

# SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE VIGAS CAJÓN ESTRUCTURALES CON MADERA DE FRONDOSA Y CONÍFERA EN SITUACIÓN DE INCENDIO

## NUMERICAL SIMULATION OF THERMO-MECHANICAL PERFORMANCE IN EUCALYPTUS GLOBULUS BOX FRAMED TIMBER BEAMS UNDER A FIRE EVENT

Rubén Regueira <sup>(1)</sup>, Elisa Otero <sup>(2)</sup>, Ramón Díaz <sup>(3)</sup>, Manuel Guaita <sup>(4)</sup>

(1) Doctor Ingeniero de Montes. Universidad de Santiago de Compostela. España.

(2) Arquitecto. Maderas Besteiro. España.

(3) Ingeniero Industrial. Gompute. Suecia.

(4) Doctor Ingeniero Agrónomo. Catedrático de Universidad. Universidad de Santiago de Compostela. España.

Dirección de contacto: ruben.regueira@usc.es

### Código de identificación: T6-13

#### Resumen

Este trabajo presenta un estudio teórico sobre el comportamiento de un producto estructural con forma de cajón. Hasta ahora, este tipo de diseño se ha desarrollado en Centroeuropa con solvencia estructural demostrada, pero solamente con madera de conífera (*Picea abies*). La singularidad del trabajo es utilizar una madera de frondosa (*Eucalyptus globulus*), que es una madera poco comercializada con fines estructurales, pero con excelentes cualidades mecánicas y grandes posibilidades de mercado y que, hasta la fecha, no se conoce que haya estudios sobre este tipo de elementos estructurales elaborados con este tipo de madera.

Para ello, se realiza un análisis numérico mediante el método de los elementos finitos (MEF), del comportamiento estructural de vigas cajón en situación ordinaria, utilizando tanto madera de conífera como madera de frondosa, comparando los resultados de ambos casos. Además, se estudia también su comportamiento en situación de incendio, con el objetivo de validar la capacidad portante del producto de acuerdo a la legislación nacional.

**Palabras clave:** simulación numérica; viga cajón; madera; eucalipto; fuego

#### Abstract

*This paper presents a theoretical study on the performance of a structural product in the form of a box. So far, this type of design has been developed in Central Europe with demonstrated structural solvency, but only with softwood (*Picea abies*). The singularity of the work is to use hardwood (*Eucalyptus globulus*), which is a wood not usually commercialized for structural purposes, but with excellent mechanical qualities and great market possibilities. Until now, there is no known studies on this type of structural elements made with this type of wood.*

*For this purpose, a numerical analysis using the finite element method (FEM), of the structural performance of box beams in ordinary situation, using both softwood and hardwood, is performed, comparing the results of both cases. In addition, it also studies its behavior in fire situation, with the objective of validating the carrying capacity of the product according to the national legislation.*

**Keywords:** numerical simulation; box framed timber beam; *Eucalyptus globulus*; fire

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema de construcción en madera más utilizado hasta hace unos años en España seguía siendo el sistema de entramado ligero. Este sistema presenta grandes desventajas con respecto a la utilización de soluciones como las vigas cajón, de reciente aparición en el mercado de Europa central, sobre todo en cuanto al peso, que puede llegar a reducirse desde un 3% a un 13%, y al tiempo de montaje en obra que puede hacerse un 45% más rápido en comparación con un sistema tradicional. Esto significa llegar a un ahorro del 28% en costes de mano de obra, y que cada vez sea más común acudir a productos prefabricados, tallados por control numérico y de fácil montaje, o módulos constructivos montados en taller.

Las vigas cajón elaboradas en Europa central se ejecutan con madera de *Picea abies*, madera mayoritariamente empleada en productos tecnológicos de madera en Europa. En España existe madera estructural de *Eucalyptus globulus*, cuyas propiedades mecánicas han sido evaluadas recientemente [1], presentando unas características elásticas y resistentes superiores a las de la *Picea abies*. En este trabajo, a través de una simulación con un modelo numérico elaborado mediante el método de los elementos finitos se estudia la viabilidad de un producto estructural de vigas en cajón en madera de eucalipto, comparando su dimensionado y rendimiento con el de un producto semejante en madera de picea ya existente en el mercado europeo. Se analizará también el comportamiento en situación de incendio mediante un modelo térmico transitorio.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es estudiar mediante simulación por el método de los elementos finitos el desempeño mecánico de un sistema estructural de vigas cajón de madera de eucalipto, comparándolo con el desempeño de un producto similar elaborado en madera de picea y que es conocido.

Teniendo en cuenta la menor velocidad de carbonización de la madera de eucalipto que la de la madera de picea, también se realizará una simulación de la degradación térmica del sistema en situación de incendio.

