

02-013

ANALYSIS OF WOOD STRUCTURES OF THE XVI CENTURY FROM AN ACTUAL PERSPECTIVE

González Boronat, Ignacio⁽¹⁾; González Gaya, Cristina⁽²⁾; Sebastián Perez, Miguel Ángel⁽²⁾

⁽¹⁾Estudiante doctorando UNED, ⁽²⁾Dpto. Ingeniería de Construcción y Fabricación, ETSII-UNED

During the European Renaissance there were written a lot of books relating to engineering matters and, because of this it is possible to have firsthand information about the technology capacity available on that period, as well as the description of many technical solutions adopted back then. In Spain, one of the most important technical treatise is Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas, nowadays attributed to Pedro Juan de Lastanosa (Monzón, 1527; Madrid, 1576).

This treatise, in spite of its principal objective of describing and studying the machines, deals with construction and infrastructure matters. Among its contents, there are some wood roof trusses for buildings for technical and productivity activities, some with unusual geometries.

This paper deals with the structural analysis of the main roof trusses considered in the treatise Los veintiún libros... which is going to allow, on the one hand, to appreciate the efficiency of the solutions showed on the book and, on the other hand, the present application possibilities of it with regard to the construction of structures with wood elements. To do this, simulations are carried out with SAP2000 software.

Keywords: *history; construction; structure; wood*

ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE MADERA DEL SIGLO XVI DESDE UNA PERSPECTIVA ACTUAL

Durante el Renacimiento europeo se escribieron bastantes libros sobre temas de ingeniería y gracias a ello se dispone de información, de primera mano, sobre la capacidad tecnológica disponible en la época, así como la descripción de buena parte de las soluciones técnicas entonces adoptadas. En España, uno de los tratados técnicos más importantes es Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas, actualmente atribuido a Pedro Juan de Lastanosa (Monzón, 1527; Madrid, 1576).

Este tratado, a pesar de que su principal objeto es la descripción y estudio de las máquinas, aborda también temas de construcción e infraestructuras. Entre sus contenidos se tienen varias soluciones de cerchas de madera para edificios de actividades técnicas y productivas, algunas de las cuales con geometrías poco usuales en la actualidad.

En el presente trabajo se aborda el análisis estructural de las principales cerchas consideradas en el tratado Los veintiún libros ... lo que va a permitir, por un lado, apreciar la eficiencia de las soluciones presentadas en el libro y, por otro, valorar las posibilidades de empleo actual de las mismas de cara a la construcción de estructuras con elementos de madera. Para ello se llevan a cabo varias simulaciones utilizando el programa SAP2000.

Palabras clave: *historia; construcción; estructura; madera*

Correspondencia: Ignacio González Boronat; igonzalez1160@alumno.uned.es



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La madera es un material muy utilizado en la antigüedad que ha ido perdiendo peso con el paso del tiempo. Bien es cierto que desde el año 2010 se observa una tendencia alcista en su producción a nivel mundial como se aprecia de las estadísticas publicadas por FAOSTAT (Tabla 1); pero esta sigue sin ser comparable con los materiales de construcción normalmente utilizados, como son el hormigón y el acero. En lo que a la madera se refiere, destaca América como principal productor mundial, situándose Asia en un entorno muy cercano.

Tabla 1: Estadísticas de productos forestales, FAOSTAT (2011-2016)

Producción (millones de m3)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	% Δ 2011- 2016
Madera en rollo	3589.58	3624.66	3672.79	3705.70	3688.43	3736.98	4.1%
Madera en rollo industrial	1768.96	1768.59	1807.51	1832.55	1825.98	1873.65	5.9%
Madera aserrada	388.51	404.81	423.25	439.61	453.09	467.57	20.3%
Tableros de madera	317.20	334.31	365.09	385.05	399.07	415.60	31.0%
Tableros de fibra	95.92	105.01	112.22	115.33	117.56	118.97	24.0%

En España no se han llevado a cabo desde las instituciones públicas muchos estudios al respecto, tras el realizado en diciembre del año 2011 (Observatorio Industrial del Sector de la Madera, 2011). El informe tenía como objetivo general “ofrecer una visión pormenorizada de la situación actual del sector de la madera en España”.

En este artículo se desarrolla un estudio sobre unas celosías de madera antiguas y su posible aplicación. Para ello se realiza un dimensionado y diseño de las mismas para varias situaciones, así como se lleva a cabo su cálculo estructural a partir de un modelo analítico de cálculo.

2. Objetivos

El objetivo de este artículo es analizar una estructura antigua con métodos actuales, demostrando así que las opciones planteadas en la antigüedad no difieren en exceso de las presentadas actualmente para este tipo de elementos estructurales.

Para ello, se realiza un análisis estructural a partir de unas cerchas que se encuentran en el libro titulado *Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas*, actualmente atribuido a Pedro Juan de Lastanosa (Monzón, 1527; Madrid, 1576). En él, aparece distintos diseños estudiándose en este caso dos de ellos.

Las cerchas son un recurso muy utilizado en edificación cuando se pretende salvar una gran luz sin necesidad de disponer elementos verticales intermedios; como es el caso, por ejemplo, de un polideportivo.

