



Universidad de la República
Facultad de Ingeniería



Instituto de Estructuras y Transporte
Prof. Julio Ricaldoni

ESTRUCTURAS DE MADERA

CURSO 2020

MEMORIA DE CÁLCULO



AUTORES:

Santiago Delgado - C.I.: 4.846.844-0
Santiago Laco - C.I.: 4.945.212-1
Mauro Libovich - C.I.: 4.936.732-6
Guillermo Riviezzo - C.I.: 5.163.549-4

DOCENTES:

Mag. Ing. Leandro Domenech
Ing. Carlos Mazzey
Ing. Daniela de Souza

GRUPO

NARCOS

FECHA: 21 de Noviembre de 2020

Tabla de contenidos

1. Introducción	1
2. Bases de Proyecto	2
2.1. Normativa Empleada	2
2.2. Materiales	2
2.3. Cargas consideradas	3
2.4. Combinaciones de acciones	3
2.5. Otras consideraciones	4
3. Verificaciones en los elementos de madera	5
3.1. Estados Límites Últimos	5
3.2. Estados Límite de Servicio	11
4. Cerramiento horizontal	13
5. Viguetas	18
6. Estado límite de vibraciones	24
7. Vigas principales	27
8. Pilares	33
9. Unión Vigueta-Viga principal	36
10. Referencias	38

1. Introducción

En el presente documento se detallan las hipótesis, cálculos y verificaciones realizadas para el diseño y proyecto de un entrepiso liviano de madera a ser ubicado en la cafetería “Narcos”.

La estructura se compone de un entablonado machihembrado como cerramiento horizontal, apoyado en **viguetas de madera aserrada** con una separación a eje de 40 centímetros, las cuales a su vez se apoyan en el sistema de vigas principales y pilares. Estas vigas principales se apoyan en los pilares que se encargan de distribuir la carga hasta la cimentación. En las figuras 1.1 y 1.2 se presentan los diseños de arquitectura en los cuales se basa el diseño estructural.

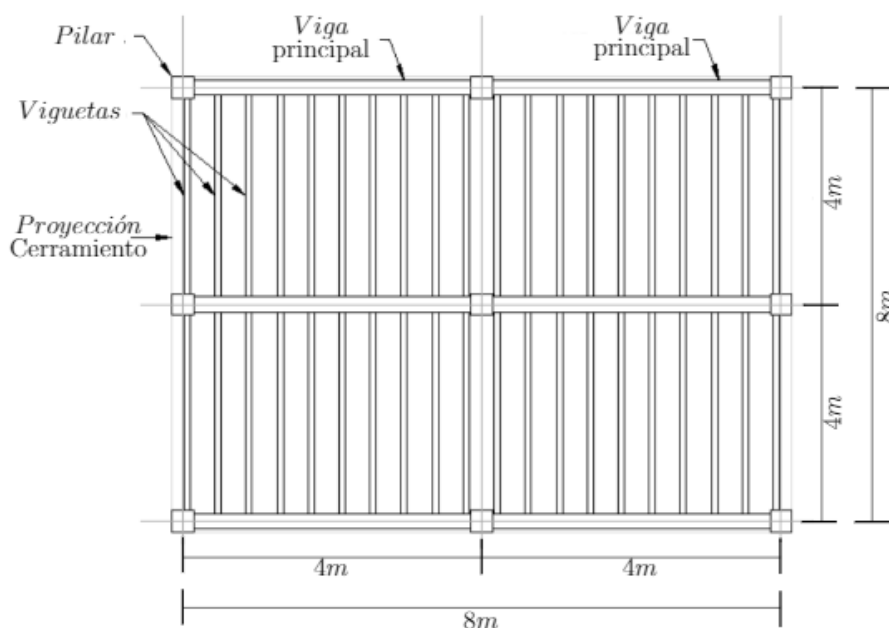


Figura 1.1: Planta de la estructura según arquitectura

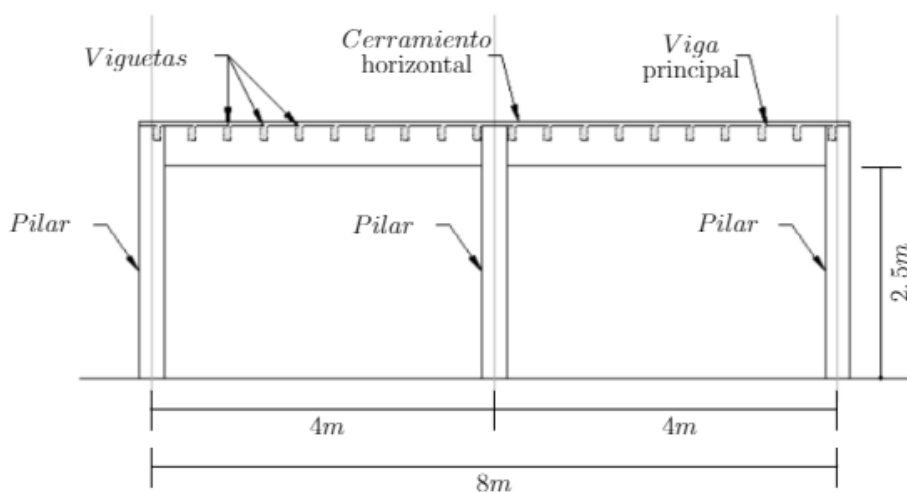


Figura 1.2: Sección de la estructura según arquitectura

2. Bases de Proyecto

2.1. Normativa Empleada

Para la definición de los materiales y sus propiedades:

- **UNIT 1261:2018** - Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de pino taeda y pino ellioti (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*).
- **UNIT 1262:2018** - Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de eucalipto (*Eucalyptus grandis*).
- **UNE-EN 338:2016** - Madera estructural. Clases resistentes.
- **EN 14080:2013** - Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos.

Para la definición de acciones y combinaciones:

- **EN 1990:** Eurocódigo 0: Bases del cálculo de estructuras.
- **EN 1991-1-1:** Eurocódigo 1 Parte 1-1: Acciones en estructuras; acciones generales; pesos específicos, pesos propios y sobrecargas de uso en edificios.

Para el diseño estructural:

- **EN 1995-1-1:** Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.
- **EN 1995-1-2:** Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego.
- **CTE-DB** Código Técnico de la Edificación - Documento Básico - Seguridad estructural (2019). (Solo para los límites de las deformaciones)

2.2. Materiales

- Para el cerramiento horizontal: Madera aserrada de clase resistente **C14** según EN 338:2016.
- Para las viguetas, vigas principales y los pilares: Madera laminada encolada de clase resistente **GL22h** según EN 14080:2013.

Las propiedades mecánicas de estas clases resistentes son recogidas por la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Propiedades mecánicas según clase resistente

Clase resistente	C14	GL22h
R. a Flexión (MPa)	14	22
R. a Tracción paralela a f. (MPa)	8	17
R. a Tracción perpendicular a f. (MPa)	0,4	0,5
R. a Compresión paralela a f. (MPa)	16	22
R. a Compresión perpendicular a f. (MPa)	2	2,5
R. al Cortante (MPa)	3,0	3,5
Módulo elástico medio (GPa)	7	10,5
Módulo elástico caract. (GPa)	4,7	8,8
Módulo elástico perp. a f. (GPa)	0,23	0,30
Módulo de cizalladura (GPa)	0,44	0,65
Densidad caract. (kg/m^3)	290	370
Densidad media (kg/m^3)	350	410

- Para las uniones se utilizan herrajes y elementos de fijación de *Rotho Blaas SRL*. con los materiales que figuran en el catálogo de los mismos.

2.3. Cargas consideradas

- Como carga permanente (G_k) se considera el peso propio de los elementos de la estructura. Para esto se utilizan las siguientes densidades medias obtenidas de las clasificaciones EC1 y EF1 de las normas UNIT:
 - Densidad media del cerramiento horizontal: 4,1258 kg/m^3 .
 - Densidad media de las viguetas, vigas y pilares: 5,0862 kg/m^3 .
- Para las sobrecargas de uso (Q_k) se consideran dos cargas no simultáneas entre sí, asociadas a la categoría C1 del EN 1991-1-1:
 - Una carga distribuida en el entrepiso de valor 3,00 kN/m^2 y duración media.
 - Una carga virtualmente puntual (área de 5 cm × 5 cm) de valor 4,00 kN y duración corta.

2.4. Combinaciones de acciones

Para las verificaciones de estado límite último en situación persistente, se considera la siguiente expresión para definir las combinaciones. Es importante notar que esta expresión para las combinaciones es válida por solo tener una carga permanente (peso propio) y solamente dos cargas variables que no son consideradas en simultáneo.

$$\gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k$$

donde:

- γ_G es el coeficiente de seguridad de las cargas permanentes. Vale 1,35 si los efectos de las mismas, para la verificación que se esté realizando, son desfavorables y 1,00 en caso contrario.
- G_k es el valor característico de la acción permanente, presentado en la sección 2.3.
- γ_Q es el coeficiente de seguridad de las cargas variables. Vale 1,50 si los efectos de las mismas, para la verificación que se esté realizando, son desfavorables y 0,00 en caso contrario.
- Q_k es el valor característico de la acción variable considerada. Sus valores fueron presentados en la sección 2.3.

