

DIAGNÓSTICO DE LA CUBIERTA Y BAJOCUBIERTA DE MADERA DE UN EDIFICIO AGROFORESTAL Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

DIAGNOSIS OF THE CURRENT STATE OF THE ROOF AND FLOOR TIMBER STRUCTURE OF AN AGROFORESTRY BUILDING, AND PROPOSALS FOR ACTION

Francisco Javier Izard Taillefer ⁽¹⁾, **Francisco Arriaga Martitegui** ⁽²⁾,
Miguel Esteban Herrero ⁽³⁾ (P), **Ignacio Bobadilla Maldonado** ⁽³⁾,
Guillermo Íñiguez González ⁽⁴⁾

(1) Máster en Ingeniería de la Madera Estructural por la Universidad de Santiago de Compostela. Graduado en Ingeniería Forestal por la Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España

(2) Profesor Catedrático de Universidad, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España

(3) Profesor Titular de Universidad, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España

(4) Profesor Contratado Doctor, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España

Dirección de contacto: miguel.esteban@upm.es; (P) Presentador

Código de identificación: T9-13

Resumen

El objeto de este trabajo es el diagnóstico de la estructura de madera de la cubierta y bajocubierta de un edificio agroforestal situado en el término municipal de Béjar (Salamanca), y proponer medidas de actuación. Se analiza cada una de las piezas de la estructura principal, se identifican daños de origen mecánico y se toman muestras para identificar la especie de madera (roble y castaño) y los agentes xilófagos (pudriciones, cerambícidos y anóbidos). Mediante Técnicas No Destructivas se cuantifican los daños y se estiman las propiedades físicas y mecánicas de la madera para definir un perfil resistente. Se realiza un análisis del estado actual para verificar el modelo e identificar las causas de las roturas observadas y proponer dos soluciones. Una, considerada de emergencia para garantizar la conservación del edificio, se basa en la sustitución de piezas rotas y medidas constructivas. Otra, para rehabilitarlo y adaptarlo a un nuevo uso como alojamiento rural, se basa en la anterior, en el refuerzo de algunas partes de la estructura y en un cálculo más desarrollado donde se tienen en cuenta las principales uniones.

Palabras clave: rehabilitación; diagnóstico; estructura; madera; durabilidad; xilófagos

Abstract

The objective of this work is the diagnosis of the wood structure of the roof and undercover of an agroforestry building located in the municipality of Béjar (Salamanca), and propose measures of action. Each piece of the main structure is analyzed, damages of mechanical origin are identified and samples are taken to identify the wood species (oak and chestnut) and xylophagous agents (rotting, cerambycidae and anobiidae). By means of Non Destructive Techniques the damages are quantified and the physical and mechanical properties of the wood are estimated to define a resistant profile. An analysis of the current state is carried out to verify the model and to identify the causes of the observed breaks and to propose two solutions. One, considered an emergency to guarantee the conservation of the building, is based on the replacement of broken pieces and constructive measures. Another, to rehabilitate it and adapt it to a new use as rural housing, is based on the previous one, in the reinforcement of some parts of the structure and in a more developed calculation where the main unions are taken into account.

Keywords: rehabilitation; diagnosis; structure; wood; durability; xylophage

1. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El edificio cuenta con muros de mampostería y una estructura de cubierta y forjado construida con madera de frondosa.

La cubierta está formada por cerchas, correas y cabios, mientras que el forjado lo conforman un sistema de vigas y los mismos tirantes de las cerchas. Estas piezas de forjado apoyan en un punto intermedio sobre las carreras, piezas que recorren longitudinalmente el edificio por su punto medio apoyadas sobre pilares de mampostería alineados.

