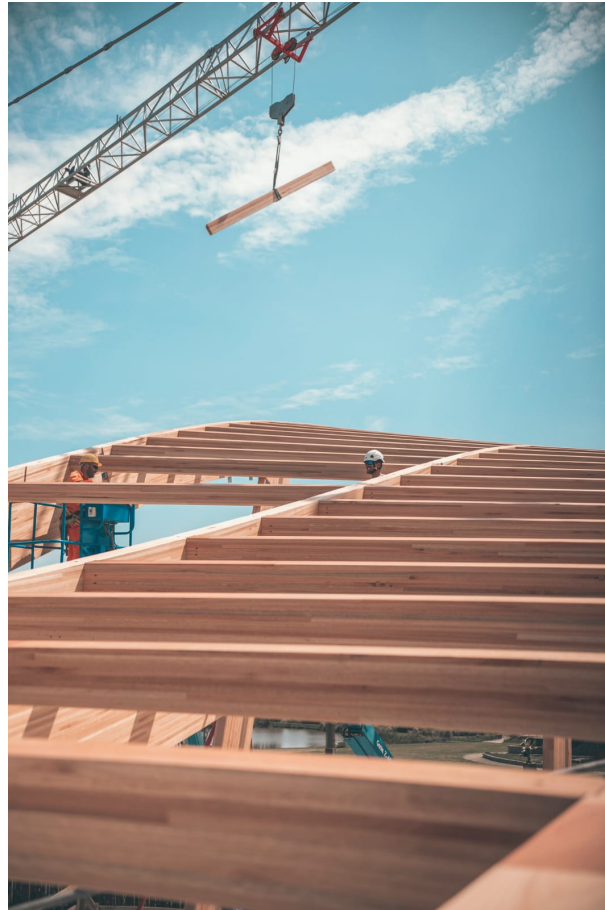


Comportamiento a flexión de compuestos madera-hormigón fabricados con madera nacional



Responsables:

Mariel Benedykt Rudman
Joaquín Luis Prats Pérez
José Pedro Urroz Olivera

Tutor:

Ing. Leandro Domenech

Co-tutor:

Ing. Carlos Mazzey



Universidad de la República
Facultad de Ingeniería



Instituto de Estructuras y Transporte
Prof. Julio Ricaldoni

Comportamiento a flexión de compuestos madera-hormigón fabricados con madera nacional

Tesina presentada para la aprobación de la asignatura Proyecto de Investigación e Innovación en Ingeniería Estructural de la Carrera Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República

Responsables:

Mariel Benedykt Rudman
Joaquín Luis Prats Pérez
José Pedro Urroz Olivera

Tutor:

Ing. Leandro Domenech

Co-tutor:

Ing. Carlos Mazzezy

11 de mayo de 2021

Agradecimientos

A Leandro y Carlos, quienes con su constante disposición, nos guiaron a lo largo de este proceso y de quienes aprendimos inmensamente.

En nuestro cierre de la carrera de Ingeniería Civil, queremos agradecer a los amigos que hicimos en este proceso y a los que nos acompañan de toda la vida. A nuestras parejas que nos apoyaron incondicionalmente. A nuestras familias, quienes nos acompañaron, apoyaron y motivaron en todo momento y sin quienes esto no hubiese sido posible. Finalmente, a todos los profesores, compañeros y demás integrantes de la Facultad de Ingeniería.

Educar es el arte de hacer que aflore todo lo más hermoso, lo más valioso, lo más digno, lo más humano que hay en el corazón de cada persona. Es posibilitar el despliegue de todos sus talentos, sus capacidades, sus dinamismos positivos más personales.

Luis Perez Aguirre

Índice

1. Introducción	4
2. Antecedentes	6
2.1. Construcción con madera en Uruguay	6
3. Marco teórico	8
3.1. Método Gamma	8
3.2. Verificaciones	10
3.2.1. Bases de cálculo	10
3.2.2. Verificaciones de Estado Límite Último - Hormigón	10
3.2.2.1. Cuantías mínimas	10
3.2.2.2. Flexión	11
3.2.2.3. Cortante	11
3.2.3. Verificaciones de Estado Límite Último - Madera	11
3.2.3.1. Coeficientes principales	11
3.2.3.2. Flexión simple	13
3.2.3.3. Tracción paralela a la fibra	13
3.2.3.4. Cortante	13
3.2.3.5. Flexo-Tracción	14
3.2.4. Estado Límite de Deformaciones	14
3.2.5. Estado Límite de Vibraciones	15
3.2.6. Conectores	19
4. Metodología	22
4.1. Características de los materiales	22
4.1.1. Hormigón armado	22
4.1.2. Madera laminada encolada	22
4.2. Tipos de uniones	24
4.2.1. Uniones consideradas	25
4.2.2. Uniones elegidas	29
4.3. Casos estudiados	32
4.3.1. Entrepiso	32
4.3.1.1. Rigidez eficaz	32
4.3.1.2. Cargas aplicadas	36
4.3.2. Probeta	37
4.3.2.1. Rigidez eficaz	37
4.3.2.2. Cargas aplicadas	39
4.3.3. Análisis de colaboración	40
4.4. Modelo computacional	41
4.4.1. Hipótesis de materiales	41
4.4.2. Condiciones de apoyo y uniones	43
4.4.3. Hipótesis de carga	45
4.4.4. Modificaciones al modelo original	46

5. Resultados	47
5.1. Entrepiso con tornillos	47
5.1.1. Verificaciones Estado Límite Último: Hormigón	47
5.1.2. Verificaciones Estado Límite Último: Madera	47
5.1.3. Verificaciones Estado Límite de Servicio	48
5.2. Entrepiso con varillas	48
5.2.1. Verificaciones Estado Límite Último: Hormigón	48
5.2.2. Verificaciones Estado Límite Último: Madera	49
5.2.3. Verificaciones Estado Límite de Servicio	49
5.3. Probeta con tornillos	50
5.3.1. Verificaciones Estado Límite Último: Hormigón	50
5.3.2. Carga y modo de rotura	50
5.4. Probeta con varillas	51
5.4.1. Verificaciones Estado Límite Último: Hormigón	51
5.4.2. Carga y modo de rotura	52
5.5. Análisis de deformaciones	52
5.5.1. Deformaciones en probeta con tornillos	53
5.5.2. Deformaciones en probeta con varillas	57
5.6. Análisis de tensiones	59
5.6.1. Tensiones en el hormigón	60
5.6.2. Tensiones en la madera	62
5.7. Análisis de Resultados	64
6. Conclusiones	66
7. Referencias bibliográficas	68

1. Introducción

El hormigón armado es el material más elegido hoy en día en la construcción, pero se está pagando un alto precio ambiental por la cantidad de dióxido de carbono que se libera en el proceso de producción. Por su parte, la construcción con madera es un fenómeno de tendencia mundial como resultado de las políticas ambientales y las necesidades de incrementar la productividad en la construcción, principalmente utilizando productos de ingeniería de madera.

Los compuestos madera-hormigón (TCC) surgen como respuesta a este escenario, ya que aprovechan las ventajas de ambos materiales de forma sinérgica. Aunque estos compuestos se vienen estudiando desde hace varios años en Europa y en Norteamérica, en Uruguay no existe ninguna experiencia con ellos.

La construcción de entresijos compuestos conformados por la madera, trabajando a tracción y el hormigón a compresión, es beneficiosa en varios aspectos. En primer lugar, se aprovecha cada material en la forma en que se desempeña mejor. Otro beneficio corresponde a que el hormigón tiene un buen comportamiento dinámico y de aislación acústica, y le otorga una protección a las viguetas de madera contra los efectos ambientales y la propagación del fuego. Además, las estructuras de madera resultan ligeras por su alta rigidez por unidad de volumen y presentan una buena terminación estética (Blass, Aune, Choo, Gorlacher, Griffiths, Hilson, Racher, Steck, 1995).

El desafío principal que presentan este tipo de estructuras es la falta de conocimiento teórico y experimental sobre las mismas, especialmente cuando se trata de madera de origen nacional. Particularmente, en 2019 se llevó a cabo un estudio del comportamiento de estos compuestos a corte, utilizando madera laminada encolada de pino y eucalipto uruguayos y conectores metálicos de tipo pasador (Domenech, Durán, Contreres, Baño, 2019).

Otra desventaja es la falta de fábricas de productos de ingeniería de madera que cumplan con todos los requisitos necesarios para su uso estructural. Por último, se carece de mano de obra calificada para el montaje de este tipo de estructuras.

Esta investigación se centra en el comportamiento estructural de los compuestos madera-hormigón fabricados con madera de origen uruguayo. El objetivo es estudiar las propiedades de cada material y de los elementos conectores, así como los modos de falla inherentes a la conexión. Además, se buscará determinar las propiedades del elemento compuesto, principalmente la rigidez a flexión, con el fin de hallar una inercia equivalente de la sección compuesta en función de las propiedades de la madera nacional, el hormigón elegido y los conectores.

Se presentarán dos casos de estudio: una probeta y un entresijo, ambos construidos con madera laminada encolada y hormigón en sitio. El primero permite comparar los resultados experimentales de una viga compuesta en condiciones de laboratorio con el modelo teórico (basado en la normativa de referencia) y con el modelo computacional. Por otro lado, el entresijo permite mostrar el diseño de una estructura compuesta con condi-

ciones de uso reales. Para cada caso de estudio se considerarán dos variantes de conectores.

Se esperaba realizar ensayos con piezas de madera laminada encolada de origen nacional fabricadas en el exterior, pero debido a la situación sanitaria causada por el COVID-19, la importación del material se vio afectada y se decidió no incluir la parte experimental en esta investigación. No obstante, en esta tesis, la probeta se diseña según las condiciones de laboratorio de la Facultad de Ingeniería UdelaR de forma que, cuando se disponga de probetas, este estudio sirva de referencia.

La normativa utilizada como referencia en esta investigación es el Eurocódigo 5 (UNE-EN-1995-1-1, 2006), donde se plantea el Método Gamma de análisis de tensiones en secciones compuestas. Además, se consideraron diversas investigaciones enfocadas en ensayos a flexión y a corte de piezas compuestas por madera y hormigón con distintos tipos de uniones y otras normas complementarias.

2. Antecedentes

2.1. Construcción con madera en Uruguay

En las últimas décadas, las políticas ecológicas han atraído el interés público y, en particular, de la industria de la construcción. Por lo tanto, se está prestando mayor atención a la elección de los materiales estructurales y a su impacto en el medio ambiente. La madera asume un rol protagonista en estos cambios, ya que es el único material que crece naturalmente y es renovable (Fournier, 2008). En comparación con los materiales convencionales, como el hormigón y el acero, que requieren de combustibles fósiles para su fabricación y provocan altas emisiones de carbono, el uso de madera de bosques sustentables ofrece grandes beneficios ambientales. Además, la madera permite la fijación de carbono durante toda su vida útil (Romero, 2018).

Acorde a esta tendencia mundial, en las últimas tres décadas en Uruguay se han desarrollado políticas gubernamentales, en especial la promulgación de la Ley Forestal N^o 15.939 de 1987 que promovió las plantaciones de especies exóticas de rápido crecimiento que han impulsado el uso de la madera como material estructural. Actualmente, se cuenta con alrededor de un millón de hectáreas de bosques (fundamentalmente de pinos y eucaliptos) según el Ministerio de ganadería, agricultura y pesca (2018).

La construcción con madera tiene numerosos beneficios, incluyendo la hermeticidad que le brinda a las estructuras y la facilidad y rapidez en el montaje. Esto permite reducir los tiempos de ejecución y los costos de obra. Además, las construcciones cuentan con mayor valor estético (Blass, Aune, Choo, Gorlacher, Griffiths, Hilson, Racher, Steck, 1995).

Por estos motivos, está aumentando la cantidad de obras con este material en Uruguay, a pesar de haber sido subestimado en el pasado. La Dirección Nacional de Vivienda y el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente han llevado a cabo proyectos de interés social en el marco del Plan de Relocalización de Asentamientos utilizando madera. También se han llevado a cabo numerosos proyectos en el ámbito privado, como la estructura para una piscina en las termas del Arapey y la cubierta para la piscina del club Lawn Tennis, ambos proyectos usando madera laminada encolada. Se destaca la construcción de un puente de madera de 8 metros de largo sobre el Arroyo Las Brujas, compuesto por madera contralaminada y vigas de madera laminada encolada (Universidad ORT, 2017).

Actualmente se está construyendo el Museo de Arte Contemporáneo Americano en Punta de Este, cuya estructura está compuesta por piezas de madera laminada encolada de origen nacional pero procesadas en la fábrica francesa SIMONIN. Al tratarse de un museo de arte regional, era fundamental el uso de especies autóctonas, y la estética de cada pieza, como se ve en la [Figura 1](#) (Revista Galería, 2020).



Figura 1: Construcción del Museo de Arte Contemporáneo Americano. Fuente: Revista Galería.

Siguiendo la tendencia creciente de construcción con madera en Uruguay y aprovechando la tradición uruguaya de construir con hormigón, los compuestos madera-hormigón presentan un gran atractivo para el país. Dentro de las estructuras compuestas, se destacan los entrepisos por el buen desempeño estructural de los materiales.

3. Marco teórico

3.1. Método Gamma

Para estudiar el comportamiento de los elementos estructurales compuestos madera-hormigón es necesario hallar una rigidez equivalente a partir de la cual se puedan calcular las tensiones en la sección.

La rigidez de la sección mixta será mayor que la de las piezas sin conexión pero menor que la que tendría si trabajaran con colaboración total. Esto se debe a que las piezas sin conectores que las unan trabajarían de forma independiente, respondiendo cada una con su rigidez individual ante los esfuerzos aplicados. Por otro lado, para que la colaboración entre los materiales sea total, se debería tener una conexión que no permita desplazamientos relativos entre las piezas (como el caso de una soldadura). Por lo tanto, la rigidez del compuesto madera-hormigón con conectores será un valor intermedio entre la rigidez de la sección homogénea y la rigidez de cada material por separado, debido a la deformación de los propios conectores y de los materiales de base.

El Método Gamma de cálculo introduce un factor γ que determina la proximidad de la rigidez compuesta respecto a los extremos explicados anteriormente. Este factor γ dependerá principalmente de la conexión.

Este método propone hallar una rigidez eficaz a flexión EI_{ef} , basándose en la teoría de la elasticidad lineal y en las siguientes hipótesis:

- Las vigas se encuentran simplemente apoyadas con una luz l . En vigas continuas las expresiones pueden utilizarse con una luz l igual a 0,8 veces la luz aplicable, y para voladizos, con una luz l igual a dos veces la longitud del voladizo.
- Las partes individuales (de madera, paneles de productos derivados de la madera) tienen la longitud completa o están hechas con empalmes encolados.
- Las partes individuales están conectadas entre sí mediante elementos de fijación mecánicos con un módulo de deslizamiento K_{ser} .
- La separación s entre los elementos de fijación es constante o varía uniformemente de acuerdo con la ley de esfuerzos cortantes entre s_{min} y s_{max} , con $s_{max} \leq 4s_{min}$.
- La carga actúa en la dirección del eje z dando lugar a un momento $M = M(x)$ que varía sinusoidalmente o parabólicamente y a un cortante $V = V(x)$.

Dadas el área, la inercia y el módulo de elasticidad del hormigón (A_1, I_1, E_1 respectivamente), y las propiedades de la madera (A_2, I_2, E_2) se tiene el diagrama de tensiones en la sección, según la [Figura 2](#). A partir de este diagrama, se pueden hallar los momentos en el hormigón y la madera según el eje longitudinal de la viga.

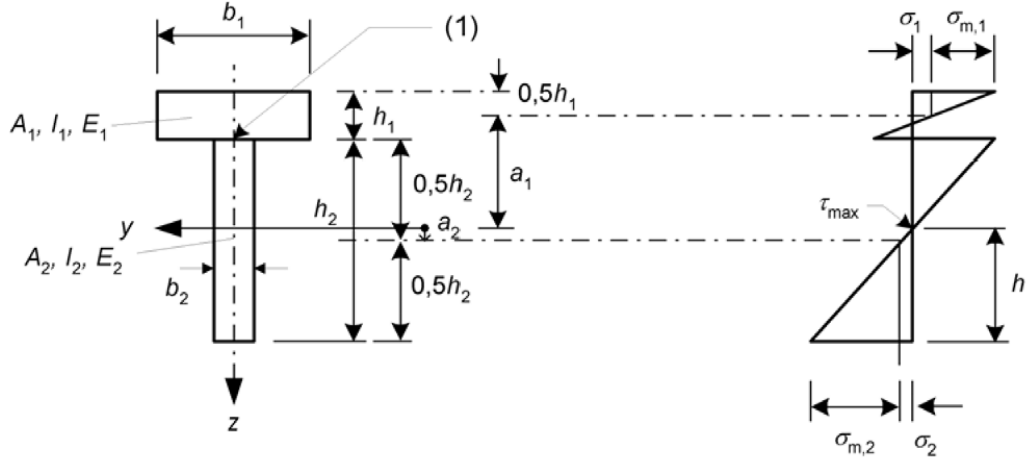


Figura 2: Diagrama de tensiones. Fuente: UNE-EN-1995-1-1 (2006).

La rigidez eficaz de la sección compuesta se calcula según la Ecuación 1:

$$EI_{ef} = \sum E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2 \quad (1)$$

Donde:

$$\gamma_2 = 1 \quad (2)$$

$$\gamma_1 = [1 + \pi^2 A_1 s_1 / (K_i l^2)]^{-1} \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 A_1 E_1 (h_1 + h_2)}{2 \sum \gamma_i A_i E_i} \quad (4)$$

$K_i = K_{ser}$ para el cálculo de los Estados Límite de Servicio y $K_i = K_u$ para Estados Límite Últimos, con $K_u = 2/3 K_{ser}$.

Las tensiones normales se calculan según la Ecuación 5 y la Ecuación 6:

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{EI_{ef}} \quad (5)$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i h_i M}{EI_{ef}} \quad (6)$$

La carga en el conector se calcula según la Ecuación 7:

$$F_i = \frac{\gamma_i E_i A_i a_i s_i V}{EI_{ef}} \quad (7)$$

Notar que la teoría del Método Gamma no considera para el cálculo el módulo de deformación transversal G , por lo que solo considera las deformaciones por cortante de forma indirecta e incompleta a partir de las deformaciones de los conectores.

