecuadamente el comportamiento dúctil de este tipo de uniones. Seguidamente se definió un macro modelo de la unión múltiple con elementos unidimensionales no lineales para representar el comportamiento histerético de las uniones clavadas, así como también la degradación de la rigidez y la falla de la conexión. A continuación se implementó el macro modelo de las uniones en la simulación de un pórtico arriostrado concéntrico construido a partir de elementos sólidos tridimensionales para representar a los miembros estructurales de madera y elementos unidimensionales para representar las uniones múltiples y se evaluó la respuesta estructural del sistema. Los modelos de elementos finitos planteados permitieron representar adecuadamente el comportamiento histerético de las uniones clavadas múltiples y su influencia sobre la estructura.

ABSTRACT

Nailed wood joints are of particular interest in the seismic design of wooden structures due to their hysteretic behavior under reversed cyclic loads which allow them to act as energy dissipation devices. Using finite element models a detailed modeling of a single joint was conducted and adjusted with experimental results, which represented adequately the ductile behavior of this kind of joints. Then a macro model of the multiple joint was defined using nonlinear unidirectional elements to represent the hysteretic behavior of the joint, as well as the stiffness degradation and failure of the connection. The nailed joint macro model was successfully implemented in a large simulation of a concentric braced timber frame where the wood members were built with tridimensional elements and the joints with unidirectional elements. The structural response of the system was evaluated. The finite element models allowed representing the hysteretic behavior of multiple nailed joints and their influence on the structure.

INTRODUCCIÓN

En el diseño sismorresistente de estructuras de madera las uniones clavadas son de interés particular debido a su comportamiento histerético bajo cargas cíclicas reversibles que les permite actuar como disipadores de energía. Es posible asegurar por medio del diseño estructural que las deformaciones no lineales se concentren en las zonas diseñadas para disipar energía, a fin de evitar la aparición de tensiones no deseadas que provoquen modos de falla frágiles en los componentes de la estructura. Sistemas estructurales como los pórticos arriostrados concéntricos, forman una estructura reticulada que aumenta la rigidez lateral del conjunto. Esto permite un control adecuado de los desplazamientos horizontales y a la vez concentra las fuerzas actuantes en las riostras de forma tal que las acciones laterales inducen en la estructura principalmente esfuerzos axiales. Los arriostramientos concéntricos presentan además ventajas significativas para la rehabilitación sísmica de estructuras, ya que permiten la fabricación de los componentes en taller y posterior montaje en obra con alteraciones mínimas de la actividad que se desarrolla en la construcción. Adicionalmente, en ciertos casos, es posible colocar solamente riostras para rehabilitar estructuras aporricadas existentes [1].

En las últimas décadas el método de elementos finitos (MEF) se ha convertido en el método prevalente usada para el análisis en mecánica estructural. Mediante el MEF se 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^[2], 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 obtenidos con el MEF depende del tipo de elemento utilizado, la discretización, las ecuaciones constitutivas, el tamaño de paso de carga, la descripción cinemática adoptada, etc.

Los modelos tridimensionales pueden lograr representar detalladamente mecanismos de falla tales como aplastamiento de la madera, flexión en el clavo y fricción entre componentes. Pero tienen un alto costo computacional de procesamiento, lo cual hace difícil su aplicación en modelaciones más complejas como puede ser la modelación de uniones múltiples o su aplicación en sistemas estructurales compuestos por un gran número de uniones múltiples. Esto hace necesario el desarrollo de modelos simplificados, o macro modelos, que representen el comportamiento global de las uniones, es decir, que sus parámetros de respuesta globales (rigidez, amortiguamiento viscoso equivalente, etc.) sean aproximadamente iguales a los obtenidos experimentalmente o mediante modelos de EF detallados.

El propósito de este trabajo es presentar una metodología desarrollada para la macro modelación numérica de uniones clavadas capaces de disipar energía, en particular las uniones múltiples sometidas a corte.

METODOLOGÍA

La definición y ajuste tanto del modelo refinado como del macro modelo se realizó siguiendo un esquema progresivo lógico, que se resume esquemáticamente en la figura 1. Dada la dificultad de llevar a cabo ensayos de corte en uniones clavadas simples (una cara de corte) se tomó como punto de referencia la curva envolvente carga-desplazamiento (F-u) obtenida en ensayo de laboratorio de una unión múltiple. A partir de estos resultados fue posible escalar los valores de carga para representar el comportamiento de una unión simple, asumiendo que el valor total de carga tomada por la probeta se distribuye uniformemente en cada uno de los elementos de fijación. Con la curva F-u escalada se calibraron los parámetros que gobiernan el comportamiento no lineal del modelo refinado construido con elementos finitos tridimensionales que representa la unión simple.

Se implementó un macro modelo construido con elementos unidimensionales no lineales que fueron ajustados a partir de la respuesta histerética de la modelación refinada. Una vez calibrado el macro modelo de la unión simple, se implementó para representar las uniones múltiples en un modelo de pórtico arriostrado concéntrico cuyos componentes estructurales (columnas, viga y riostras) fueron construidos con elementos sólidos tetraédricos de comportamiento elástico. Por último se evaluó la respuesta global del pórtico arriostrado ensamblado a través de elementos lineales.

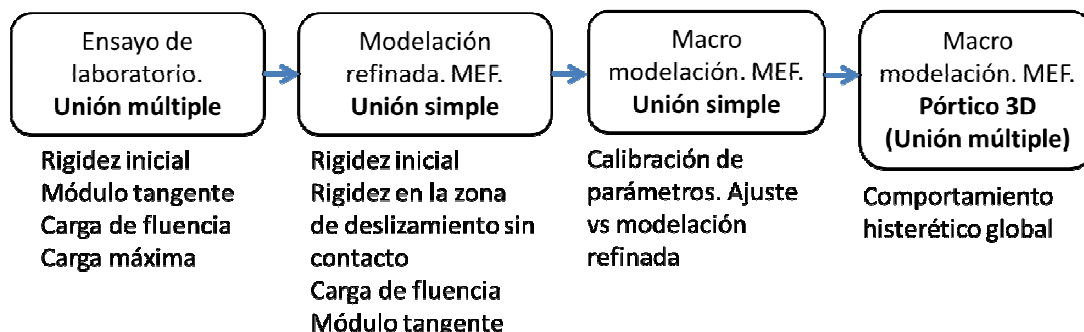


Figura 1. Resumen de la metodología implementada

Ensayo de laboratorio

Para poder calibrar los modelos numéricos con parámetros obtenidos en laboratorio se llevó a cabo un ensayo de una unión múltiple clavada típica. La probeta se conformó con elementos de madera de zoita (*Luehea divaricata*) con una sección de 150 mm x 20 mm y una longitud de 500 mm, unidos con clavos espiralados de 2.2 mm de diámetro x 50 mm de largo clavados con una clavadora neumática Dorking Titania. Los clavos se dispusieron en 2 filas de 2 unidades cada una en cada miembro lateral, con un espaciamiento suficiente para evitar la formación de fisuras, superando las medidas mínimas requeridas por el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera ^[3], conformando una unión múltiple de 16

elementos de fijación. En la figura 2.c se puede observar la probeta dispuesta en la máquina durante la realización del ensayo.