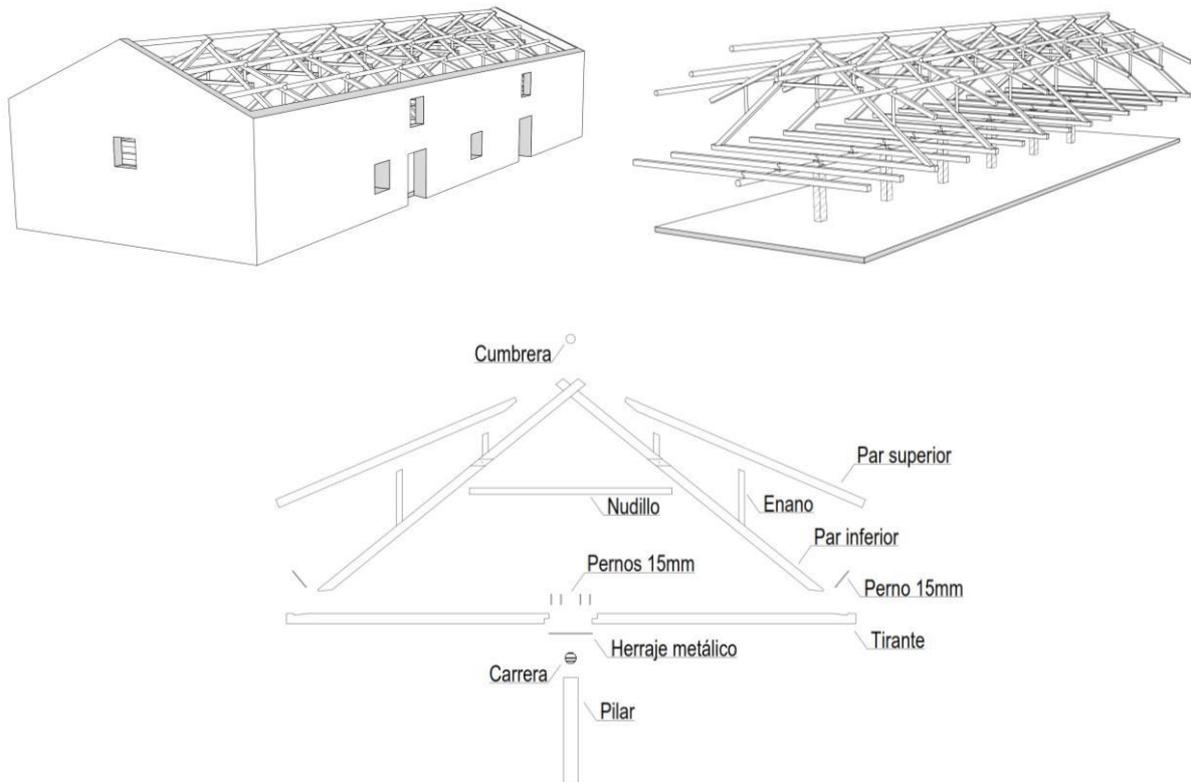


Figura 1: Planos detalle del edificio, su estructura y la configuración de la cercha.

2. INSPECCIÓN Y PATOLOGÍA

Se analiza y se inspecciona cada una de las piezas de la estructura principal, realizando un muestreo que será analizado en el laboratorio. Se realiza una identificación y cuantificación de los daños bióticos y estructurales.

Los insectos xilófagos que atacan las piezas de la estructura son: Familia Anobiidae; Familia Cerambycidae, Hesperophanes cinereus Villier.

Para valorar la patología se emplean Técnicas No Destructivas como el Microsecond Timer y el penetrómetro.

Para determinar los daños graves se emplea un punzón y se determina la cantidad de sección atacada. También se emplea la Técnica No Destructiva de onda de impacto para estudiar la velocidad de paso de la onda y de esta forma identificar posibles daños o singularidades en las piezas de madera.