Para las verificaciones en la situación accidental de incendio se considera la siguiente expresión para definir las combinaciones.

$$G_k + \psi_1 \cdot Q_k$$

donde:

- ψ_1 es el coeficiente frecuente de las acciones variables. Para las cargas variables consideradas, el coeficiente es 0,7.

Para los estados límite de servicio se consideran dos tipos de combinaciones de acciones. La primera de éstas es la característica, cuya expresión es la siguiente:

$$G_k + Q_k$$

La segunda es la cuasipermanente, cuya expresión es:

$$G_k + \psi_2 \cdot Q_k$$

donde ψ_2 es el coeficiente cuasipermanente de las acciones variables. Para las cargas variables de este proyecto el coeficiente es 0,6.

Es importante notar que las cargas variables son consideradas cargas libres, por lo que pueden tomar cualquier posición y se debe adoptar, para cada verificación, la posición que sea más desfavorable. De manera análoga, no es un requisito considerar que existen cargas variables actuando, pudiendo considerar una situación solamente con cargas permanentes.

2.5. Otras consideraciones

Tomando en cuenta el ambiente de exposición de la estructura se tiene, para todos los elementos, una clase de servicio tipo 1 según la cláusula 2.3.1.3 del EN 1995-1-1.

Asociado al uso de la construcción se considera que se requieren 30 minutos de resistencia al fuego.

3. Verificaciones en los elementos de madera

Se presentan a continuación las distintas verificaciones que se realizan sobre los elementos de madera de la estructura. Luego, en las secciones correspondientes a las distintas piezas, se muestran los cálculos para cada una y su aptitud frente a los diversos estados límite.

3.1. Estados Límites Últimos

Tracción Paralela a la Fibra:

No aplica por no existir elementos sometidos a tracción en la dirección de la fibra.

Compresión Paralela a la Fibra:

Se debe comprobar la siguiente desigualdad:

$$\frac{N_d}{A} = \sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot (f_{c,0,k}/\gamma_m) \cdot k_{sys}$$

donde:

- N_d es la directa de compresión de diseño según las combinaciones de estado límite último en situación persistente.
- A es el área de la sección de la pieza.
- k_{mod} es un coeficiente que tiene en cuenta el contenido de humedad y la duración de la carga. Es recogido en la tabla 3.1 del EN 1995-1-1 y los valores que toma para la clase de servicio y duraciones de carga de este proyecto se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Valores del coeficiente k_{mod} para este proyecto

Formato de Madera	Duración de la carga		
	Permanente	Media	Corta
Madera Aserrada	0,6	0,8	0,9
Madera Laminada Encolada	0,6	0,8	0,9

En una combinación de cargas de distinta duración, aplica el coeficiente de la carga de menor duración.

- $f_{c,0,k}$ es el valor característico de la resistencia a la compresión paralela a la fibra según la tabla 2.1.
- γ_m es el coeficiente de seguridad del material. Vale 1,3 para las piezas de madera aserrada y 1,25 para las piezas de madera laminada encolada.
- k_{sys} es un coeficiente de carga compartida que permite aumentar la resistencia si existe la posibilidad de redistribuir carga a elementos repetidos. Su desarrollo se presentará en el estado límite último de flexión simple **ya que en compresión paralela a la fibra se considera igual a 1.**

Flexión simple:

Se debe comprobar la siguiente desigualdad:

$$\frac{M_d}{W_{el}} = \sigma_{m,y,d} \leq f_{m,y,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot (f_{m,k}/\gamma_m) \cdot k_{sys}$$

donde:

- M_d es el momento de diseño según las combinaciones de estado límite último en situación persistente.
- W_{el} es el módulo elástico de la sección. Para secciones rectangulares, como las utilizadas en el proyecto, su valor es $W_{el} = bh^2/6$ siendo b el ancho de la pieza y h el canto de la misma.
- k_h es un coeficiente que tiene en cuenta el comportamiento frágil en tracción de la madera.

Para madera aserrada vale:

$$k_h = \begin{cases} \min \{(150/h)^{0,2} ; 1,3\} & \text{si } h < 150 \\ 1 & \text{si } h \geq 150 \end{cases}$$

Y para madera laminada encolada vale:

$$k_h = \begin{cases} \min \{(600/h)^{0,1} ; 1,1\} & \text{si } h < 600 \\ 1 & \text{si } h \geq 600 \end{cases}$$

En ambas ecuaciones h es en milímetros.

- $f_{m,k}$ es la resistencia a flexión característica según la tabla 2.1.
- k_{sys} es el coeficiente mencionado anteriormente. En flexión simple de elementos lineales vale 1,1 si se puede considerar carga compartida y 1 en caso contrario. Para considerar carga compartida se necesita:
 - Que sean una serie de piezas iguales equiespaciadas unidas transversalmente por otra estructura secundaria.
 - Que esta estructura secundaria sea continua en al menos 2 vanos y que este diseñada para resistir las diversas cargas.
 - En el caso de viguetas, que la luz sea menor a 6 metros.

En todos los casos del proyecto se considera $k_{sys} = 1$ excepto en las viguetas que se considera $k_{sys} = 1,1$.

Cortante:

Se debe comprobar la siguiente desigualdad:

$$1,5 \cdot \frac{V_d}{b_{ef} \cdot h} = \tau_d \leq f_{v,d} = k_{mod} \cdot (f_{v,k}/\gamma_m)$$

donde:

- V_d es el cortante de diseño según las combinaciones de estado límite último en situación persistente.
- $b_{ef} = k_{cr} \cdot b$ es un ancho efectivo para tener en cuenta la presencia de fendas. El coeficiente $k_{cr} = 0,67$ para los productos de madera que se consideran en este proyecto.
- $f_{v,k}$ es la resistencia característica a cortante según la tabla 2.1.

Se considera que ninguna pieza posee entalladuras en las cuales se debería realizar comprobaciones adicionales.

Torsión:

Se desprecia cualquier presencia de torsión en la estructura. Estrictamente, se genera un poco en las vigas por la descarga excéntrica de las viguetas.

Tracción perpendicular a la fibra:

No aplica por no existir elementos sometidos a tracción perpendicular a la fibra. Las uniones se diseñan de forma de poder considerar esto.

Compresión perpendicular a la fibra:

Se debe comprobar la siguiente desigualdad:

$$\frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} = \sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} = k_{c,90} \cdot k_{mod} \cdot f_{c,90,k}/\gamma_m$$

donde:

- $F_{c,90,d}$ es el valor de la carga concentrada de diseño según las combinaciones de estado límite último en situación persistente.
- A_{ef} es el área efectiva de la carga concentrada. Se calcula considerando las dimensiones de la carga concentrada, aumentando a cada lado el máximo valor entre 30 milímetros, el vuelo de la pieza desde el borde de la carga, la dimensión de la carga o la separación entre cargas.
- $f_{c,90,k}$ es la resistencia característica a compresión perpendicular a la fibra según la tabla 2.1.

- $k_{c,90}$ es un coeficiente que permite mayorar la resistencia. Para piezas sobre apoyos aislados, como es el caso, si la separación entre cargas es mayor a 2 veces el canto de la pieza se puede tomar $k_{c,90} = 1,5$ para madera aserrada de coníferas y $k_{c,90} = 1,75$ para madera laminada encolada de coníferas siempre y cuando la longitud de la carga sea menor a 400 milímetros.

Inestabilidad en elementos comprimidos:

Se debe comprobar la siguiente desigualdad:

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_c \cdot f_{c,0,d}$$

siendo k_c un coeficiente que toma en cuenta la inestabilidad en compresión. Se calcula según la siguiente expresión:

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \leq 1$$

con:

$$k = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2)$$

$$\beta_c = \begin{cases} 0,2 & \text{en madera aserrada} \\ 0,1 & \text{en madera laminada encolada} \end{cases}$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

donde:

- λ es la esbeltez mecánica de la pieza. Se calcula como la luz de pandeo sobre el radio de giro de la sección en la dirección considerada.

La luz de pandeo para un elemento bi-articulado, como los que se consideran en este proyecto, es idéntica a la longitud de la pieza.

El radio de giro de la sección, para piezas rectangulares, se calcula como $h/\sqrt{12}$.

- $E_{0,05}$ es el módulo elástico característico según la tabla 2.1.

Se debe notar que, por ser el coeficiente $k_c \leq 1$, realizar esta verificación indirectamente verifica compresión perpendicular a la fibra.