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Esquema metodológico general

En primer lugar, se realizó una simulación de tipo mecánico por el método de los elementos finitos del comportamiento de un sistema estructural de vigas cajón de madera de *Picea abies*. Este sistema de *Picea abies* está ensayado estructuralmente y desempeño estructural es conocido [2]. El modelo numérico es ajustado, especialmente en cuanto al tamaño del mallado, hasta que su comportamiento estructural, especialmente la deformación vertical, es idéntico al recogido en los ensayos estructurales indicados por [2], momento en el que el modelo se considera validado.

A continuación, se cambia el material del modelo, reemplazando la *Picea abies* por *Eucalyptus globulus*. Los resultados de la deformación vertical serán previsiblemente inferiores, debido a la mayor rigidez del eucalipto. Por ello, se puede reducir la sección de los cajones. Este proceso de optimización se repite iterativamente hasta que, con menor sección, se consigue exactamente la misma deformación vertical que con madera de picea. Tendremos, por lo tanto, el mismo desempeño estructural con menor cantidad de madera.

Una vez se obtiene la sección optimizada, se realiza sobre la misma un análisis térmico para comprobar su desempeño en situación de incendio.

### 3.2 Sistema estructural de vigas cajón. Geometría.

Se ha adoptado como modelo de referencia un diseño de viga cajón en *Picea abies*, obtenido de bibliografía existente [2], cuyos parámetros geométricos son los descritos en la Figura 1.

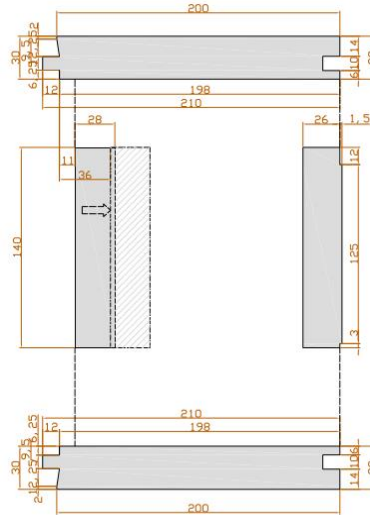


Figura 1: Modelo detallado del prototipo de viga cajón

Mediante el software comercial de simulación ANSYS® v.17.1.0, se ha dibujado con el módulo Design Modeler de Workbench, un sistema de forjado de madera compuesto por cinco vigas cajón. El modelo está parametrizado, permitiendo de este modo variar parámetros geométricos como los anchos y longitudes de las piezas. Esta parametrización facilitará enormemente la automatización de la optimización del diseño en pasos posteriores del trabajo. La geometría de partida fue la siguiente:

- Sección transversal del cajón: 200x200 mm

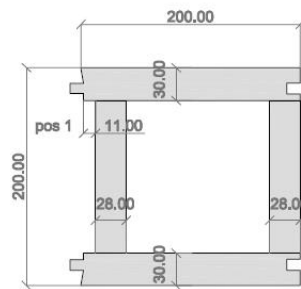


Figura 2: Modelo de viga cajón estudiado

- Ancho de las piezas verticales del cajón: 28 mm
- Ancho de las piezas horizontales del cajón: 30 mm
- Número de elementos ensamblados en continuo: 5 elementos viga cajón