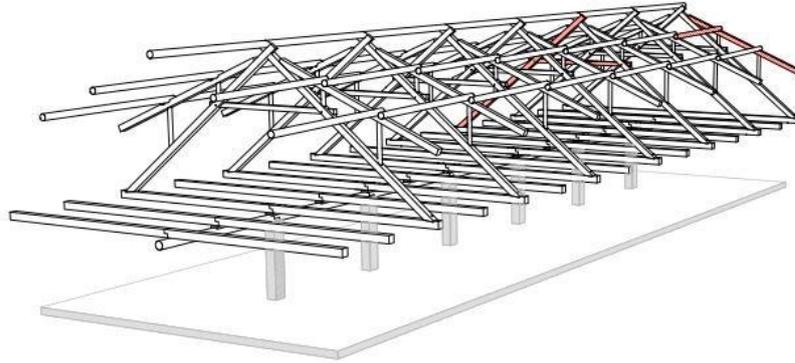


Figura 2: Vista global. Piezas de la estructura con daños graves representadas en color rojo.

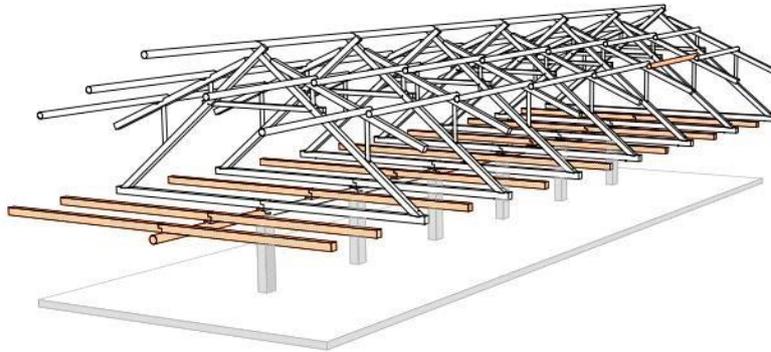


Figura 3: Vista global de ataques de insectos (en marrón, grado de ataque en albura medio; en gris, ataque elevado).

Para determinar aquellas piezas con riesgos de ataque de hongos de pudrición se emplea un xilohigrómetro. La figura 4 representa el contenido de humedad medio en las piezas de la estructura.

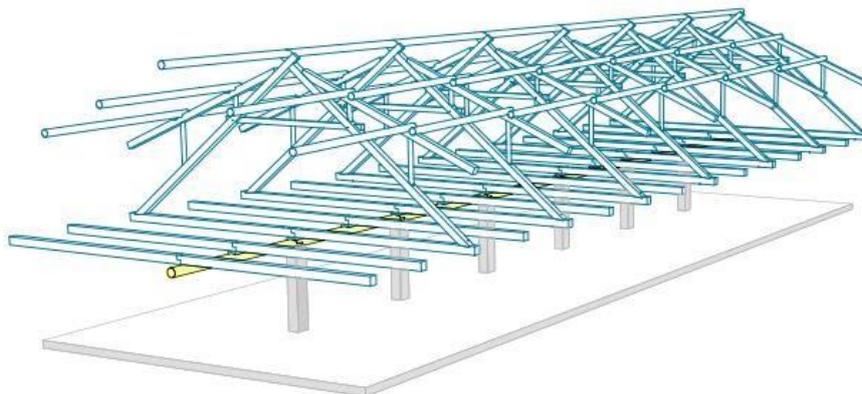


Figura 4: En azul las piezas con riesgo de ataque por hongos, con humedad entre 18-25% y en amarillo por debajo del 18%.

En la tabla 1 se muestran los porcentajes del contenido de humedad de los distintos grupos de piezas de la estructura, en las que se observa que únicamente desciende del 18% en las carreras. Además, se muestran los valores de velocidad de paso de la onda del Microsecond Timer de Fakopp (MST).

Tabla 1: Porcentajes del contenido de humedad medio, máximo y mínimo de cada uno de los grupos de piezas de la estructura principal y velocidad de paso de la onda corregida al 12%, distinguiendo entre las piezas de castaño y las de roble.