Vuelco Lateral:

Se debe comprobar la siguiente desigualdad:

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,y,d}$$

siendo k_{crit} un coeficiente que toma en cuenta la inestabilidad en flexión. Se calcula según la siguiente expresión:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{si } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{si } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ 1/\lambda_{rel,m}^2 & \text{si } \lambda_{rel,m} > 1,4 \end{cases}$$

con:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot b^2 \cdot E_{0,05}}{h \cdot l_{ef}}$$

donde l_{ef} es la longitud efectiva de vuelco lateral. Se calcula como $l_{ef} = \beta_V \cdot l$ siendo l la longitud real de la viga y β_V un coeficiente que tiene en cuenta la configuración de carga y las condiciones de apoyo. Para este proyecto se utilizan los coeficientes presentados en la figura 3.1, donde los dos primeros son obtenidos directamente del EN 1995-1-1 y el tercero de (Argüelles & Arriaga, 1996).

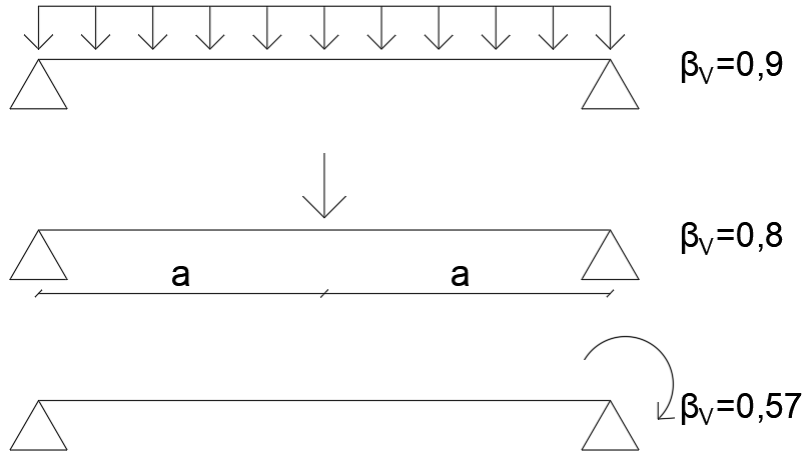


Figura 3.1: Coeficientes β_V según la configuración de carga

En los casos en que la carga se aplica en el borde comprimido (como se da en la mayor parte de los casos del proyecto) la longitud efectiva se debe incrementar en $2h$.

Se debe notar que, por ser el coeficiente $k_{crit} \leq 1$, realizar esta verificación indirectamente verifica flexión simple.

Combinación de esfuerzos:

En el caso de los pilares de la estructura, los cuales se pueden encontrar simultáneamente sometidos a esfuerzos de compresión y flexión esviada, se deben verificar los efectos de combinación de esfuerzos según los siguientes criterios:

- Si no hay inestabilidad ni a compresión ni a flexión ($k_c = 1$ para ambos ejes principales del pilar y $k_{crit} = 1$) entonces se deben verificar las siguientes dos desigualdades:

$$\begin{cases} \sigma_{m,y,d}/f_{m,y,d} + k_m \cdot \sigma_{m,z,d}/f_{m,z,d} + (\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d})^2 \leq 1 \\ k_m \cdot \sigma_{m,y,d}/f_{m,y,d} + \sigma_{m,z,d}/f_{m,z,d} + (\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d})^2 \leq 1 \end{cases}$$

donde k_m es un coeficiente que vale 0,7 para secciones rectangulares y los subíndices y y z hacen referencia a los dos ejes principales de la sección.

- Si hay inestabilidad a compresión pero no a flexión entonces se deben verificar las siguientes dos desigualdades:

$$\begin{cases} \sigma_{m,y,d}/f_{m,y,d} + k_m \cdot \sigma_{m,z,d}/f_{m,z,d} + \sigma_{c,0,d}/(k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}) \leq 1 \\ k_m \cdot \sigma_{m,y,d}/f_{m,y,d} + \sigma_{m,z,d}/f_{m,z,d} + \sigma_{c,0,d}/(k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}) \leq 1 \end{cases}$$

- Si hay inestabilidad a flexión, cosa que no ocurre en este proyecto (para los casos donde se estudia combinación de esfuerzos), se debe recurrir a otro cuerpo normativo ya que el EN 1995-1-1 no considera flexión esviada con posibilidad de inestabilidad a flexión.

Es importante notar que con realizar esta verificación ya se verifican los estados límite de flexión simple, compresión paralela a la fibra, inestabilidad en compresión y vuelco lateral.

Comprobaciones Singulares:

No aplica por no existir elementos curvos o de sección variable.

Comprobación a fuego:

Se hace uso del método de la sección reducida para verificar la situación accidental de incendio. El mismo se basa en considerar una profundidad efectiva de carbonización en las caras expuestas (ver figura 3.2) la cual reduce la sección de la pieza. Esta profundidad se calcula según la siguiente expresión:

$$d_{ef} = \beta_n \cdot t + k_0 \cdot 7mm$$

siendo:

- β_n la velocidad de carbonización ficticia. Para madera aserrada de coníferas con densidad característica mayor o igual a 290 kg/m^3 vale $0,8 \text{ mm/min}$ y para madera laminada encolada de coníferas con la misma limitación de la densidad vale $0,7 \text{ mm/min}$. Considerando las características del Eucalipto nacional y del lado de la seguridad, se considera que toda la madera es de conífera.
- t el tiempo requerido de resistencia al fuego según la sección 2.5
- k_0 un coeficiente que vale 1 para tiempos mayores o iguales a 20 minutos.

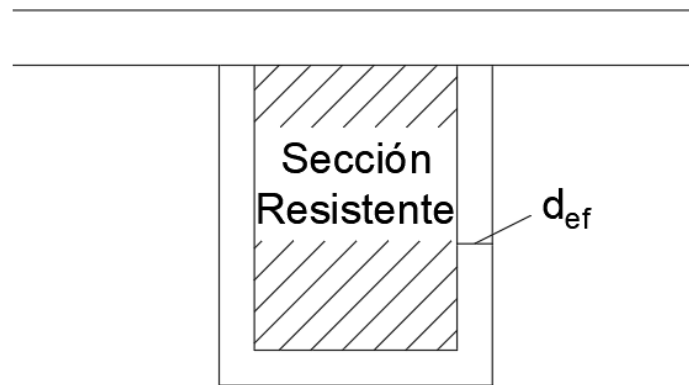


Figura 3.2: Esquema del método de la sección reducida

Una vez reducida la sección se deben verificar los estados límites últimos de directas, flexión e inestabilidades. Lógicamente, si existe combinación de estos esfuerzos, se debe verificar. Se deben tener en cuenta las siguientes particularidades:

- Las solicitaciones se calculan a partir de las combinaciones accidentales de incendio.
- El coeficiente k_{mod} , el coeficiente k_{sys} , el coeficiente k_h y el coeficiente γ_m se toman iguales a 1.
- Para las resistencias se considera $k_{fi} \cdot f_k$ siendo f_k la resistencia característica pertinente según la tabla 2.1 y k_{fi} un coeficiente que vale 1,25 para madera aserrada y 1,15 para madera laminada encolada. Lo mismo aplica, según la cláusula 2.3 del EN 1995-1-2, para el valor característico del módulo de deformación longitudinal en el caso de las verificaciones de inestabilidad.

3.2. Estados Límite de Servicio

Deformaciones:

La flecha neta final ($w_{net,fin}$) se calcula según la siguiente expresión:

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c$$

donde:

- w_{inst} es la flecha instantánea calculada con la combinación característica de acciones y utilizando los valores medios del módulo elástico longitudinal (E) y transversal (G). Para tener en cuenta las deformaciones por corte en la madera se aplican los siguientes factores mayoradores de la flecha sin considerar deformaciones por corte:

$$Factor = \begin{cases} \left(1 + \frac{6}{5} \frac{E}{G} \left(\frac{h}{l}\right)^2\right) & \text{Para cargas puntuales en el centro del vano.} \\ \left(1 + \frac{24}{25} \frac{E}{G} \left(\frac{h}{l}\right)^2\right) & \text{Para cargas uniformemente distribuidas.} \end{cases}$$

- w_{creep} es la flecha diferida calculada como la flecha instantánea (pero con la combinación cuasipermanente de acciones) multiplicada por un factor k_{def} que, para la clase de servicio y productos estructurales del proyecto, vale 0,6.
- w_c es la contraflecha de fabricación.

Las verificaciones que se realizan son las dos siguientes. No se considera la verificación de flecha activa ya que no existen elementos no estructurales que pudieran perder su funcionalidad debido a estas deformaciones.

- Se limita la flecha instantánea de las cargas variables a $l/350$.
- Se limita la flecha neta final a $l/300$.

Vibraciones

El estado límite de vibraciones se asocia a más de un elemento a la vez por lo cual su verificación se realiza en la sección 6, destinada exclusivamente a este estado límite.

4. Cerramiento horizontal

Para el cerramiento se considera un conjunto de tablas machihembradas de 6 pulgadas de ancho y una pulgada de canto.

Las cargas que actúan sobre el mismo (y sus valores característicos) son:

- Su peso propio de magnitud $G_k = 16 \text{ N/m}$
- La sobrecarga distribuida en el entrepiso, multiplicada por el ancho de las tablas, de magnitud $Q_{k,dist} = 0,46 \text{ kN/m}$
- La carga puntual de la sobrecarga de uso de magnitud $Q_{k,punt} = 4,00 \text{ kN}$

De forma simplificada, para el cálculo de solicitaciones se considera a las tablas como simplemente apoyadas con una luz de 40 centímetros, igual a la separación entre viguetas.