3.2. Verificaciones

3.2.1. Bases de cálculo

En el estudio de entrepisos compuestos madera - hormigón, se utilizó el Eurocódigo 0 (UNE-EN-1990, 2003) para determinar las combinaciones de acciones. En los análisis utilizados, fue de interés considerar la situación permanente o transitoria ([Ecuación 8](#)) y una situación cuasi-permanente ([Ecuación 9](#)); correspondiéndose con un Estado Límite Último y un Estado Límite de Servicio respectivamente.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (8)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (9)$$

siendo:

- $\gamma_{G,j}$: coeficiente de seguridad para las cargas permanentes.
- $\gamma_{Q,1}$: coeficiente de seguridad para el valor característico de la acción variable dominante.
- $\gamma_{Q,i}$: coeficiente de seguridad para el valor característico de la acción variable concomitante.
- G_k : acción permanente.
- $Q_{k,1}$: valor característico de la acción variable dominante.
- $Q_{k,i}$: valor característico de la acción variable concomitante.
- $\psi_{0,i}$: valor de combinación para el valor característico de la carga concomitante.
- $\psi_{1,i}$: coeficiente de valor frecuente para el valor característico de la carga.
- $\psi_{2,i}$: coeficiente de simultaneidad para la acción variable i en combinación cuasi-permanente.

3.2.2. Verificaciones de Estado Límite Último - Hormigón

3.2.2.1 Cuantías mínimas

Previo a las verificaciones del Estado Límite Último, se deben tomar en cuenta los valores de cuantía mínima mecánica y geométrica. De acuerdo a la norma EHE (2008), se tienen la [Ecuación 10](#), la [Ecuación 11](#) y la [Ecuación 12](#).

$$A_{s,geo}^{min} = 0,018A_c \quad (10)$$

$$A_{s,mec}^{min} = 0,2A_c \frac{f_{ct,m,fl}}{f_{yd}} \quad (11)$$

Se tiene que la cuantía mecánica mínima ω_{min} es:

$$\omega_{min} = 0.22 \frac{f_{ct,m,fl}}{f_{cd}} = 0.045 \quad (12)$$

Donde:

- A_c : área de hormigón.
- $f_{ct,m,fl} = \max\{(1.6 - h/1000)f_{ct,m}; f_{ct,m}\}$ y $f_{ct,m} = 0.30f_{ck}^{2/3}$.
- f_{ck} : resistencia característica a compresión del hormigón.
- f_{cd} : resistencia de diseño a compresión del hormigón.
- f_{yd} : resistencia a tracción del acero.

3.2.2.2 Flexión

Utilizando las ecuaciones adimensionales de García Messeguer, Morán Cabré, Arroyo Portero, (2009) se tienen la [Ecuación 13](#) y la [Ecuación 14](#), de donde se puede determinar la armadura necesaria A_s , que debe ser mayor que las cuantías mínimas definidas en la sección anterior.

$$M_d \longrightarrow \mu = \frac{M_d}{bd^2 f_{cd}} \quad (13)$$

$$\mu \longrightarrow \omega = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} = \frac{A_s f_{yd}}{bd f_{cd}} \longrightarrow A_s \quad (14)$$

Donde:

- M_d : Momento de diseño de la losa.
- b : Ancho de la losa.
- d : Canto útil de la losa.

3.2.2.3 Cortante

En esta investigación se consideró que la viga de madera es la encargada de llevar el cortante total de la pieza, por lo que el cortante en el hormigón no será tenido en cuenta.

3.2.3. Verificaciones de Estado Límite Último - Madera

3.2.3.1 Coeficientes principales

Para la verificación de las distintas solicitaciones a las cuales se encuentra sometida la viga de madera, se deben de definir los siguientes coeficientes:

- $k_{c,90}$: factor que tiene en cuenta la configuración de la carga, la posibilidad del fendado y el aplastamiento.
- k_{def} : coeficiente que tiene en cuenta el tipo de madera y la clase de servicio de la estructura.

- k_h : coeficiente de altura. Este valor es calculado de acuerdo a la [Ecuación 15](#) si la altura de la pieza h es menor a 600 mm. En caso contrario, toma el valor de 1.
- k_m : para secciones rectangulares de madera maciza, madera laminada encolada y madera microlaminada toma el valor de 0,7. En otros casos, toma el valor de 1.
- k_{mod} : factor que tiene en cuenta el efecto de la duración de la carga y del contenido de humedad, según la [Tabla 1](#). Al tener una combinación de acciones, se toma el valor correspondiente a la acción de más corta duración, según Eurocódigo 5 (UNE-EN-1995-1-1, 2006).
- k_{sys} : coeficiente de carga compartida.
- γ_M : coeficiente de seguridad de los materiales.

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} ; 1, 1 \right\} \quad (15)$$

Tabla 1: Valores de k_{mod} para madera laminada encolada. Fuente: Eurocódigo 5 (UNE-EN-1995-1-1, 2006).

Clase de Servicio	Clase de duración de la carga				
	Acción permanente	Acción de larga duración	Acción de media duración	Acción de corta duración	Acción instantánea
1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9

Los valores de los distintos coeficientes pueden ser determinados según el Eurocódigo 5 (UNE-EN-1995-1-1, 2006). Los valores utilizados para los coeficientes en el caso del entrepiso y la probeta se especifican en la [Tabla 2](#).

Tabla 2: Coeficientes adoptados para los casos de estudio.

	Caso Entrepiso	Caso Probeta
k_{c90}	1,0	1,0
k_{def}	0,6	0,6
k_h	1,0	1,1
k_m	0,7	0,7
k_{mod}	0,8	1
k_{sys}	1,1	1
γ_M	1,25	1

Para el caso de la probeta se consideró $\gamma_m = 1$ y $k_{mod} = 1$ porque al tratarse de un modelo experimental, se busca que la probeta alcance la rotura y no agregarle factores de seguridad.

3.2.3.2 Flexión simple

La tensión de cálculo $\sigma_{m,y,d}$ debe ser menor o igual a la resistencia de cálculo $f_{m,y,d}$:

$$\sigma_{m,y,d} \leq f_{m,y,d} \quad (16)$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_d}{W} \quad (17)$$

- M_d : momento flector de diseño.
- W : módulo resistente.

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \left(f_{m,y,k} \frac{k_h}{\gamma_M} \right) k_{sys} \quad (18)$$

- $f_{m,y,k}$: resistencia característica de la madera a flexión.

3.2.3.3 Tracción paralela a la fibra

La tensión de cálculo $\sigma_{t,0,d}$ debe ser menor o igual a la resistencia de cálculo $f_{t,0,d}$:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (19)$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A} \quad (20)$$

- N_d : esfuerzo axial de tracción.
- A : área de la sección traccionada.

$$f_{t,0,d} = k_{mod} \left(f_{t,0,k} \frac{k_h}{\gamma_M} \right) k_{sys} \quad (21)$$

- $f_{t,0,k}$: resistencia característica de la madera a tracción.

3.2.3.4 Cortante

La tensión de cálculo τ_d debe ser menor o igual a la resistencia de cálculo $f_{v,d}$:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (22)$$

$$\tau_d = 1.5 \frac{V_d}{b_{ef} h} \quad (23)$$

$$b_{ef} = k_{cr} b \quad (24)$$

- V_d : Esfuerzo cortante.

- b_{ef} : ancho eficaz teniendo en cuenta la presencia de fendas.
- b : ancho de la pieza.
- k_{cr} toma el valor de 0,67 para madera laminada encolada en caso que tenga presencia de fendas, de lo contrario este valor es 1.

$$f_{v,d} = k_{mod}(f_{v,k}/\gamma_M) \quad (25)$$

- $f_{v,k}$: resistencia característica de la madera a corte.

3.2.3.5 Flexo-Tracción

Se deben verificar las inecuaciones indicadas en la [Ecuación 26](#) y la [Ecuación 27](#).

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (26)$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (27)$$

siendo:

- $\sigma_{t,0,d}$: tensión de tracción de la madera.
- $\sigma_{m,y,d}$ y $\sigma_{m,z,d}$: tensiones por flexión en el eje y o el eje z respectivamente.
- $f_{t,0,d}$, $f_{m,y,d}$ y $f_{m,z,d}$: resistencias de cálculo a tracción paralela a la fibra y a flexión según el eje y y flexión según el eje z respectivamente.

3.2.4. Estado Límite de Deformaciones

En base al Código Técnico de la Edificación (2006), se tiene que las deformaciones pueden ser determinadas con la [Ecuación 28](#), la [Ecuación 29](#) y la [Ecuación 30](#).

$$w_{activa} = k_{def}w_G + w_{Q_1} + k_{def}\psi_{2,1}w_{Q_1} + \sum \psi_{0,i}w_{Q,i} + \sum k_{def}\psi_{2,i}w_{Q,i} \quad (28)$$

$$w_{inst} = w_{Q,1} + \sum \psi_{0,i}w_{Q,i} \quad (29)$$

$$w_{neta,f} = (1 + k_{def})w_G + \sum \psi_{2,i}(1 + k_{def})w_{Q,i} - w_c \quad (30)$$

siendo:

- w_{activa} : flecha generada desde el momento de la construcción de un muro o tabique.
- w_{inst} : flecha generada en el instante en el que se aplica la carga.
- $w_{neta,f}$: flecha neta final a tiempo infinito. En caso de ser considerada, se debe restar la contraflecha (w_c).

Los límites admisibles para cada tipo de flecha se pueden ver en la [Tabla 3](#).

Tabla 3: Deformaciones máximas admisibles.

w_{activa}	w_{inst}	$w_{net,f}$
L/400	L/350	L/300

Para el caso de la flecha activa, en base al Código Técnico de la Edificación (2006), se consideró el límite $L/400$ por suponer que se apoyan tabiques no frágiles en la estructura.

3.2.5. Estado Límite de Vibraciones

El análisis del Estado Límite de Vibraciones se basó en Feldmann, Heinemeyer, Volling (2020). Este documento presenta fórmulas para el cálculo de la frecuencia, amortiguamiento y su efecto sobre la estructura. Se asume que el entrepiso se deformará de forma sinusoidal ante los efectos de las vibraciones.

El coeficiente de amortiguamiento D va a estar dado por la suma de los amortiguamientos debido al material, muebles y acabados de albañilería. Se tiene entonces la [Ecuación 31](#).

$$D = D_1 + D_2 + D_3 \quad (31)$$

siendo:

- D_1 : amortiguamiento debido a los efectos estructurales.
- D_2 : amortiguamiento debido al mobiliario colocado.
- D_3 : amortiguamiento provocado por la albañilería.

Cada coeficiente de amortiguamiento está dado por la [Tabla 4](#). Al ser una estructura mixta madera-hormigón, se decidió tomar el valor menor, siendo este el correspondiente al hormigón. Los valores de amortiguamiento utilizados fueron $D_1 = 2$, $D_2 = 1$ y $D_3 = 0$.

Tabla 4: Valores del coeficiente de amortiguamiento. Fuente: Feldmann, Heinemeyer, Volling (2020).

Tipo	Amortiguamiento (% de amortiguamiento crítico)
Amortiguamiento crítico D_1	
Madera	6
Hormigón	2
Acero	1
Compuestos (acero-hormigón)	1
Amortiguamiento debido a mobiliario D_2	
Oficina tradicional: 1 a 3 personas con muros separadores	2
Oficina sin bibliotecas	0
Oficina de planta abierta	1
Bibliotecas	1
Casas	1
Escuelas	0
Gimnasios	0
Amortiguamiento debido a terminaciones D_3	
Terminaciones bajo el piso	1
Entrepiso flotante	0
Regla de natación	1
Amortiguamiento total $D = D_1 + D_2 + D_3$	

Para el cálculo de la frecuencia f y de la masa modal M_{mod} de la pieza se utilizaron la [Ecuación 32](#) y la [Ecuación 33](#) respectivamente.

$$f = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI_y}{ml^4}} \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{b}{l} \right)^2 + \left(\frac{b}{l} \right)^4 \right] \frac{EI_x}{EI_y}} \quad (32)$$

siendo:

- m : masa del entrepiso incluyendo los acabados de albañilería y sus sobrecargas de uso más representativas, en kg/m^2 .
- $b = l_y$ y $l = l_x$, en base a la [Figura 3](#).
- E : módulo de Young en N/m^2 .
- I_x : momento de inercia a flexión según el eje x en m^4 .
- I_y : momento de inercia a flexión según el eje y en m^4 .

$$M_{mod} = M \left[\frac{\delta_x^2 + \delta_y^2}{2\delta^2} + \frac{8}{\pi^2} \frac{\delta_x \delta_y}{\delta^2} \right] \quad (33)$$

siendo:

- M_{mod} : masa modal de la pieza.
- M : masa de la pieza.
- δ_x : deflexión de la viga.
- δ_y : deflexión de la losa asumiendo que el descenso de la viga es cero.
- δ : es la suma de δ_x y δ_y .

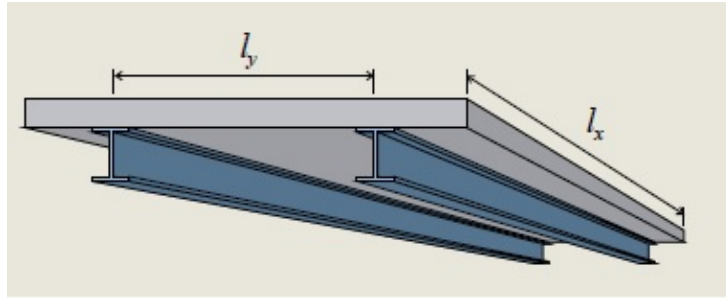


Figura 3: l_x y l_y . Fuente: Feldmann, Heinemeyer, Volling (2020).

En función de la masa modal y la frecuencia, se utiliza el ábaco de la [Figura 4](#) para obtener la clasificación de la estructura para un damping ratio de 3 %.

Classification based on a damping ratio of 3%

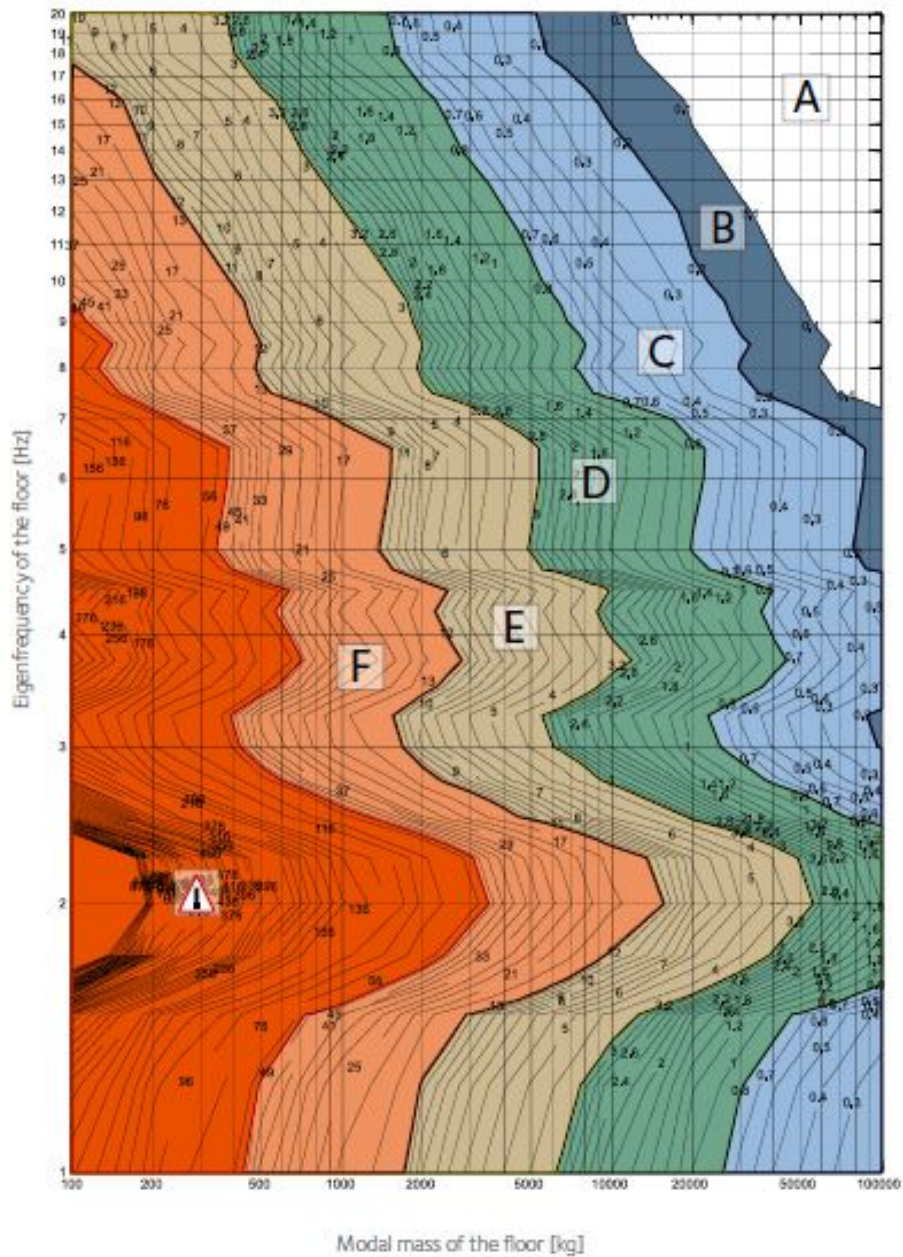


Figura 4: Clasificación de la estructura ante los efectos de las vibraciones. Fuente: Feldmann, Heinemeyer, Volling (2020).

Según la clase obtenida en el ábaco de la Figura 4, se observa en la Figura 5 la clasificación recomendada para cada tipo de estructura según su uso.