	Humedad (%)			MST
	Promedio	Máx	Mín	V12% (m/s)
Madera sana	20	20.5	19.5	3834.9
Tirantes sur	23.2	24.1	21.5	4002.6
Tirantes norte	23.1	25.5	20.2	3908.3
Carreras	17.8	18.2	17.2	4094.6
Pares y parecillos sur	23.3	24.5	19.8	3967.1
Pares y parecillos norte	24.1	24.9	22.1	3564.4
Correa	23.5	26.2	20.1	2783.1
Viguetas	22.3	23.1	21.5	3745.5
Valor medio castaño	22.5	23.8	20.3	3723.7
Vigas forjado sur	22.5	24.1	20	3905.8
Vigas forjado norte	22.1	23.2	21.1	3393.3
Valor medio roble	22.3	23.7	20.6	3649.6
Humedad ambiental	85%			
Temperatura	10 oC			

Se localiza una patología estructural en uno de los pares inferiores de una cercha donde, en la unión con el nudillo, el par se encuentra fracturado y fuera del plano de la cercha.

3. IDENTIFICACIÓN DE ESPECIE Y ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA

Se realiza un análisis detallado en laboratorio para poder estimar de forma precisa la especie y más adelante las propiedades mecánicas de la misma.

3.1 Identificación de la especie

Para ello se extraen cinco muestras de madera de cinco piezas distintas de la estructura mediante un taladro de 1600 W con broca de corona de 20 mm de diámetro mediante la cual se extraen los pequeños cilindros.

Más adelante, en el laboratorio, se extraen láminas de muy poco espesor y se observan al microscopio donde se visualizan los caracteres anatómicos de la madera para identificar la especie y se confirma que se trata de castaño en su totalidad, excepto las vigas, formadas por madera de roble.

3.2 Estimación de las propiedades mecánicas de la madera

Con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas de la madera, en primer lugar se halla la densidad de la misma. Para ello, se emplean las mismas probetas extraídas mediante el taladro y se determina la densidad de cada una de forma precisa en el laboratorio.

Debido a que el roble presenta mejores características físicas y mecánicas que el castaño y su sección atacada es menor que la de éste, se decide continuar el trabajo teniendo en cuenta como material estructural únicamente el castaño, con el fin de realizar los cálculos desde el lado de la seguridad.

Debido a que no se encuentra suficiente información en cuanto a la resistencia a flexión del castaño en gran escuadría y tampoco se halla relación entre el módulo de elasticidad dinámico y el estático, se decide emplear la resistencia a flexión y los módulos de elasticidad de la clase resistente a la que más se aproximen los valores de estas propiedades hallados en la tesis doctoral: ‘Caracterización mecánica de la madera estructural de *Castanea sativa Mill.* Clasificación visual y evaluación mediante métodos no destructivos’ Universidad de Santiago de Compostela. Escuela Politécnica Superior. Vega, A. (Lugo, 2013).

De este modo, los módulos de elasticidad empleados en este nuevo perfil resistente provienen de la clase D35, mientras que las propiedades que determinan la resistencia se obtendrán a partir de la clase D27, siempre desde el lado de la seguridad. La densidad media será el promedio obtenido empíricamente mediante el método de la extracción de testigos y para la densidad característica se tomará el mínimo valor de esta propiedad hallado mediante el mismo método.

Como conclusión, la tabla 2 muestra las propiedades del perfil resistente basado en la clase resistente modificada, las cuales se aproximan de forma precisa a la madera de castaño del edificio:

Tabla 2: Propiedades mecánicas que conforman el perfil resistente.