Primero se estudian dos cerchas de madera, dimensionando las dimensiones geométricas de los elementos estructurales siguiendo los diseños desarrollados por Pedro Juan de Lastanosa. Estas se estudian para tres situaciones en función de la luz que se pretenda salvar: 10, 15 y 20 metros. Tras ello, se realiza una comparación entre ambas soluciones, así como un análisis comparativo sustituyendo la madera por el material más utilizado en la actualidad para este tipo de soluciones estructurales: el acero.

3. Caso de estudio

Se estudia una estructura en celosía formada por elementos de madera. Este tipo de estructuras consisten en elementos estructurales verticales dispuestos de manera triangulada, considerándose normalmente uniones articuladas en los nudos en los que se conectan dichos elementos.

En el caso 1 (Figura 1) se analiza una cercha de madera formada por un tirante, tres péndolas a cada lado, así como dos tornapuntas centrales impidiendo la flexión de los pares y dos tornapuntas más a cada lado de la sección. Por su parte, el caso 2 (Figura 2) resulta bastante similar al caso 1, diferenciándose principalmente por añadir al esquema anterior un contratirante intermedio, así como el pendolón central que recoge la cumbre.

El dimensionamiento de la cercha de madera se realiza considerando una separación entre cerchas de 8 metros, al considerar esta una separación ordinaria para este tipo de soluciones estructurales.

Figura 1: Cercha de madera analizada en el caso 1

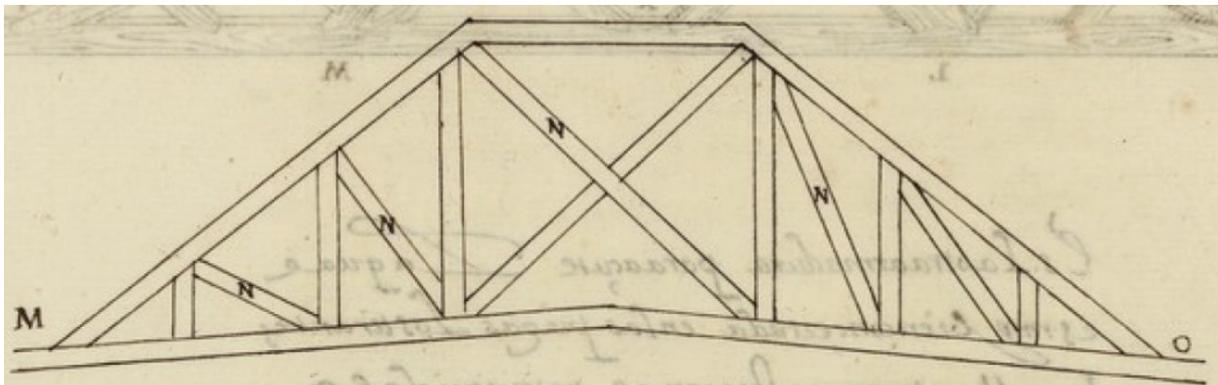
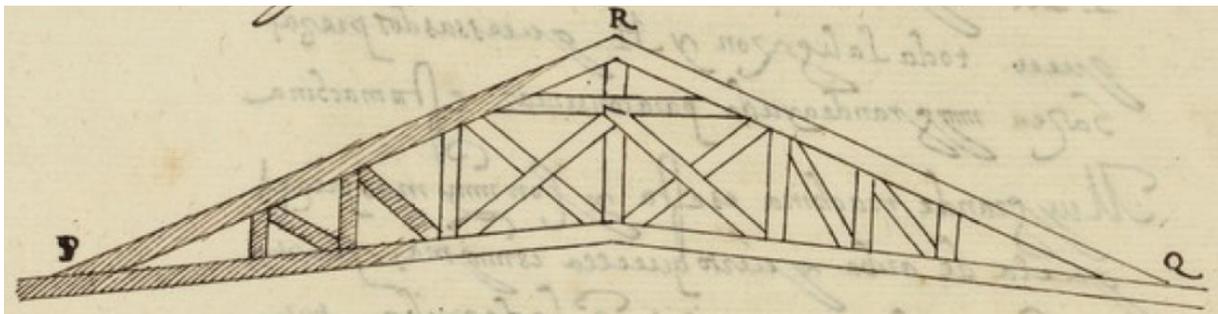


Figura 2: Cercha de madera analizada en el caso 2



3.1 El material

La madera destaca principalmente por tratarse de un material anisótropo, al desarrollar propiedades mecánicas diferentes en distintas direcciones. Además, es un material higroscópico, ya que es capaz de absorber la humedad del medio (Argüelles y Arriaga, 2000).

Pese a estas características, para el cálculo se pueden simplificar estas características siguiendo lo indicado en el Código Técnico de la Edificación (CTE): “En el análisis de estructuras compuestas por barras (es decir, elementos en los que predomina una dirección sobre las otras con una relación mínima entre largo y canto de 6), formando estructuras trianguladas o estructuras de nudos rígidos o semirrígidos, y para el cálculo de solicitaciones globales (cortante, momento y axil) de la barra, se considerará válida la hipótesis de que el

material es isótropo, elástico y lineal, considerando las deformaciones instantáneas o a largo plazo a través de los módulos descritos anteriormente” (CTE DB-SE-M, 2009, p. 17).