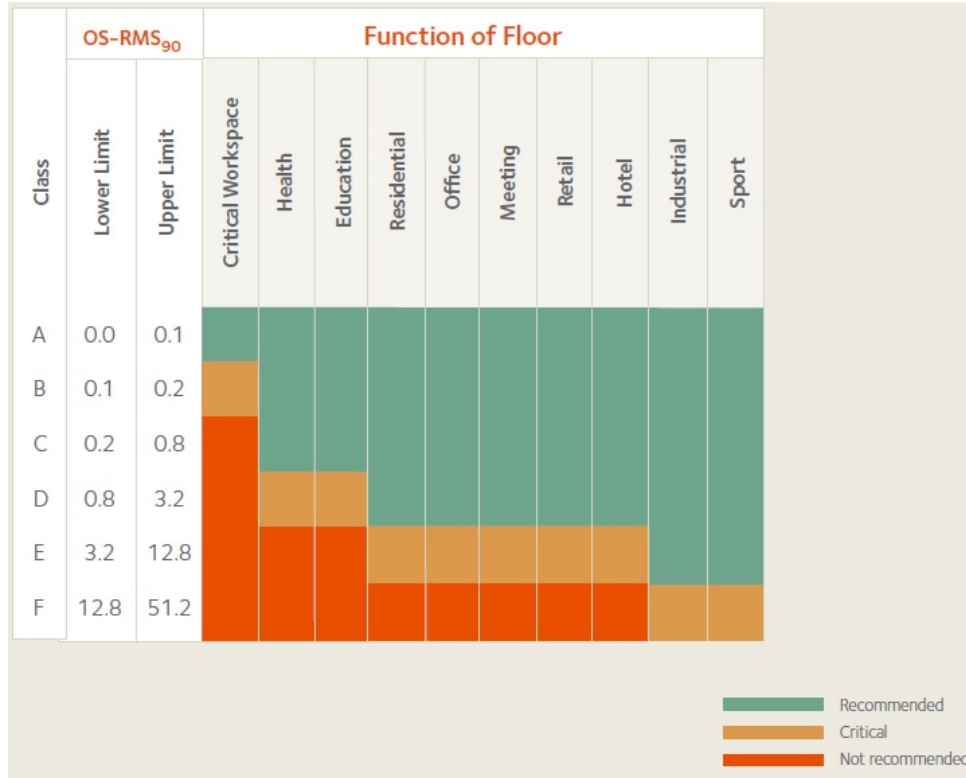


Figura 5: Clasificaciones recomendadas. Fuente: Feldmann, Heinemeyer, Vollling (2020).

Siendo el $OS - RMS_{90}$ un criterio de clasificación para las vibraciones generadas por humanos sobre el entepiso. El índice 90 indica que el 90 % de las vibraciones se encuentran cubiertas por este valor.

3.2.6. Conectores

Se utilizarán las verificaciones correspondientes a una unión acero-madera, según las Ecuaciones de Johansen presentadas en el Eurocódigo 5 (UNE-EN-1995-1-1, 2006). En este caso, el hormigón actuará a una placa de acero gruesa.

De las 12 ecuaciones disponibles en la normativa de referencia, se utilizaron aquellas correspondientes a una placa gruesa en cortadura simple. Se tienen entonces la [Ecuación 34](#), [Ecuación 35](#) y la [Ecuación 36](#), donde $F_{v,Rk}$ es el mínimo valor característico de la capacidad de carga por plano de cortadura y por medio de fijación.

$$F_{v,Rk} = f_{h,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (34)$$

$$F_{v,Rk} = 2.3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (35)$$

$$F_{v,Rk} = f_{h,k} t_1 d \quad (36)$$

siendo:

- $f_{h,k}$: valor característico de la resistencia al aplastamiento en la pieza de madera.
- $M_{y,Rk}$: momento de plastificación del conector.
- t_1 : menor valor entre el espesor de la pieza lateral de madera y la profundidad de penetración.
- d : diámetro del medio de fijación.
- $F_{ax,Rk}$: valor característico de la capacidad de arranque del medio de fijación. Este valor es conocido como 'Efecto sogá' y, en caso de que no se conozca, se considera 0.

Estas ecuaciones se corresponden con las posibles formas de falla mostradas en la [Figura 6](#), que corresponden al aplastamiento de la madera (c), la falla por corte en el conector (d) y a la combinación de ambas (e). En la [Figura 6](#) se puede ver la madera, la placa que representa al hormigón y los conectores.

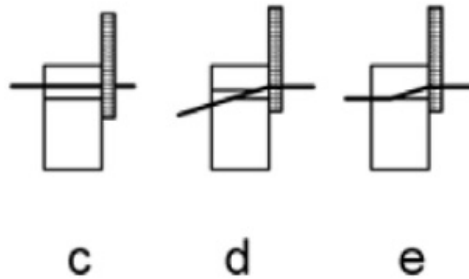


Figura 6: Efectos de cortadura simple en madera-hormigón. Fuente: Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1, 2006).

Para hallar la resistencia al aplastamiento en la pieza de madera $f_{h,k}$, se tienen la [Ecuación 37](#) y la [Ecuación 38](#).

$$f_{h,0,k} = 0.082(1 - 0.01d)\rho_k \quad (37)$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90}\text{sen}^2\alpha + \text{cos}^2\alpha} \quad (38)$$

siendo:

- $f_{h,0,k}$: valor característico de la resistencia al aplastamiento paralelo a la fibra en N/mm^2 .
- ρ_k : valor característico de la densidad de la madera en kg/m^3 .
- α : ángulo formado entre la dirección de la carga y la fibra.
- d : es el diámetro del perno o conector en mm.

- k_{90} : toma distintos valores en base a si la madera es conífera ([Ecuación 39-a](#)), madera microlaminada ([Ecuación 39-b](#)) o frondosa ([Ecuación 39-c](#)).

$$k_{90} = \begin{cases} 1.35 + 0.015d & (a) \\ 1.30 + 0.015d & (b) \\ 0.90 + 0.015d & (c) \end{cases} \quad (39)$$

Para hallar el momento de plastificación del conector $M_{y,Rk}$, se utilizó la [Ecuación 40](#):

$$M_{y,Rk} = 0,3f_{u,k}d^{2,6} \quad (40)$$

siendo

- $M_{y,Rk}$: valor del momento plástico en Nmm.
- $f_{u,k}$: valor característico de la resistencia última.
- d : diámetro del perno en mm.

Una vez hallado el mínimo de $F_{v,Rk}$, se tendrá la fuerza máxima que resiste el conector antes de llegar a la rotura. La carga en el conector F_i hallada según la [Ecuación 7](#) no puede superar este valor, como se indica en la [Ecuación 41](#):

$$F_i \leq F_{v,Rk} \quad (41)$$

4. Metodología

La primer etapa de la investigación consistió en la revisión bibliográfica de documentos y artículos sobre usos y estudios de estructuras mixtas de madera-hormigón. Los documentos estudiados se clasificaron según el tipo de materiales usados y las propiedades ensayadas por cada autor.

Una vez elegidos los materiales a utilizar (como se indica en [Subsección 4.2](#)), se determinaron las dimensiones del entrepiso y la probeta. Para elegir las dimensiones de la probeta se consideraron las limitaciones del laboratorio y se eligieron tal que su comportamiento fuera comparable a aquel de un entrepiso de vivienda con características estándar. Para estudiar dicho comportamiento, se realizó un modelo teórico basado en el Método Gamma ([Subsección 3.1](#)). Se tienen entonces dos casos de estudio: una viga en un entrepiso con dimensiones reales y una viga a utilizar como probeta.

Luego, se procedió con el desarrollo del modelo computacional de elementos finitos en SAP2000. Se obtuvieron las solicitaciones de este modelo para compararlas con los valores esperables según el Método Gamma.

4.1. Características de los materiales

4.1.1. Hormigón armado

Se consideró un hormigón C25 (resistencia a la compresión 25 MPa), con las características que se muestran en la [Tabla 5](#). La armadura es de acero de resistencia característica 500 MPa.

Tabla 5: Propiedades del hormigón.

Resistencia característica a la compresión (MPa)	f_{ck}	25,0
Resistencia de diseño a compresión (MPa)	f_{cd}	16,7
Modulo de deformación longitudinal (MPa)	E	27264
Densidad (kN/m^3)	ρ	24,5

4.1.2. Madera laminada encolada

La madera laminada encolada (en adelante MLE) es un producto de ingeniería de madera constituido por láminas de madera aserrada (mínimo 2) con la dirección de la fibra paralela y encoladas entre sí con adhesivos durables y resistentes desde el punto de vista estructural y ambiental. Las láminas se orientan horizontalmente, con espesores t entre 6 mm y 45 mm. Para darle el largo deseado a la pieza, las distintas laminas pueden estar unidas en las testas mediante uniones dentadas o finger-joint, como se muestra en la [Figura 7](#).

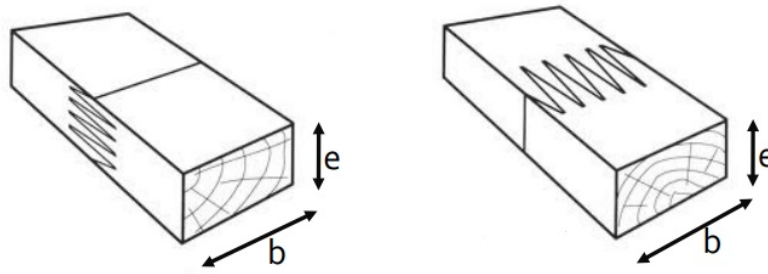


Figura 7: Finger-joint. Fuente: TRADA (2021).

Este material tiene como ventaja la posibilidad de hacer elementos curvos (como se puede ver en la [Figura 8](#)), de secciones variables y cantos elevados, de grandes longitudes y características mecánicas homogéneas (a diferencia de otros elementos de madera).



Figura 8: Curvado de vigas de MLE. Fuente: N'H International (2021).

El tipo de madera considerado para esta investigación es MLE de clase resistente GL24h que tiene las características que se muestran en la [Tabla 6](#).

Tabla 6: Propiedades de la madera GL24h.

Resistencia a flexión (MPa)	f_{mgk}	24,0
Resistencia tracción (MPa)	f_{t0gk}	19,2
	f_{t90gk}	0,5
Resistencia a compresión (MPa)	f_{c0gk}	24,0
	f_{c90gk}	2,5
Resistencia a corte (MPa)	f_{vgk}	3,5
Resistencia a cortante de rodadura (MPa)	f_{rgk}	1,2
Modulo de elasticidad (MPa)	$E_{0g,mean}$	11500
	$E_{0g,0.05}$	9600
	$E_{90g,mean}$	300
	$E_{90g,0.05}$	250
Modulo cortante transversal (MPa)	$G_{g,mean}$	650
	$G_{g,0.05}$	540
Modulo cortante de rodadura (MPa)	$Gr_{g,mean}$	65
	$Gr_{g,0.05}$	54
Densidad (kg/m ³)	$\rho_{g,k}$	385
	$\rho_{g,mean}$	420

La MLE considerada para la probeta es producida en la fábrica francesa SIMONIN, a partir de madera aserrada de origen nacional. Se optó por una fábrica extranjera porque era la única opción que permitía la fabricación de vigas a partir de madera nacional siguiendo la normativa exigida por el Eurocódigo UNE-EN- 14080 (2013). Las fábricas nacionales no cumplen con dichos requerimientos y las fábricas regionales no trabajan con madera aserrada proporcionada por el cliente, sino que usan madera originaria en su respectivo país.

Las resistencia de diseño de la madera depende de la Clase de Uso y la Clase de Servicio de la misma. Estas dependen de la posible degradación de la madera y su contenido de humedad, respectivamente. Para los casos de estudio, se considerará una Clase de Uso 1 (correspondiente a obras interiores), que se asocia a una Clase de Servicio 1.

4.2. Tipos de uniones

El comportamiento de la sección compuesta dependerá del tipo de unión a utilizar entre la madera y el hormigón. El conector a utilizar deberá ser química y térmicamente compatible con ambos materiales, así como asegurar una buena colaboración entre ambos.

Para elegir los conectores, se consideraron distintos tipos en base a la bibliografía disponible y se evaluaron las ventajas y desventajas de construir la probeta con cada uno de ellos.

4.2.1. Uniones consideradas

Chapa perforada

Como se puede ver en la [Figura 9](#) y la [Figura 10](#), este sistema se basa en una placa de acero A36 con orificios para aumentar la adherencia entre los materiales. Esta placa se encastra en la madera y los agujeros quedan libres para ser rellenados posteriormente con hormigón, garantizando así la adherencia.

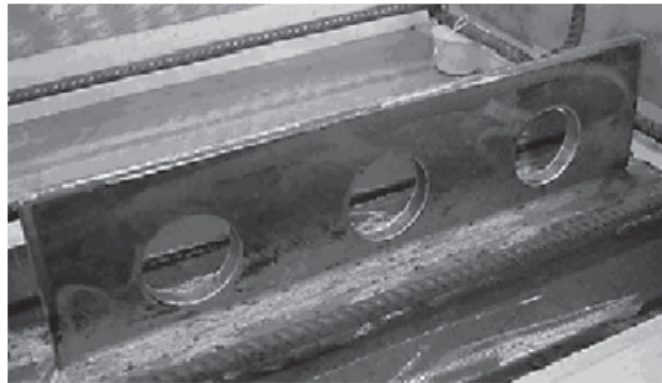


Figura 9: Chapa perforada. Fuente: Miotto, Alves (2010).

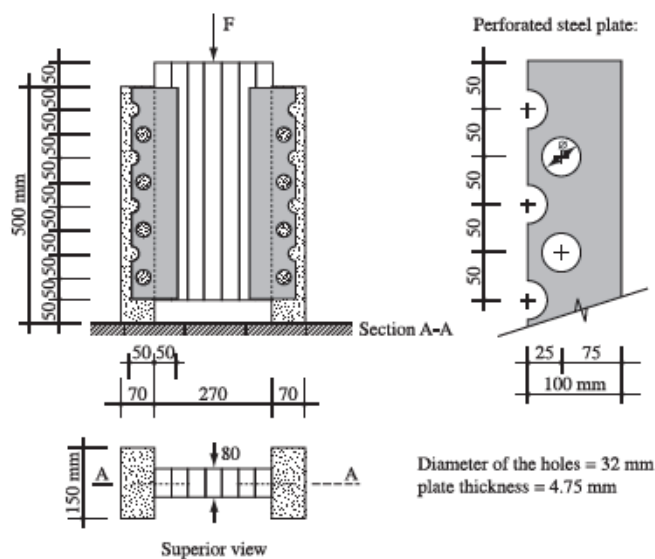


Figura 10: Unión madera-hormigón con chapa perforada. Fuente: Miotto, Alves (2010).

Según Miotto, Alves (2010), al unir una viga de madera con una losa de hormigón mediante una chapa de estas características, y colocando barras de acero en la dirección transversal a los agujeros, se genera una unión mecánica entre los materiales de modo que trabajen en conjunto. Además, la chapa proporciona resistencia a corte, haciendo que la pieza compuesta trabaje de forma más eficiente. Sin embargo, se tiene que este tipo de

chapas son difíciles de fabricar y presentan poca deformación plástica.

Ganchos de acero

Otro tipo de unión sugerida por Miotto, Alves (2010) es mediante ganchos de acero a 45° , como se puede ver en la [Figura 11](#).

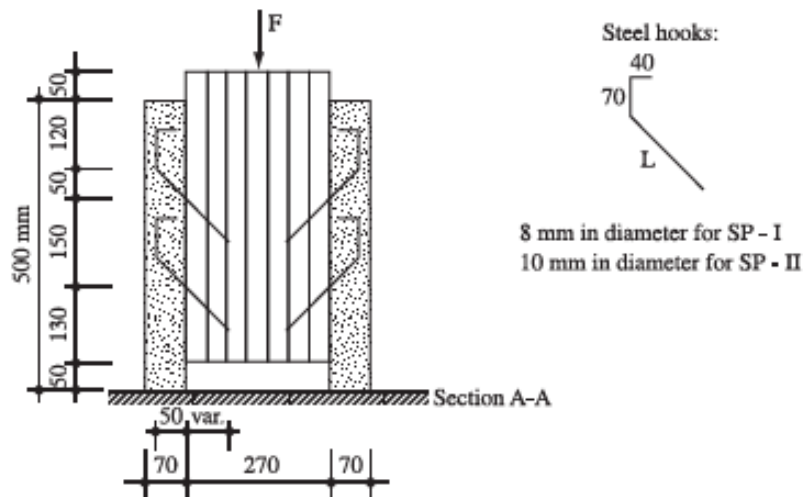


Figura 11: Ganchos de acero a 45° . Fuente: Miotto, Alves (2010).

Los ganchos se fabrican con barras de hierro conformado con resistencia característica de 500 MPa y son colocadas en la madera laminada encolada mediante adhesivo epoxy. Las probetas ensayadas por los autores, con ganchos a 45° , resultaron tener una rigidez cuatro veces mayor que aquellas con conectores perpendiculares a la fibra. Además, se concluyó que el diámetro de los ganchos y la longitud de penetración en la viga eran los factores más importantes para determinar la rigidez equivalente de la pieza compuesta.

Para este tipo de unión, se tiene como desventaja la introducción de los ganchos en la madera al momento de fabricar las probetas.

Conectores tubulares

Se consideró el uso de conectores tubulares, como se muestran en la [Figura 12](#). Estos conectores tienen la ventaja de ofrecer mayor resistencia al corte, al tener una mayor área transversal que las barras de acero.



Figura 12: Conectores tubulares. Fuente: Raitis, Lacis (2016).

Los conectores tubulares pueden ser colocados en la viga de madera de dos formas, como se muestra en la [Figura 13](#). La primera forma consiste en hacer un agujero donde se colocará el conector con adhesivo epoxy. La segunda forma es haciendo un agujero, retirando el relleno de madera y llenando el hueco con hormigón.

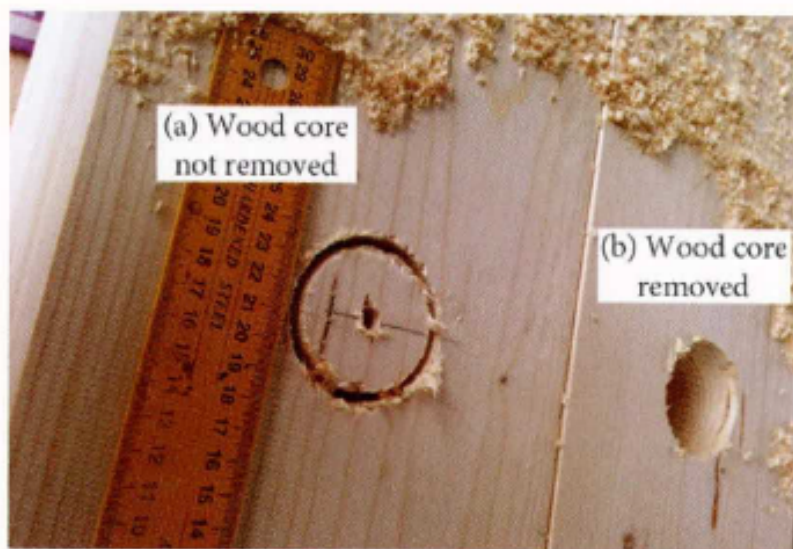


Figura 13: Colocación de conectores tubulares. Fuente: Raitis, Lacis (2016).