Tomando en cuenta las cargas que se tienen y el modelo estructural del entablonado se realizan las verificaciones de flexión simple, cortante, compresión perpendicular a la fibra y deformaciones. No corresponde la verificación de vuelco lateral ya que la flexión es según el eje débil. No se considera la comprobación a fuego de estos elementos.

Debido al machihembrado de las tablas se admite cierta redistribución de la carga puntual por lo cual no se realizan verificaciones de flexión, cortante ni deformaciones con la misma.

Tomando el modelo analítico en cuenta se tiene que el momento (M), cortante (V) y flecha (w) (sin contar deformaciones por corte) máximos por las cargas distribuidas uniformemente (q) son según las siguientes expresiones, donde I es la inercia de la pieza.

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8}$$

$$V = \frac{q \cdot l}{2}$$

$$w = \frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{EI}$$

A continuación se presentan las distintas verificaciones.

Flexión:

Para la verificación del estado límite último de flexión y posteriormente para el cortante se consideran las siguientes combinaciones de carga:

- C1: $1,35 \cdot G_k$
- C2: $1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,dist}$

En la tabla 4.1 se presenta la verificación de flexión para estos elementos.

Tabla 4.1: Verificación de flexión en el cerramiento horizontal

Parámetros generales		
b (mm)	152,4	
h (mm)	25,4	
W_{el} (mm ³)	16.387,06	
k_h	1,3	
$f_{m,k}$ (MPa)	14	
γ_m	1,3	
k_{sys}	1	
Parámetros específicos de la combinación		
Combinación	C1	C2
M_d (Nm)	0,432	14,147
$\sigma_{m,y,d}$ (kPa)	26,31	863,32
k_{mod}	0,6	0,8
$f_{m,y,d}$ (kPa)	8.400	11.200
Verificación		
Aprovechamiento (%)	0,31	7,71

Cortante:

En la tabla 4.2 se presenta la verificación de cortante para estos elementos.

Tabla 4.2: Verificación de cortante en el cerramiento horizontal

Parámetros generales		
b (mm)	152,4	
h (mm)	25,4	
b_{ef} (mm)	102,1	
$f_{v,k}$ (MPa)	3,0	
γ_m	1,3	
Parámetros específicos de la combinación		
Combinación	C1	C2
V_d (N)	4,32	141,47
τ_d (kPa)	2,45	81,82
k_{mod}	0,6	0,8
$f_{v,d}$ (kPa)	1.384,62	1846,15
Verificación		
Aprovechamiento (%)	0,18	4,43

Compresión perpendicular a la fibra:

Para la verificación del estado límite último de compresión perpendicular a la fibra se consideran 4 combinaciones de carga:

- C1: $1,35 \cdot G_k$
- C2: $1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,dist}$
- C3: $1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,punt}$ con la carga puntual aplicada sobre la vigueta.
- C4: $1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,punt}$ con la carga puntual no aplicada sobre la vigueta.

Con las primeras 3 combinaciones se verifica la compresión asociada a la reacción en el apoyo sobre la vigueta. Con las últimas 2 se verifica la compresión asociada a la carga concentrada.

Es importante notar que en el caso de la reacción por cargas distribuidas se considera el doble del cortante visto en la anterior verificación ya que hay dos vanos de tablas descargando en la misma vigueta.

En la tabla 4.3 se presenta la verificación de compresión perpendicular a la fibra en estos elementos. El largo de la carga hace referencia a la dimensión en la dirección de la tabla y el ancho a la dimensión en la dirección perpendicular a la misma. Con largos y anchos efectivos se hace referencia al largo y ancho de la carga con el aumento de 30 milímetros a cada lado si corresponde.

Tabla 4.3: Verificación de compresión perpendicular a la fibra en el cerramiento horizontal

Parámetros generales					
$f_{c,90,k}$ (MPa)	2,00				
γ_m	1,3				
Parámetros específicos de la combinación					
Carga a verificar	Reacción			Carga puntual	
Combinación	C1	C2	C3	C3	C4
$F_{c,90,d}$ (N)	8,62	282,94	6008,62	6.000,00	6.000,00
largo de la carga (mm)	101,6	101,6	101,6	50	50
ancho de la carga (mm)	152,4	152,4	152,4	50	50
largo efectivo (mm)	161,6	161,6	101,6	50	110
ancho efectivo (mm)	152,4	152,4	152,4	50	110
A_{ef} (mm ²)	24.627,84	24.627,84	15.483,84	2.500	12.100
$\sigma_{c,90,d}$ (MPa)	$3,50 \times 10^{-4}$	0,0115	0,388	2,400	0,500
$k_{c,90}$	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5
k_{mod}	0,6	0,8	0,9	0,9	0,9
$f_{c,90,d}$ (MPa)	0,92	1,23	1,38	1,38	1,38
$k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$ (MPa)	1,38	1,85	1,38	1,38	2,08
Verificación					
Aprovechamiento (%)	0,03	0,62	28,03	173,33	23,88

La única verificación que no cumple es la carga concentrada cuando es aplicada directamente sobre la viga. Como en este caso la falla solamente implica un efecto estético de abollamiento y no genera problemas de funcionalidad y ni mucho menos de seguridad, se considera verificado este estado límite.

Deformaciones:

En la tabla 4.4 se presenta el cálculo de las flechas instantáneas y diferidas máximas para cada una de las cargas.

Tabla 4.4: Cálculo de flechas del cerramiento horizontal

Parámetros generales		
h (mm)	25,4	
I (mm ⁴)	208.115,71	
l (m)	0,40	
E (GPa)	7,0	
G (GPa)	0,44	
k_{def}	0,6	
Factor para def. por corte	1,062	
Parámetros específicos de las cargas		
Carga	G_k	$Q_{k,dist}$
Flecha solo por flexión (mm)	$3,65 \times 10^{-3}$	0,105
w_{inst} (mm)	$3,88 \times 10^{-3}$	0,111
ψ_2	1,0	0,6
w_{creep} (mm)	$2,33 \times 10^{-3}$	0,040

Por solo tener una carga variable, la verificación de la flecha instantánea para cargas variables se resume en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Verificación de la flecha instantánea de la carga variable en el entablonado

Parámetros	
l (m)	0,40
w_{adm} (mm)	1,14
w_{inst} (mm)	0,111
Verificación	
Aprovechamiento (%)	9,72

Análogamente para la verificación de la flecha neta final solo existe una combinación característica:

$$G_k + Q_{k,dist}$$

y una cuasipermanente:

$$G_k + 0,6 \cdot Q_{k,dist}$$

Obteniendo la verificación según se muestra en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Verificación de la flecha neta final para el cerramiento horizontal

Parámetros	
$l \text{ (m)}$	0,4
$w_{adm} \text{ (mm)}$	1,33
$w_c \text{ (mm)}$	0
$w_{fin} \text{ (mm)}$	0,157
$w_{net,fin} \text{ (mm)}$	0,157
Verificación	
Aprovechamiento (%)	11,79



5. Viguetas

Para las viguetas se consideran piezas rectangulares de 4 pulgadas de ancho y 180 milímetros de canto, equiespaciadas 40 centímetros entre sí.

Las cargas que actúan sobre las mismas (y sus valores característicos) son:

- Su peso propio de magnitud $G_{k,pp} = 0,093 \text{ kN/m}$ y el peso propio del cerramiento horizontal $G_{k,CH} = 0,042 \text{ kN/m}$ calculado como el peso del mismo (por unidad de área) multiplicado por un ancho de influencia de 0,4 metros. Sumando estas dos cargas se obtiene la carga permanente $G_k = 0,135 \text{ kN/m}$
- La sobrecarga distribuida en el entrepiso, multiplicada por el ancho de influencia de 0,4 metros, de magnitud $Q_{k,dist} = 1,20 \text{ kN/m}$
- La carga puntual de la sobrecarga de uso de magnitud $Q_{k,punt} = 4,00 \text{ kN}$

El modelo de cálculo de las viguetas es una viga simplemente apoyada en las vigas principales (o pilares) con una luz de 4 metros.

Tomando en cuenta las cargas que se tienen y el modelo estructural de las viguetas, se realizan las verificaciones de flexión simple, cortante, compresión perpendicular a la fibra, vuelco lateral y deformaciones. En este caso se considera la comprobación a fuego de estos elementos.

Tomando el modelo analítico en cuenta se tiene que el momento (M), cortante (V) y flecha (w) (sin contar deformaciones por corte) máximos por las cargas distribuidas uniformemente (q) son según las siguientes expresiones, donde I es la inercia de la pieza.