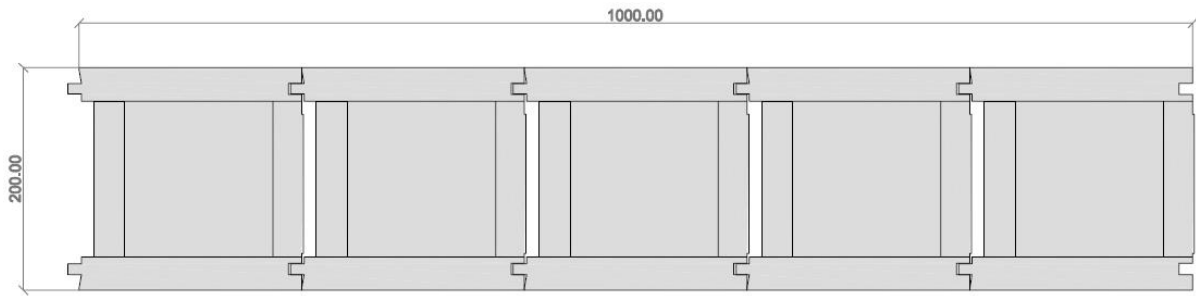


Figura 3: Número de elementos de viga cajón ensamblados

- Luz de cálculo: 6.50m

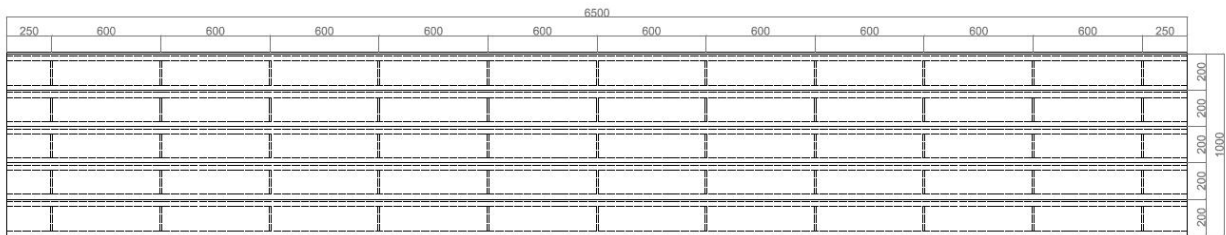


Figura 4: Representación en planta de la placa formada por las vigas cajón

Además, se disponen una serie de tablas transversales rigidizadoras de 10 mm de espesor, espaciadas cada 600mm a lo largo de la longitud de la viga.

Tanto las caras superior e inferior como las laterales de la viga se componen de tablas de longitud igual al largo de la viga, tal y como muestra la figura 5, encoladas a tope unas con otras, haciendo la forma de cajón.



Figura 5: Modelo renderizado del prototipo de viga cajón

La conexión entre las 5 vigas cajón se materializa con uniones machihembradas dispuestas en las tablas inferiores y superiores, constituyendo un sistema ensamblado en continuo tipo placa alveolar.



Figura 6: Sistema formado por ensamble de vigas cajón en continuo

### 3.3 Propiedades elásticas ortótropas de la madera de *Picea abies* y *Eucalyptus globulus*

Es fundamental realizar una correcta definición de las propiedades del material usado en un modelo matemático basado en elementos finitos. Para este caso, los primeros valores a considerar son las denominadas constantes elásticas, que permiten definir las relaciones entre las tensiones y deformaciones unitarias.

Se definirán dos materiales para el modelo. Uno de ellos será píceca y el otro eucalipto. Las propiedades de la madera de píceca pudieron ser obtenidas de la bibliografía [3], mientras que las propiedades de la madera de eucalipto se obtuvieron experimentalmente empleando el método de propagación de los ultrasonidos [1]:

Tabla 1: Valores de las constantes elásticas para la especie *Eucalyptus globulus*

Módulos de elasticidad longitudinal (N/mm <sup>2</sup> )			Módulos de elasticidad transversal (N/mm <sup>2</sup> )			Coeficientes de Poisson					
$E_L$	$E_R$	$E_T$	$G_{LR}$	$G_{LT}$	$G_{RT}$	$U_{RT}$	$U_{LT}$	$U_{LR}$	$U_{TR}$	$U_{RL}$	$U_{TL}$
21.939	2.420	1.165	1.756	969	533	0,696	0,588	0,452	0,325	0,052	0,032

Tabla 2: Valores de las constantes elásticas para la especie *Picea abies*

Módulos de elasticidad longitudinal (N/mm <sup>2</sup> )			Módulos de elasticidad transversal (N/mm <sup>2</sup> )			Coeficientes de Poisson					
$E_L$	$E_R$	$E_T$	$G_{LR}$	$G_{LT}$	$G_{RT}$	$U_{RT}$	$U_{LT}$	$U_{LR}$	$U_{TR}$	$U_{RL}$	$U_{TL}$
11.600	892	552	779	672	76	0,39	0,43	0,51	0,24	0,04	0,02

### 3.4 Anisotropía de la madera

La madera es un material anisótropo, sus propiedades varían según la dirección considerada, por tanto es preciso definir la correspondencia entre las tres direcciones del espacio y la dirección de la fibra.

En la generación del modelo numérico, se definen unos ejes locales para orientar la dirección de la fibra de cada tabla o pieza en la posición correcta. Los ejes globales del programa están dispuestos de la manera que se muestra en la figura 7: el eje Z sigue la dirección longitudinal (L), el eje Y la dirección radial (R) y el eje X la dirección tangencial (T). Por tanto, se crea un sistema de ejes locales adecuadamente orientados donde el eje X (dirección longitudinal) tiene que corresponderse con el Z global y el Z (dirección tangencial) con el X global.