Para el caso que se estudia se ha considerado una madera aserrada de especies de coníferas y chopo, denominada C24, que presenta, según el CTE, las propiedades indicadas en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades asociadas a la clase resistente C24

Madera aserrada – C2	
Flexión $f_{m,k}$ [N/mm ²]	24
Tracción paralela $f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	14
Compresión paralela $f_{c,0,k}$ [N/mm ²]	22
Cortante $f_{v,k}$ [N/mm ²]	4,0
Módulo de elasticidad paralelo medio $E_{0,medio}$ [kN/mm ²]	11
Módulo transversal medio G_{medio} [kN/mm ²]	0,69
Densidad característica ρ_k [kg/m ³]	350
Densidad media ρ_{medio} [kg/m ³]	420

Para obtener los factores de corrección de la resistencia primero se debe definir la clase de servicio de la estructura. Siguiendo lo dispuesto en el CTE, se considera que la cercha de madera se encuentra englobada en el grupo denominado como “clase de servicio 2”. Esto es debido a que se trata de una estructura de madera a cubierto que está expuesta a un ambiente exterior.

Con todo, factor de modificación resulta igual a 0,80. Además, al tratarse de elementos de madera maciza se toma un coeficiente parcial de seguridad del material de valor 1,30. Estos factores se han obtenido según lo indicado en el CTE, así como en el Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1, 2006).

3.2 Acciones de diseño

Las acciones de diseño se han definido según el CTE (CTE DB-SE-AE, 2009). Por un lado, se han considerado las acciones permanentes debidas al peso propio de la estructura, las cuales se calculan según sus dimensiones y la densidad del material que lo constituye; en este caso, para la madera se consideran los valores indicados en el apartado anterior. La carga permanente se debe a las correas o el tablero resistente que se disponga en la cubierta, así como el tipo de cubrición que se lleve a cabo, pudiendo ser este, por ejemplo, de chapa o teja. Esta carga se considera de valor 1,00 kN/m².

Además, se consideran también una serie de acciones variables. Estas son debidas a la sobrecarga de mantenimiento, así como a la carga de nieve. Al tratarse de una cubierta denominada como “ligera” en la Norma, la sobrecarga de uso a considerar debido al mantenimiento será de 0,40 kN/m², no concomitante con el resto de las acciones variables. Por su parte, se ha considerado que las cerchas se localizan en la ciudad de Madrid, lo que supone una sobrecarga de nieve de 0,40 kN/m².

3.3 Métodos de cálculo

Para el dimensionamiento de la estructura, tanto las combinaciones de carga, los coeficientes de ponderación de acciones y de resistencias, procedimientos de cálculo y materiales adoptados, están de acuerdo al CTE.

El proceso general de cálculo aplicado en el análisis de la estructura es el conocido como el Método de los Estados Límites, que establece que la seguridad de la estructura en su conjunto o en cualquiera de sus partes, se garantiza comprobando que la sollicitación no supera la respuesta última de las mismas. Este formato de seguridad se expresa sintéticamente mediante la siguiente desigualdad:

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$

Donde S_d representa la sollicitación de cálculo aplicable en cada caso, y R_d la respuesta última de la sección o elemento.

Las hipótesis de cargas consideradas para las distintas situaciones de proyecto, se han definido según el apartado 4 del CTE DB-Seguridad Estructural. El modelo de estudio se somete a dos estados o tipos de revisión: Estado Límite de Servicio (ELS), es decir, que los elementos estructurales no presenten desplazamientos o deformaciones que excedan los límites permisibles; y a una revisión del Estado Límite Último (ELU), que determina la capacidad o resistencia estructural de los elementos, así como la revisión de estabilidad general.

Con ello, las combinaciones de acciones características son:

$$G + Q_{\text{mantenimiento}} \quad (2)$$

$$G + Q_{\text{nieve}} \quad (3)$$

Para el dimensionado de los elementos estructurales bajo las sollicitaciones impuestas, en un enfoque de resistencia última, las hipótesis de carga son:

$$1.35G + 1.5Q_{\text{mantenimiento}} \quad (4)$$

$$1.35G + 1.5Q_{\text{nieve}} \quad (5)$$

4. Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de los modelos analíticos de cálculo realizados mediante el software SAP2000, para cada uno de los casos y cada una de las distancias.

Considerando las propiedades asociadas a la clase resistente C24 (Tabla 2), resultan unas resistencias de cálculo en tracción paralela y compresión paralela de 8,62 MPa y 13,54 MPa, respectivamente. Además, la deformación máxima admisible considerando lo dispuesto en la normativa actual (CTE DB-SE, 2009, p.12), es de $L/300$ para una combinación de acciones característica (expresiones 2 y 3) considerando la integridad de los elementos constructivos.

4.1 Caso 1

Primero se analiza la cercha que salva una luz de 10 metros. Esta solución encaja adecuadamente para un elevado número de soluciones tanto geométricas como considerando distintas clases materiales.

En las figuras 3 y 4 se muestra una salida de resultados en las que se aprecia que no se superan los límites resistentes del material; así como las máximas deformaciones admisibles, del orden de 10 mm para las secciones de mayor longitud. Se ha considerado un canto total de 1.9 m, así como secciones de 20x20 cm.