Material	Castanea sativa Mill.
Resistencia a flexión (N/mm ²) D27	27
Resistencia a tracción (N/mm ²) D27	14
Resistencia a compresión (N/mm ²) D27	21
Resistencia a cortante (N/mm ²) D27	4
MOE característico (E0,05) (N/mm ²) D35	10100
Densidad media (kg/m ³)	542
Densidad característica (kg/m ³)	506

4. COMPROBACIÓN ESTRUCTURAL

El cálculo de la estructura principal del edificio se realiza con el perfil resistente basado en la clase resistente modificada, teniendo en cuenta dos modelos diferenciados:

Se realiza el estudio comparativo del estado original (modelo 1 o M1) con el actual (modelo 2 o M2) de los elementos tipo. Donde M1 tiene una clase de servicio 2 y M2 presenta las secciones reducidas por los ataques y una clase de servicio 3 debido al elevado contenido de humedad de las piezas. Se realiza cualquier cálculo acorde a la normativa vigente (CTE-DB SE M). Las pérdidas de sección como consecuencia de los ataques producidos por organismos xilófagos se evalúan a partir de las medidas realizadas mediante la Técnica No Destructiva del penetrómetro.

Las acciones consideradas en el cálculo son las siguientes: peso propio, sobrecargas de uso, nieve, viento e incendio.

El cálculo estructural de los modelos mencionados se realiza mediante el programa Estrumad® en 2D por lo que se segmenta de la siguiente forma:

- En primer lugar se realiza el cálculo de los cabios inclinados biapoyados.
- A continuación se calculan las correas y la cumbrera también biapoyadas.
- Se modeliza el resto de la estructura de la cercha, la cual recibe las cargas puntuales procedentes de las correas y la cumbrera.
- Por último, se calculan las carreras y viguetas del forjado.

Una vez se comprueba el cálculo de los cabios, correas y cumbrera como elementos de cubierta se evalúa la cantidad de carga que reciben los pares superiores de la cercha a través del punto de apoyo

de las correas y la cumbrera en forma de carga puntual. Estas cargas puntuales provienen de las cargas que puedan recibir dichos elementos de cubierta (carga permanente, sobrecargas de uso, nieve y viento).

El tirante de la cercha tipo también actúa como forjado, por lo que se crean dos nuevas hipótesis de carga donde se tiene en cuenta la sobrecarga de uso uniforme y puntual junto con la carga de nieve, además del peso de las viguetas y el entablado de este piso.

Para calcular las carreras, se tienen en cuenta las cargas puntuales que reciben a través de las vigas y de los tirantes, además de las sobrecargas de uso puntual y uniforme.

5. RESULTADOS DE CÁLCULO Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTADO ACTUAL

Una vez modelizada la estructura mediante el programa Estrumad se procede a calcularla y se obtienen los valores de esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores y los índices de tensiones y deformaciones para cada una de las barras de la estructura.

Todo ello de acuerdo con las hipótesis de carga planteadas y las combinaciones de hipótesis en base al Código Técnico de la Edificación.

En la tabla 3 se muestran los resultados de cálculo del estado original y de estado actual, indicando los índices máximos de tensiones, de deformación, el esfuerzo dominante y la combinación de hipótesis correspondiente de cabios, viguetas, carreras, correas y cercha tipo.

Tabla 3: Resultados de cálculo. Cabios, viguetas, carreras, correas y cercha tipo. Secciones originales con CS2 (M1) vs secciones reducidas con CS3 (M2). Índices de agotamiento en los modelos 1 y 2. Los valores de flecha se calculan con respecto a una deformación límite de $L/300$.

Piezas	Barras	i Tensiones%		i Flecha %	
		M1	M2	M1	M2
Cabios	-	33	50	33	55
Correas	-	43	59	48	81
Tirantes	1	61	80	103	145
	2	61	80	103	145
Par inf 1	3	109	152	26	47
	4	100	139	13	21
	5	48	64	10	20
	6	22	30	0	0
Par inf 2	7	105	148	24	44
	8	100	140	12	24
	9	44	61	12	18
	10	22	29	0	0
Par sup 1	11	56	77	22	39
	12	55	76	23	42
	13	14	19	2	6
Par sup 2	14	56	74	20	37
	15	56	74	23	41
	16	17	23	4	6
Nudillo	17	50	71	8	16
Enano i1	18	18	26	0	0
Enano i2	19	21	30	0	0
Enan s1	20	17	25	0	0
Enan s2	21	22	32	0	0
Carreras	-	122	152	192	203
Viguetas	-	73	87	195	205