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8}$$

$$V = \frac{q \cdot l}{2}$$

$$w = \frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{EI}$$

Para la carga puntual (P) estos parámetros son según las siguientes expresiones. Resulta importante notar que para el máximo momento y flecha se consideró la carga actuando en el centro del vano y para el cortante tendiendo hacia el apoyo.

$$M = \frac{P \cdot l}{4}$$

$$V = P$$

$$w = \frac{1}{48} \frac{P \cdot l^3}{EI}$$

Para las comprobaciones de fuego se considera una profundidad de carbonización efectiva $d_{ef} = 28 \text{ mm}$ y se considera que todas las caras, menos la superior, se encuentran expuestas por lo que el canto de la pieza se reduce a $h_{fi} = h - d_{ef} = 152,0 \text{ mm}$ y el ancho a

$$b_{fi} = b - 2d_{ef} = 45,6 \text{ mm}.$$

A continuación se presentan las distintas verificaciones.

Flexión y vuelco lateral:

Para la verificación de todos los estados límite último en situación persistente, se consideran las siguientes combinaciones de carga:

- C1: $1,35 \cdot G_k$
- C2: $1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,dist}$
- C3: $1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,punt}$

Para el coeficiente β_V en la combinación 3 se tomó el valor de la carga puntual por ser esta la mayor proporción de la sollicitación por excelencia. Para las 3 combinaciones se consideró que la carga se aplica en el borde comprimido, si bien en las 3 combinaciones la componente de peso propio se aplica en el baricentro de la pieza.

Para la verificación de flexión y vuelco lateral en situación accidental de incendio, se consideran las siguientes combinaciones de carga:

- $C1_{fi}: G_k$
- $C2_{fi}: G_k + 0,7 \cdot Q_{k,dist}$
- $C3_{fi}: G_k + 0,7 \cdot Q_{k,punt}$

En la tabla 5.1 se presenta la verificación de flexión y vuelco lateral para estos elementos.

Tabla 5.1: Verificación de flexión y v. lateral en las viguetas

Parámetros generales						
Situación	Persistente			Incendio		
b (mm)	101,6			45,6		
h (mm)	180,0			152,0		
W_{el} (mm ³)	548.640,00			175.590,40		
l (m)	4,0			4,0		
k_h	1,1			1		
$f_{m,k}$ (MPa)	22,0			25,3		
γ_m	1,25			1		
k_{sys}	1,1			1		
$E_{0,05}$ (GPa)	8,80			10,12		
Parámetros específicos de la combinación						
Situación	Persistente			Incendio		
Combinación	C1	C2	C3	C1 _{fi}	C2 _{fi}	C3 _{fi}
M_d (kNm)	0,364	3,964	6,364	0,270	1,950	3,070
$\sigma_{m,y,d}$ (MPa)	0,664	7,226	11,600	1,537	11,105	17,483
k_{mod}	0,6	0,8	0,9	1,0		
$f_{m,y,d}$ (MPa)	12,778	17,037	19,166	25,300		
β_V	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8
l_{ef} (m)	3,960	3,960	3,560	3,904	3,904	3,504
$\sigma_{m,crit}$ (MPa)	99,402	99,402	110,571	27,670	27,670	30,817
$\lambda_{rel,m}$	0,470	0,470	0,446	0,956	0,956	0,906
k_{crit}	1	1	1	0,843	0,843	0,880
$k_{crit} \cdot f_{m,y,d}$ (MPa)	12,778	17,037	19,166	21,321	21,321	22,275
Verificación						
Aprovechamiento (%)	5,20	42,41	60,52	7,21	52,08	78,49

Cortante:

En la tabla 5.2 se presenta la verificación de cortante para estos elementos.

Tabla 5.2: Verificación cortante en las viguetas

Parámetros generales			
b (mm)	101,6		
h (mm)	180,0		
b_{ef} (mm)	68,1		
$f_{v,k}$ (MPa)	3,50		
γ_m	1,25		
Parámetros específicos de la combinación			
Combinación	C1	C2	C3
V_d (kN)	0,364	3,964	6,364
τ_d (MPa)	0,045	0,485	0,779
k_{mod}	0,6	0,8	0,9
$f_{v,d}$ (MPa)	1,680	2,240	2,520
Verificación			
Aprovechamiento (%)	2,65	21,67	30,92

Compresión perpendicular a la fibra:

En este caso tan solo se debe verificar la carga puntual ya que las reacciones en los apoyos son competencia de las uniones vigueta-viga y vigueta-pilar. Para esto se considera la carga puntual como actuando encima de los apoyos así no se considera el aumento de 30 milímetros a cada lado y se considera un coeficiente $k_{c,90} = 1$.

La carga puntual se aplica en el cerramiento horizontal y se considera que se “abre” a 45° por lo cual el ancho y largo de la carga que se considera es el ancho real de la misma más un canto del cerramiento a cada lado (en el caso del ancho, acotado por el ancho de la vigueta).

En la tabla 5.3 se presenta la verificación de compresión perpendicular a la fibra en estos elementos.

Tabla 5.3: Verificación de compresión perpendicular a la fibra en las viguetas

Parámetros	
$F_{c,90,d}$ (kN)	6,0
Largo de la carga (mm)	100,8
Ancho de la carga (mm)	100,8
A_{ef} (mm ²)	10.160,64
$\sigma_{c,90,d}$ (MPa)	0,591
$f_{c,90,k}$	2,50
γ_m	1,25
k_{mod}	0,9
$f_{c,90,d}$ (MPa)	1,800
$k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$ (MPa)	1,800
Verificación	
Aprovechamiento (%)	32,81

Deformaciones:

En la tabla 5.4 se presenta el cálculo de las flechas instantáneas y diferidas máximas para cada una de las cargas.

Tabla 5.4: Cálculo de flechas para las viguetas

Parámetros generales			
h (mm)	180		
I (mm ⁴)	49.377.600		
l (m)	4,0		
E (GPa)	10,5		
G (GPa)	0,65		
k_{def}	0,6		
Parámetros específicos de las cargas			
Carga	G_k	$Q_{k,dist}$	$Q_{k,punt}$
Flecha solo por flexión (mm)	0,868	7,715	10,287
Factor para def. por corte	1,031	1,031	1,039
w_{inst} (mm)	0,895	7,957	10,691
ψ_2	1,0	0,6	0,6
w_{creep} (mm)	0,537	2,864	3,847

La verificación de la flecha instantánea para cargas variables se resume en la tabla 5.5.

Tabla 5.5: Verificación de la flecha instantánea de la carga variable en las viguetas

Parámetros generales		
l (m)	4,0	
w_{adm} (mm)	11,43	
Parámetros específicos de la carga		
Carga	$Q_{k,dist}$	$Q_{k,punt}$
w_{int} (mm)	7,957	10,691
Verificación		
Aprovechamiento (%)	69,63	93,54

Para la verificación de la flecha neta final existen dos combinaciones características:

- C1: $G_k + Q_{k,dist}$
- C2: $G_k + Q_{k,punt}$

las cuales expresadas en la combinación cuasipermanente son:

- C1: $G_k + 0,6 \cdot Q_{k,dist}$
- C2: $G_k + 0,6 \cdot Q_{k,punt}$

Obteniendo la verificación según se muestra en la tabla 5.6, donde se debe notar que a las viguetas se le aplica una contraflecha de 5 milímetros en la sección central.

Tabla 5.6: Verificación de la flecha neta final para las viguetas

Parámetros generales		
l (m)	4,0	
w_{adm} (mm)	13,33	
w_c (mm)	5,00	
Parámetros específicos de la combinación		
Combinación	C1	C2
w_{fin} (mm)	12,254	15,971
$w_{net,fin}$ (mm)	7,254	10,971
Verificación		
Aprovechamiento (%)	54,40	82,28

6. Estado límite de vibraciones

Para la verificación de vibraciones se considera el capítulo 7.3.3 del EN 1995-1-1 el cual, si bien es para entrepisos residenciales, se considera adecuado para esta estructura.

La primer verificación que se realiza es que la frecuencia fundamental del entrepiso (f_1) sea mayor a 8 Hz. Para esto se utiliza la siguiente ecuación aproximada

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$

donde:

- l es la longitud del entrepiso en el sentido de las viguetas, medida en metros.
- $(EI)_l$ es la rigidez a flexión por unidad de ancho para momentos según el eje perpendicular a las viguetas. Se mide en Nm^2/m .
- m es la masa del entrepiso por unidad de superficie, considerando el peso propio de las viguetas y del cerramiento horizontal y el 10 % de la sobrecarga distribuida en su valor característico. Se mide en kg/m^2 .

Para la rigidez a flexión por unidad de ancho para momentos según el eje perpendicular a las viguetas se considera la siguiente igualdad, donde se desprecia la colaboración del cerramiento horizontal.

$$(EI)_l = \frac{n_{vig}}{B} \cdot E_{vig} \cdot I_{vig}$$

siendo:

- n_{vig} el número de viguetas transversales.
- E_{vig} el módulo de deformación longitudinal medio de las viguetas.
- I_{vig} la inercia de las viguetas.
- B el ancho del entrepiso en la dirección perpendicular a las viguetas.