Figura 3: Tensiones en ELU en el caso 1 para una luz de 10 metros (datos en kN/m²)

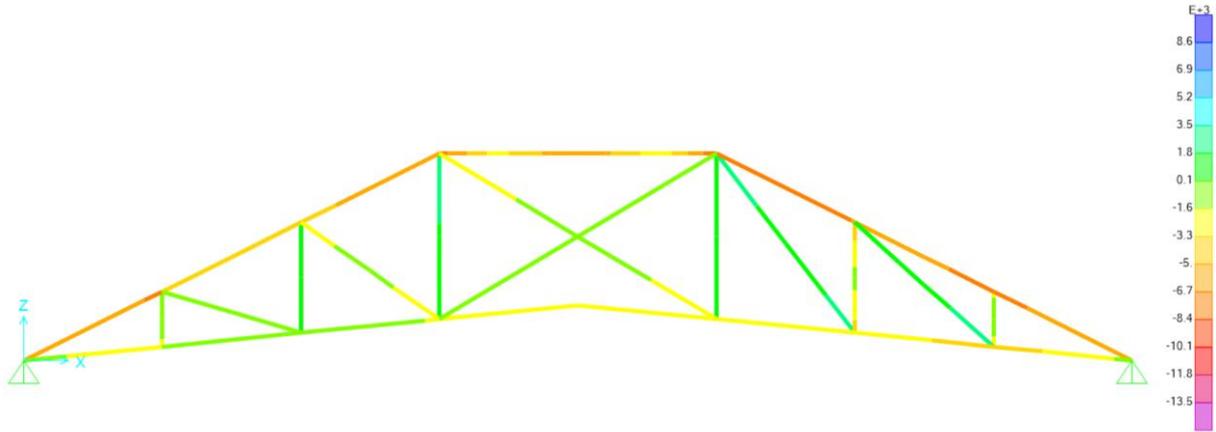
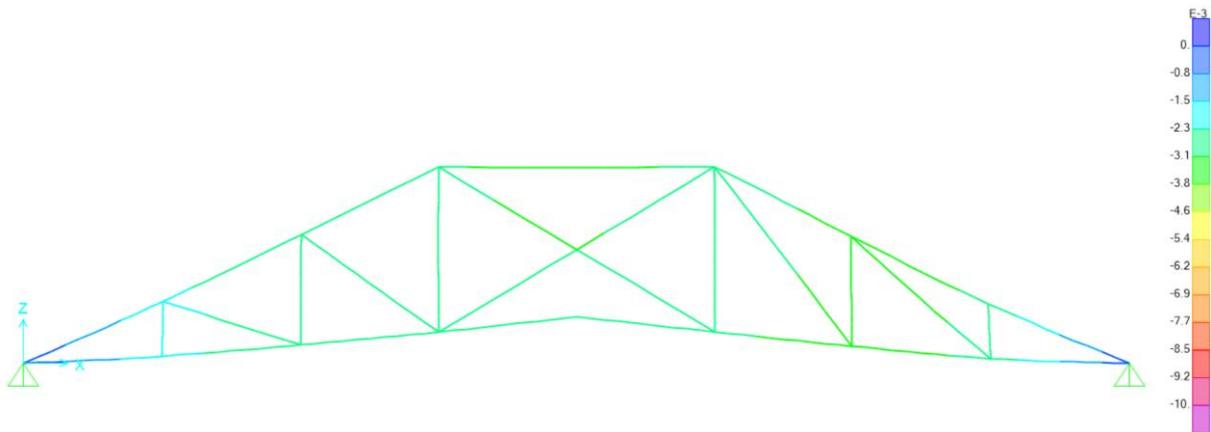


Figura 4: Deformaciones en ELS en el caso 1 para una luz de 10 metros (datos en m)



La geometría anterior no cumple con los mínimos requisitos resistentes y de deformación, debiendo por ello aumentar la sección de madera considerada hasta los 25x25 cm, así como elevar el canto a 2,50 m de altura total.

Figura 5: Tensiones en ELU en el caso 1 para una luz de 15 metros (datos en kN/m²)