Según los resultados de Raitis, Lacis (2016), se observó que este tipo de conector aumenta la rigidez equivalente de la sección compuesta y, al estar los tubulares rellenos de hormigón o madera, se aumenta su rigidez ante los efectos de pandeo. Además, la forma circular de los conectores hace que las tensiones se distribuyan de forma gradual, sin puntos solicitados excesivamente.

Esta opción se descartó por la complejidad para construir las probetas, dada la exactitud con la que se tienen que hacer las perforaciones en la madera para colocar los conectores.

Unión con perfil metálico

Faggiano, Marzo, Mazzolani, Calado (2016) estudiaron la posibilidad de unir vigas compuestas por madera- hormigón mediante un perfil metálico y una capa de goma, como se muestra en la [Figura 14](#) y la [Figura 15](#). La capa de goma se coloca para disminuir los desplazamientos entre la viga de madera y el perfil metálico.

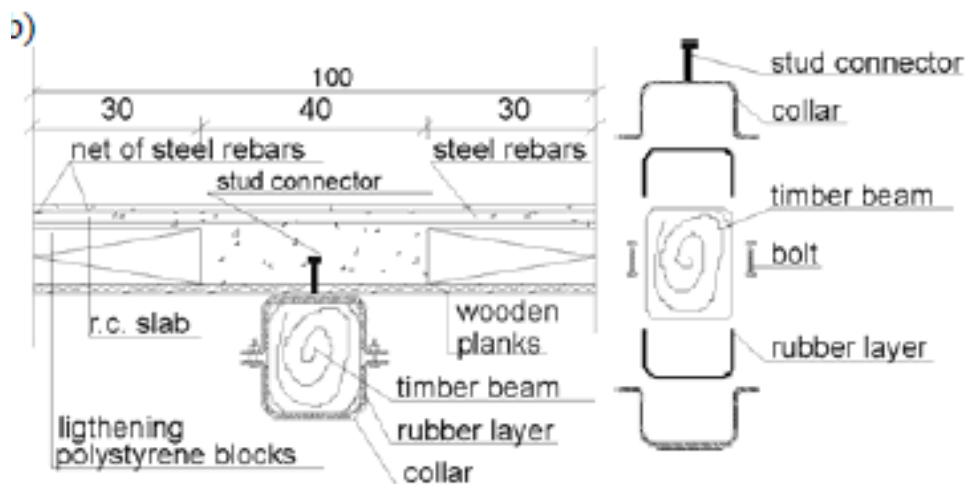


Figura 14: Unión con perfil metálico. Fuente: Faggiano, Marzo, Mazzolani, Calado (2016).



Figura 15: Probeta con perfil metálico. Fuente: Faggiano, Marzo, Mazzolani, Calado (2016).

Esta conexión fue descartada ya que implicaba un alto costo de acero en comparación con otras opciones igual de eficientes (como el uso de tornillos o barras) y por aspectos estéticos.

Unión dentada

Por último, se consideró una unión dentada, según la investigación de Jiang, Hu, Hong, Zhang, Fanggian (2020). Esta unión consiste en utilizar "dientes" en la madera que serán rellenos de hormigón para generar una unión mecánica entre estos materiales, como se puede ver en la [Figura 16](#). Además, la investigación estudiada planteaba agregar barras o tornillos para aumentar la rigidez equivalente de la sección compuesta.

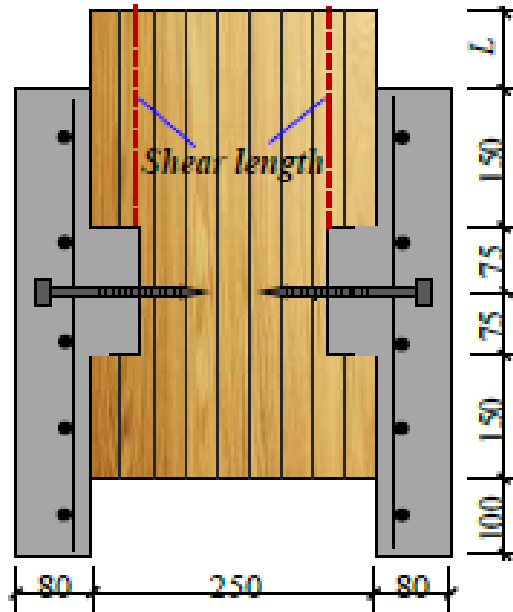


Figura 16: Unión dentada. Fuente: Jiang, Hu, Hong, Zhang, Fanggian (2020).

4.2.2. Uniones elegidas

Finalmente, se eligieron los tipos de uniones a utilizar en base a su facilidad constructiva y relación costo-eficiencia.

Tornillos

El primer conector elegido fueron tornillos de la fábrica italiana Rothoblaas de 9 mm de diámetro y 240 mm de largo, colocados en forma de cruz como se puede ver en la [Figura 17](#). Estos tornillos son de acero grado 8.8, según lo que indica la [Tabla 7](#) de acuerdo al Eurocódigo UNE-EN ISO 898-1 (1999).

Tabla 7: Propiedades del acero grado 8.8.

Límite elástico (MPa)	f_{yb}	640
Resistencia a la rotura (MPa)	f_{ub}	800

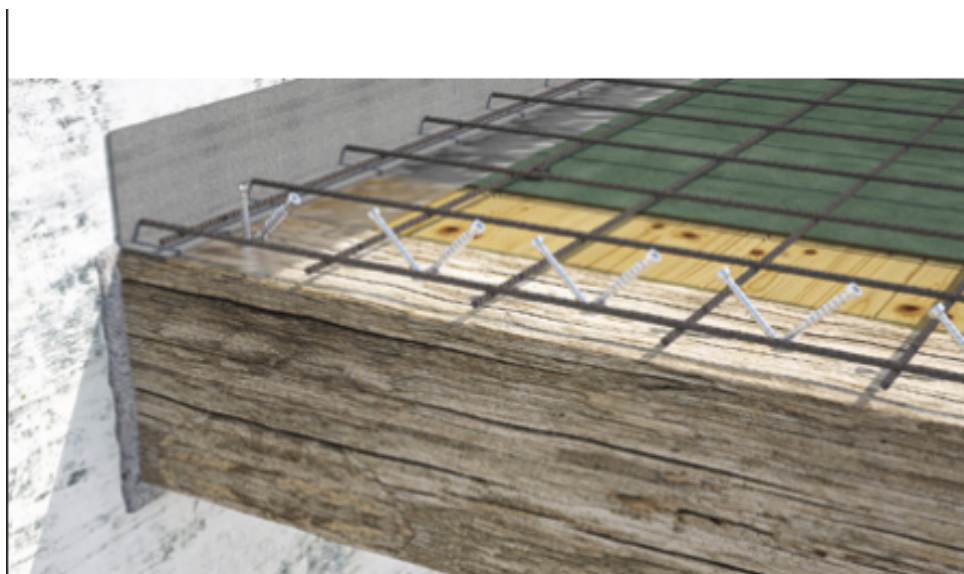
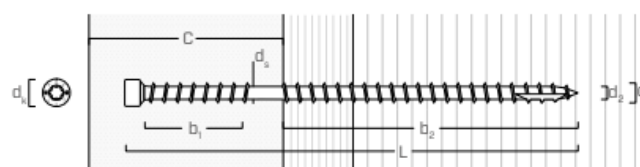


Figura 17: Tornillos cruzados. Fuente: Rothoblaas (2019).

Se eligieron estos tornillos ya que se trata de una fábrica especializada en soluciones para la construcción con madera, que tiene presencia regional en Argentina. Resultó ser entonces una opción de fácil construcción, buen desempeño, y buena relación costo-resistencia.

Sus propiedades mecánicas se muestran en la [Figura 18](#).



Nominal diameter	d_1	[mm]	7	9
Head diameter	d_1	[mm]	9,50	11,50
Tip diameter	d_2	[mm]	4,60	5,90
Shank diameter	d_3	[mm]	5,00	6,50
Pre-drilling hole diameter	d_4	[mm]	4,0	5,0
Characteristic yield moment	M_{yk}	[Nmm]	20000	38000
Characteristic withdrawal-resistance parameter	$f_{ax,k}$	[N/mm ²]	11,3	11,3
Associated density	ρ_s	[kg/m ³]	350	350
Characteristic tensile strength	$f_{tens,k}$	[kN]	20,0	30,0
Withdrawal-resistance characteristic - concrete	Crossed connectors at a 45° angle, with soundproofing layer ⁽¹⁾	$F_{ak,concrete, Rk}$	[kN]	10,0
	Parallel connectors at a 45° angle, with soundproofing layer ⁽²⁾			10,0
	Parallel connectors at a 30° angle, with soundproofing layer ⁽²⁾			15,0
	Parallel connectors at a 45° angle, without soundproofing layer			15,0
Coefficient of friction	μ	[-]	0,25	0,25

⁽¹⁾ Resilient underscreed foil, in bitumen and polyester felt, like SILENT FLOOR.

Figura 18: Propiedades de los tornillos. Fuente: Rothoblaas (2019).

Se eligió usar la recomendación del catálogo Rothoblaas (2019) y calcular el módulo K_{ser} según la [Figura 19](#).

SLIP MODULUS K_{ser}

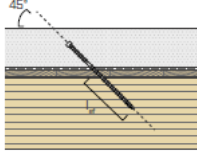
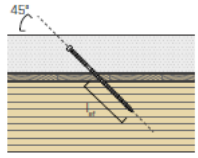
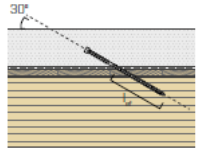
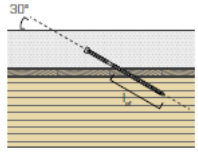
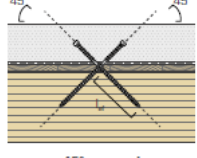
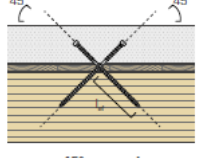
connector arrangement with soundproofing layer ⁽¹⁾	K_{ser} [N/mm]		connector arrangement without soundproofing layer ⁽²⁾	K_{ser} [N/mm]	
	CTC Ø7	CTC Ø9		CTC Ø7	CTC Ø9
 <p>45° parallels</p>	16 l_{ef}	22 l_{ef}	 <p>45° parallels</p>	48 l_{ef}	60 l_{ef}
 <p>30° parallels</p>	48 l_{ef}	48 l_{ef}	 <p>30° parallels</p>	80 l_{ef}	80 l_{ef}
 <p>45° crossed</p>	70 l_{ef}	100 l_{ef}	 <p>45° crossed</p>	70 l_{ef}	100 l_{ef}

Figura 19: K_{ser} para los tornillos seleccionados. Fuente: Rothoblaas (2019).

Varillas

El segundo conector elegido fueron varillas $\phi 8$ colocadas de forma perpendicular al eje de la viga. Estas varillas tienen 240 mm de largo y resistencia última característica f_{uk} de 500 MPa.

Se eligieron este tipo de varillas por ser fáciles de conseguir (se trata de las mismas varillas utilizadas para el hormigón armado) y tener buen desempeño, en base a lo estudiado en la bibliografía mencionada en este capítulo.

Dados los conectores elegidos, se tiene un módulo de deslizamiento K_{ser} definido según el Eurocódigo 5 (UNE-EN-1995-1-1, 2006), como se muestra en la [Tabla 8](#).

Tabla 8: Valores de K_{ser} para medios de fijación y conectores en N/mm, en uniones de madera-madera y tableros derivados de la madera-madera. Fuente: Eurocódigo 5 (UNE-EN-1995-1-1, 2006).

Tipo de herraje	K_{ser}
Pasadores Pernos con o sin holgura* Tirafondos Clavos (con pretaladro)	$\rho_m^{1,5} d / 23$
Clavos (sin pretaladro)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8} / 30$
Grapas	$\rho_m^{1,5} d^{0,8} / 80$
Conectores de anillo de tipo A de acuerdo con la Norma Europea EN 912 Conectores de placa de tipo B de acuerdo con la Norma Europea EN 912	$\rho_m^{1,5} d_c / 2$
Conectores de placa dentada Conectores de tipos C1 a C9 de acuerdo con la Norma Europea EN 912 Conectores de tipos C10 a C11 de acuerdo con la Norma Europea EN 912	$1,5 \rho_m^{1,5} d_c / 4$ $1,5 \rho_m^{1,5} d_c / 2$
* La holgura debería añadirse de forma separada a la deformación	

4.3. Casos estudiados

Estudiamos dos ejemplos de estructuras compuestas madera - hormigón: una probeta de laboratorio en condiciones ideales y un entrepiso residencial en condiciones de uso reales.

4.3.1. Entrepiso

4.3.1.1 Rigidez eficaz

El entrepiso está compuesto por una carpeta de hormigón y viguetas de madera, generando una sección mixta madera - hormigón. Este tipo de entrepisos se pueden encontrar en estructuras de madera remodeladas, donde se agrega una carpeta de hormigón para aumentar la resistencia del conjunto. También se usan en obras nuevas, como el caso estudiado.

En la [Figura 20](#), la [Figura 21](#) y la [Figura 22](#) se pueden ver las características de la estructura que compone el entrepiso, y los datos de su geometría se encuentran en la [Tabla 9](#) y [Tabla 10](#). Los subíndices 1 y 2, hacen referencia al hormigón y la madera respectivamente.

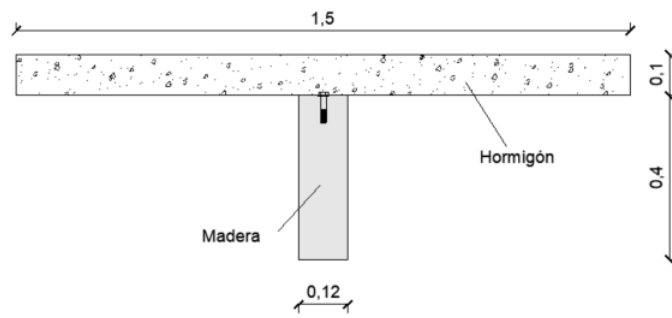


Figura 20: Sección de viga compuesta en entrepiso con ancho colaborante de hormigón.

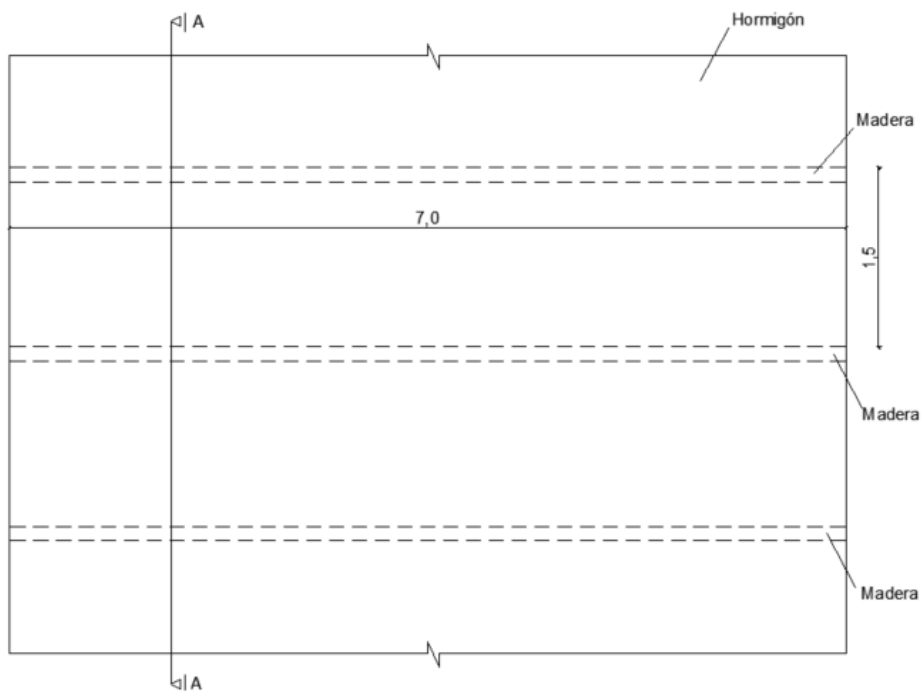


Figura 21: Vista en planta del entrepiso. Unidades: metros.

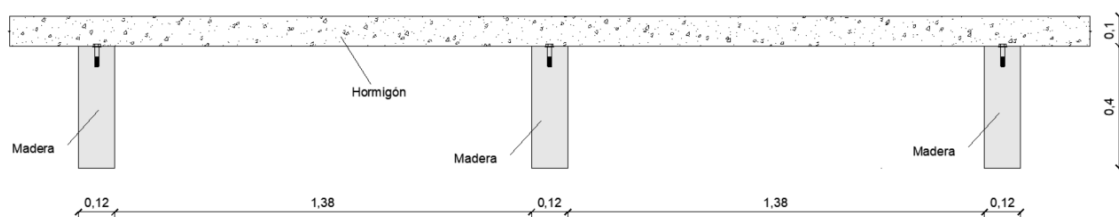


Figura 22: Corte A-A. Unidades: metros.

Tabla 9: Datos geométricos del hormigón en el entrepiso.

HORMIGÓN	
b_{ef} (m)	1,50
h_1 (m)	0,10
A_1 (m ²)	0,15
I_1 (m ⁴)	0,000125
L (m)	7,00
Distancia entre vigas (m)	1,50

La losa tendrá una armadura de $\phi 8/15$ en ambas direcciones.

Tabla 10: Datos geométricos de la madera en el entrepiso.