La segunda verificación es una verificación de rigidez en la cual se debe verificar la siguiente desigualdad:

$$\frac{w}{F} \leq a$$

con:

- w la flecha máxima instantánea asociada a la carga F . Para su cálculo se considera la flecha máxima de una vigueta y se tiene en cuenta los efectos de las deformaciones por corte según se presentó en el Estado Límite de Deformaciones. Se mide en mm .
- F la carga a aplicar para generar la máxima flecha. Se mide en kN .
- a un parámetro que depende de un parámetro b que se definirá en la siguiente verificación.

Finalmente se realiza una verificación de la velocidad según la siguiente desigualdad:

$$v \leq b^{(f_1 \cdot \zeta - 1)}$$

con:

- v la velocidad asociada a un impulso unitario, medida en $m/(Ns^2)$, la cual se puede calcular según la siguiente expresión:

$$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{m \cdot B \cdot l + 200}$$

donde n_{40} es el número de modos normales de vibración con frecuencias hasta 40 Hz . Se estima con la siguiente fórmula:

$$n_{40} = \left(\left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{B}{l} \right)^4 \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right)^{0,25}$$

considerando que $(EI)_b$ es la rigidez a flexión por unidad de ancho para momentos según el eje paralelo a las viguetas. Se mide en Nm^2/m y se lo calcula según la siguiente expresión, donde h_{ch} es el canto de las tablas del cerramiento y E_{ch} el módulo de deformación longitudinal de las mismas.

$$(EI)_b = \frac{E_{ch} \cdot h_{ch}^3}{12}$$

- ζ el coeficiente de amortiguamiento. La bibliografía y los docentes del curso recomiendan tomar $\zeta = 0,02$ el cual es un valor ligeramente menos conservador que el presentado en el EN 1995-1-1.
- b un parámetro que depende del parámetro a de la verificación de rigidez. Entre ambos se pueden tomar varios valores siempre y cuando se encuentren en la gráfica presentada en la figura 6.1.

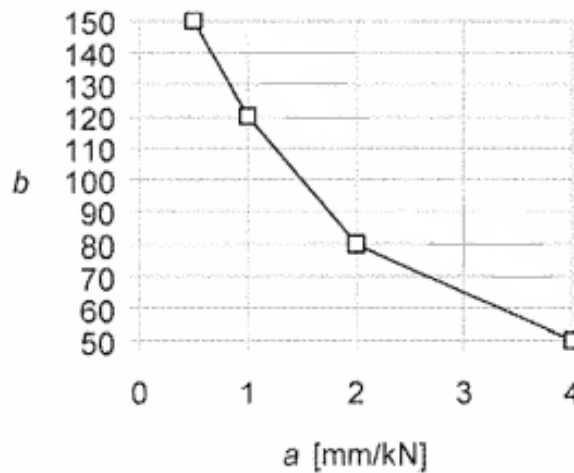


Figura 6.1: Valores para a y b de las verificaciones del EL de vibraciones

En la tabla 6.1 se muestran estas 3 verificaciones para el entrepiso del proyecto.

Tabla 6.1: Verificación del Estado Límite de Vibraciones

Verif. Frecuencia	
l (m)	4,0
m (kg/m ²)	66,22
$(EI)_l$ (Nm ² /m)	1.360.970,1
f_1 (Hz)	14,074
$f_{1,min}$ (Hz)	8,00
Verifica?	SÍ
Verif. Rigidez	
a (mm/kN)	3,00
w/F (mm/kN)	2,673
Verifica?	SÍ
Verif. Velocidad	
b	65
v_{adm} (m/Ns ²)	0,0498
B (m)	8,00
$(EI)_b$ (Nm ² /m)	9.559,12
n_{40}	12
v (m/Ns ²)	0,0131
Verifica?	SÍ

7. Vigas principales

Para las vigas principales se consideran piezas rectangulares de 6 pulgadas de ancho y 360 milímetros de canto. Por ser el par de vigas que se encuentran en el centro del entrepiso las más solicitadas, son las únicas que se verifican.

Las cargas que actúan sobre las mismas (y sus valores característicos) son:

- Su peso propio de magnitud $G_{k,pp} = 0,279 \text{ kN/m}$.
- Las descargas puntuales de las viguetas, ubicadas cada 40 centímetros. Estas descargas se calculan como el doble (por ser las viguetas de ambos vanos) del cortante máximo de las viguetas asociado al valor característico de las acciones. Estas descargas se componen de una fracción permanente $G_{k,vig} = 0,540 \text{ kN}$ y una fracción variable $Q_{k,vig} = 4,800 \text{ kN}$.
- La carga puntual de la sobrecarga de uso de magnitud $Q_{k,punt} = 4,00 \text{ kN}$.

El modelo de cálculo de las vigas principales es de una viga simplemente apoyada en los pilares, con una luz de 4 metros.

Tomando en cuenta las cargas que se tienen y el modelo estructural de las vigas, se realizan las verificaciones de flexión simple, cortante, compresión perpendicular a la fibra, vuelco lateral y deformaciones. En este caso se considera la comprobación a fuego de estos elementos.

Tomando el modelo analítico en cuenta se tiene que el momento (M), cortante (V) y flecha (w) (sin contar deformaciones por corte) máximos por las cargas distribuidas uniformemente (q) son según las siguientes expresiones, donde I es la inercia de la pieza.

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8}$$

$$V = \frac{q \cdot l}{2}$$

$$w = \frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{EI}$$

Para la carga puntual (P) estos parámetros son según las siguientes expresiones. Resulta importante notar que para el máximo momento y flecha se consideró la carga actuando en el centro del vano y para el cortante tendiendo hacia el apoyo.

$$M = \frac{P \cdot l}{4}$$

$$V = P$$

$$w = \frac{1}{48} \frac{P \cdot l^3}{EI}$$

Finalmente, para las descargas de las viguetas, se realizó un modelo sencillo en Robot Structural Analysis de Autodesk, de un elemento de viga simplemente apoyado con las cargas puntuales para obtener el momento, el cortante y la flecha máxima por las mismas.

Ya que en un principio se desconocía la sección de los elementos y el valor de las acciones a considerar, tanto las cargas como la inercia y el módulo elástico en el modelo se los consideró unitarios. En las figuras 7.1 a 7.3 se presentan los resultados del modelo.



Figura 7.1: Diagrama de momentos en la viga por unidad de carga de las viguetas. Unidades Nm/N . El máximo es 5,00.

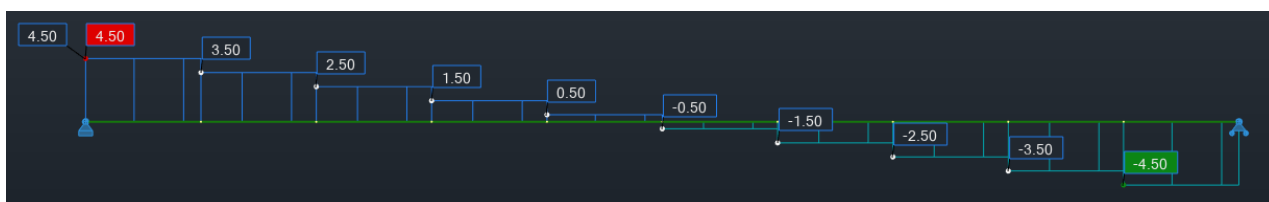


Figura 7.2: Diagrama de cortantes en la viga por unidad de carga de las viguetas. Unidades N/N . El máximo es 4,50.

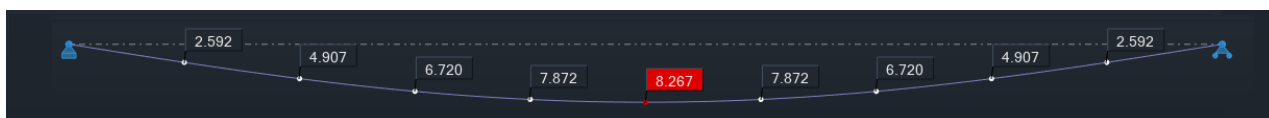


Figura 7.3: Diagrama de deformada en la viga por unidad de carga de las viguetas y multiplicada por la rigidez. Unidades $m \cdot Nm^2/N$. El máximo es 8,267.

Para las comprobaciones de fuego se considera una profundidad de carbonización efectiva $d_{ef} = 28 \text{ mm}$ y se considera que todas las caras, menos la superior, se encuentran expuestas por lo que el canto de la pieza se reduce a $h_{fi} = h - d_{ef} = 332 \text{ mm}$ y el ancho a $b_{fi} = b - 2d_{ef} = 96,4 \text{ mm}$.

A continuación se presentan las distintas verificaciones.

Flexión y vuelco lateral:

Para la verificación de todos los estados límite último en situación persistente, se consideran las siguientes combinaciones de carga:

- C1: $1,35 \cdot (G_{k,pp} + G_{k,vig})$
- C2: $1,35 \cdot (G_{k,pp} + G_{k,vig}) + 1,5 \cdot Q_{k,vig}$
- C3: $1,35 \cdot (G_{k,pp} + G_{k,vig}) + 1,5 \cdot Q_{k,punt}$

El coeficiente β_V en las 3 combinaciones se lo consideró igual al de carga uniformemente distribuida, ya que el diagrama de momentos es similar al obtenido con una carga de esta índole. Para las 3 combinaciones se consideró que la carga se aplica en el borde comprimido, si bien en las 3 combinaciones la componente de peso propio se aplica en el baricentro de la pieza.