La rotura del par inferior coincide con la unión con el nudillo, lugar en el cual el par presenta una sección reducida a la mitad. Es por ello que basta con reducir a la mitad la sección en el cálculo y por lo tanto duplicar el índice de tensiones máximo en la unión. El índice de tensiones debido a la flexocompresión producida en dicha sección es del 247.4%. Este índice de agotamiento por tensiones se aproxima a los límites de rotura, lo que unido a algún posible defecto, como por ejemplo, un nudo o una desviación de fibra, puede justificar que la fractura se haya producido a causa de las tensiones que recibe el par en dicho punto.

6. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

En base a los resultados obtenidos mediante la inspección, las técnicas no destructivas empleadas y la comprobación del cálculo estructural, se llega a la conclusión de que es necesario realizar ciertas medidas en la cubierta y bajocubierta del edificio para garantizar su conservación o bien rehabilitarlo por completo.

En este trabajo se describen dos soluciones:

- La primera, denominada solución de emergencia, se basa únicamente en garantizar la conservación del edificio y mantener la función que ha tenido hasta hoy mediante actuaciones que no requieran un alto coste económico.
- La segunda solución consiste en proponer las actuaciones necesarias para la ejecución de la rehabilitación completa de la estructura donde se imponen nuevas cargas de uso y determinadas exigencias normativas. También se realizan comprobaciones de cálculo de las uniones de mayor importancia.

6.1 Propuesta solución de emergencia

Con la intención de conservar el edificio y frenar el deterioro se proponen las siguientes medidas: reducción del contenido de humedad en la madera, sustitución de piezas con daños graves de origen biótico o estructural y protección superficial. Teniendo en cuenta estas actuaciones, se lleva a cabo la comprobación de la estructura en la nueva situación bajo una clase de servicio 2 y con las secciones reducidas de las piezas de madera.

La figura 6 muestra los resultados de cálculo de la cercha en la solución de emergencia.

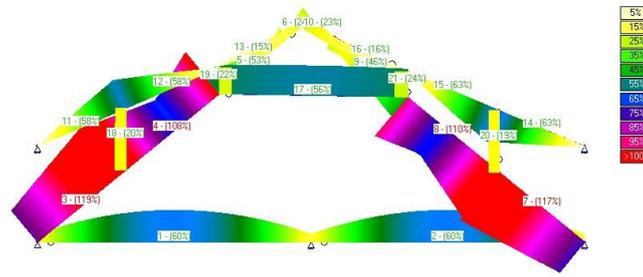


Figura 6: Representación gráfica de las tensiones que sufre la cercha en la solución de emergencia, con sección reducida y clase de servicio 2. El color rojo indica los mayores niveles de agotamiento, en este caso, por encima del 100%. Valores máximos de tensión expresados en %.

Como se puede observar en la figura 6, aunque los índices de tensiones superen el 100%, las piezas siguen sin estar en situación de riesgo pues no exceden si quiera el 120% (el valor crítico de rotura se encuentra alrededor del 300%), y debido a que las flechas no son muy elevadas, se puede considerar que las soluciones adoptadas para únicamente conservar el edificio y frenar el deterioro, sin alterar su uso, son aceptables.

6.2 Propuesta rehabilitación total

En esta solución, se propone la rehabilitación del edificio para construir un hotel. El estudio se centra en el cálculo de la estructura principal de la cubierta y bajocubierta.

Debido a que debe tratarse de un edificio acondicionado, se mejoran las condiciones de humedad relativa del aire de forma que sólo exceda el 65% unas pocas semanas al año y por tanto el contenido de humedad en la madera disminuye hasta el 12%, lo que da lugar a una clase de servicio 1.