El ensayo mecánico fue realizado en Máquina Universal de Ensayos AMSLER con capacidad máxima de 60 toneladas. La escala utilizada fue de 0-6 ton, con una sensibilidad de 10kg calibrada en febrero de 2014 y equipada con un sistema de adquisición de datos que consiste en un calibre electrónico digital (sistema capacitivo de medición lineal), con un error de $\pm 0,02\text{mm}$ en el rango de medición usado. La probeta fue sometida a un protocolo de desplazamiento impuesto que se muestra en la figura 2.a. Se realizaron dos ciclos de carga con velocidad controlada hasta un 40% de la carga máxima esperada y descarga a 50 kg, luego un ciclo de carga hasta el 70% de la carga máxima esperada y posteriormente ciclos sucesivos de carga y descarga sin control de velocidad en incrementos de carga de 50 kg respecto del ciclo anterior y descargando a 50 kg sucesivamente hasta la rotura. La adquisición digital de datos se hizo en el rango de 0 a 3.3 mm. Los resultados obtenidos experimentalmente se presentan y discuten más adelante al ser comparados con los obtenidos mediante modelos de EF.

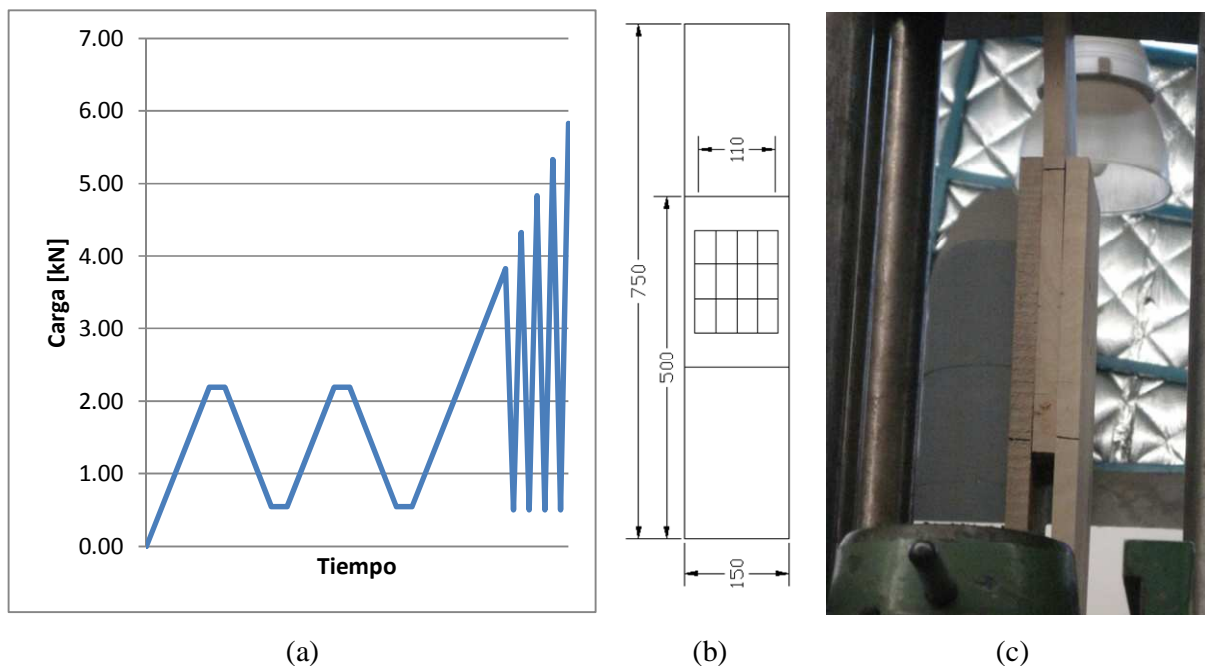


Figura 2. a) Protocolo de carga utilizado, b) dimensiones de la probeta, c) ensayo

Modelación refinada. Construcción del modelo de elementos finitos

Un modelo de elementos finitos tridimensional fue construido para representar el comportamiento histerético de una unión de dos miembros de madera con un elemento de fijación tipo clavija bajo carga lateral, es decir, una unión simple con una cara de corte. 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). El modelo construido no incluye la representación geométrica de la cabeza y punta del clavo por lo que vale su denominación genérica de elemento de fijación tipo clavija en lugar de clavo.

Propiedad	Valor	Unidad
E_X, E_Y	375	MPa
E_Z	7455	MPa
PR_{XY}	0.545	mm/mm
PR_{YZ}, PR_{XZ}	0.018	mm/mm
G_{XY}	121	MPa
G_{YZ}, G_{XZ}	505	MPa

Tabla 1. Constantes elásticas asignadas al tensor elástico ortotrópico de la madera

Se asignaron las propiedades de elasticidad ortotrópica a los elementos de madera así como un comportamiento de endurecimiento isotrópico bilineal en la zona cercana a la clavija. Las constantes elásticas asignadas al tensor elástico ortotrópico para la madera se muestran en la tabla 1, en donde E_i es el módulo elástico en la dirección i , G_{ij} es el módulo de corte en el plano ij y PR_{ij} es el Coeficiente de Poisson entre las direcciones i y j . El contacto entre la clavija y la madera 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^[4].

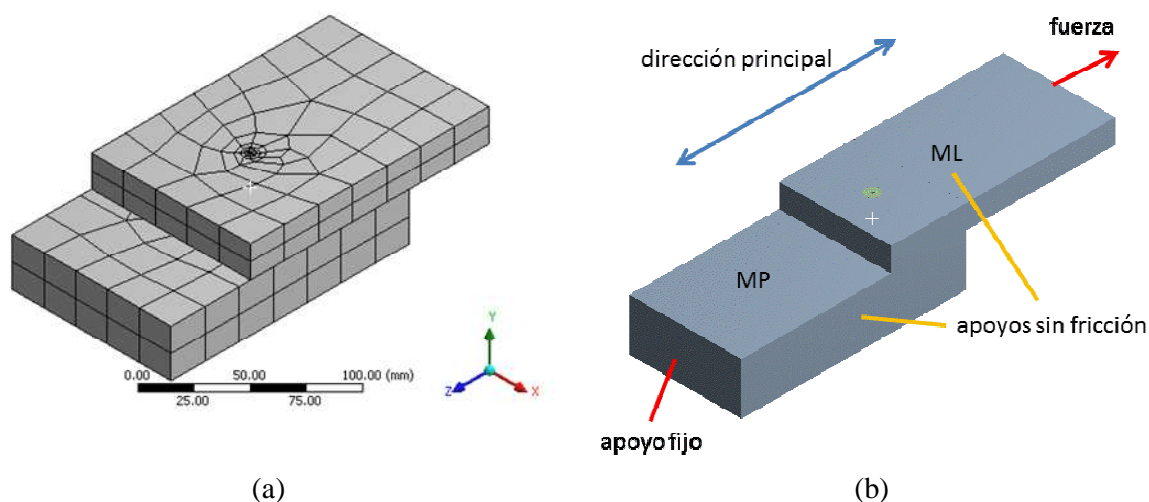


Figura 3. a) Malla de elementos sólidos hexaédricos utilizada en la modelación refinada, b) disposición esquemática de vínculos y solicitaciones

Se ajustaron los parámetros de generación de malla de ANSYS para obtener una buena relación precisión-velocidad de convergencia. Se aplicó un mallado mapeado en la proximidad de la unión para los miembros principal y lateral. El número final de nodos fue de 4550 distribuidos en 752 elementos, de los cuales la mayor densidad (refinación de malla) se encuentra en la zona de contacto entre el elemento de fijación y la madera. Un gráfico esquemático de la malla puede verse en la figura 3a. 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 (o el desplazamiento) se aplicó distribuida sobre la cara posterior del ML (ver figura 3b). Las solicitaciones se aplicaron en desplazamientos impuestos.

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, valores obtenidos a partir del diámetro del elemento de fijación según AF&PA [5].