Para la verificación de flexión y vuelco lateral en situación accidental de incendio, se consideran las siguientes combinaciones de carga:

- $C1_{fi}: (G_{k,pp} + G_{k,vig})$
- $C2_{fi}: (G_{k,pp} + G_{k,vig}) + 0,7 \cdot Q_{k,vig}$
- $C3_{fi}: (G_{k,pp} + G_{k,vig}) + 0,7 \cdot Q_{k,punt}$

En la tabla 7.1 se presenta la verificación de flexión y vuelco lateral para estos elementos.

Tabla 7.1: Verificación de flexión y v. lateral en las vigas

Parámetros generales						
Situación	Persistente			Incendio		
b (mm)	152,4			96,4		
h (mm)	360			332		
W_{el} (mm ³)	3.291.840,00			1.770.932,27		
l (m)	4,0			4,0		
k_h	1,052			1,00		
$f_{m,k}$ (MPa)	22			25,3		
γ_m	1,25			1		
k_{sys}	1			1		
$E_{0,05}$ (GPa)	8,80			10,12		
Parámetros específicos de la combinación						
Situación	Persistente			Incendio		
Combinación	C1	C2	C3	C1 _{fi}	C2 _{fi}	C3 _{fi}
M_d (kNm)	4,397	40,397	10,397	3,257	20,057	6,057
$\sigma_{m,y,d}$ (MPa)	1,336	12,272	3,158	1,839	11,326	3,420
k_{mod}	0,6	0,8	0,9	1,0		
$f_{m,y,d}$ (MPa)	11,113	14,818	16,670	25,300	25,300	25,300
β_V	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
l_{ef} (m)	4,320	4,320	4,320	4,264	4,264	4,264
$\sigma_{m,crit}$ (MPa)	102,51	102,51	102,51	51,82	51,82	51,82
$\lambda_{rel,m}$	0,463	0,463	0,463	0,699	0,699	0,699
k_{crit}	1	1	1	1	1	1
$k_{crit} \cdot f_{m,y,d}$ (MPa)	11,113	14,818	16,670	25,300	25,300	25,300
Verificación						
Aprovechamiento (%)	12,02	82,82	18,95	7,27	44,77	13,52

Cortante:

En la tabla 7.2 se presenta la verificación de cortante para estos elementos.

Tabla 7.2: Verificación cortante en las vigas

Parámetros generales			
b (mm)	152,4		
h (mm)	360		
b_{ef} (mm)	102,2		
$f_{v,k}$ (MPa)	3,50		
γ_m	1,25		
Parámetros específicos de la combinación			
Combinación	C1	C2	C3
V_d (kN)	4,032	36,432	10,032
τ_d (MPa)	0,165	1,487	0,409
k_{mod}	0,6	0,8	0,9
$f_{v,d}$ (MPa)	1,68	2,24	2,52
Verificación			
Aprovechamiento (%)	9,79	66,37	16,25

Compresión perpendicular a la fibra:

En este caso tan solo se debe verificar la carga puntual ya que las reacciones en los apoyos son competencia de las uniones viga-pilar. Para esto se considera la carga puntual como actuando encima de los apoyos así no se considera el aumento de 30 milímetros a cada lado y se considera un coeficiente $k_{c,90} = 1$.

La carga puntual se aplica en el cerramiento horizontal y se considera que se “abre” a 45° por lo cual el ancho y largo de la carga que se considera es el ancho real de la carga más un canto del cerramiento a cada lado (en el caso del ancho, acotado por el ancho de la viga).

En la tabla 7.3 se presenta la verificación de compresión perpendicular a la fibra en estos elementos.

Tabla 7.3: Verificación de compresión perpendicular a la fibra en las vigas

Parámetros	
$F_{c,90,d}$ (kN)	6,0
Largo de la carga (mm)	100,8
Ancho de la carga (mm)	100,8
A_{ef} (mm ²)	10.160,64
$\sigma_{c,90,d}$ (MPa)	0,591
$f_{c,90,k}$	2,50
γ_m	1,25
k_{mod}	0,9
$f_{c,90,d}$ (MPa)	1,800
$k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$ (MPa)	1,800
Verificación	
Aprovechamiento (%)	32,81

Deformaciones:

Para tener en cuenta los efectos del cortante en la deformación, en el caso de las descargas de las viguetas, se considera el factor de corte de las cargas uniformemente distribuidas ya que el cortante y el momento por estas cargas poseen unos diagramas muy similares a los de cargas uniformemente distribuidas.

En la tabla 7.4 se presenta el cálculo de las flechas instantáneas y diferidas máximas para cada una de las cargas.

Tabla 7.4: Cálculo de flechas para las vigas

Parámetros generales				
h (mm)	360			
I (mm ⁴)	592.531.200			
l (m)	4,0			
E (GPa)	10,5			
G (GPa)	0,65			
k_{def}	0,6			
Parámetros específicos de las cargas				
Carga	$G_{k,pp}$	$G_{k,vig}$	$Q_{k,vig}$	$Q_{k,punt}$
Flecha solo por flexión (mm)	0,150	0,717	6,378	0,857
Factor para def. por corte	1,126	1,126	1,126	1,157
w_{inst} (mm)	0,169	0,807	7,179	0,992
ψ_2	1,0	1,0	0,6	0,6
w_{creep} (mm)	0,101	0,484	2,585	0,357

La verificación de la flecha instantánea para cargas variables se resume en la tabla 7.5.

Tabla 7.5: Verificación de la flecha instantánea de la carga variable en las vigas

Parámetros generales		
l (m)	4,0	
w_{adm} (mm)	11,43	
Parámetros específicos de la carga		
Carga	$Q_{k,vig}$	$Q_{k,punt}$
w_{int} (mm)	7,179	0,992
Verificación		
Aprovechamiento (%)	62,82	8,68

Para la verificación de la flecha neta final existen dos combinaciones características:

- C1: $(G_{k,pp} + G_{k,vig}) + Q_{k,dist}$
- C2: $(G_{k,pp} + G_{k,vig}) + Q_{k,punt}$

las cuales expresadas en la combinación cuasipermanente son:

- C1: $(G_{k,pp} + G_{k,vig}) + 0,6 \cdot Q_{k,dist}$
- C2: $(G_{k,pp} + G_{k,vig}) + 0,6 \cdot Q_{k,punt}$

obteniendo la verificación según se muestra en la tabla 7.6.

Tabla 7.6: Verificación de la flecha neta final para las vigas

Parámetros generales		
l (m)	4,0	
w_{adm} (mm)	13,33	
w_c (mm)	0	
Parámetros específicos de la combinación		
Combinación	C1	C2
w_{fin} (mm)	11,325	2,910
$w_{net,fin}$ (mm)	11,325	2,910
Verificación		
Aprovechamiento (%)	84,93	21,82



8. Pilares

Para los pilares se consideran piezas rectangulares de $h = 165 \text{ mm}$ en el sentido de las vigas principales y $b = 6''$ en el sentido de las viguetas. Por ser el pilar central del entrepiso el que se encuentra más solicitado, éste es el único que se verifica.

Las cargas que actúan sobre el mismo (y sus valores característicos) son:

- Su peso propio de magnitud $G_{k,pp} = 0,366 \text{ kN}$.
- La descarga de las vigas principales, que se estiman con una excentricidad igual a $h/2 + 10 \text{ cm}$. Estas descargas se componen de una fracción permanente $G_{k,vp} = 2,987 \text{ kN}$ y una fracción variable $Q_{k,vp} = 21,600 \text{ kN}$.
- La descarga de las viguetas, que se estiman con una excentricidad igual a $b/2 + 10 \text{ cm}$. Estas descargas se componen de una fracción permanente $G_{k,vig} = 0,540 \text{ kN}$ y una fracción variable $Q_{k,vig} = 4,800 \text{ kN}$.
- No se considera la sobrecarga puntual ya que su magnitud es menor a las componentes de sobrecarga de las descargas de las vigas y es de menor duración.

El modelo de cálculo del pilar es de una columna bi-articulada de longitud igual a la altura libre del entrepiso más el canto de las vigas principales. De manera análoga y del lado de la seguridad, se considera que todas las cargas se aplican en la cara superior del pilar.

Tomando en cuenta las cargas que se tienen y el modelo estructural considerado, se realizan las verificaciones de combinaciones de esfuerzos. En este caso se considera la comprobación a fuego de estos elementos.

Para las comprobaciones de fuego se considera una profundidad de carbonización efectiva $d_{ef} = 28 \text{ mm}$ y se considera que todas las caras se encuentran expuestas por lo que las dimensiones del pilar en caso de incendio pasan a ser $h_{fi} = h - 2d_{ef} = 109,0 \text{ mm}$ y $b_{fi} = b - 2d_{ef} = 96,4 \text{ mm}$.