En esta situación, puesto que debe cumplirse la norma, los índices de máxima tensión y deformaciones no deben sobrepasar el 100%. Por esta razón, y debido a que se tiene en cuenta la situación de incendio, se propone una solución mediante la cual se refuerzan, se sustituyen y se protegen frente al fuego ciertas piezas. Además se tienen en cuenta las cargas de uso correspondientes a la categoría de uso A1.

Para reforzar los pares inferiores se emplean piezas de madera microlaminada de 30 mm de espesor y un canto de 180 situadas en la cara opuesta a la que se encuentra el nudillo, de forma que pueda recorrer todo el par sin interrupciones. Estas piezas quedan con una sección total de 30 x 180 mm.

En el forjado, debido a que las vigas y tirantes no cumplen a flecha, se propone reforzar mediante madera microlaminada de 30 x 225 mm a ambos laterales de cada pieza y en toda la longitud.

Por último, se realiza un entrevigado mediante piezas de madera microlaminada con secciones de 200 x 225 mm.

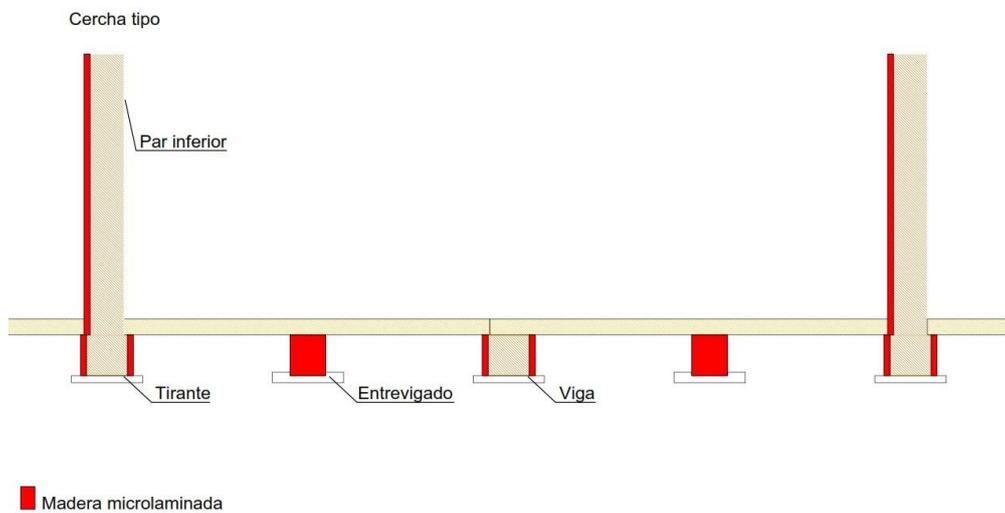


Figura 7: Gráfico que muestra la disposición de las piezas y las dimensiones de las secciones de madera microlaminada (en rojo).

A continuación se muestra en la tabla 3 los índices de agotamiento y las deformaciones que presenta la estructura con las nuevas cargas, refuerzos, nuevas piezas y clase de servicio 1:

Tabla 4: Resultados de cálculo.

Pieza	Barra	bxh / diám.	Í tens. %	Flecha %	Tramo	Fuego (R60,0.7)	
						i (%)	bxh mm 60 min
Cabios	-	85	37	38	10/20	-	-
Correas	-	230	43	45	10/20	64	62x191
Tirantes	1	285x225	51	89	10/20	65	192x127
Vigas (LVL)	2	200x225	36	94	10/20	70	102x127
Par inf 1	3	215x185	81	26	20/20	-	-
	4	215x185	76	10	0/20	-	-
	5	215x185	43	10	0/20	-	-
	6	215x185	17	0	20/20	-	-
Par inf 2	7	215x185	80	24	20/20	-	-
	8	215x185	76	13	0/20	-	-
	9	215x185	33	8	0/20	-	-
	10	215x185	16	0	20/20	-	-
Par sup 1	11	175x175	50	25	20/20	-	-
	12	175x175	47	21	20/20	-	-
	13	175x175	14	4	20/20	-	-
Par sup 2	14	175x175	50	22	20/20	-	-
	15	175x175	50	23	0/20	-	-
	16	175x175	11	2	20/20	-	-
Nudillo	17	135x135	52	9	10/20	-	-
Enano i1	18	85	20	0	todo	-	-
Enano i2	19	85	25	0	todo	-	-
Enano s1	20	85	19	0	todo	-	-
Enano s2	21	85	27	0	todo	-	-
Carreras (MLE)	-	240x280	96	85	10/20	45	-
Viguetas	-	85	45	75	10/20	-	-