MADERA	
b_2 (m)	0,12
h_2 (m)	0,40
A_2 (m ²)	0,048
I_2 (m ⁴)	0,000640
L (m)	7,00
Distancia entre vigas (m)	1,50

Consideramos un hormigón C25 y madera laminada encolada de clase GL24h, según [Subsubsección 4.1.1](#) y [Subsubsección 4.1.2](#).

Como se explicó en [Subsubsección 4.2.2](#), se utilizaron dos tipos de conectores: tornillos y varillas. En la [Tabla 11](#) y la [Tabla 12](#) se pueden ver las características de cada uno de ellos.

Tabla 11: Datos de los tornillos en el entrepiso.

TORNILLOS	
Separación (m)	0,10
d_{nom} (m)	0,009
Cant. conectores	1 (cruz)
ρ_m (kN/m ³)	4,12
ρ_k (kN/m ³)	3,77
f_{uk} (kPa)	800000
K_{ser} (kN/m)	19000
K_u (kN/m)	12667
k_{90}	1,44
$f_{h,0,k}$ (kPa)	28729
α	90
$f_{h,a,k}$ (kPa)	21317
$M_{y,Rk}$ (kNm)	0,073
$F_{ax,rk}$ (kN)	0
Long. de penetración (m)	0,19

Tabla 12: Datos de las varillas en el entrepiso.

VARILLAS	
Separación (m)	0,15
d_{nom} (m)	0,02
Cant. conectores	2
ρ_m (kN/m ³)	4,12
ρ_k (kN/m ³)	3,77
f_{uk} (kPa)	500000
K_{ser} (kN/m)	29939
K_u (kN/m)	19959
k_{90}	1,60
$f_{h,0,k}$ (kPa)	25256
α	90
$f_{h,a,k}$ (kPa)	17070
$M_{y,Rk}$ (kNm)	0,36
$F_{ax,rk}$ (kN)	0
Long. de penetración (m)	0,19

Para hallar la rigidez eficaz EI_{ef} de la sección compuesta según el Método Gamma, se tiene la [Ecuación 42](#).

$$EI_{ef} = \sum E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2 \quad (42)$$

Dados E_i , I_i y A_i , en la [Tabla 13](#) se pueden ver los valores ingresados de a_i y γ_i según las condiciones geométricas y los conectores usados.

Tabla 13: Datos ingresados según Método Gamma.

TORNILLOS	
γ_1	0,19
a_1 (m)	0,10
γ_2	1
a_2 (m)	0,15
VARILLAS	
γ_1	0,20
a_1 (m)	0,10
γ_2	1
a_2 (m)	0,15

Finalmente, se obtiene la rigidez EI_{ef} :

$$EI_{ef,tornillos} = 30824,33 \text{ kNm}^2 \quad (43)$$

$$EI_{ef,varillas} = 31157,70 \text{ kNm}^2 \quad (44)$$

4.3.1.2 Cargas aplicadas

Las cargas que actúan sobre el entrepiso son:

- **Carga permanente:** Se considera el peso propio de la sección compuesta y una carga adicional de $1,0 \text{ kN/m}^2$ correspondiente a revestimientos, quedando una carga permanente por viga de $5,4 \text{ kN/m}$.
- **Sobrecarga de uso:** Se considera una sobrecarga de uso distribuida uniformemente de $2,0 \text{ kN/m}^2$, y una sobrecarga puntual de $2,0 \text{ kN}$, según lo indicado en la norma UNIT 33 (1991) para comedores y lugares de estar en edificios de vivienda.

Los coeficientes ψ_i para hallar las combinaciones de carga según lo explicado en [Subsección 3.2.1](#) son:

- $\psi_0 = 0,7$
- $\psi_1 = 0,5$
- $\psi_2 = 0,3$

Los coeficientes de seguridad utilizados para las cargas permanentes γ_g y sobrecargas de uso γ_q respectivamente son:

- $\gamma_g = 1,35$
- $\gamma_q = 1,5$

4.3.2. Probeta

4.3.2.1 Rigidez eficaz

Al igual que el entrepiso, la probeta se encuentra conformada por una viga de madera con una carpeta de hormigón. En la [Figura 23](#) y la [Figura 24](#), se puede ver las características de la probeta a utilizar para los ensayos.

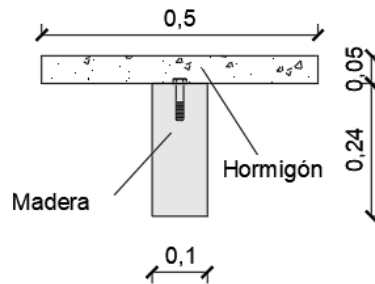


Figura 23: Sección de la probeta. Unidades: metros.

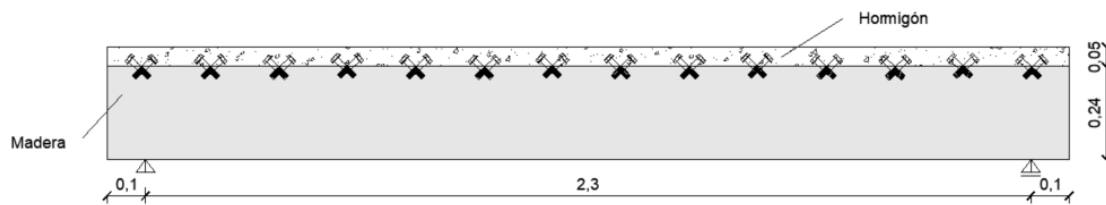


Figura 24: Corte longitudinal de la viga. Unidades: metros.

Dadas las limitaciones del laboratorio, se determinaron las condiciones geométricas y la separación entre los conectores. Estos datos son mostrados en la [Tabla 14](#) y en la [Tabla 15](#).

Tabla 14: Datos geométricos del hormigón en la probeta.

HORMIGÓN	
b_{ef} (m)	0,50
h_1 (m)	0,05
A_1 (m ²)	0,025
I_1 (m ⁴)	0,000005
L (m)	2,40
Distancia entre vigas (m)	0,50

La losa tendrá una armadura de $\phi 8/15$ en ambas direcciones.

Tabla 15: Datos geométricos de la madera en la probeta.

MADERA	
b_2 (m)	0,10
h_2 (m)	0,24
A_2 (m ²)	0,024
I_2 (m ⁴)	0,000115
L (m)	2,40
Distancia entre vigas (m)	0,50

Las características de los conectores para hallar la rigidez equivalente de la probeta son mostradas en la [Tabla 16](#) y en la [Tabla 17](#).

Tabla 16: Datos de los tornillos en la probeta.

TORNILLOS	
Separación (m)	0,10
d_{nom} (m)	0,009
Cant. conectores	2 en cruz
ρ_m (kN/m ³)	4,12
ρ_k (kN/m ³)	3,77
f_{uk} (kPa)	800000
K_{ser} (kN/m)	19000
K_u (kN/m)	12667
k_{90}	1,44
$f_{h,0,k}$ (kPa)	28729
α	90
$f_{h,a,k}$ (kPa)	21317
$M_{y,Rk}$ (kNm)	0,073
$F_{ax,rk}$ (kN)	0
Long. de penetración (m)	0,19

Tabla 17: Datos de las varillas en la probeta

TORNILLOS	
Separación (m)	0,05
d_{nom} (m)	0,008
Cant. conectores	2
ρ_m (kN/m ³)	4,12
ρ_k (kN/m ³)	3,77
f_{uk} (kPa)	500000
K_{ser} (kN/m)	11976
K_u (kN/m)	7984
k_{90}	1,42
$f_{h,0,k}$ (kPa)	29044
α	90
$f_{h,a,k}$ (kPa)	21745
$M_{y,Rk}$ (kNm)	0,033
$F_{ax,rk}$ (kN)	0
Long. de penetración (m)	0,19

Dada la geometría definida anteriormente y las propiedades de los conectores, se tienen en la [Tabla 18](#) los valores ingresados para hallar la rigidez eficaz según la [Ecuación 42](#).

Tabla 18: Datos ingresados según Método Gamma.

TORNILLOS	
γ_1	0,14
a_1 (m)	0,11
γ_2	1
a_2 (m)	0,037
VARILLAS	
γ_1	0,17
a_1 (m)	0,10
γ_2	1
a_2 (m)	0,043

Utilizando las ecuaciones presentadas y detalladas en la [Subsubsubsección 4.3.1.1](#), se puede llegar a que el valor de la rigidez efectiva es el indicado en la [Ecuación 45](#) y [Ecuación 46](#).

$$EI_{ef,tornillos} = 2957,03 \text{ kNm}^2 \quad (45)$$

$$EI_{ef,varillas} = 3183,92 \text{ kNm}^2 \quad (46)$$

4.3.2.2 Cargas aplicadas

Las cargas que actúan sobre la probeta y consideradas para el análisis son:

- **Carga permanente:** Se considera el peso propio de la sección compuesta de 0,72 kN/m.
- **Sobrecarga de uso:** Se considera una sobrecarga de uso puntual que se incrementa de 0 kN hasta la rotura de la probeta, que se estima sucederá a 68 kN en el caso de los tornillos y 72 kN en el caso de las varillas. Cada 4 kN se estudia el comportamiento de la probeta con el fin de compararlo con el Método Gamma y el modelo computacional.

Los coeficientes de seguridad para las cargas permanentes γ_g y las sobrecargas de uso γ_q tomados son:

- $\gamma_g = 1$
- $\gamma_q = 1$

Los coeficientes de seguridad utilizados toman un valor unitario porque se quiere lograr la falla de la probeta. Por lo tanto, estos coeficientes no deben aumentar la carga.

4.3.3. Análisis de colaboración

Se define a la colaboración de la sección como:

$$Colaboración (\%) = \frac{EI_{ef} - EI_{suma}}{EI_{comp} - EI_{suma}} \quad (47)$$

Donde EI_{comp} es la rigidez obtenida por el Teorema de Steiner tras homogeneizar la sección y EI_{suma} es la suma de las rigideces de la parte de madera y la parte del hormigón por separado.

El porcentaje de colaboración, por la tanto, da una idea de si el comportamiento de la probeta se parece más a aquel de una sección homogénea o al de dos materiales independientes. Los resultados se pueden ver en la [Tabla 19](#).

Tabla 19: Análisis de colaboración.

ENTREPISO			
TORNILLOS		VARILLAS	
EI_{ef} (kNm ²)	30824	EI_{ef} (kNm ²)	31158
$EI_{x,comp}$ (kNm ²)	41165	$EI_{x,comp}$ (kNm ²)	41165
$EI_{x,suma}$ (kNm ²)	10768	$EI_{x,suma}$ (kNm ²)	10768
Colaboración	66 %	Colaboración	67 %
PROBETA			
TORNILLOS		VARILLAS	
EI_{ef} (kNm ²)	2957	EI_{ef} (kNm ²)	3184
$EI_{x,comp}$ (kNm ²)	5597	$EI_{x,comp}$ (kNm ²)	5597
$EI_{x,suma}$ (kNm ²)	1467	$EI_{x,suma}$ (kNm ²)	1467
Colaboración	36 %	Colaboración	42 %

En base a los resultados, se tiene que en el entrepiso hay una colaboración de aproximadamente 66 % y en la probeta 39 %.

Esto se debe a que en el entrepiso se tiene más libertad para elegir las dimensiones de la viga y la posición de los conectores a colocar. Por lo tanto, se puede diseñar una viga compuesta con un índice de colaboración mayor que, por lo tanto, tenga mayor rigidez eficaz y trabaje de forma más eficiente. El largo de la probeta también influye en la colaboración; dado que en el laboratorio esta variable está limitada por la prensa, la colaboración entre los materiales es menor.

4.4. Modelo computacional

Para el modelo computacional se decidió utilizar el programa SAP2000 que se basa en el Método de Elementos Finitos.

4.4.1. Hipótesis de materiales

La viga modelada representa la probeta a ensayar, compuesta por hormigón armado y madera. Tanto la parte de madera como la parte de hormigón, son representadas con elementos de área.

Las propiedades del hormigón ingresadas en el modelo computacional corresponden con aquellas señaladas en [Subsubsección 4.1.1](#). Estas se pueden ver en la [Figura 25](#).

The image shows a 'Material Property Data' dialog box with the following sections and values:

- General Data:**
 - Material Name and Display Color: C25/30 (with a red color swatch)
 - Material Type: Concrete (dropdown menu)
 - Material Grade: C25/30
 - Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass:**
 - Weight per Unit Volume: 24,9926
 - Mass per Unit Volume: 2,5485
- Units:** KN, m, C (dropdown menu)
- Isotropic Property Data:**
 - Modulus Of Elasticity, E: 27264042,
 - Poisson, U: 0,2
 - Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1,000E-05
 - Shear Modulus, G: 11360018,
- Other Properties For Concrete Materials:**
 - Specified Concrete Compressive Strength, f_c : 25000,
 - Expected Concrete Compressive Strength: 25000,
 - Lightweight Concrete
 - Shear Strength Reduction Factor: (empty field)
- Switch To Advanced Property Display
- Buttons: OK, Cancel

Figura 25: Propiedades del hormigón.

La madera se definió en SAP2000 como material ortótropo con las características indicadas en [Subsubsección 4.1.2](#) correspondientes a la clasificación GL24h, como se puede ver en la [Figura 26](#).

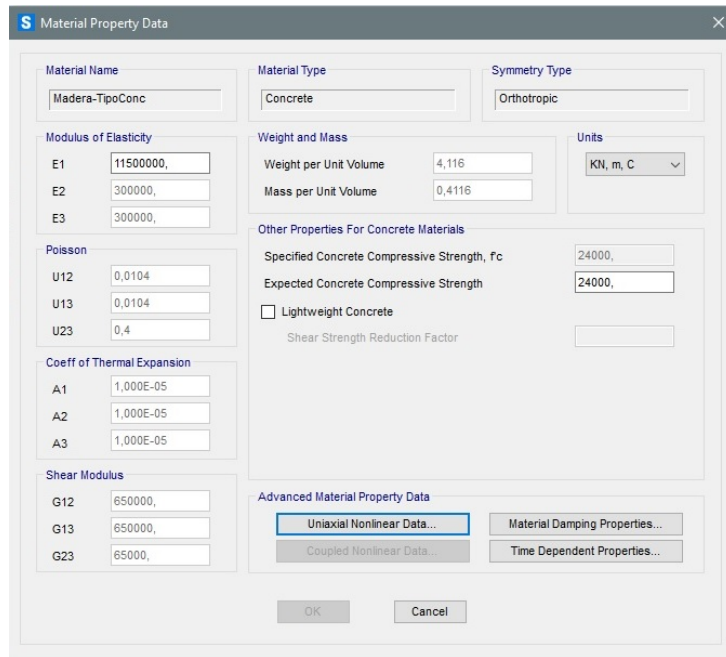


Figura 26: Propiedades de la madera.

4.4.2. Condiciones de apoyo y uniones

Se modeló la viga como simplemente apoyada, al igual que el modelo teórico basado en el Método Gamma, como se puede ver en la Figura 27. Además, se agregaron 3 apoyos adicionales fijos en el sentido del eje y por tratarse de un modelo tridimensional, asegurando así la estabilidad global.

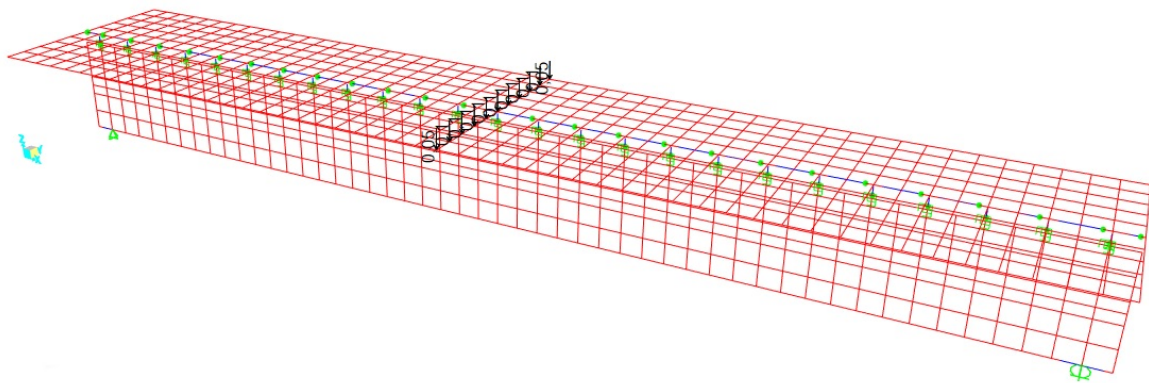


Figura 27: Viga simplemente apoyada.

Por otro lado, se colocaron resortes que representan el medio de fijación entre la madera y el hormigón. Las propiedades de los resortes colocados corresponden con los tornillos (y varillas) seleccionados en Subsección 4.2.2. Estas se pueden ver en la Figura 28 y la Figura 29.

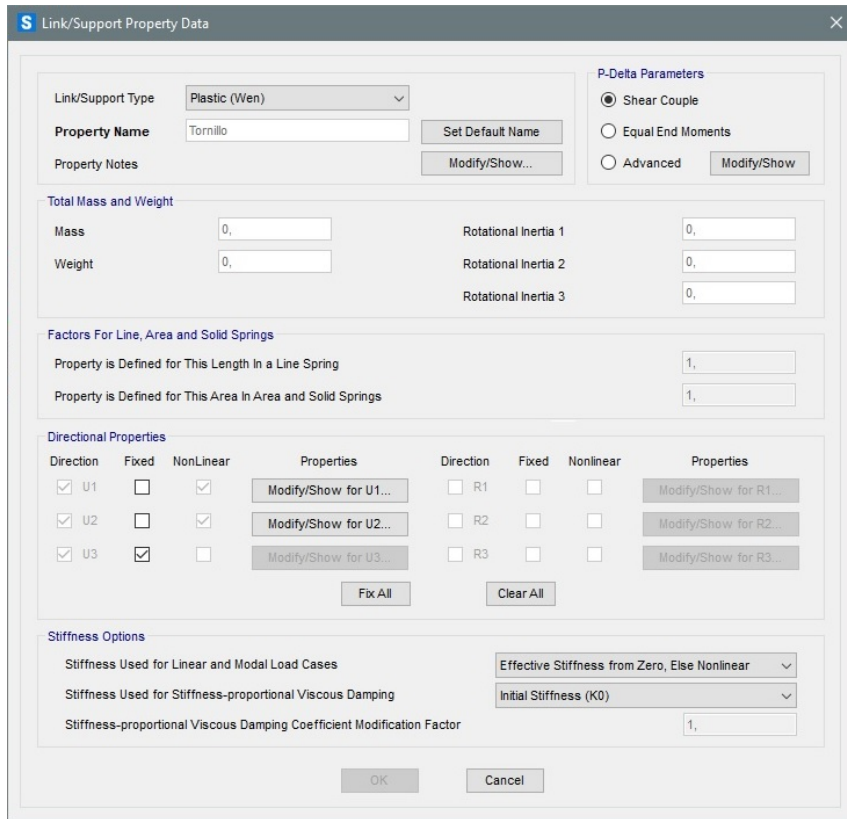


Figura 28: Definición de los tornillos.