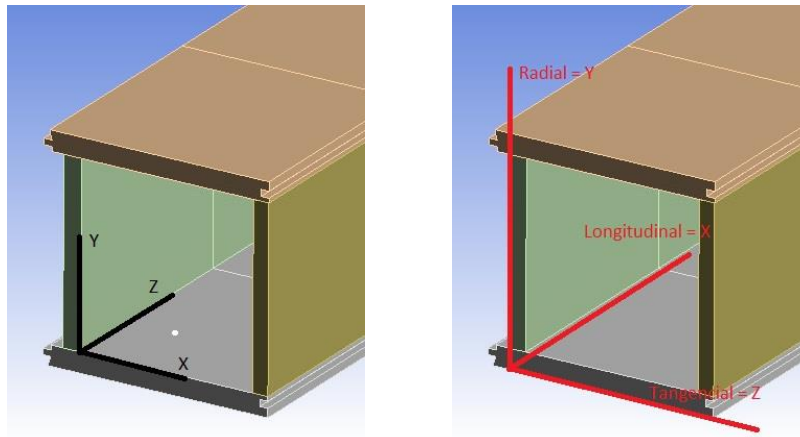


Figura 7: Ejes globales en el modelo de simulación numérica. Dirección de los ejes locales aplicados en correspondencia con la dirección de la fibra de la madera

### 3.5 Mallado

La estructura se ha discretizado con elementos hexaedros lineales, concretamente se han usado elementos **SOLID 185**, bricks de 8 nodos con 3 grados de libertad por nodo.

Figure 4.185-1 SOLID185 3-D Structural Solid

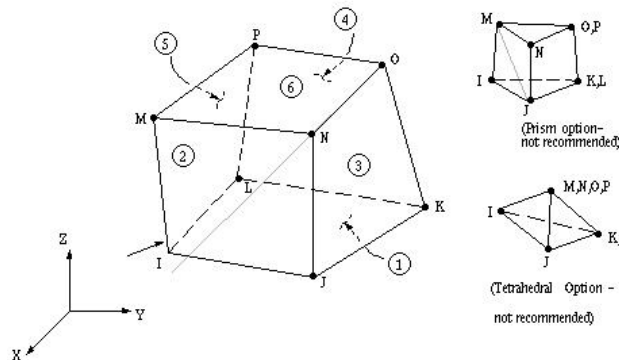


Figura 8: Solid 185 3-D structural Solid

Para utilizar correctamente estos elementos (capaces de proporcionar resultados más precisos que los elementos tetraédricos en análisis no lineales), se ha estudiado el tamaño de malla más adecuado para cada volumen o tabla que conforma la viga, permitiendo un control del número de elementos resultantes en función de lo necesario.

Se ha procurado introducir una malla más fina en las zonas que, presumiblemente y tras comprobar en sucesivos análisis fallidos, son las más críticas. Estas zonas son las juntas machihembradas entre las tablas horizontales, y se ha podido controlar mediante la imposición del tamaño de la malla sobre los bordes generados en cada una, resultando óptimo 1/10 del ancho de tabla para los elementos horizontales y 1/6 del ancho de tabla para los verticales. Las tablas transversales rigidizadoras se han mallado con 100 divisiones, al igual que las longitudinal en el eje Z. La imagen siguiente muestra el control y resultado de la malla.

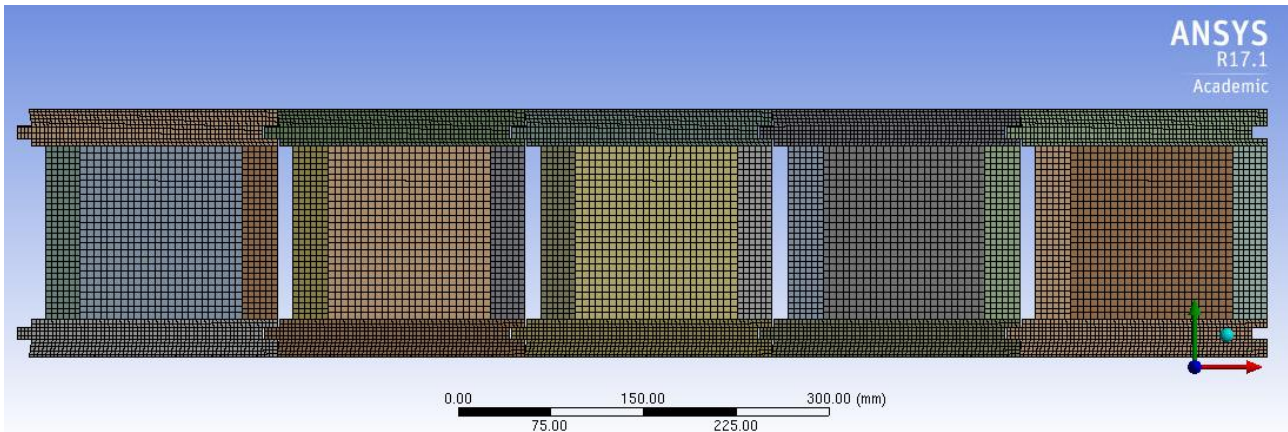


Figura 9: Resultado de la malla en el modelo FEM

El número de elementos y nodos de cada caso se relaciona en la siguiente tabla:

Tabla 2: Número de elementos y nodos del modelo

Sección (bxh) (mm)	Espesor tablas V (mm)	Espesor tablas H (mm)	Número nodos	Número elementos
200x200	28	30	1.000.595	833.800

La referencia para estimar la calidad de la malla es medir la oblicuidad o asimetría. La asimetría determina qué tan cerca estamos de una cara ideal, y se mide en una escala del 1 (Excelente) al 0 (Inaceptable). Otra magnitud importante es la ortogonalidad del elemento. La ortogonalidad se mide en una escala de 0 (Excelente) a 1 (Inaceptable).

En general, para obtener unos valores recomendados de calidad, la máxima oblicuidad debe mantenerse por debajo de 0.95 y la mínima ortogonalidad por encima de 0.1.

La calidad del mallado que se ha obtenido para el modelo estructural, está dentro de los valores del rango excelente, y se refleja en los siguientes gráficos:

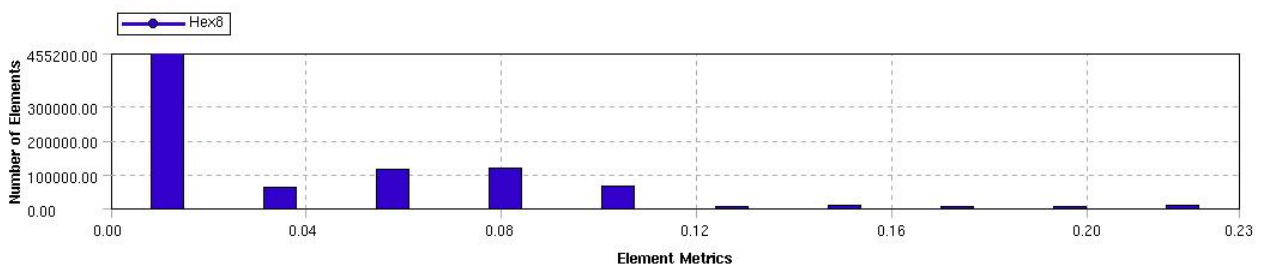


Figura 10: Métrica de la oblicuidad de la malla obtenida

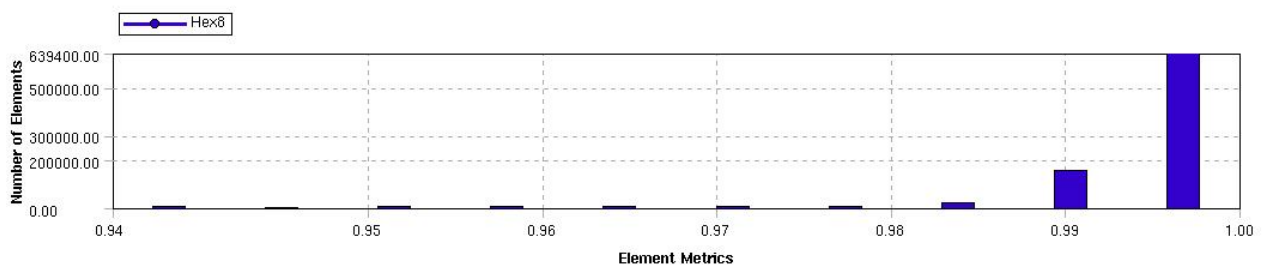


Figura 11: Métrica de la ortogonalidad de la malla obtenida

### 3.6 Contactos

Es necesario definir el comportamiento de los contactos entre los distintos elementos geométricos que conforman el modelo. En este caso, las uniones encoladas entre todas las tablas que conforman la geometría de la viga se han caracterizado como contactos tipo *bonded*, y para las uniones machihembradas que ensamblan una viga con otra, se han definido contactos del tipo *frictional*, estableciendo un coeficiente de fricción de valor 0,27. Este valor fue determinado experimentalmente.

### 3.7 Condiciones de contorno

Sobre el modelo se aplicaron las siguientes condiciones de contorno:

- Una aceleración de valor igual a la gravedad, aplicada sobre el peso propio del modelo, calculado empleando los valores de densidad de las maderas de picea y de eucalipto.
- Una carga de uso de valor igual al indicado para uso residencial en el Código Técnico de la Edificación, aplicado como presión en la cara superior de los cajos.
- Dos apoyos en los extremos de las vigas, uno de tipo fijo y otro de deslizadera en el eje longitudinal, conformando por lo tanto un sistema estructural de vigas biapoyadas.