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 [6]. 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. Si bien la compresión longitudinal a las fibras se caracteriza por una degradación de la rigidez antes de la densificación, en el rango de cargas hasta el desplazamiento último de la unión, puede considerarse que existe un leve fenómeno de endurecimiento o aumento de la rigidez posterior a la fluencia. Estudios anteriores realizados por otros investigadores han representado satisfactoriamente el aplastamiento de las fibras de la madera mediante una aproximación bilineal [7].

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 inicialmente como igual a la resistencia al aplastamiento de la madera, F_c . Para uniones con elementos de fijación de tipo clavija sometidos a carga lateral la NDS provee ecuaciones para calcular la resistencia al aplastamiento en la zona de contacto de la madera [5]. Para diámetros de clavija menores a 6.35 mm no se distingue una influencia significativa entre la dirección de aplicación de la carga y la dirección transversal o paralela a las fibras por lo que la resistencia al

aplastamiento F_e se calcula según la Ec.1, la cual es función solamente de la gravedad específica anhidra de la madera, G . Se asumió un valor de G igual a 0.6 para los parámetros iniciales del modelo. El módulo tangente se determinó a partir de la curva F - u obtenida en el ensayo mecánico.

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

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. 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.

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 asumió un coeficiente de fricción de 0.5 en base a la experiencia documentada en la literatura publicada ^[8]. Se utilizó un algoritmo de contacto tipo Lagrange Aumentado, el cual ha sido utilizado exitosamente por otros autores ^[9]. 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.

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 et al. ^[10] encontraron una relación directamente proporcional entre el parámetro FKN y la 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.

Macro modelación. Unión simple

Se buscó representar el comportamiento histerético de la conexión a través de un macro-modelo simplificado que permita agilizar el tiempo de procesamiento a fin de estudiar configuraciones complejas de conexiones con múltiples elementos de fijación. El macro modelo está compuesto principalmente por elementos simples (resorte y patín de fricción). El comportamiento global del modelo se dividió en tres etapas, una primera etapa consistente en el comportamiento histerético para deformaciones inferiores a la deformación última (Módulo 1); una etapa correspondiente a la degradación de la rigidez (Módulo 2) y la etapa final correspondiente a la falla de la unión (Módulo 3). Una figura esquemática del modelo completo puede verse en la figura 4.

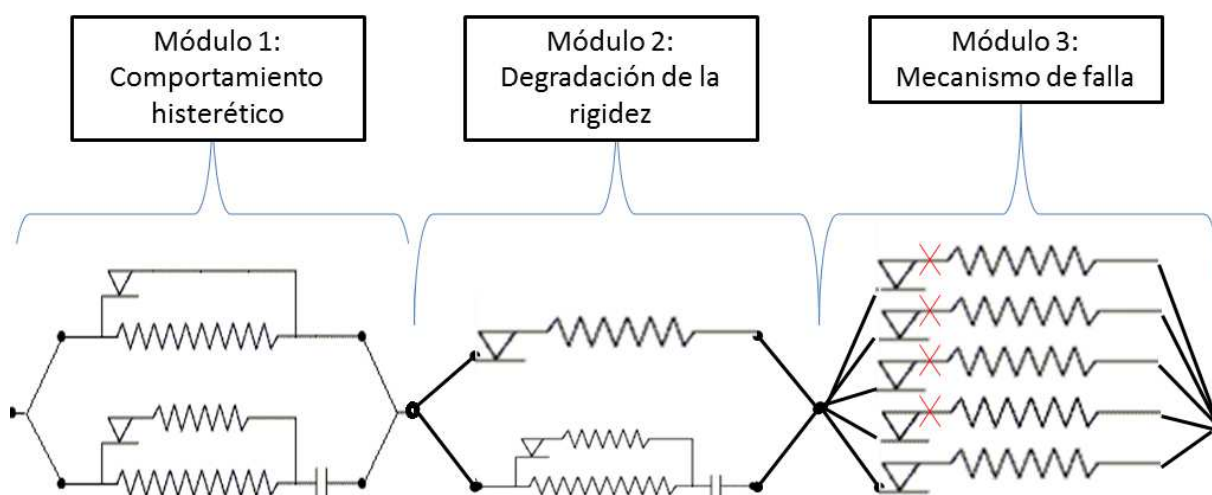


Figura 4. Representación esquemática del macro modelo con sus 3 módulos.

Módulo 1. Comportamiento Histerético

Blasetti et al. ^[11] han utilizado con éxito elementos finitos unidimensionales para modelar el comportamiento dinámico histerético de uniones clavadas. El modelo constitutivo asumido está compuesto por dos ramas en paralelo que poseen una combinación elementos simples (resortes, patín de fricción y gap o brecha) para representar el comportamiento elastoplástico no lineal. Cada rama está constituida por un elemento de conexión unidimensional COMBIN40 disponible en el código comercial de elementos finitos ANSYS. Un esquema del modelo constitutivo puede verse en la figura 5a.

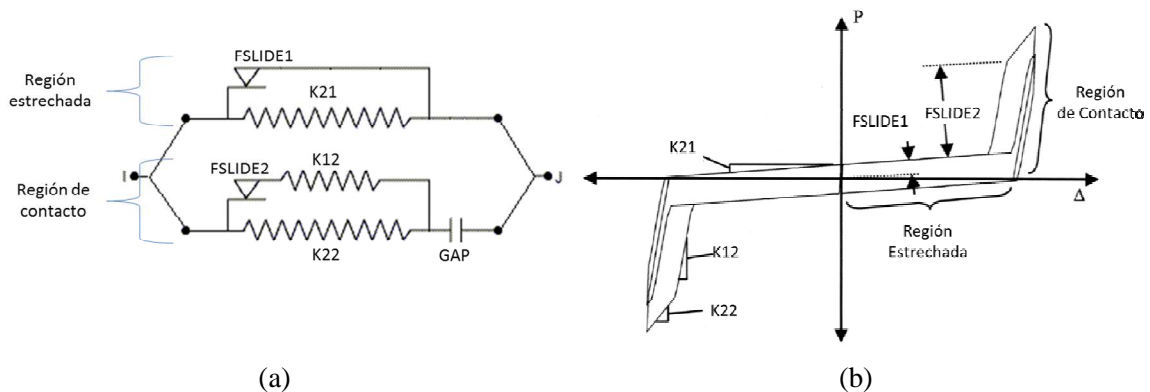


Figura 5. Constantes que controlan el comportamiento elastoplástico no lineal. a) Representación de modelo constitutivo, b) Comportamiento carga-desplazamiento.

El primer elemento COMBIN40 (rama superior) modela la mayoría de los ciclos secundarios, la región estrechada de la curva carga desplazamiento (Fig. 5b). Consiste en un resorte (K21) y un patín de fricción (FSLIDE1) de dos direcciones en paralelo. El resorte representa la pendiente de la región estrechada y el patín de fricción representa la mitad del espesor de la región estrechada. Este elemento modela la rigidez mínima y disipación de energía de un ciclo secundario.

El segundo elemento modela el comportamiento de la conexión cuando el clavo se pone en contacto con la madera. Consiste en un resorte (K12) en serie con un patín de fricción (FSLIDE2) de una dirección, todo lo cual está en paralelo con otro resorte (K22). También contiene un gap de modo tal que la conexión no ofrece resistencia cuando el gap está abierto, pero cuando se cierra toma carga. Inicialmente el gap está cerrado. El patín de fricción crea una transición de la rigidez elástica a rigidez inelástica de la conexión causada por el aplastamiento de la madera, la transición ocurrirá una vez que el elemento es comprimido con el gap cerrado. El deslizador también permite al gap abrirse a medida que el elemento se descomprime. Cuando el gap aumenta, ocurre la transición a grandes desplazamientos para ciclos subsiguientes.