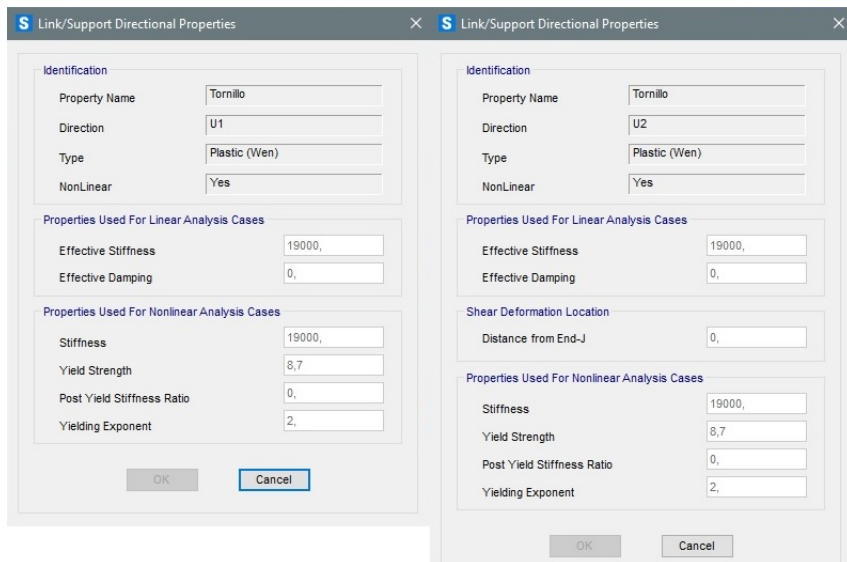


Figura 29: Propiedades de los tornillos.

Se diseñaron los resortes tal que tengan un comportamiento plástico para representar las condiciones reales de las probetas.

Los resortes se unen al hormigón y a la madera mediante barras infinitamente rígidas

en forma de "L", como se muestra en la [Figura 30](#). De esta forma, se transmite el momento en cada punto de conexión y se asegura la compatibilidad de deformaciones.

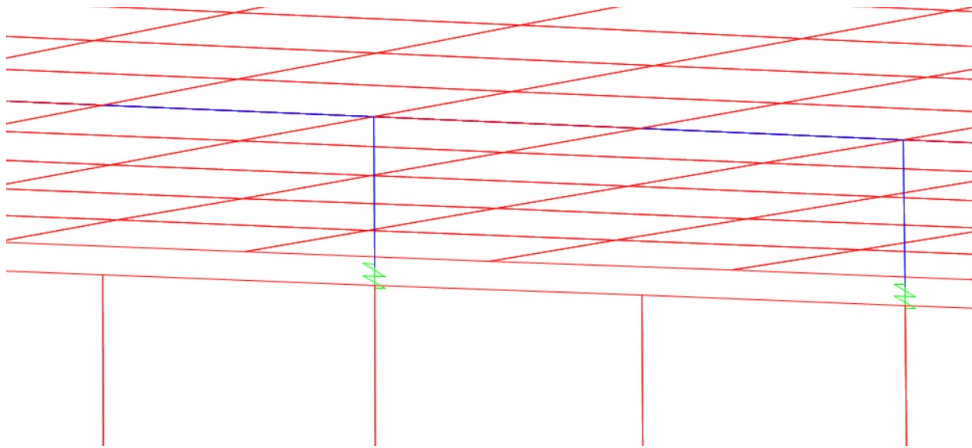


Figura 30: Resorte y barra infinitamente rígida en la unión.

4.4.3. Hipótesis de carga

Las cargas que actúan sobre la viga estudiada son: su peso propio y la carga del ensayo, como se explicó en [Subsubsubsección 4.3.2.2](#). Se aplicó una combinación no lineal que suma ambas cargas y aumenta la carga del ensayo de a 4 kN para observar el comportamiento de la viga al aumentar los esfuerzos sobre ella.

La carga correspondiente al ensayo se coloca como una carga distribuida sobre el eje de la viga ([Figura 31](#)) y tiene un valor unitario.

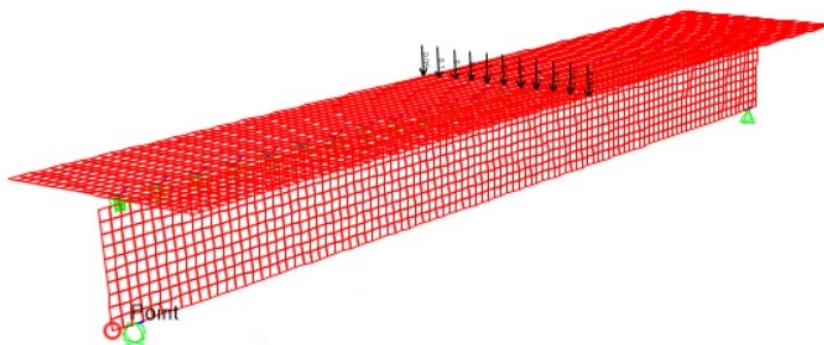


Figura 31: Carga que actúa sobre la viga.

4.4.4. Modificaciones al modelo original

Modificaciones a los materiales

En primer lugar, se consideró un modelo alternativo con la madera definida como material isótropo para observar si los resultados del Método Gamma se aproximan más al modelo de la madera trabajando como material isótropo u ortótropo.

Modificaciones a los conectores

También se consideró un modelo alternativo en el cual se considera que los tornillos no plastifican, obteniéndose un comportamiento lineal de los mismos.

Por otro lado, se consideraron los casos extremos donde la constante k de los resortes tiende a infinito, y cuando su valor tiende a 0. De este modo se estudia el caso de conector infinitamente rígido donde los materiales trabajan solidariamente (con $k = \infty$), y con rigidez nula donde los materiales trabajan de forma independiente (con $k = 0$).

Modelo simplificado

Por último, se consideró un modelo simplificado de la viga, en el cual se representa a la madera y el hormigón como elementos lineales en lugar de elementos de área.

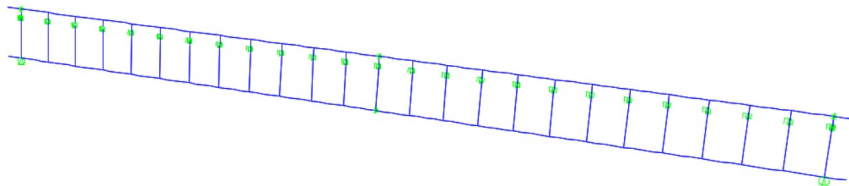


Figura 32: Modelo simplificado.

En este caso, se definieron las secciones de las barras longitudinales para que representen las propiedades del hormigón y de la madera de la viga original. Se definió el material como isótropo para obtener resultados más próximos al Método Gamma. Se agregan barras verticales infinitamente rígidas que unen a las longitudinales para asegurar que trabajen en conjunto.

Al plantear el modelo así, se busca obtener resultados similares de una forma más rápida y directa. La desventaja es que, al no tener elementos de área, no se puede ver la distribución de tensiones en cada material. Adicionalmente, no se observa el efecto del ancho de influencia del hormigón.

5. Resultados

5.1. Entrepiso con tornillos

5.1.1. Verificaciones Estado Límite Último: Hormigón

Según lo establecido en [Subsubsección 3.2.2](#), se verifica que con la armadura colocada en el hormigón no se supere el momento último M_u de la losa y que se cumpla con la cuantía geométrica y mecánica mínimas. Los resultados se pueden ver en la [Tabla 20](#).

Tabla 20: Verificaciones ELU: Hormigón.

Flexión perpendicular a la viga					
ω	μ	M_u (kNm)	M_d (kNm)	Verificación	Porcentaje
0,12	0,11	15,44	1,53	Verifica	10 %
Flexión paralela a la viga					
ω	μ	M_u (kNm)	M_d (kNm)	Verificación	Porcentaje
0,08	0,07	15,44	7,96	Verifica	52 %

5.1.2. Verificaciones Estado Límite Último: Madera

También se debe verificar el Estado Límite Último de la madera, según lo explicado en [Subsubsección 3.2.3](#). En particular, se verifica que la tensión de diseño a flexión $\sigma_{m,y,d}$ no supere la resistencia $f_{m,y,d}$, que la tracción paralela a la fibra $\sigma_{t,0,d}$ no supere la resistencia de la madera $f_{t,0,d}$ y que la tensión de cortante τ_d no supere la máxima resistente $f_{v,d}$. Por otro lado, se verifica que no se supere la flexo-tracción admisible según la [Ecuación 26](#) y la [Ecuación 27](#) y por último, que la carga en cada conector F_1 no supere la máxima $F_{v,Rk}$.

Estas verificaciones se pueden ver en la [Tabla 21](#).

Tabla 21: Verificaciones ELU: Madera.

Flexión					
$\sigma_{m,y,d}$ (kPa)	k_h	$f_{m,y,d}$ (kPa)		Verificación	Porcentaje
5371	1,04	17595		Verifica	31 %
Tracción paralela a la fibra					
$\sigma_{t,0,d}$ (kPa)	k_h	$f_{t,0,d}$ (kPa)		Verificación	Porcentaje
3903	1,0	14076		Verifica	28 %
Cortante					
τ_d (kPa)		$f_{v,d}$ (kPa)		Verificación	Porcentaje
1285		1493		Verifica	86 %
Flexo-tracción					
$\sigma_{t,0,d}$ (kPa)	k_m	Verificación 1	Verificación 2	Porcentaje 1	Porcentaje 2
3903	0,71	Verifica	Verifica	58 %	49 %
Carga en el conector					
F_1 (kN)		$F_{v,Rk}$ (kN)		Verificación	Porcentaje
5,35		8,59		Verifica	62 %

5.1.3. Verificaciones Estado Límite de Servicio

Finalmente, se debe verificar el Estado Límite de Servicio del entrepiso y asegurar que se trate de una estructura segura, cómoda y que pueda cumplir con su fin para los usuarios.

Esto consiste en verificar que no se supere la flecha activa admisible: $L/400$, considerando que se apoyarán tabiques no frágiles sobre el entrepiso. Además, se verifica la flecha instantánea y la flecha total según las indicaciones del Código Técnico de la Edificación (2006).

Por último, se verifica que dada la frecuencia natural del entrepiso y su masa modal, las vibraciones del entrepiso estén en el rango "Recomendado".

Las verificaciones anteriores se pueden ver en la [Tabla 22](#).

Tabla 22: Verificaciones ELS.

Flecha activa				
$w_{act,P}$ (m)	$w_{act,SCU}$ (m)	$L/400$ (m)	Verificación	Porcentaje
0,0043	0,0064	0,0175	Verifica	37 %
Flecha instantánea				
$w_{inst,P}$ (m)	$w_{inst,SCU}$ (m)	$L/350$ (m)	Verificación	Porcentaje
0,0005	0,0030	0,0200	Verifica	15 %
Flecha total				
$w_{neta,final}$ (m)	$L/300$ (m)		Verificación	Porcentaje
0,0104	0,0233		Verifica	45 %
Vibraciones				
Frecuencia natural (Hz)	Masa modal (kg)	Damping (%)	Clase	Clasificación
11,98	1345	3	D	Recomendado

En base a los resultados obtenidos, se tiene que la sollicitación más limitante para el entrepiso con tornillos es el cortante, cumpliendo los requisitos con un porcentaje de aprovechamiento del 86 %.

5.2. Entrepiso con varillas

5.2.1. Verificaciones Estado Límite Último: Hormigón

Análogo al caso del entrepiso con tornillos, se verifica que dada la armadura de la losa no se supere M_u y se cumpla con las cuantías mínimas. Los resultados se pueden ver en la [Tabla 23](#).

Tabla 23: Verificaciones ELU: Hormigón

Flexión perpendicular a la viga					
ω	μ	M_u (kNm)	M_d (kNm)	Verificación	Porcentaje
0,12	0,11	15,44	1,53	Verifica	10 %
Flexión paralela a la viga					
ω	μ	M_u (kNm)	M_d (kNm)	Verificación	Porcentaje
0,08	0,07	15,44	7,87	Verifica	51 %

5.2.2. Verificaciones Estado Límite Último: Madera

Para el entrepiso con varillas se deben hacer las mismas verificaciones correspondientes al Estado Límite Último de la madera, como se puede ver en la [Tabla 24](#).

Tabla 24: Verificaciones ELU: Madera.

Flexión					
$\sigma_{m,y,d}$ (kPa)	k_h	$f_{m,y,d}$ (kPa)		Verificación	Porcentaje
5314	1,04	17595		Verifica	30 %
Tracción paralela a la fibra					
$\sigma_{t,0,d}$ (kPa)	k_h	$f_{t,0,d}$ (kPa)		Verificación	Porcentaje
3926	1,04	14076		Verifica	28 %
Cortante					
τ_d (kPa)		$f_{v,d}$ (kPa)		Verificación	Porcentaje
1285		1493		Verifica	86 %
Flexo-tracción					
$\sigma_{t,0,d}$ (kPa)	k_m	Verificación 1	Verificación 2	Porcentaje 1	Porcentaje 2
3926	0,70	Verifica	Verifica	58 %	49 %
Carga en el conector					
$F_{v,Rk}$ (kN)		F_1 (kN)		Verificación	Porcentaje
25,57		8,08		Verifica	32 %

5.2.3. Verificaciones Estado Límite de Servicio

Por último, se harán las verificaciones para el Estado Límite de Servicio del entrepiso con varillas, como se puede ver en la [Tabla 25](#).

Tabla 25: Verificaciones ELS.

Flecha activa				
$w_{act,P}$ (m)	$w_{act,SCU}$ (m)	$L/400$ (m)	Verificación	Porcentaje
0,0042	0,0063	0,0175	Verifica	36 %
Flecha instantánea				
$w_{inst,P}$ (m)	$w_{inst,SCU}$ (m)	$L/350$ (m)	Verificación	Porcentaje
0,00046	0,0030	0,0200	Verifica	15 %
Flecha total				
$w_{neta,final}$ (m)	$L/300$ (m)		Verificación	Porcentaje
0,0130	0,0233		Verifica	44 %
Vibraciones				
Frecuencia natural (Hz)	Masa modal (kg)	Damping (%)	Clase	Clasificación
11,98	1345	3	D	Recomendado

En base a los resultados obtenidos, se tiene que la sollicitación más limitante para el entrepiso con varillas es el cortante.

5.3. Probeta con tornillos

Para el caso de la probeta, al tratarse de una viga con fin experimental, se va a buscar la rotura de la misma. Esto se va a lograr aumentando la carga puntual aplicada, como se explicó en la [Subsubsubsección 4.3.2.1](#), hasta alcanzar la falla en la madera. Se estimará así la carga y modo de rotura a esperar en los ensayos.

5.3.1. Verificaciones Estado Límite Último: Hormigón

Como se busca que la probeta falle por la madera, se verifica que el hormigón no exceda su resistencia para las cargas consideradas. Los resultados de dicha verificación se pueden ver en la [Tabla 26](#), correspondientes a la carga de rotura de la madera (68 kN).

Tabla 26: Verificaciones ELU: Hormigón.

Flexión perpendicular a la viga					
ω	μ	M_u (kNm)	M_d (kNm)	Verificación	Porcentaje
0,35	0,29	2,25	0,04	Verifica	2 %
Flexión paralela a la viga					
ω	μ	M_u (kNm)	M_d (kNm)	Verificación	Porcentaje
0,70	0,45	2,25	1,98	Verifica	88 %

5.3.2. Carga y modo de rotura

Para determinar la carga y modo de falla de la madera se estudiarán los Estados Límites Últimos de: flexión, tracción paralela a la fibra, cortante, flexo-tracción y la carga en el conector; a partir de las propiedades de los materiales, la geometría y las ecuaciones expresadas en la [Subsección 3.2](#) se calculan las cargas últimas para cada caso. Se aumenta la carga aplicada hasta que alguna de las sollicitaciones supere la carga última. En la

Tabla 27 se observa la máxima carga admisible, la primer carga de rotura y el porcentaje para cada sollicitación.

Tabla 27: Máxima carga admisible y carga de rotura.

		P=64 kN		P=68 kN	
Flexión					
$f_{m,y,d}$ (kPa)	$\sigma_{m,y,d}$ (kPa)	Porcentaje		$\sigma_{m,y,d}$ (kPa)	Porcentaje
26303	18164	69 %		19284	73 %
Tracción paralela a la fibra					
$f_{t,0,d}$ (kPa)	$\sigma_{t,0,d}$ (kPa)	Porcentaje		$\sigma_{t,0,d}$ (kPa)	Porcentaje
21042	5636	27 %		5984	28 %
Cortante					
f_{vd} (kPa)	τ_d (kPa)	Porcentaje		τ_d (kPa)	Porcentaje
2333	2054	88 %		2179	93 %
Flexo-tracción					
≤ 1	$\frac{\sigma_{t,0,d} + \sigma_{m,y,d}}{f_{t,0,d} + f_{m,y,d}}$	$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}}$	$\frac{\sigma_{t,0,d} + \sigma_{m,y,d}}{f_{t,0,d} + f_{m,y,d}}$	$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}}$	
	96 %	75 %	102 %	80 %	
Carga en el conector					
$F_{v,Rk}$ (kN)	F_1 (kN)	Porcentaje		F_1 (kN)	Porcentaje
8,59	5,71	66 %		6,06	71 %

Como se observa en la Tabla 27, el modo de falla es por flexo-tracción.

No se estudia el Estado Límite de Servicio ya que se trata de una estructura con fin experimental, que no será utilizada como parte de una estructura final, por lo que los aspectos estéticos y de confort son irrelevantes.