### 3.8 Optimización

Una vez se obtuvieron los resultados de la deformación del modelo de picea, se buscó obtener esa misma deformación reduciendo las dimensiones de las piezas que conforman el cajón empleando la madera de eucalipto, aprovechando así sus mejores propiedades elásticas. Para ello simplemente se sustituyó el material, y se cambiaron dos de los parámetros de la geometría: ancho de los elementos horizontales y ancho de los elementos verticales. El mallado se adaptó automáticamente a las nuevas dimensiones, y tanto los contactos como las condiciones de contorno se conservaron invariables respecto al modelo de picea.

### 3.9 Modelo de degradación térmica en situación de incendio

Tras optimizar dimensionalmente el modelo mecánico con madera de eucalipto, se procedió a realizar con esa misma geometría un modelo transitorio térmico que simulase la degradación térmica del sistema estructural durante un incendio de 30 minutos de duración siguiendo la metodología descrita en [4] y en [5]. Se trata de un análisis de tipo transitorio térmico en el que se aplican en las caras expuestas las cargas de convección y de radiación que indica el eurocódigo 1 considerando la curva normalizada tiempo temperatura descrita en la norma ISO 834-1.

Las propiedades térmicas de la madera de eucalipto se tomaron de [6].

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Modelo estructural estático de picea

La deformación vertical (flecha) para modelo de referencia en madera de picea es de 13,04 mm (ver Figura 12)



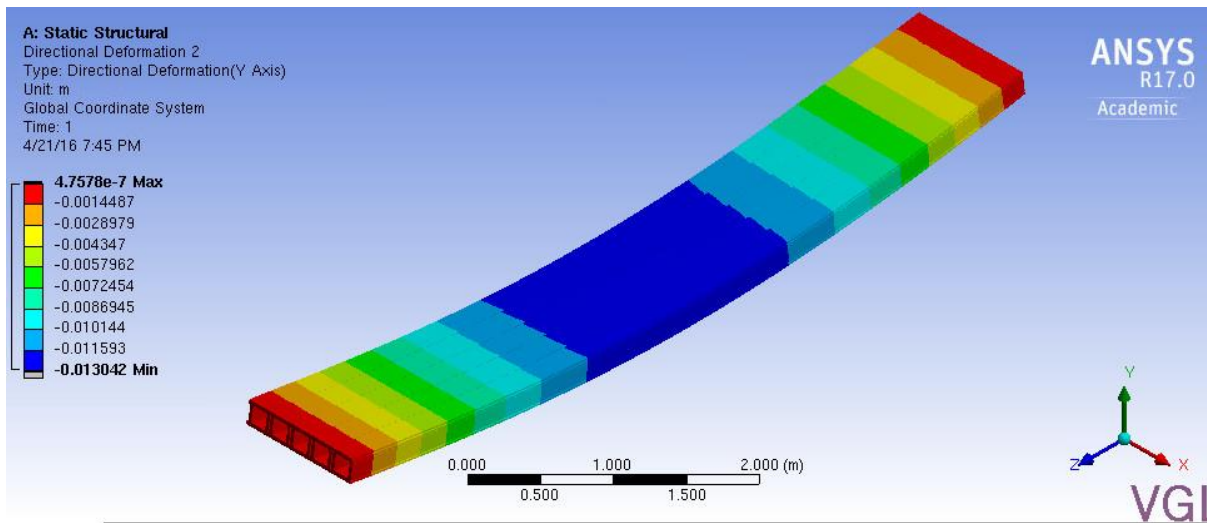


Figura 12: Deformación en el caso de referencia *Picea abies*

## 4.2 Modelo estructural estático de eucalipto

La deformación vertical (flecha) para la geometría del modelo de referencia, pero elaborado en madera de eucalipto es de 6,93 mm (ver Figura 13)