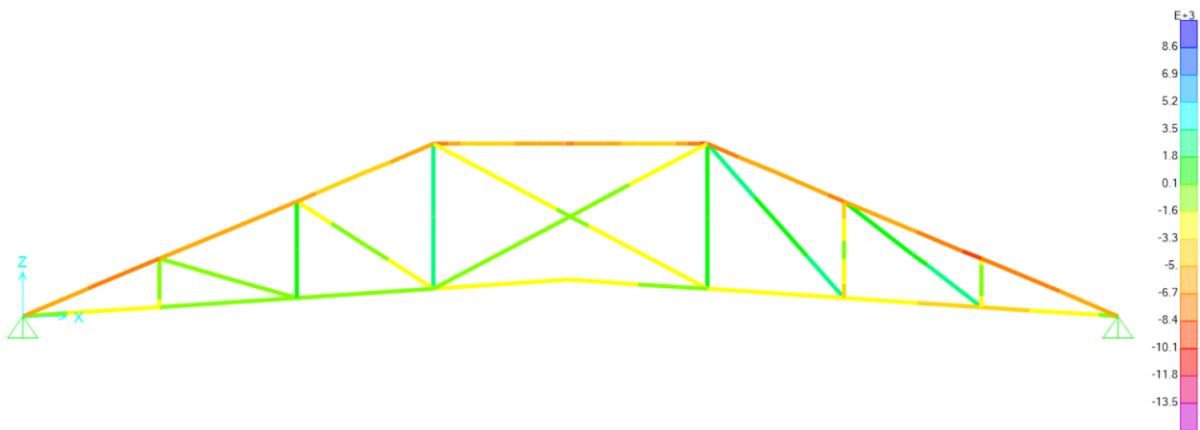
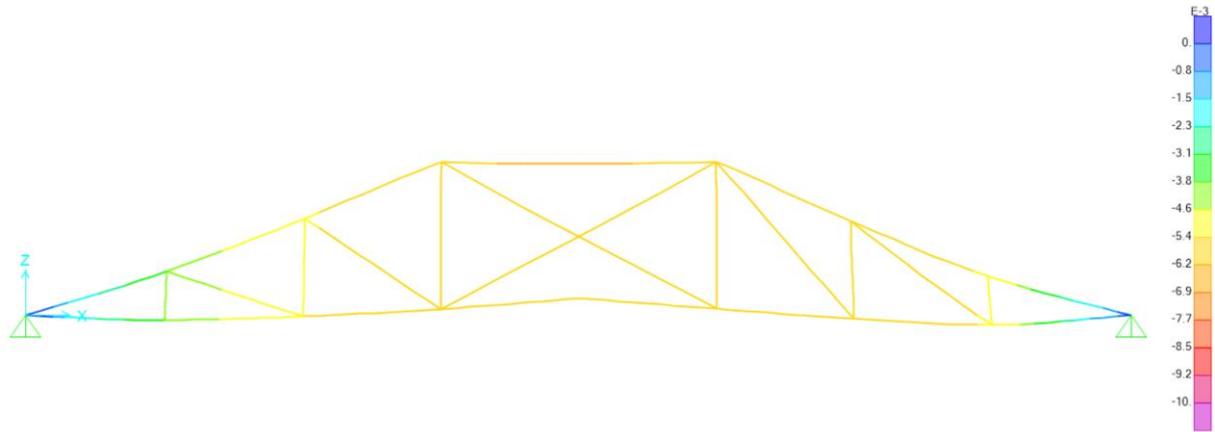


Figura 6: Deformaciones en ELS en el caso 1 para una luz de 15 metros (datos en m)



La última situación estudiada para el caso 1 recoge la cercha que salva una luz de 20 metros. Esta también requiere un aumento de canto y de sección como en la situación anterior, llegando hasta los 2,70 m y 30x30 cm, respectivamente.

Figura 7: Tensiones en ELU en el caso 1 para una luz de 20 metros (datos en kN/m²)

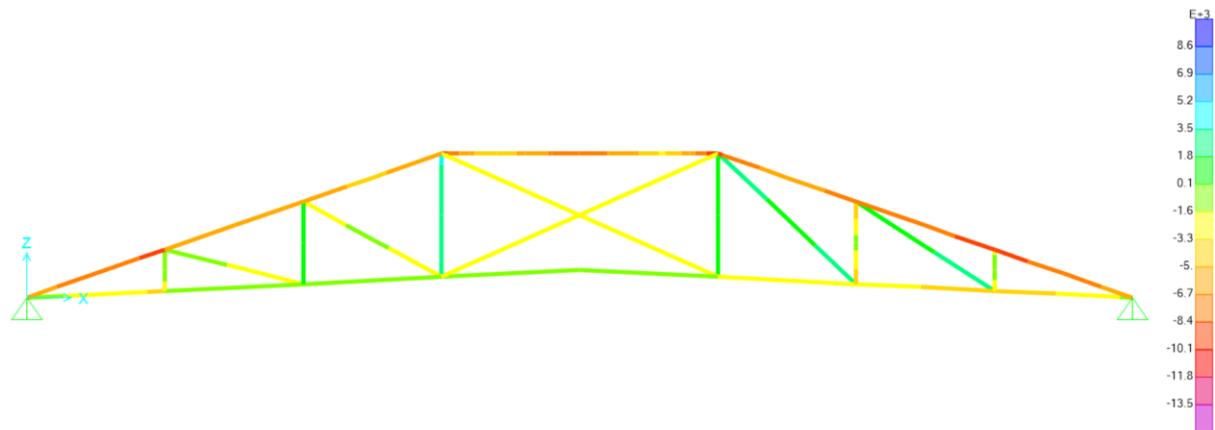
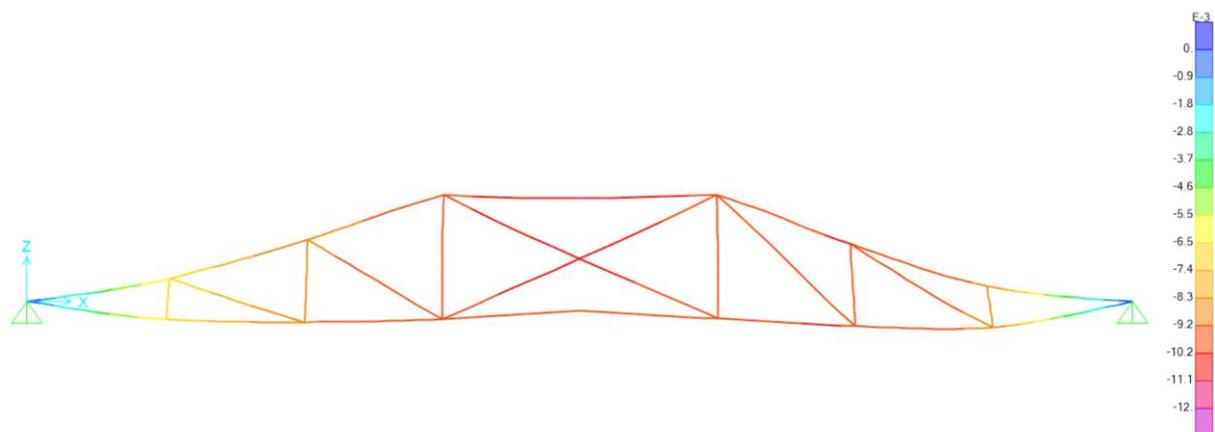