Para la verificación del estado límite último de combinación de esfuerzos en situación persistente, se consideran las siguientes combinaciones de carga:

- C1: $1,35 \cdot (G_{k,pp} + G_{k,vp} + G_{k,vig})$
- C2: $1,35 \cdot (G_{k,pp} + G_{k,vp} + G_{k,vig}) + 1,5 \cdot (Q_{k,vig} + Q_{k,vp})$ considerando que la sobrecarga distribuida se aplica en la totalidad del entrepiso.
- C3: $1,35 \cdot (G_{k,pp} + G_{k,vp} + G_{k,vig}) + 1,5 \cdot (Q_{k,vig} + Q_{k,vp})$ considerando que la sobrecarga distribuida se aplica en una parte del entrepiso, de forma tal que solo una de las dos viguetas y solo una de las dos vigas presenta sobrecarga de uso.

La distinción entre las combinaciones 2 y 3 se basa en considerar una en la cual la compresión sea máxima (la 2) y una en la cual el momento flector sea máximo. Gracias a esta consideración de cargas variables es que se considera que verifican los pilares de borde, los

cuales tienen excentricidades máximas, estudiando solamente el pilar central.

Para la verificación de este mismo estado límite en la situación accidental de incendio se consideran las siguientes combinaciones de carga:

- $C1_{fi}: (G_{k,pp} + G_{k,vp} + G_{k,vig})$
- $C2_{fi}: (G_{k,pp} + G_{k,vp} + G_{k,vig}) + 0,7 \cdot (Q_{k,vig} + Q_{k,vp})$ considerando que la sobrecarga distribuida se aplica en la totalidad del entrepiso.
- $C3_{fi}: (G_{k,pp} + G_{k,vp} + G_{k,vig}) + 0,7 \cdot (Q_{k,vig} + Q_{k,vp})$ considerando que la sobrecarga distribuida se aplica en una parte del entrepiso, de forma tal que solo una de las dos viguetas y solo una de las dos vigas presenta sobrecarga de uso.

En la tabla 8.1 se presentan los parámetros generales para la verificación de combinación de esfuerzos para el pilar central del entrepiso. Con eje “y” se hace referencia al eje paralelo a las viguetas y con eje “z” al eje paralelo a las vigas.

Tabla 8.1: Parámetros generales para la verificación del pilar del entrepiso.

Situación	Persistente	Incendio
b (mm)	152,4	96,4
h (mm)	165,0	109,0
l (m)	2,86	
$E_{0,05}$ (GPa)	8,80	10,12
$f_{c,0,k}$ (MPa)	22,0	25,3
β_c	0,1	
Radio de giro y (mm)	47,63	31,47
λ_y	60,04	90,89
$k_{c,y}$	0,803	0,436
Radio de giro z (mm)	43,99	27,83
λ_z	65,01	102,77
$k_{c,z}$	0,739	0,347
¿Aplica inestabilidad compresión?	SÍ	SÍ
$W_{el,y}$ (mm ³)	691.515,0	190.888,1
$W_{el,z}$ (mm ³)	638.708,4	168.822,1
$k_{h,y}$	1,10	1,00
$k_{h,z}$	1,10	1,00
$f_{m,k}$ (MPa)	22	25,3
β_V	0,57	0,57
l_{ef} (m)	1,63	1,63
$\sigma_{m,crit}$ (MPa)	592,62	412,82
$\lambda_{rel,m}$	0,193	0,248
k_{crit}	1	1
¿Aplica vuelco lateral?	NO	NO
γ_m	1,25	1,0
k_{sys}	1	1
k_m	0,7	

En cuanto al coeficiente β_V del vuelco lateral, se lo consideró para las 3 combinaciones igual a 0,57 el cual es el valor que corresponde a la tercer combinación, ya que en las primeras dos no existe momento flector. Por otra parte, al no existir cargas en el vano, no se considera que se deba sumar ningún factor de modificación al largo efectivo de vuelco lateral.

En la tabla 8.2 se presenta la verificación de la combinación de esfuerzos en el pilar central del entrepiso. Se debe notar que el aprovechamiento se calcula a partir del máximo valor entre las fórmulas de combinación de esfuerzos que correspondan según se desarrolló en la sección 3.

Tabla 8.2: Verificación del pilar central del entrepiso

Parámetros específicos de la combinación						
Situación	Persistente			Incendio		
Combinación	C1	C2	C3	C1 _{fi}	C2 _{fi}	C3 _{fi}
N_d (kN)	10,016	89,216	49,616	7,419	44,379	25,899
$\sigma_{c,0,d}$ (MPa)	0,398	3,548	1,973	0,707	4,224	2,465
k_{mod}	0,6	0,8	0,8	1,0		
$f_{c,0,d}$ (MPa)	10,56	14,08	14,08	25,3	25,3	25,3
$k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}$ (MPa)	8,480	11,306	11,306	11,031	11,031	11,031
$k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}$ (MPa)	7,808	10,411	10,411	8,784	8,784	8,784
$M_{y,d}$ (kNm)	0,0	0,0	5,913	0,0	0,0	2,759
$M_{z,d}$ (kNm)	0,0	0,0	1,269	0,0	0,0	0,592
$\sigma_{m,y,d}$ (MPa)	0,0	0,0	8,551	0,0	0,0	14,456
$\sigma_{m,z,d}$ (MPa)	0,0	0,0	1,986	0,0	0,0	3,507
$f_{m,y,d}$ (MPa)	11,616	15,488	15,488	25,3	25,3	25,3
$f_{m,z,d}$ (MPa)	11,616	15,488	15,488	25,3	25,3	25,3
Verificación						
Aprovechamiento (%)	5,10	34,08	81,64	8,04	48,08	89,21



9. Unión Vigueta-Viga principal

Se seleccionó, del catálogo de Placas y Conectores de *Rotho Blaas*, el herraje oculto de aleación acero-aluminio ALUMINI125. La elección de un herraje oculto se basó principalmente en lograr garantizar una protección adecuada contra el fuego.

Para la conexión con la vigueta se seleccionan 4 pasadores autoperforantes SBD7595 de 7,5 milímetros de diámetro y 95 milímetros de largo. Respetando las indicaciones del fabricante:

- La separación a eje entre los pasadores es de al menos 23 milímetros.
- La distancia entre el eje del pasador superior y la cara superior de la vigueta es de al menos 30 milímetros.
- La distancia entre el eje del pasador inferior y la cara inferior de la vigueta es de al menos 23 milímetros.
- La distancia entre el eje de los pasadores y el borde del herraje es de al menos 10 milímetros.
- La distancia entre el eje del conjunto de pasadores y la cara de la viga principal es de al menos 86 milímetros.

Para la conexión con la viga principal se seleccionan 15 tornillos HBSPEVO560 de 5 milímetros de diámetro y 60 milímetros de largo. Los mismos se colocan en los 15 agujeros de 7 milímetros de diámetro que existen en las alas del herraje, espaciados entre sí 15 milímetros. Respetando las indicaciones del fabricante, la separación entre el tornillo superior y la cara superior de la viga principal es de al menos 25 milímetros y se deben realizar pre-taladros de 3 milímetros de diámetro.

Utilizando este herraje con estos conectores se tiene una resistencia al corte característica de 12,90 kN calculada con una densidad característica de la madera de 385 kg/m^3 . Para pasar a la densidad característica de la madera que se encuentra en la unión (370 kg/m^3) se debe aplicar un factor de corrección indicado por *Rotho Blaas* de 0,96 obteniendo una resistencia característica de 12,38 kN .

Para verificar la unión se debe verificar la siguiente desigualdad:

$$F_{v,d} \leq R_{v,d} = k_{mod} \frac{R_{v,k}}{\gamma_m}$$

donde:

- $F_{v,d}$ es el corte que debe ser capaz de llevar la unión en las combinaciones de estado límite último en situación persistente.
- k_{mod} es el factor que tiene en cuenta el contenido de humedad y la duración de la carga que se desarrolló en la sección 3 y sus valores son los mismos de la tabla 3.1.
- $R_{v,k}$ es la resistencia característica al corte mencionada anteriormente.

- γ_m es el coeficiente parcial de seguridad que para las uniones vale 1,3.

En la tabla 9.1 se presenta la verificación de esta unión para las 3 combinaciones de estado límite último en situación persistente de las viguetas.

Tabla 9.1: Verificación de la unión vigueta - viga principal

Parámetros generales			
$R_{v,k} \text{ (} kN \text{)}$	12,38		
γ_m	1,3		
Parámetros específicos de la combinación			
Combinación	C1	C2	C3
$F_{v,d} \text{ (} kN \text{)}$	0,364	3,964	6,364
k_{mod}	0,6	0,8	0,9
$R_{v,d} \text{ (} kN \text{)}$	5,71	7,61	8,57
Verificación			
Aprovechamiento (%)	6,37	52,09	74,26

10. Referencias

- (1) R. Argüelles y F. Arriaga, *Estructuras de Madera*, 1996.
- (2) RothoBlaaSRL, *Placas y Conectores para Madera*, 2019.