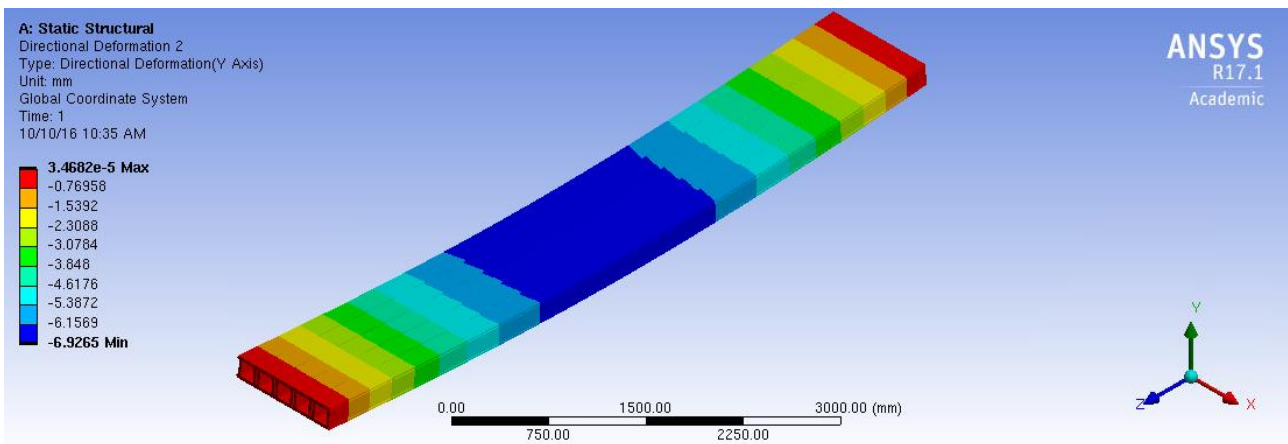


Figura 13: Deformación en el caso del modelo de eucalipto

Tras la validación del modelo realizado en madera de eucalipto, se ha procedido a realizar una optimización del modelo, reduciendo la sección de las tablas que conforman la geometría hasta alcanzar un valor de deformación vertical igual o superior al obtenido para el caso de viga cajón con madera de picea. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3 y la figura 14.

Tabla 3: Deformación vertical de los cajones de eucalipto en función del ancho de sus elementos horizontales y verticales

Ancho elemento horizontal (mm)	Ancho elemento vertical (mm)	Deformación eucalipto (mm)
30	28	6.93
28	26	7.09
26	24	7.30
24	22	7.56
22	20	7.87
20	18	8.26
18	16	8.76
16	14	9.41
15	15	9.48
14	12	10.28
12	10	11.44
10	8	13.16

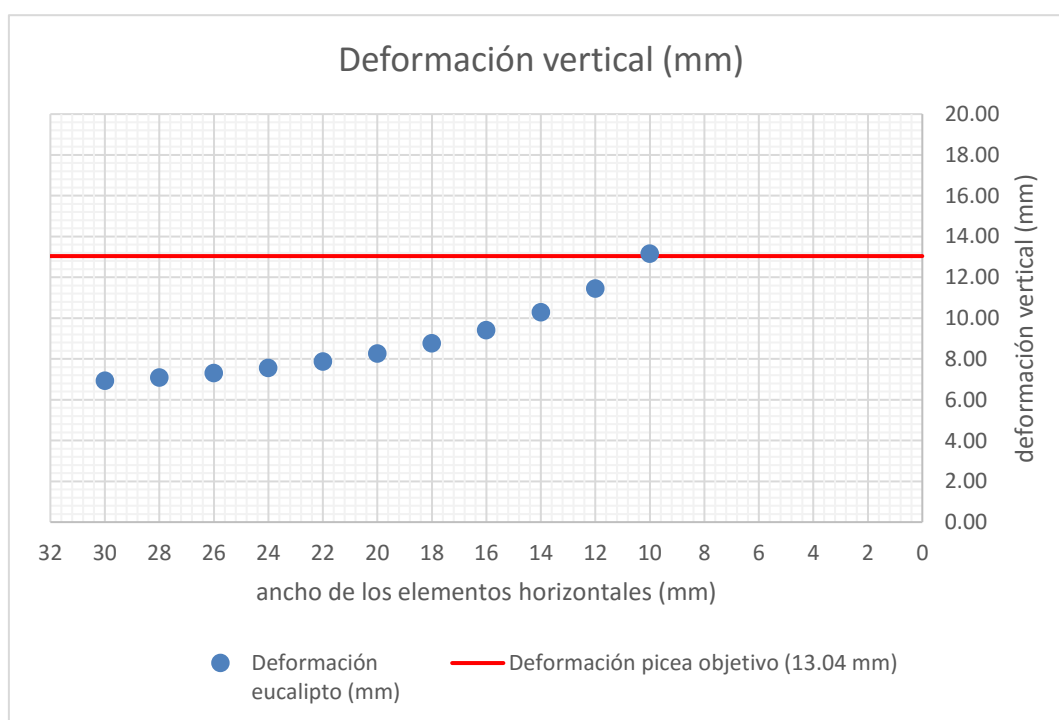


Figura 14: Deformación vertical de los cajones de eucalipto en función del ancho de sus elementos horizontales y verticales

### 4.3 Modelo térmico de eucalipto

La distribución de temperaturas obtenida es la que se muestra en la figura 15.