5.4. Probeta con varillas

Al igual que en la probeta con tornillos, se busca hallar la falla de la madera en la viga compuesta.

5.4.1. Verificaciones Estado Límite Último: Hormigón

En el caso de varillas, se vuelve a verificar el hormigón armado a flexión y los resultados se pueden ver en la Tabla 28 con la carga de rotura de la madera (72 kN).

Tabla 28: Verificaciones ELU: Hormigón.

Flexión perpendicular a la viga					
ω	μ	M_u (kNm)	M_d (kNm)	Verificación	Porcentaje
0,35	0,29	2,25	0,04	Verifica	2 %
Flexión paralela a la viga					
ω	μ	M_u (kNm)	M_d (kNm)	Verificación	Porcentaje
0,70	0,45	2,25	1,95	Verifica	87 %

5.4.2. Carga y modo de rotura

En la [Tabla 29](#) se tiene el análisis de cada solicitación para la carga máxima que resiste la probeta y para la carga de rotura.

Tabla 29: Máxima carga admisible y carga de rotura.

		P=68 kN		P=72 kN	
Flexión					
$f_{m,y,d}$ (kPa)	$\sigma_{m,y,d}$ (kPa)	Porcentaje	$\sigma_{m,y,d}$ (kPa)	Porcentaje	
26303	17910	68 %	18950	72 %	
Tracción paralela a la fibra					
$f_{t,0,d}$ (kPa)	$\sigma_{t,0,d}$ (kPa)	Porcentaje	$\sigma_{t,0,d}$ (kPa)	Porcentaje	
21042	6404	30 %	6776	32 %	
Cortante					
f_{vd} (kPa)	τ_d (kPa)	Porcentaje	τ_d (kPa)	Porcentaje	
2333	2179	93 %	2304	99 %	
Flexo-tracción					
≤ 1	$\frac{\sigma_{t,0,d} + \sigma_{m,y,d}}{f_{t,0,d} + f_{m,y,d}}$	$\frac{\sigma_{t,0,d} + k_m \sigma_{m,y,d}}{f_{t,0,d} + k_m f_{m,y,d}}$	$\frac{\sigma_{t,0,d} + \sigma_{m,y,d}}{f_{t,0,d} + f_{m,y,d}}$	$\frac{\sigma_{t,0,d} + k_m \sigma_{m,y,d}}{f_{t,0,d} + k_m f_{m,y,d}}$	
	99 %	78 %	104 %	83 %	
Carga en el conector					
$F_{v,Rk}$ (kN)	F_1 (kN)	Porcentaje	F_1 (kN)	Porcentaje	
5,55	3,24	58 %	3,43	62 %	

Al igual que en la probeta con tornillos, se observa en la [Tabla 29](#) que el modo de falla es por flexo-tracción.

5.5. Análisis de deformaciones

Se estudiará el comportamiento fuerza-desplazamiento de las vigas compuestas para comparar los resultados computacionales con los resultados sugeridos por el Método Gamma. Se estudian las deformaciones de la probeta hasta la carga de 52 kN, donde se puede observar la plastificación de los conectores en el modelo computacional.

En la [Figura 33](#) y la [Figura 34](#) se puede ver el modelo deformado correspondiente al caso de los tornillos para una carga de 40 kN, siendo análogo para el caso de las varillas.

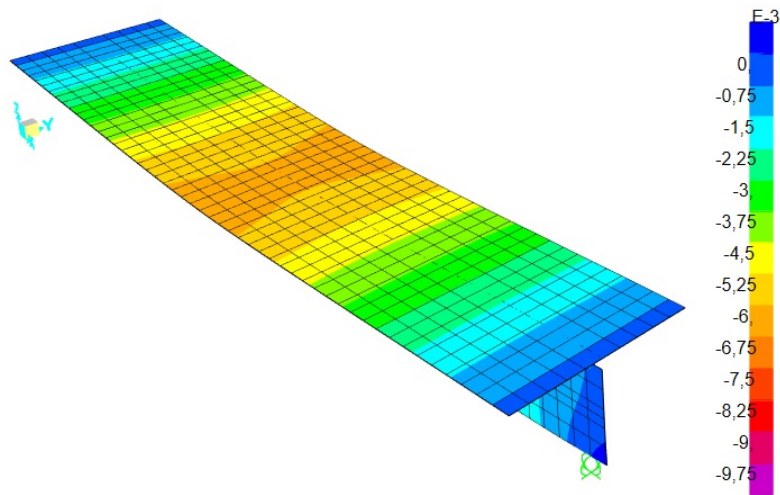


Figura 33: Deformación en la viga en metros según el eje z.

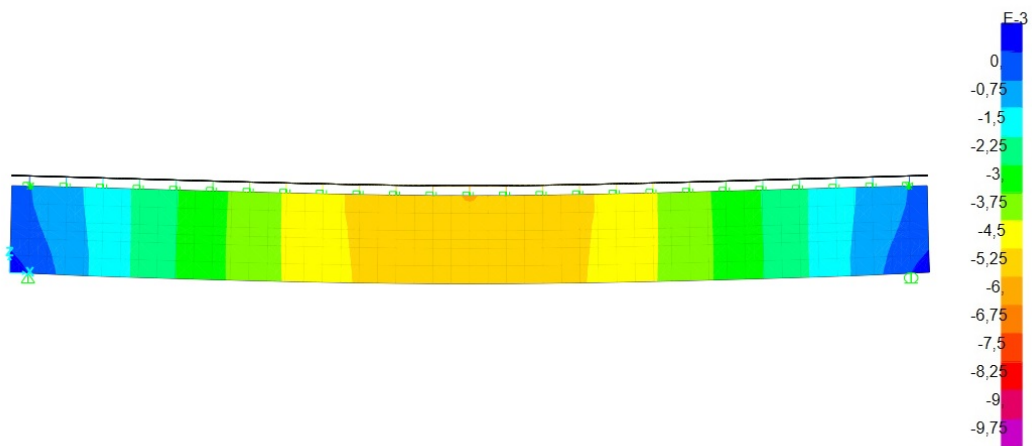


Figura 34: Deformación en la viga en metros según el eje z.

5.5.1. Deformaciones en probeta con tornillos

Se comparan los resultados del Método Gamma con el modelo computacional con tornillos, como se puede ver en la [Figura 35](#).

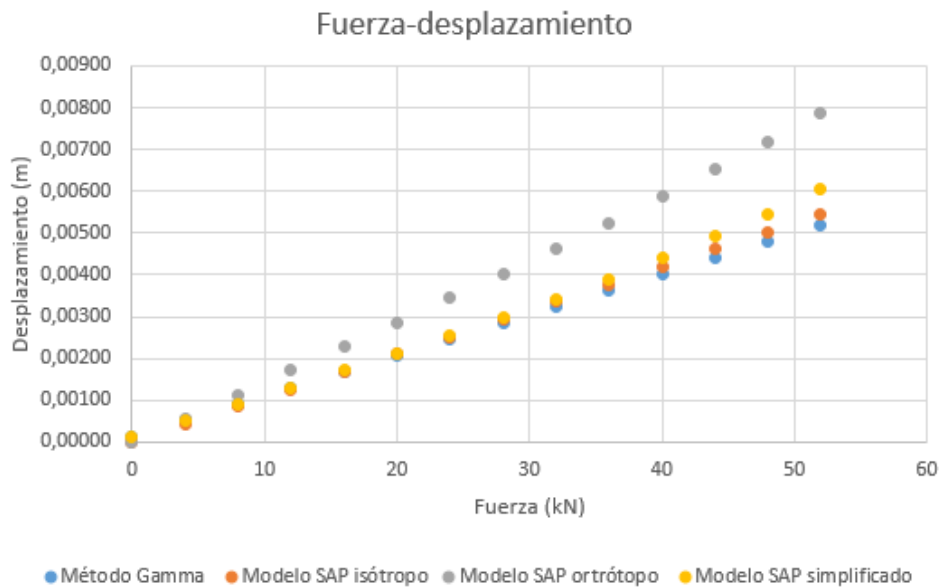


Figura 35: Gráfico fuerza-desplazamiento.

Se compara con tres modelos: con la madera definida como material isotrópico y con la madera definida como material ortótropo (caso más real) para observar cual se aproxima más al Método Gamma; y por último, se comparan los resultados de los modelos tridimensionales con el modelo simplificado bidimensional.

Se puede observar que el modelo isotrópico arroja un resultado muy próximo a aquel del Método Gamma. Esto se puede explicar porque el Método Gamma no considera la deformación por corte característica de los materiales ortótropos, como la madera.

Como el Método Gamma no contempla la presencia de cargas puntuales en sus hipótesis, se observa que al aumentar la carga puntual, aumenta la diferencia en los resultados entre el Método Gamma y el modelo computacional.

También se puede observar que el modelo simplificado dio resultados muy próximos al modelo tridimensional isotrópico y al Método Gamma, por lo que se podría considerar este tipo de análisis más sencillo al momento de diseñar.

Por otro lado, se consideró el modelo modificado donde los resortes tienen $k = \infty$. En este caso, al tener conectores infinitamente rígidos, la sección se comporta como si se tratara de una sección homogénea, siguiendo la Teoría de vigas de Euler-Bernoulli.

Los resultados se pueden ver en la [Figura 36](#).

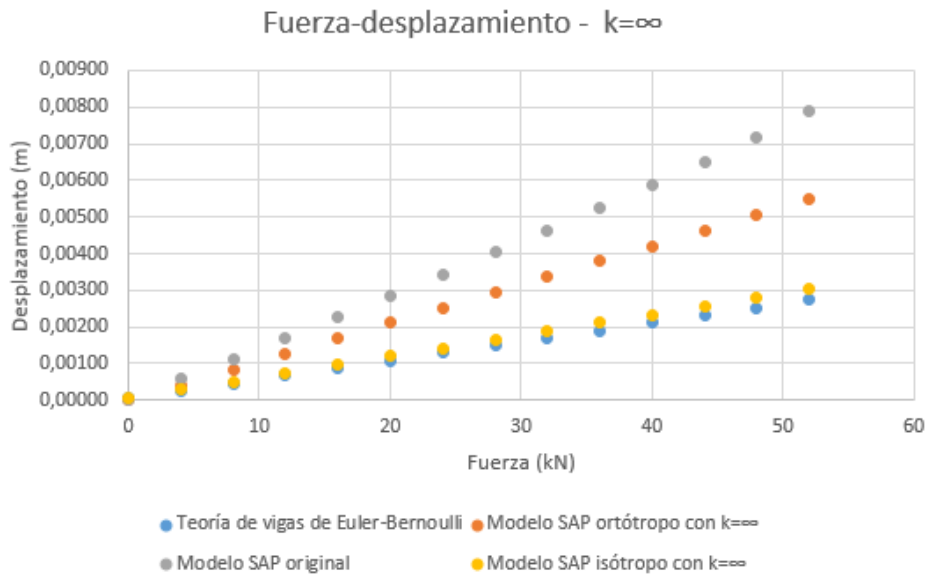


Figura 36: Gráfico fuerza-desplazamiento con $k = \infty$.

Se puede observar que, dado el resultado obtenido por el modelo SAP y por el modelo teórico con sección homogénea, se tiene una mayor rigidez. Esto tiene sentido ya que la rigidez de la sección homogénea es mayor que la rigidez eficaz propuesta por el modelo SAP original.

El modelo SAP isótropo dio un resultado muy similar a la Teoría de vigas de Euler-Bernoulli, lo cual se explica porque, cuando el hormigón y la madera están unidos por un conector infinitamente rígido, se comportan como un material homogéneo.

También se consideró el modelo modificado, donde los resortes tienen $k = 0$. En este caso, al tener los conectores rigidez nula, los materiales trabajan de forma independiente. Los resultados se pueden ver en la [Figura 37](#).

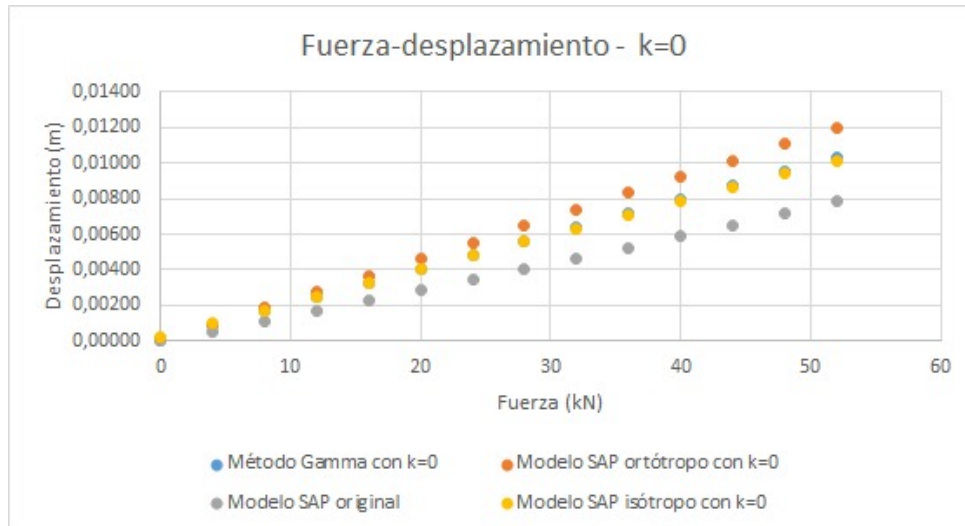


Figura 37: Gráfico fuerza-desplazamiento con $k = 0$.

Como es de esperar, se tiene que para $k = 0$ la rigidez es menor que aquella del modelo original.

Además, observando la [Figura 36](#) y la [Figura 37](#) se tiene una mayor diferencia en los valores del Método Gamma respecto al modelo computacional al aumentar la rigidez de los conectores.

Finalmente, en la [Figura 38](#) se puede ver los valores obtenidos del modelo elástico y del modelo plástico de SAP. En el gráfico se puede ver cierta plastificación que explica la diferencia entre los resultados de cada modelo.

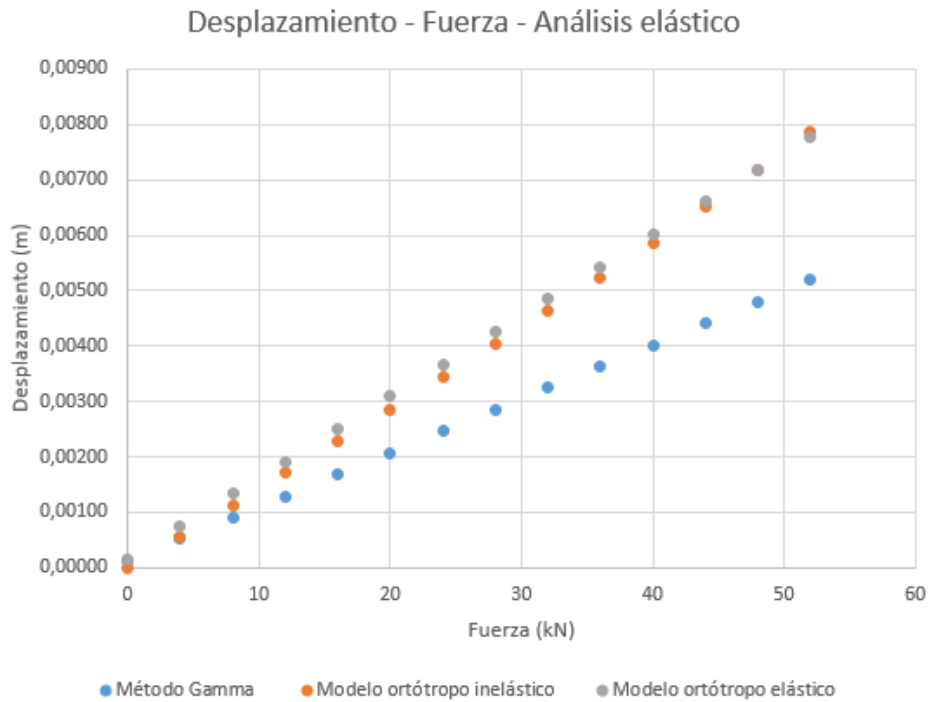


Figura 38: Gráfico fuerza-desplazamiento con análisis elástico.

5.5.2. Deformaciones en probeta con varillas

En la [Figura 39](#), la [Figura 40](#), la [Figura 41](#) y la [Figura 42](#) se pueden ver los resultados para el caso de la probeta con varillas, donde se obtuvieron resultados análogos al caso anterior.

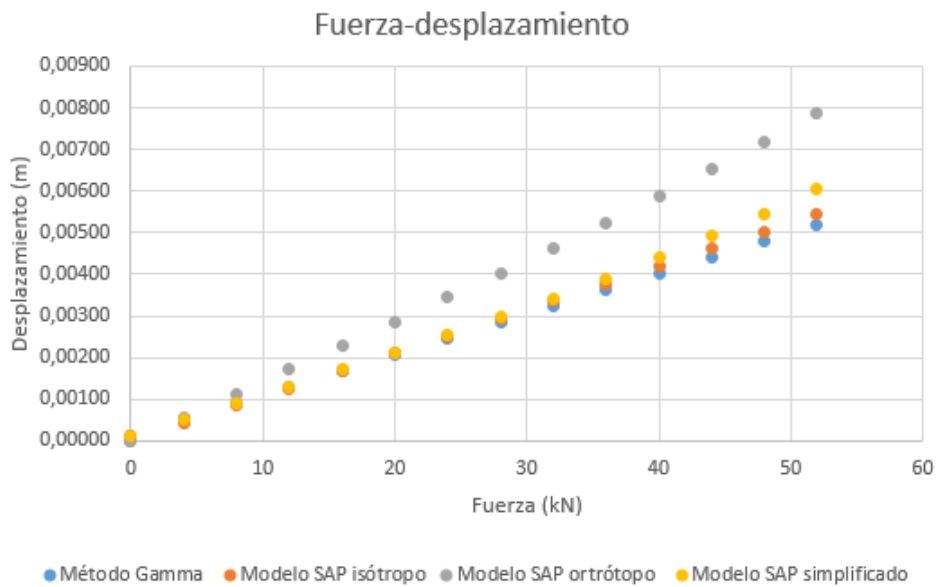


Figura 39: Gráfico fuerza-desplazamiento.