Figura 8: Deformaciones en ELS en el caso 1 para una luz de 20 metros (datos en m)



4.2 Caso 2

Al tratarse este caso de un diseño con una gran similitud con el presentado en el caso 1, se toma de manera inicial la misma solución presentada anteriormente para cada situación,

desarrollando un diseño similar al caso anterior hasta el contratirante intermedio, alargando los pares hasta su intersección en la zona central de la cercha, recogidos estos por el pendolón. Para llevar a cabo un correcto análisis comparativo de ambos casos, se disponen dimensiones geométricas similares para las secciones de los elementos estructurales.

Primero se analiza la situación 1, en la que la cercha se diseña para salvar una luz de 10 m de distancia. En este caso se reduce el canto total hasta los 2,00 m, resultando los esfuerzos y las deformaciones por debajo de los límites resistentes y de deformación admisibles, respectivamente.

Figura 9: Tensiones en ELU en el caso 2 para una luz de 10 metros (datos en kN/m²)

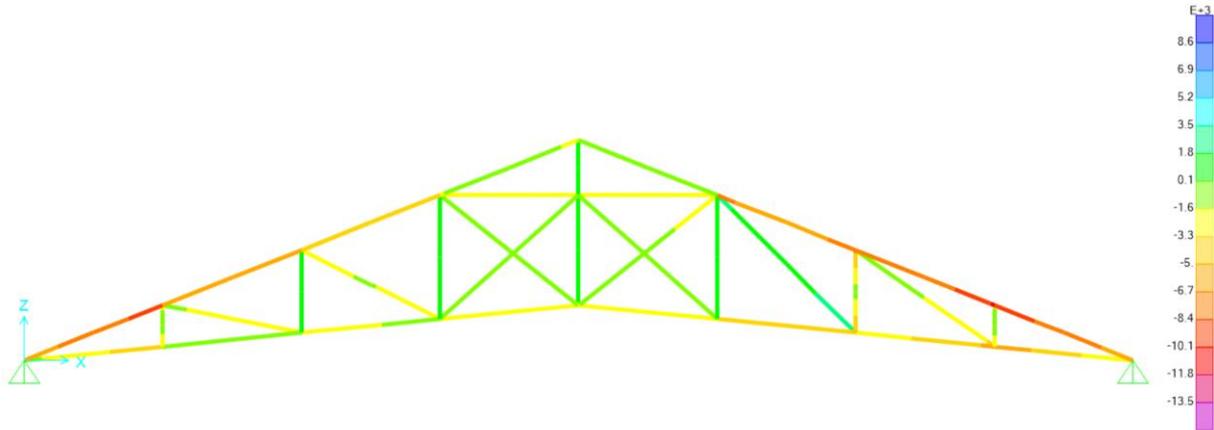
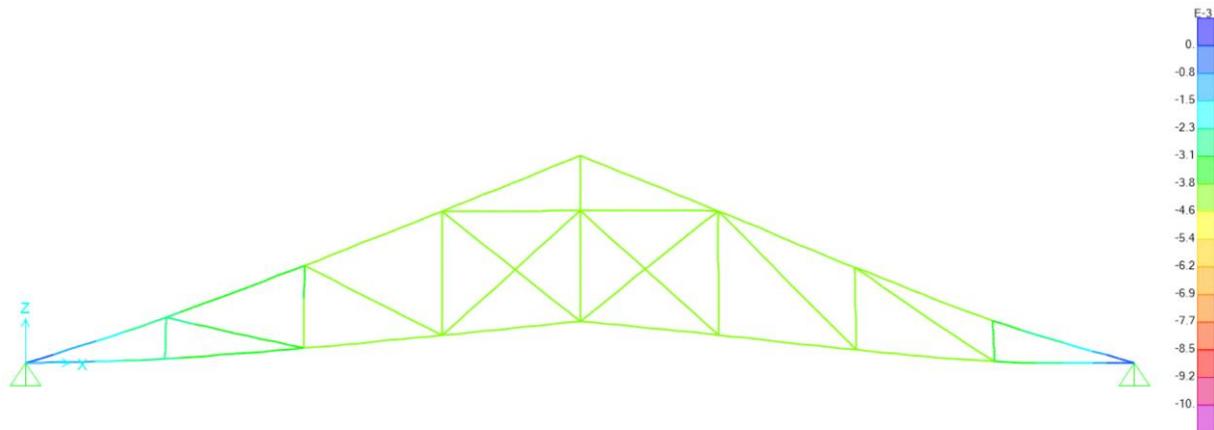


Figura 10: Deformaciones en ELS en el caso 2 para una luz de 10 metros (datos en m)



En la segunda situación, se deben aumentar las secciones de los elementos estructurales, así como elevar el canto de la cercha, similar a lo acontecido en el caso 1. Con todo, se calcula la cercha con piezas de 25x25 cm y un canto total de 2,50 m.