Los valores numéricos para calibrar el modelo fueron tomados de datos obtenidos en experimentos numéricos del modelo refinado para la unión simple bajo carga cíclica reversa. La respuesta del modelo de la conexión para cualquier ciclo dado es una función del desplazamiento en el ciclo actual y el desplazamiento máximo previo. Por lo tanto, se asume que la respuesta no es una función de amortiguamiento o de velocidad. Este módulo no es capaz de representar por sí solo la falla de la conexión, sino que continúa proveyendo resistencia aún en grandes desplazamientos; consecuentemente, se incorporó al modelo dos módulos adicionales, uno capaz de aportar al comportamiento global del conjunto la degradación de la rigidez de la conexión para grandes deformaciones y un módulo capaz de representar la falla de la conexión una vez alcanzada la resistencia última de la misma.

Modulo 2. Degradación de la rigidez

Para representar la degradación de la rigidez en la conexión, se construyó un módulo consistente en tres ramas con resortes en paralelo en donde las dos primeras ramas incluyen a su vez un patín de fricción en serie con el resorte. Es decir, los resortes soportan valores de carga crecientes hasta que en su rama correspondiente se alcanza la fuerza de deslizamiento (Figura 4, Módulo 2). Esta configuración simple permite una calibración de parámetros numéricos directa a partir de la curva Fuerza-Desplazamiento experimental. La suma de la rigidez de los tres resortes en paralelo constituye el módulo fundacional o rigidez inicial, K_{fund} ; la rigidez del resorte de la última rama, que no posee un patín de fricción, es igual al módulo tangente de la conexión, K_{tan} ; y por último las fuerzas de deslizamiento de los patines de la primera y segunda rama pueden obtenerse como el valor de carga en cada rama que corresponde al límite de fluencia convencional, D_y , y al deslizamiento correspondiente a la carga máxima, D_{ult} , o bien pueden adoptarse valores que ajusten mejor la curva experimental si se la conoce. Es necesario determinar numéricamente una rigidez media, K_{med} , que determinará la deformación máxima alcanzada por el conjunto al momento de la carga máxima.

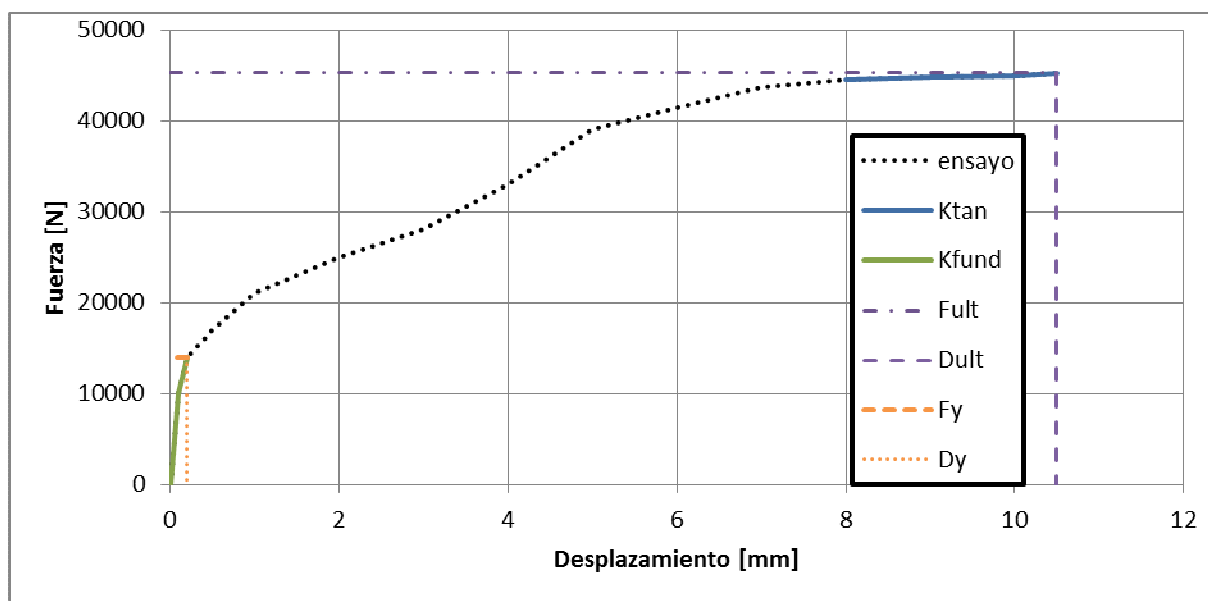


Figura 6. Parámetros de calibración del Módulo 2, Degradación de la Rigidez, a partir de la curva Fuerza-Desplazamiento de referencia experimental.

En la figura 6 se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento de un ensayo de laboratorio en la que se destacan los parámetros que definen el Módulo 2. Para calibrar este módulo se usaron resultados obtenidos por otros autores en ensayos de laboratorio para una unión múltiple en compuesta de 21 clavos de 2.5 mm de diámetro sometida a corte doble en 3 miembros de madera de Eucalyptus Grandis de $100 \times 22 \text{ mm}^2$ de sección ^[12].

Modulo 3. Rotura

Para representar la falla de la conexión, el momento a partir del cual la carga que es capaz de resistir disminuye hasta hacerse casi nula, se añadió un módulo consistente en un conjunto de ramas patín de fricción + resorte en paralelo (Figura 4, Módulo 3), configurados para anularse (rotura) en el momento en que se alcanza la carga de deslizamiento en cada uno de los patines excepto en el último, lo que le da al conjunto la capacidad de soportar una carga remanente luego de la rotura. Cada rotura se observa en el comportamiento global como una discontinuidad provocada por la pérdida de capacidad de carga del resorte que se anula junto con el patín de fricción, lo cual puede generar problemas de convergencia numérica. Esto puede solucionarse añadiendo más pares patín/resorte a fin de distribuir la carga en más elementos y hacer los saltos de carga de menor magnitud. Las constantes de cada rama se configuran para que la mayor rigidez o capacidad de carga del conjunto se concentre en las primeras ramas y la carga se libere en saltos de aproximadamente igual magnitud.

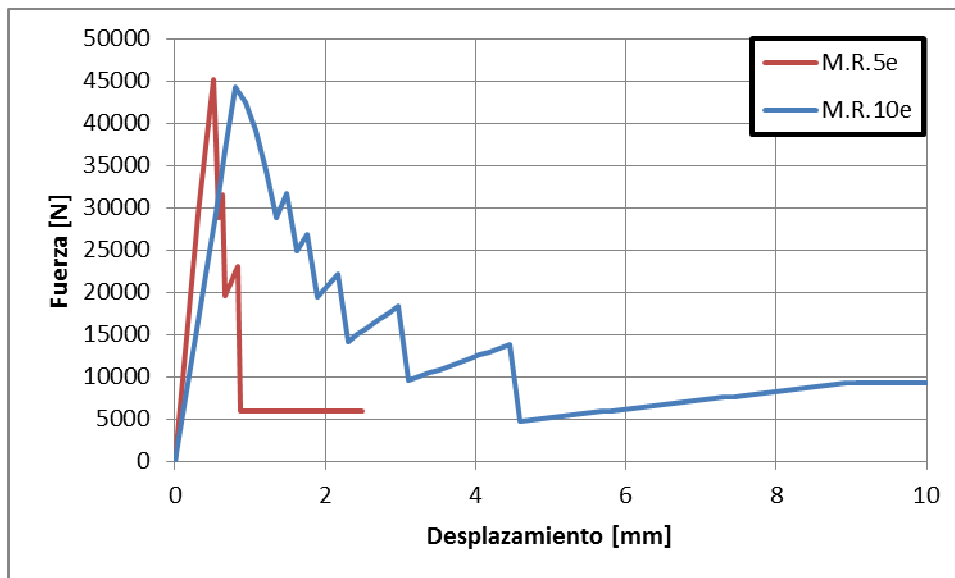


Figura 7. Comportamiento Fuerza-Desplazamiento del Módulo de Rotura para 5 y 10 ramas patín/resorte en paralelo.