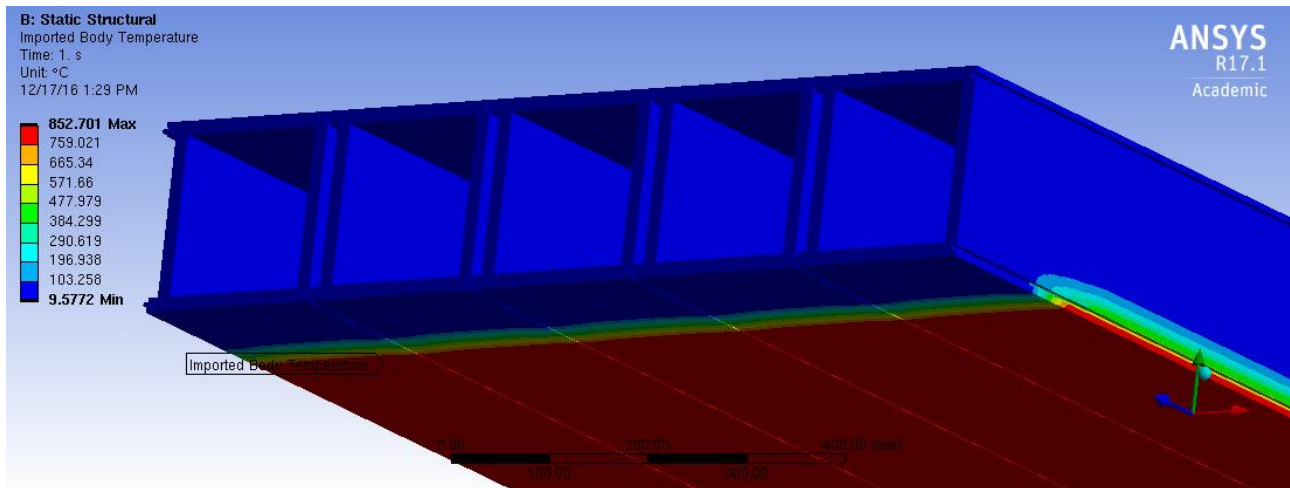


Figura 15: Distribución de temperaturas

## 5. CONCLUSIONES

Es posible modelizar el comportamiento estructural y térmico de una estructura autoportante de vigas cajón empleando el paquete comercial de simulación numérica por el método de los elementos finitos Ansys Workbench, obteniéndose un desempeño igual al observado en ensayos experimentales.

La ejecución de los cajones en madera de eucalipto puede suponer una reducción en el volumen de madera que se emplea para elaborarlos. Concretamente, para la configuración geométrica estudiada en este trabajo, se observa que realizando los cajones con tablas de eucalipto de 10 x 8 mm se obtienen unas deformaciones verticales muy similares a las obtenidas en cajones elaborados con tablas de picea de 30 x 28 mm.

El desempeño en situación de incendio puede ser una limitación importante en el uso de secciones tan reducidas como las indicadas anteriormente. Por ello que se están realizando actualmente ensayos de degradación térmica que permitan determinar la validez de estas secciones tan reducidas; o de ser el caso, determinar la sección mínima necesaria que cumpla con los requerimientos a fuego establecidos en el código técnico de la edificación vigente en España como normativa constructiva de obligado cumplimiento.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Comisión Europea por el apoyo ofrecido en el marco del proyecto Fortissimo 2.

## REFERENCIAS

- [1] J. Crespo, J. R. Aira, C. Vázquez, A. Majano-Majano, M. Guaita. Determination of the elastic constants in *Eucalyptus globulus* by ultrasound and mechanical tests. WCTE 2016 World Conference on Timber Engineering. August 22-25, 2016. Vienna, Austria
- [2] <http://www.lignatur.ch/>
- [3] Argüelles Álvarez, R., Arriaga Martitegui, F. y Martínez Calleja, J. J. Estructuras de madera diseño y cálculo. Madrid. AITIM. 2000.
- [4] Regueira, R. Aplicación de métodos numéricos al análisis de estructuras de madera en situación de incendio. Tesis doctoral. Santiago de Compostela, 2013.
- [5] Pinto, E. Determinação de um modelo para a taxa de carbonização transversal a grã para a madeira de *E. citriodora* e *E. grandis*, Tese doutoral. São Carlos, Brazil, 2005.
- [6] Molina, J. C., Carlito C. J., NUMERICAL ANALYSIS OF COMPOSITE STRUCTURE WOOD CONCRETE IN FIRE. WCTE 2012 World Conference on Timber Engineering. July 16-19, 2012. Auckland.