Figura 11: Tensiones en ELU en el caso 2 para una luz de 15 metros (datos en kN/m²)

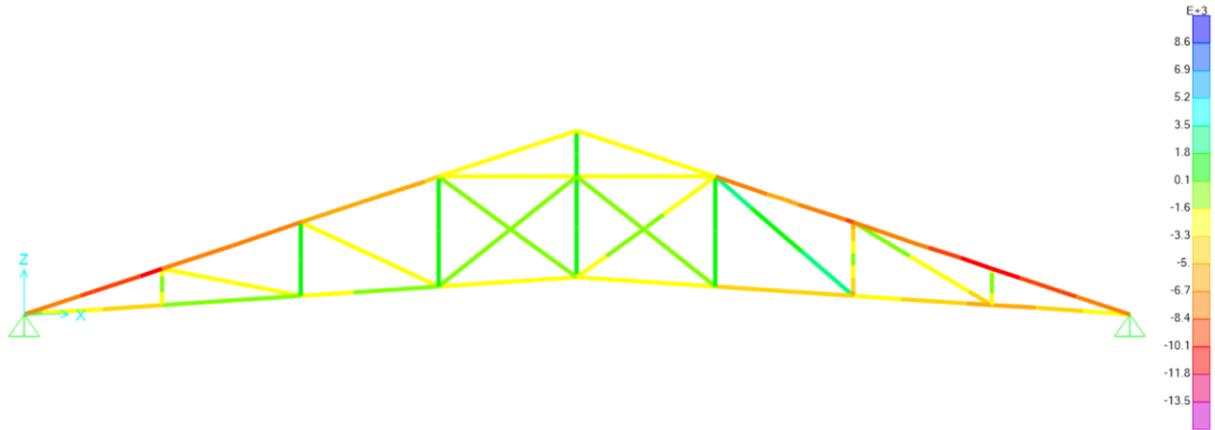
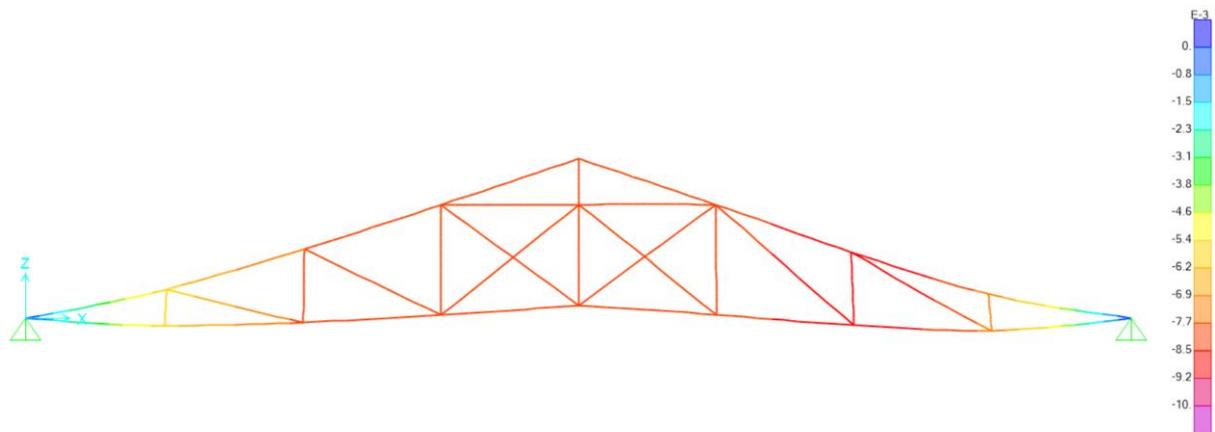


Figura 12: Deformaciones en ELS en el caso 2 para una luz de 15 metros (datos en m)



Por último, se analiza el caso de la cercha de tipo 2 con una luz de 20 metros. Esta presenta problemas manteniendo la sección de 30x30 cm que tenía el caso 1, ya que obliga a aumentar el canto total de la misma cerca de los 3,50 m.

Figura 13: Esfuerzos en ELU en el caso 2 para una luz de 20 metros (datos en kN/m²)