Es importante destacar que no se encuentra en la bibliografía información abundante que describa la forma de la curva Fuerza-Desplazamiento posterior al momento en que se alcanza la carga máxima dadas las dificultades que presenta la medición experimental de este fenómeno, por lo cual los valores asumidos para cada salto de carga son simbólicos y no representan la falla de una conexión real. Sin embargo este modelo es de utilidad en el estudio del mecanismo de colapso de sistemas complejos en donde es necesario conocer el comportamiento de un sistema estructural a medida que sus componentes comienzan a fallar. En la figura 7 se observa el comportamiento Fuerza-Desplazamiento del Módulo de Rotura para 5 y 10 ramas patín/resorte en paralelo.

Pórtico arriostrado con uniones unidimensionales

Se construyó un pórtico arriostrado concéntricamente utilizando elementos tetraédricos. El mismo puede observarse en la figura 8.

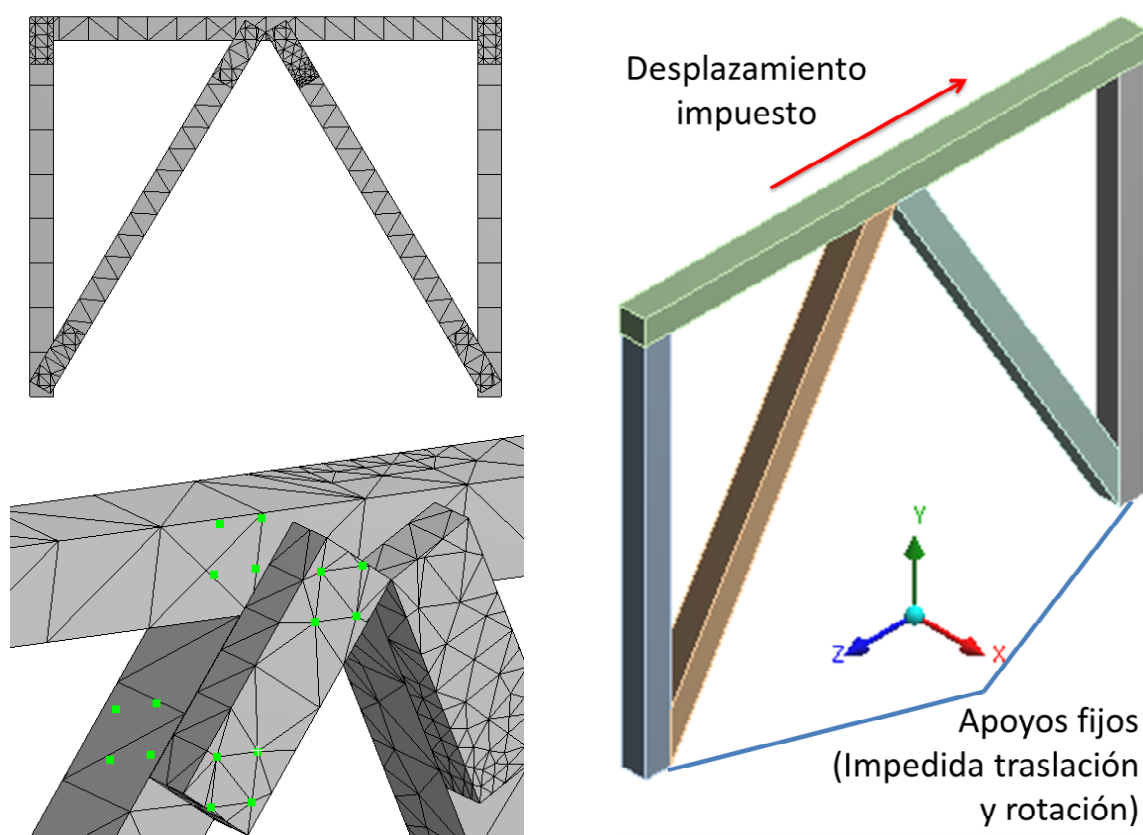


Figura 8. Izq. Arriba: Malla de elementos sólidos tetraédricos utilizada en la modelación refinada 3D del pórtico arriostrado; Izq. Abajo: Detalle de uniones; Derecha: disposición esquemática de vínculos y solicitaciones

La vinculación entre dos elementos estructurales (ej.: viga-riostra) está compuesta por un dos pares Miembro Principal-Miembro Lateral (MP-ML) de modo tal que para vincular el elemento principal 1 con el elemento principal 2 es necesario modelar ambas conexiones: MP1-ML y MP2-ML. Cada conexión representa una unión múltiple clavada, las cuales se modelaron a través del macro modelo compuesto de elementos lineales descrito anteriormente. Para poder otorgar a las uniones la capacidad de transmitir esfuerzo de momento se construyeron las uniones usando cuatro pares de nodos por unión. En la figura 8 puede verse en el detalle de la unión viga-riostra en color verde los nodos de la malla de elementos utilizados para ensamblar el sistema estructural. Las propiedades elásticas ortotrópicas asignadas a los componentes estructurales son las mismas que se muestran en la Tabla 1. La respuesta global del pórtico arriostrado ensamblado se obtuvo a través de una simulación numérica con desplazamiento monótonico creciente y otra simulación

numérica con desplazamiento cíclico reverso para determinar la respuesta histerética del conjunto. Los parámetros de los elementos de conexión utilizados corresponden a la curva experimental mostrada en la figura 6 correspondiente a una unión múltiple con 21 elementos de fijación obtenida por Sosa Zitto et al.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Modelación refinada y ensayo de laboratorio

A partir de envolvente de la curva carga-desplazamiento obtenida en el ensayo de laboratorio se determinaron los siguientes parámetros para calibrar el modelo refinado de la unión simple: rigidez inicial, carga de fluencia y módulo tangente. Los mismos pueden observarse en la figura 9a y la tabla 3. Luego se ajustaron los parámetros que regulan el comportamiento elastoplástico bilineal del modelo de elementos finitos: módulo elástico, módulo tangente y tensión de fluencia. La comparación entre la curva obtenida en ensayo y la obtenida a partir del modelo de elementos finitos se muestra en la figura 9b.