Como se puede observar, gracias al hecho de aligerar la cubierta, reforzar pares inferiores, tirantes y vigas, y realizar el entrevigado de madera microlaminada, la estructura cumple en cuanto a índices de agotamiento, flecha y fuego, y se han podido mantener todas las piezas de la estructura excluyendo aquellas fracturadas o con daños graves y las carreras.

Además debido a que al realizar el entrevigado disminuye la distancia entre apoyos de las viguetas de forjado, en esta situación dichas viguetas cumplen la norma con índices de deformaciones máximas del 75% con respecto al límite que exige la norma de $L/300$, siendo L la luz de las piezas.

Los pares inferiores, reforzados con madera microlaminada, presentan índices de tensiones que no exceden del 81%. Por otro lado, la máxima flecha se da en los tirantes y vigas donde se alcanzan valores de 94 % con respecto a $L/300$ en el caso de las vigas.

En cuanto al fuego, se calcula la sección residual de correas, tirantes y vigas y su índice de agotamiento pasados los 60 minutos de exposición. La sección residual de las correas es de 62 x 191

mm con un índice máximo de tensiones del 64%, los tirantes, con sección residual de 192 x 127 mm, alcanzan índices de agotamiento del 65%, y por último, las vigas de madera microlaminada presentan una sección residual de 102 x 127 mm, con índices de agotamiento del 70%.

Las carreras, piezas que recorren el edificio longitudinalmente y donde apoyan vigas y tirantes, y ahora el nuevo entrevigado, requieren un análisis de cálculo para evaluar sus índices de agotamiento y deformaciones. Los índices de agotamiento de estas piezas alcanzan el 156%.

Por esta razón, se propone reemplazar estas piezas, rollizos de castaño de 225 mm de diámetro, con vigas de madera laminada GL30h con secciones de 240 x 280 mm.

6.3 Empalme entre las piezas del tirante

El axil de tracción que debe resistir el tirante es de 67.62 kN. Para ello, se propone reforzar la unión entre ambas piezas con un empalme a media madera reforzado mediante dos piezas de madera microlaminada dispuestas lateralmente a los tirantes de castaño con un herraje y 4 pernos de acero. Lo que dará lugar a una unión entre madera-madera y a doble cortadura.

El resultado de cálculo indica que deberán colocarse dos núcleos de pernos, uno en cada pieza del tirante, a una distancia de 200mm de la testa correspondiente, formados por un conjunto de 6 pernos dispuestos en doble fila, y en el otro extremo de cada pieza de castaño se dispone otro núcleo de 3 pernos en fila, estas clavijas son designadas como: pernos de acero M12 de calidad 8.8.

En la siguiente figura se muestran en detalle la unión entre piezas del tirante:



Figura 8: Representación gráfica del refuerzo de la unión entre piezas del tirante mediante madera microlaminada

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Documento Básico de Seguridad Estructural-Madera (CTE-DB SE M). (2009).
- [2] Vega, A. 'Caracterización mecánica de la madera estructural de *Castanea sativa Mill.* Clasificación visual y evaluación mediante métodos no destructivos' Universidad de Santiago de Compostela. Escuela Politécnica Superior. (2013).