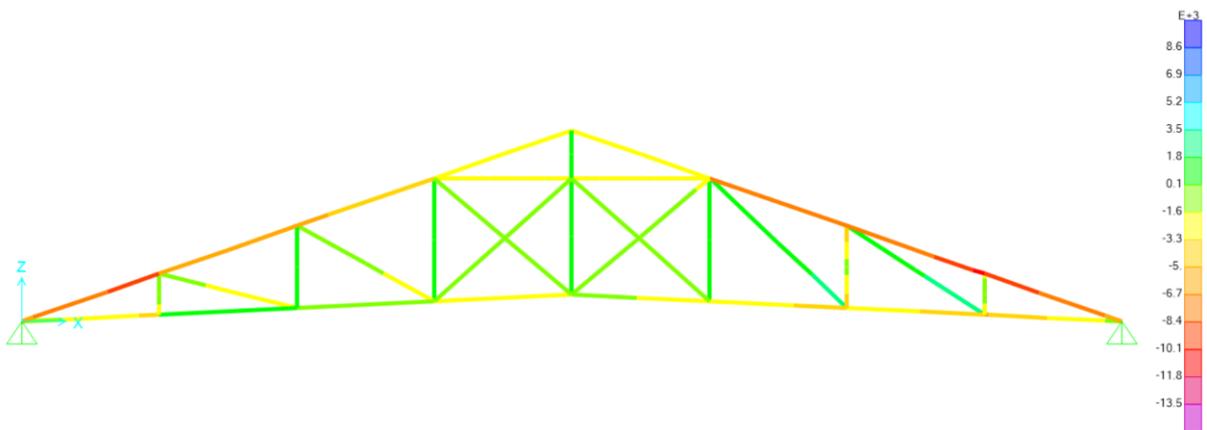
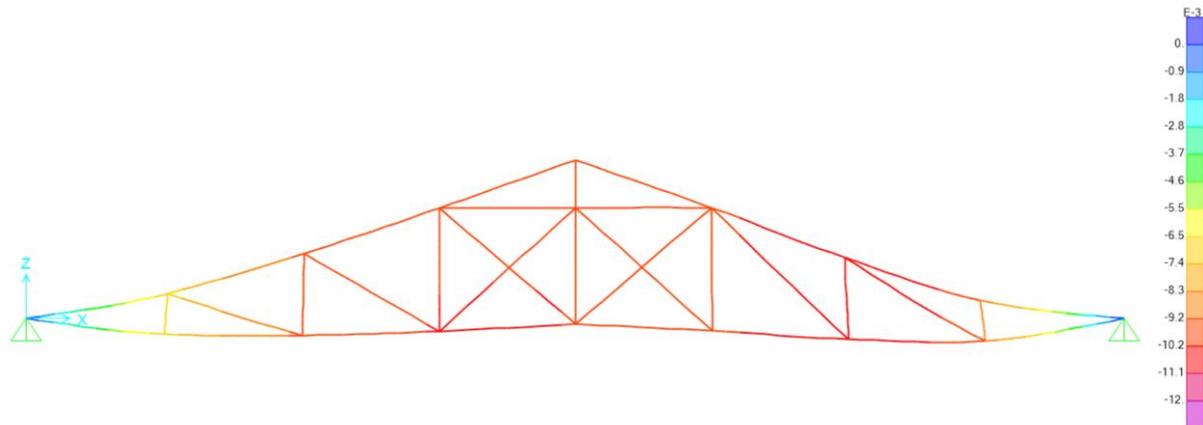


Figura 14: Deformaciones en ELS en el caso 2 para una luz de 20 metros (datos en m)



5. Conclusiones

Tras los resultados obtenidos se observa que, a grandes rasgos, ambas soluciones no difieren en exceso en sus soluciones geométricas. Manteniendo las mismas secciones se obtienen cantos similares, resultando menores los desarrollados en el caso 1.

El diseño del caso 2 supone un mayor peso propio, no aprovechando a nivel estructural ese aumento de material. En relación con este punto, se observa que las partes superiores de los pares, a partir del contratirante, no trabajan al mismo nivel tensional que el resto de la estructura, situándose los esfuerzos en estas dos zonas en el rango entre 1,60 MPa y 3,30 MPa. Además, el tirante también se encuentra más solicitado en el caso 2.

Por otro lado, en el caso 1 se obtienen unas relaciones de luz a salvar y canto para las situaciones de 10 m, 15 m y 20 m de $L/5,2$, $L/6$ y $L/7,41$, respectivamente. Por su parte, para el caso 2 estas relaciones resultan $L/5$, $L/6$ y $L/5,7$, respectivamente. De estos resultados se puede concluir que la cercha del caso 1 trabaja mejor que la cercha del caso 2 a medida que se incrementa la luz que se debe salvar. Por otro lado, se observa que difieren menos entre sí las relaciones obtenidas en el caso 2, obteniéndose valores muy similares para las tres situaciones estudiadas.

En definitiva, pese a que ambos tienen diseños relativamente similares, el caso 1 supone un mayor aprovechamiento del material dispuesto, obteniéndose mejores relaciones entre la luz a salvar y el canto necesario que en el caso 2.

Si se comparan los resultados obtenidos para las cerchas de madera con otra solución empleando el acero, se observa cómo este permite utilizar un canto de un tamaño considerablemente menor. Esto se puede concluir a partir de las recomendaciones mostradas en la guía *Steel Buildings in Europe* (ArcelorMittal, 2008). En ella se recomienda que la relación entre la luz y el canto para el caso de cerchas se sitúe en el entorno de $L/15$ y $L/20$, siendo L la luz que se pretende salvar; suponiendo esto una posible reducción del canto del orden del 30%.

Referencias

- ArcelorMittal (2008). *Steel Buildings in Europe. Edificios de acero de una sola planta (SSB)*. ArcelorMittal.
- Argüelles, R. y Arriaga, F. (2000). *Estructuras de Madera. Diseño y cálculo*. AITIM, Madrid, España.
- Código Técnico de la Edificación CTE (2009). *Documento Básico. Seguridad estructural (DB SE)*.

Código Técnico de la Edificación CTE (2009). *Documento Básico. Acciones en la edificación (DB SE-AE)*

Código Técnico de la Edificación CTE (2009). *Documento Básico. Seguridad estructural. Madera (DB SE-M)*

De Lastanosa, P. J. (s. XVI). *Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas.*

Observatorio Industrial del Sector de la Madera (2011). *La industria de la madera en España: Situación actual y perspectivas.*

UNE-EN 1995-1-1 (2006). *Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.*