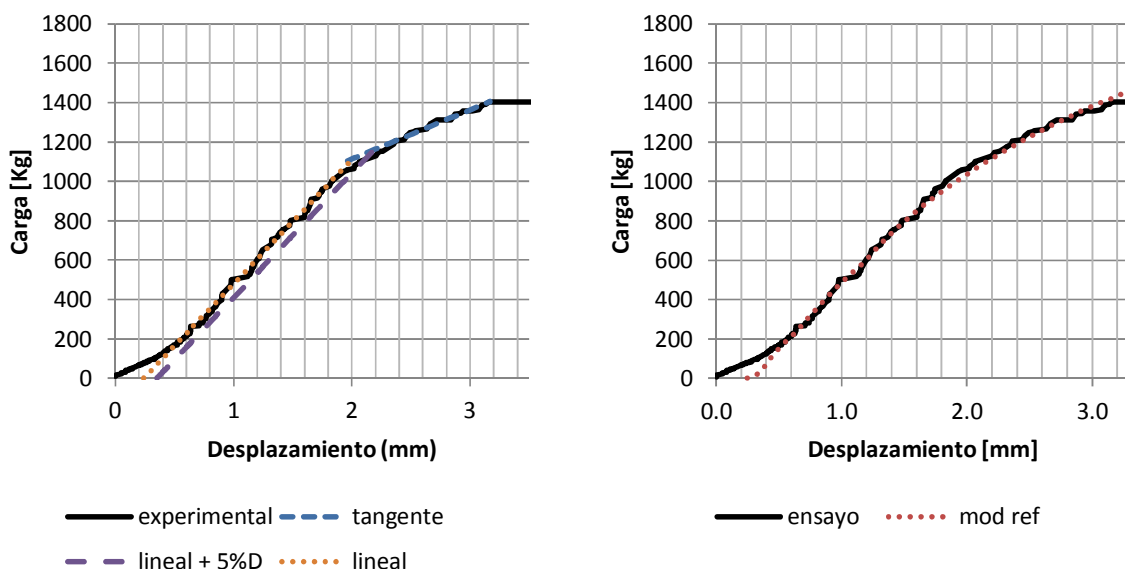


Figura 9. a) Obtención de parámetros a partir de curva experimental, b) comparación de la envolvente de la curva experimental vs modelación refinada.

Parámetro	Ensayo	Modelo MEF
Rigidez inicial	631 kg/mm	679 kg/mm
Módulo tangente	249 kg/mm	321 kg/mm
Carga de fluencia	1091 kg	885 kg

Tabla 3. Tipificación de curva experimental y parámetros de calibración

Comportamiento histerético del modelo refinado

Se realizó una simulación numérica refinada de una unión simple (una cara de corte) con un protocolo de carga cíclico a fin de determinar la respuesta histerética del modelo refinado. Se implementaron 24 ciclos en 8 grupos de 3 ciclos cada uno en los cuales el desplazamiento máximo de cada grupo se incrementaba en un 10% del desplazamiento máximo. El desplazamiento máximo se estableció como igual al desplazamiento máximo medido en el ensayo mecánico, 3.3 mm. La respuesta histerética para una cara de corte se observa en la figura 10a junto con la respuesta histerética típica para una conexión dúctil capaz de disipar energía tal como lo reportan de Dujíč, B. y Zarnic, R. ^[13] (Figura 10b).

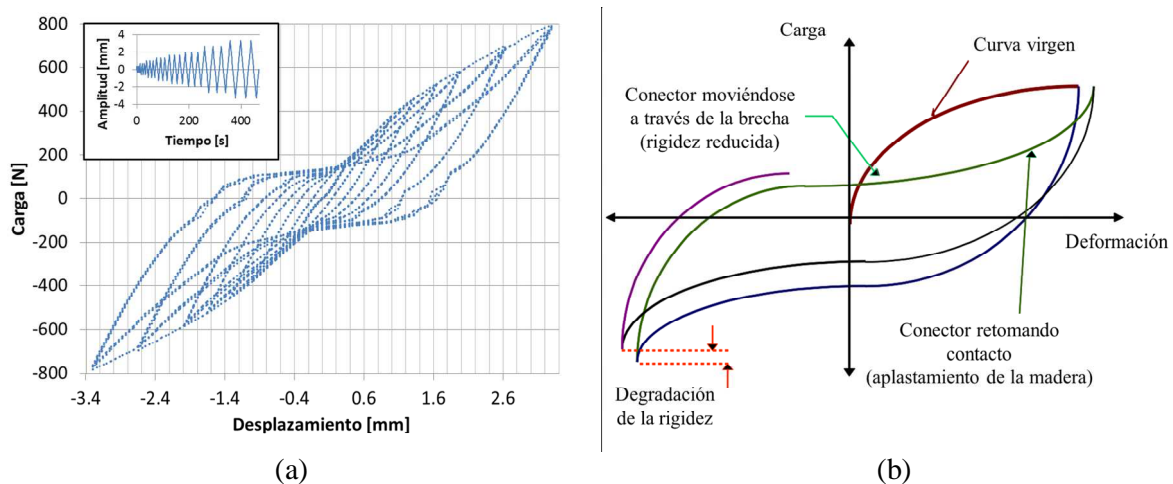


Figura 10. Respuesta histerética. a) MEF, b) Curva típica para conexiones dúctiles según Dujíč, B. y Zarnic, R.

Se observa que el modelo representa adecuadamente el comportamiento histerético de conexiones dúctiles capaces de disipar energía. Para cada incremento de desplazamiento, al comienzo la curva F-u sigue a la curva envolvente (Fig.10b, curva virgen), luego en la descarga y recarga el clavo se mueve a través de una región de rigidez reducida porque pierde contacto con la región aplastada de la madera y se mueve friccionalmente a través de una región ya deformada. Si se continúan realizando ciclos de carga sin incrementar el desplazamiento máximo, la rigidez se degrada con cada ciclo. Sólo cuando vuelve a incrementarse el desplazamiento máximo, es decir, continúa la plastificación o aplastamiento de la madera (clavo retomando contacto), la rigidez aumenta.

Macro modelación. Calibración del modelo

Se obtuvieron los siguientes datos a partir de la respuesta histerética de modelación refinada 3D: amplitud de la región estrechada y rigidez, rigidez de la zona de contacto y de la zona de transición, amplitud de la región de contacto. Los mismos pueden verse en la figura 11 y en la tabla 4.

Parámetro	MEF3D	COMBIN40	Unidad
Fslide1	67.31	70	N
K21	49.959	35	N/mm
Fslide2	539.68	150	N
K12	105.72	250	N/mm
K22	170.56	100	N/mm
K _{cic}	239	237	N/mm
veq _{cic}	0.12	0.11	N.mm2

Tabla 4. Parámetros obtenidos para la calibración del modelo

Los parámetros se calcularon en primer lugar a partir de la respuesta histerética del último ciclo de carga a través de regresiones lineales a los tres tramos de interés y luego se ajustaron para minimizar la diferencia entre la rigidez total del ciclo K_{cic} y el amortiguamiento viscoso equivalente veq_{cic} del modelo MEF3D y el modelo lineal construido con los elementos COMBIN40 así como también para ajustar el comportamiento F-u a la envolvente obtenida en la modelación refinada.

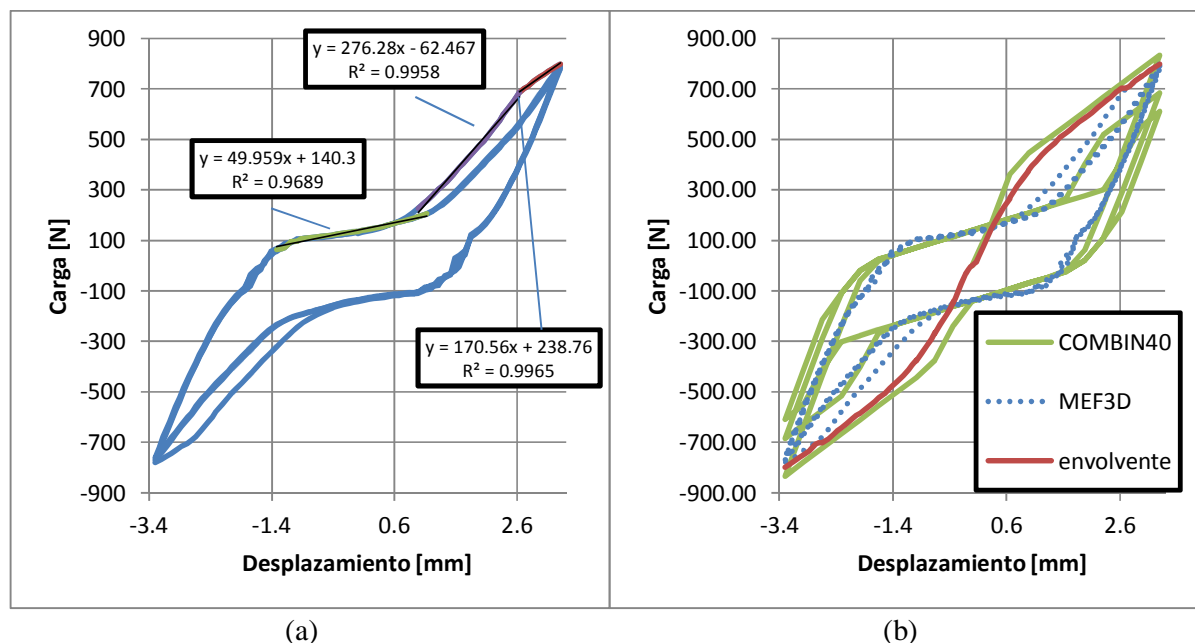


Figura 11. Respuesta histerética. a) MEF, b) Curva típica para conexiones dúctiles

Respuesta del modelo bajo carga monotónica

Se comparó la curva obtenida experimentalmente por Sosa Zitto con la respuesta F-u del macro modelo completo escalado de la unión con para carga monotónica y para la envolvente de una simulación bajo carga cíclica reversible. Las curvas pueden observarse en la figura 12.

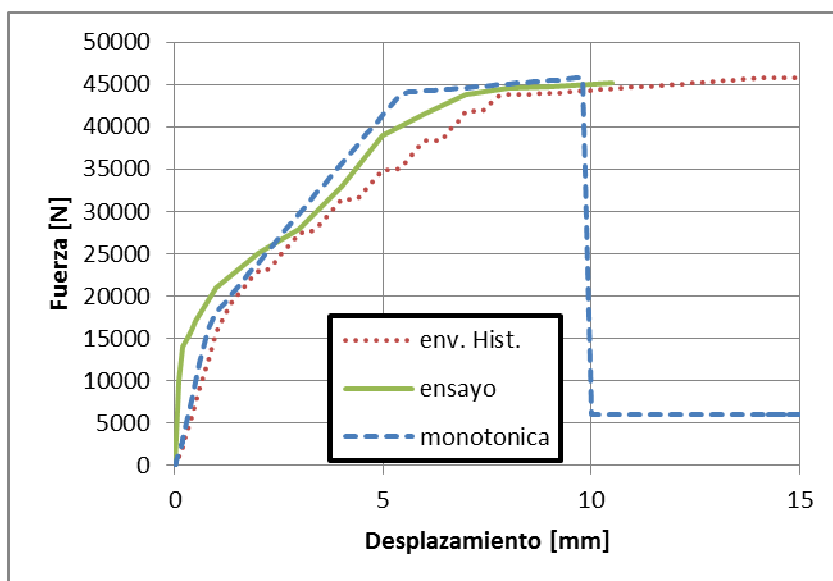


Figura 12. Comparación curva experimental de unión múltiple (ensayo) con respuesta del modelo para carga monotónica y cíclica reversible (env. Hist.)

Se observa que el macro modelo es capaz de realizar un buen ajuste de la curva experimental tanto para carga monotónica como para carga cíclica reversible. La respuesta global del macro modelo presenta de forma clara las etapas de deformación de la unión: existe una primera región donde hay comportamiento elástico (0 a 15000 N), luego un comienzo de la fluencia con una degradación inicial de la rigidez (15000 a 42000 N) que muestra plasticidad con endurecimiento, posteriormente cuando se está próximo a la carga última se presenta una segunda zona de fluencia donde el endurecimiento disminuye significativamente y la rigidez se hace igual al módulo tangente por lo que ocurre un gran desarrollo de la deformación con un leve aumento de la carga (5 a 10 mm) y finalmente aparece la rotura (≈ 45000 N). Se observa que bajo carga cíclica reversible, la envolvente muestra una mayor degradación de la rigidez, lo que provoca que la carga de rotura no se alcance para el nivel de deformación alcanzado.

Respuesta del modelo bajo carga cíclica

Utilizando un protocolo de carga cíclico (15 ciclos, desplazamiento máximo 15 mm, incremento de 1 mm del desplazamiento máximo en cada ciclo) se obtuvo la respuesta histerética del macro modelo completo para una unión múltiple. Se observa que para bajas deformaciones (Figura 13a) tiene el mismo patrón F-u que el modelo refinado mostrado en la figura 10, caracterizado por una región de estrechamiento o pinching bien definida. A medida que se incrementa el nivel de deformación, los ciclos de histéresis se desarrollan dentro de los límites de la envolvente respetando las etapas de fluencia con endurecimiento y fluencia tangente hasta alcanzarse la rotura (Figura 13b) en donde la carga cae hasta anularse o mantener una resistencia residual. Esto muestra que el macro modelo desarrollado funciona adecuadamente para bajas deformaciones, grandes deformaciones y rotura.

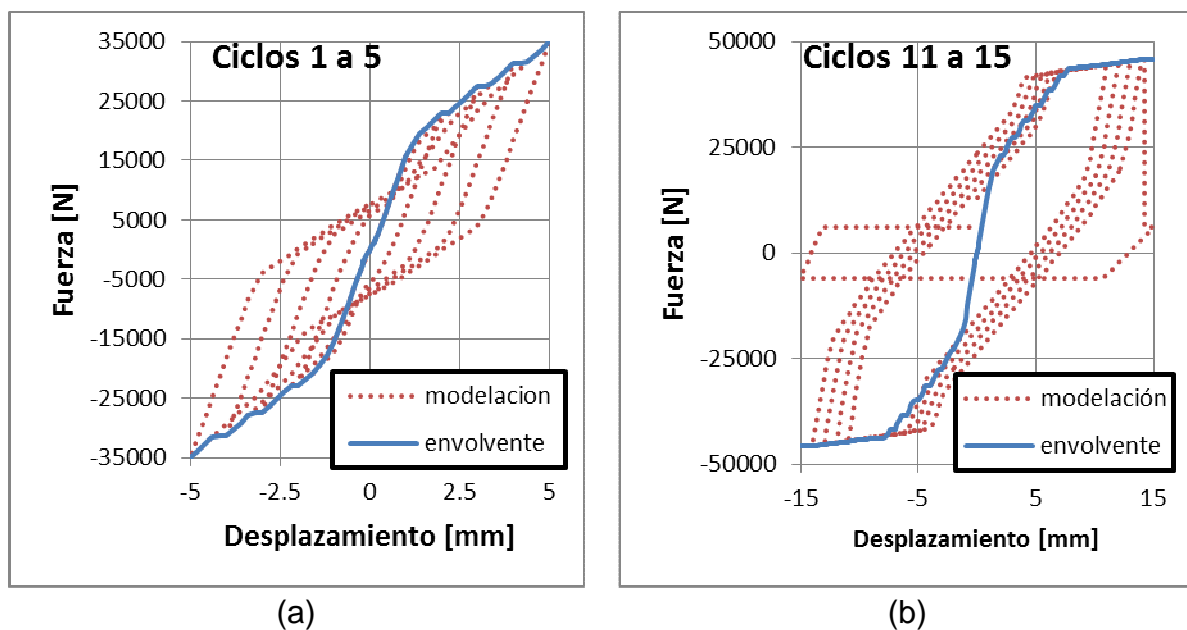


Figura 13. Respuesta histerética del macro modelo completo. a) Primeros ciclos, b) Últimos ciclos hasta la rotura.

Implementación del macro modelo en una estructura plana

Se implementó el macro modelo para representar las uniones de un pórtico arriostrado mostrado en la figura 8. Cada unión representó un par MP-ML a través de 4 pares de nodos a fin de poder otorgarse la capacidad de transmitir esfuerzo de momento, lo que no puede ser lograda utilizando un solo par de nodos ya que al igual que en un elemento de fijación longitudinal como un clavo se formaría un eje sin impedimento para la rotación. Los valores numéricos para cada unión son idénticos a los usados en la calibración de la respuesta monotónica, es decir representan una unión múltiple compuesta por 21 elementos de fijación tal como fue

ensayado por Sosa Zitto. La respuesta obtenida Momento (en el apoyo fijo)-Desplazamiento tanto para carga monótonica como cíclica puede verse en la figura 14.

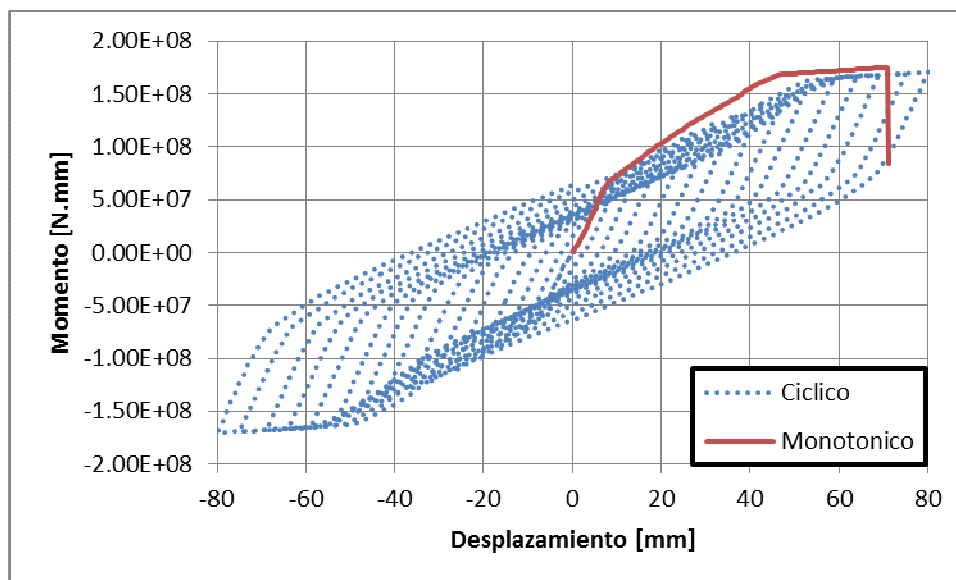


Figura 14. Respuesta monótonica e histerética del pórtico arriostrado ensamblado a través del macro modelos de la unión.

Si bien los valores numéricos son cualitativos dado que no se está representando una estructura real, se observa que el modelo de pórtico posee una gran capacidad de disipación de energía, dado que su curva de histéresis presenta un fenómeno de estrechamiento mucho menos pronunciado que el de las uniones clavadas. Toda la disipación proviene de la deformación plástica modelada a través de los elementos lineales ya que los miembros de madera están configurados para tener un comportamiento elástico.

CONCLUSIONES

Se modelaron las uniones clavadas entre dos elementos de madera usando el software de análisis de elementos finitos ANSYS. Se realizó en primer lugar una modelación refinada ajustada a partir de un ensayo de laboratorio. A partir de la modelación refinada se calibró un macro modelo construido con elementos básicos como resortes y patines de fricción que permitieron simplificar el proceso de modelado y su implementación en sistemas estructurales más complejos como un pórtico arriostrado concéntrico.

Se comprobó que el comportamiento histerético puede ser modelado usando una combinación de elementos básicos comunes a un gran número de software de análisis por elementos finitos. Esto permite la predicción del desempeño de un sistema estructural (pórtico) basado en los datos provenientes de ensayos de las uniones clavadas. El modelo de conexión representa cualitativamente el

comportamiento de las uniones clavadas. Los valores de disipación de energía y rigidez predichos por el modelo de conexión caen dentro de un rango razonable de forma tal que los modelos de uniones pueden ser incorporados en simulaciones de mayor escala como por ejemplo el análisis de un pórtico arriostrado concéntrico.

Se ha presentado un método para la estimación de las propiedades de las uniones clavadas de madera. Esta metodología puede ser aplicada a otros tipos de conexiones. Su versatilidad permitiría ajustar el comportamiento de la conexión así como también las propiedades de material. También permitiría explorar modificaciones en el diseño a fin de mejorar el desempeño sísmico de estructuras. Además de uniones mecánicas de madera, esta metodología podría ser aplicada a cualquier componente estructural con comportamiento histerético y resulta un aporte original al incorporar un mecanismo de degradación de la rigidez y de rotura de forma sencilla, por lo que facilita el análisis de estructuras complejas con numerosas uniones y elementos.

Esta metodología de modelado ofrece un gran potencial como una alternativa simple a las técnicas de programación intensiva y modelación refinada de alto costo computacional utilizados comúnmente en el ámbito de la ingeniería estructural. Es posible ajustar los parámetros que los gobiernan para lograr predicciones precisas a partir de ensayos simples de laboratorio. La principal limitación del modelo es que no considera la influencia de la velocidad de desplazamiento al no incorporar en el modelo constitutivo elementos tipo viscoso. Sin embargo, podría extenderse su aplicación a otras uniones de miembros estructurales con características histeréticas.

Referencias:

1. Crisafulli, F.J. (2010). Diseño sismorresistente de construcciones de acero, ILAFA, Santiago, Chile
2. Mackerle, J. (2003). Finite element analysis of fastening and joining: A bibliography (1990–2002), International Journal of Pressure Vessels and Piping, 80:253–271,
3. INTI-CIRSOC (2013), Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Buenos Aires
4. ANSYS Inc. (2009). ANSYS® Workbench Release 12.0, Help System, Mechanical User's Guide, WA, USA.
5. American Forest & Paper Association (1999), General Dowel Equations for Calculating Lateral Connection Values. Technical Report 12, American Wood Council, USA.
6. Holmberg S., Persson K., Petersson H. (1999). Nonlinear mechanical behavior and analysis of wood and fiber materials, Computers and Structures, 72:459-480.
7. Dias, A.M.P.G., Van de Kuilen, J.W., Lopes, S., Cruz, H. (2007). A non-linear 3D FEM model to simulate timber–concrete joint, Advances in Engineering Software,

38:522-530.

8. Ehlbeck, J. (1979). Nailed joints in wood structures, Virginia Polytechnic Institute and State University - Wood Research and Wood Construction Laboratory.

9. Kharouf N., McClure, G., Smith, I. (2003). Elasto-plastic modeling of wood bolted connections, *Computers and Structures*, 81:747–754.

10. Santos, C.L., de Jesus, A.M.P., Morais, J.J.L., Lousada, J.L.P.C. (2008). 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.

11. Blasetti, A.S.; Hoffman, R. M.; Dinehart, D. W. (2008); Simplified Hysteretic Finite-Element Model for Wood and Viscoelastic Polymer Connections for the Dynamic Analysis of Shear Walls, *J. Struct. Eng.*134:77-86.

12. Sosa Zitto, M. A.; Köhler, J.; Piter, J. C. (2014); Load-carrying capacity of timber-to timber joints of fast-growing Argentinean *Eucalyptus grandis* with nails of small diameter laterally loaded in double shear: analysis according to the criterion adopted by European standards, *European Journal of Wood and Wood Products*, 72:21-31

13. Dujič, B., Zarnic, R. (2006). Study of lateral resistance of massive x-lam wooden wall system subjected to horizontal loads. International Workshop on "Earthquake Engineering on Timber Structures" Coimbra, November.