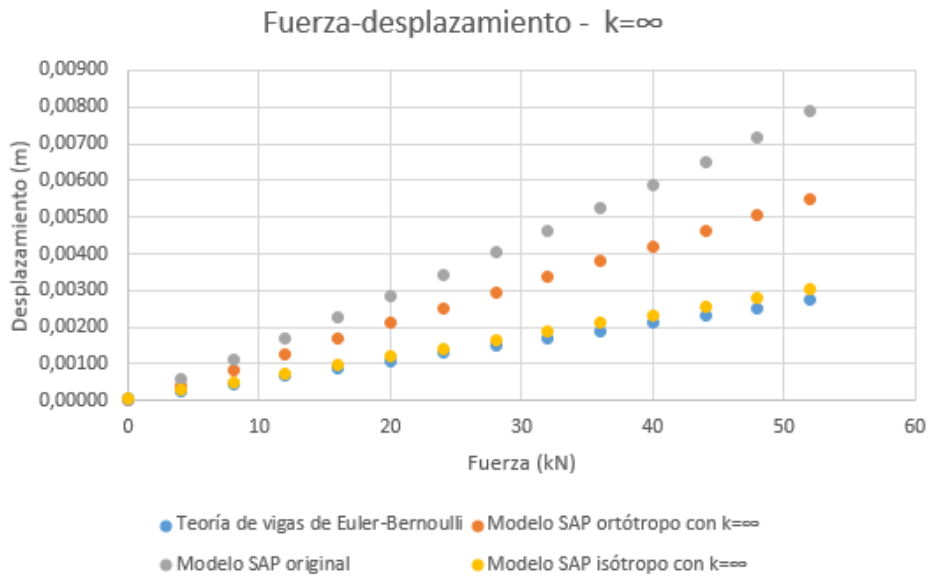


Figura 40: Gráfico fuerza-desplazamiento con $k = \infty$.

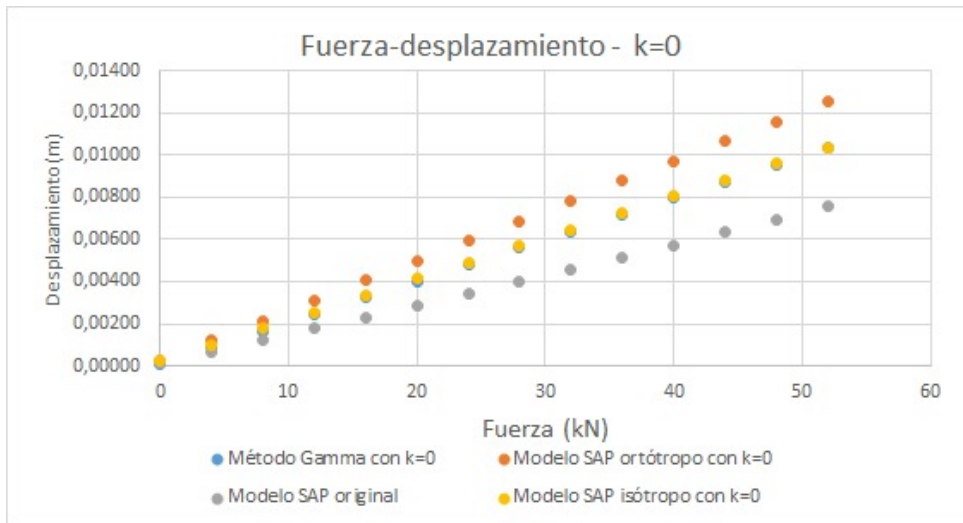


Figura 41: Gráfico fuerza-desplazamiento con $k = 0$.

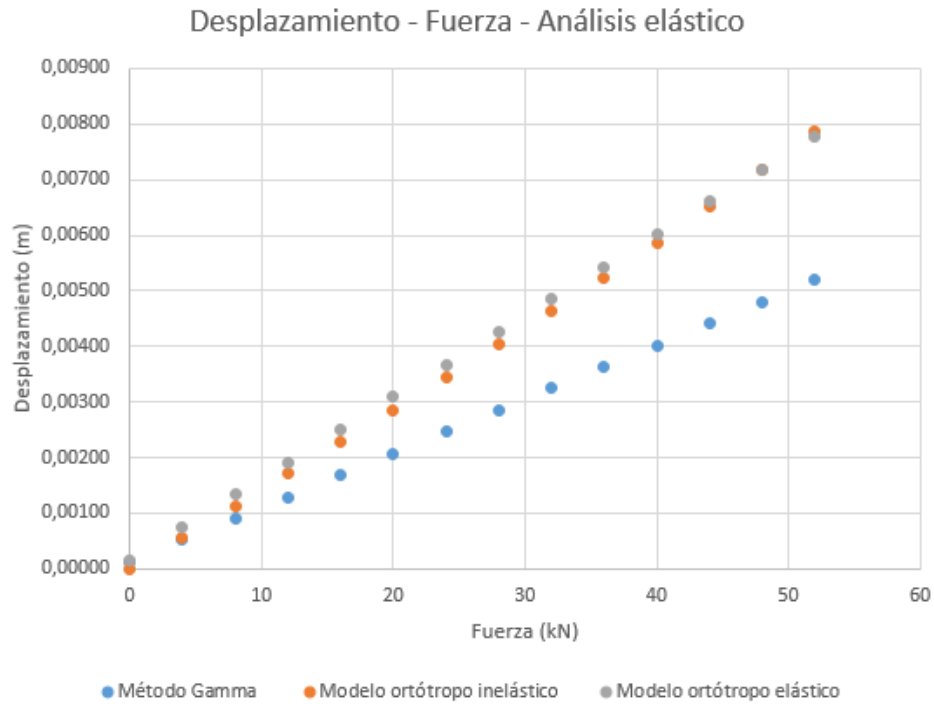


Figura 42: Gráfico fuerza-desplazamiento con análisis elástico.

5.6. Análisis de tensiones

Se realizó un estudio comparativo de las tensiones obtenidas por el modelo computacional y aquellas que propone el Método Gamma. En la [Figura 43](#) y la [Figura 44](#) se puede ver la distribución de tensiones a las cuales están sometidos el hormigón y la madera respectivamente para una carga de 40 kN.

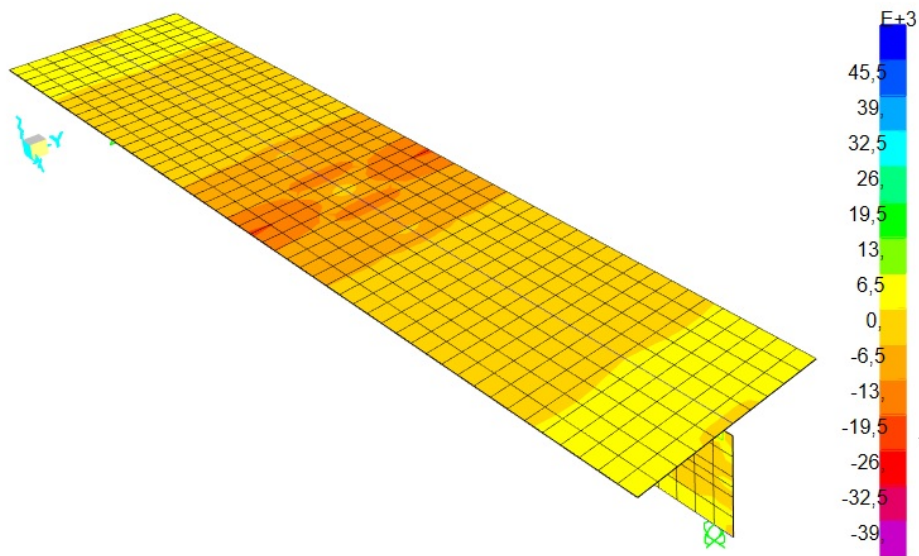


Figura 43: Tensiones S11 en el hormigón en kPa.

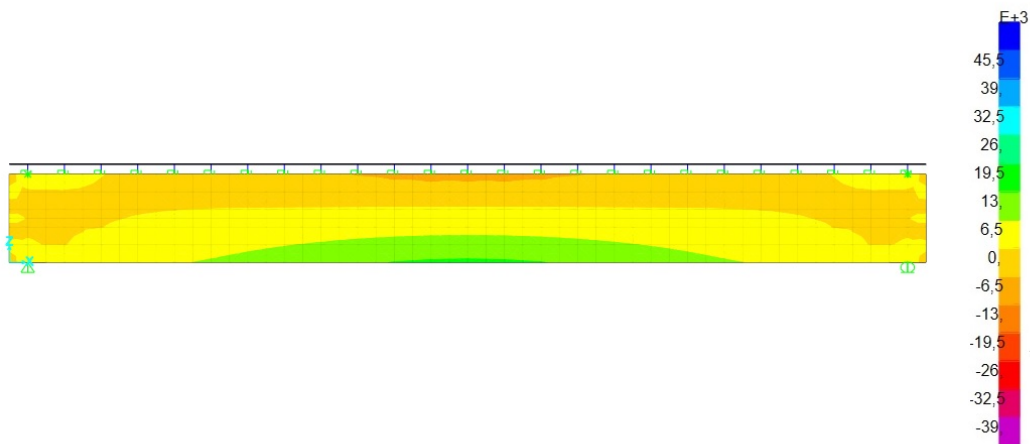


Figura 44: Tensiones S11 en la madera en kPa.

Se consideraron dos estados de carga: con la carga permanente (DEAD) y con una sobrecarga puntual de 40 kN (DEAD+40kN), para estudiar un primer caso con carga uniformemente distribuida y el segundo con carga puntual (la cual no entra en las hipótesis del Método Gamma).

5.6.1. Tensiones en el hormigón

Para estudiar las tensiones en el hormigón, se consideraron los resultados de los modelos con tornillos y varillas respectivamente, así como los modelos con la madera definida como material isótropo y como material ortótropo. Estos resultados se comparan con el

Método Gamma (según la [Ecuación 5](#) y la [Ecuación 6](#)).

En la [Tabla 30](#) y la [Tabla 31](#) se pueden ver los resultados obtenidos para los modelos de la probeta con tornillos.

Tabla 30: Tensiones en modelo isótropo con tornillos.

DEAD		
$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
-192,57	-173,14	11 %
$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
47,67	28,62	67 %
DEAD + 40 kN		
$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
-9061,19	-12920,06	30 %
$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
2243,16	7760,99	71 %

Tabla 31: Tensiones en modelo ortótropo con tornillos.

DEAD		
$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
-192,57	-166,47	16 %
$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
47,67	31,18	53 %
DEAD + 40 kN		
$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
-9061,19	-13825,13	34 %
$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
2243,16	9133,71	75 %

En la [Tabla 32](#) y la [Tabla 33](#) se pueden ver los resultados obtenidos para los modelos de la probeta con varillas.

Tabla 32: Tensiones en modelo isótropo con varillas.

DEAD		
$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
-189,09	-180,03	5 %
$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
34,03	25,30	35 %
DEAD + 40 kN		
$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
-8897,52	-14098,03	37 %
$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
1601,26	8273,84	81 %

Tabla 33: Tensiones en modelo ortótropo con varillas.

DEAD		
$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
-189,09	-202,12	6 %
$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
34,03	50,96	33 %
DEAD + 40 kN		
$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 + \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
-8897,52	-18850,65	53 %
$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - Método Gamma	$\sigma_1 - \sigma_{m1}$ (kPa) - SAP	
1601,26	13036,27	88 %

Si bien, para la carga muerta (DEAD) se observan diferencias entre las tensiones obtenidas a partir de los modelos computacionales y las halladas con el modelo teórico, al aumentar la carga puntual la diferencia entre los resultados obtenidos aumenta significativamente. Esto se puede deber a que una de las hipótesis del Método Gamma es que se aplican cargas cuyo momento varía sinusoidalmente o parabólicamente, lo cual no se cumple al aplicar la carga puntual.

5.6.2. Tensiones en la madera

Por otro lado, se estudió la distribución de tensiones en la madera obtenida en el modelo computacional. Esta se comparó con los valores planteados por el Método Gamma, asumiendo una distribución lineal de tensiones en la madera.

Los resultados para cada estado de carga se pueden ver en la [Figura 45](#) y en la [Figura 46](#) para la probeta con tornillos y en la [Figura 47](#) y la [Figura 48](#) para el caso con varillas.

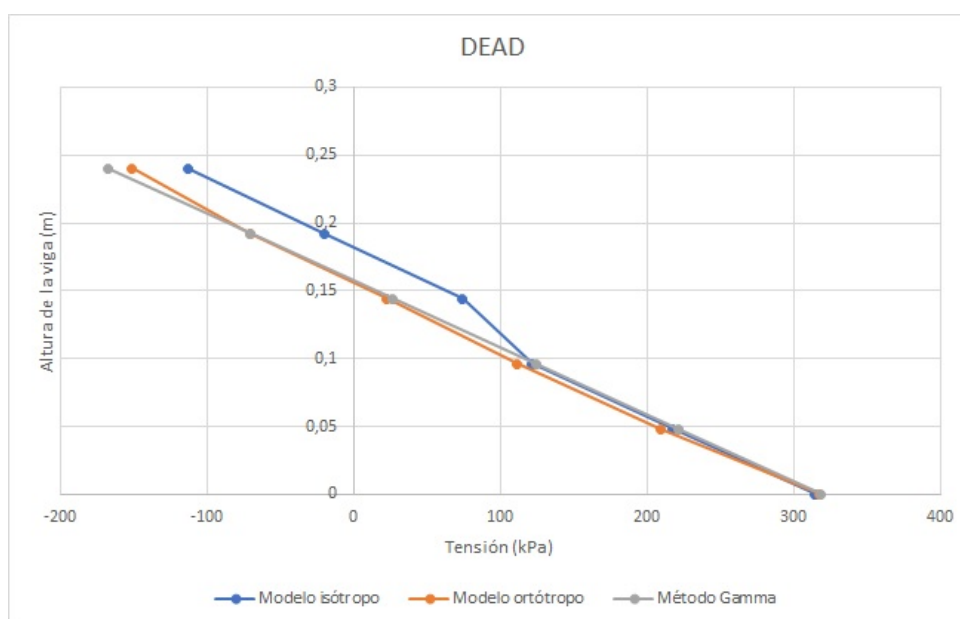


Figura 45: Distribución de tensiones en la madera con tornillos.

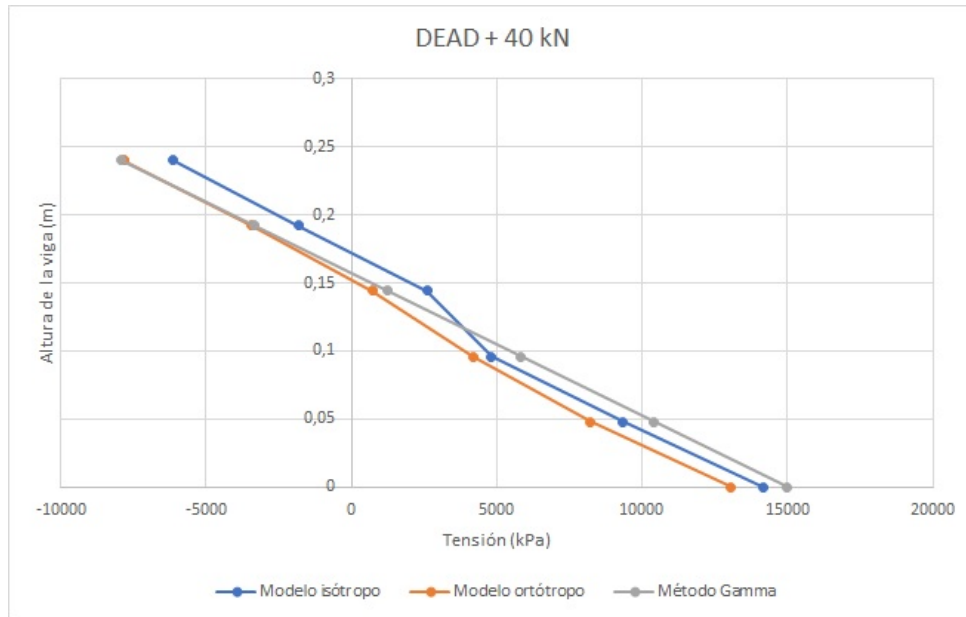


Figura 46: Distribución de tensiones en la madera con tornillos.

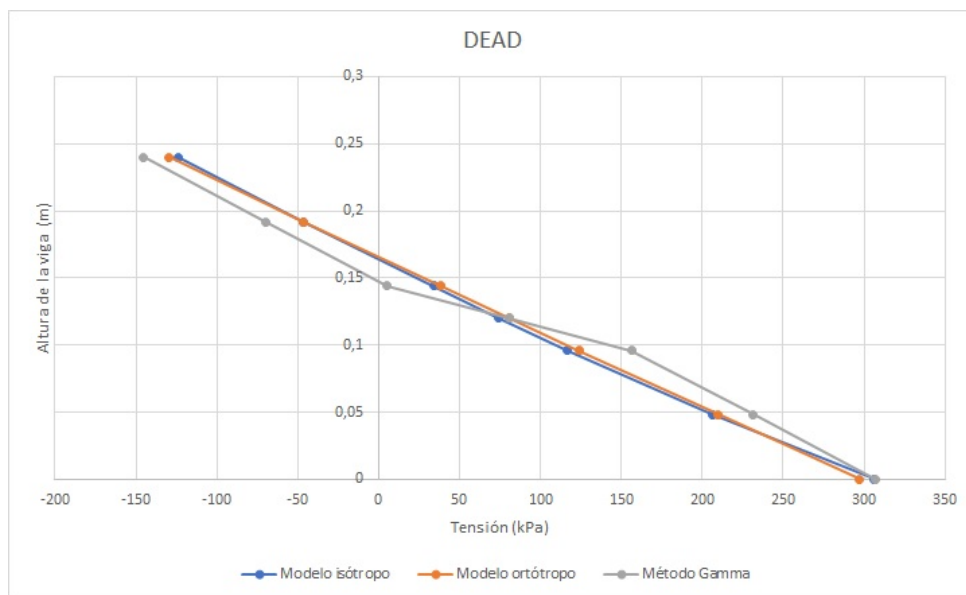


Figura 47: Distribución de tensiones en la madera con varillas.

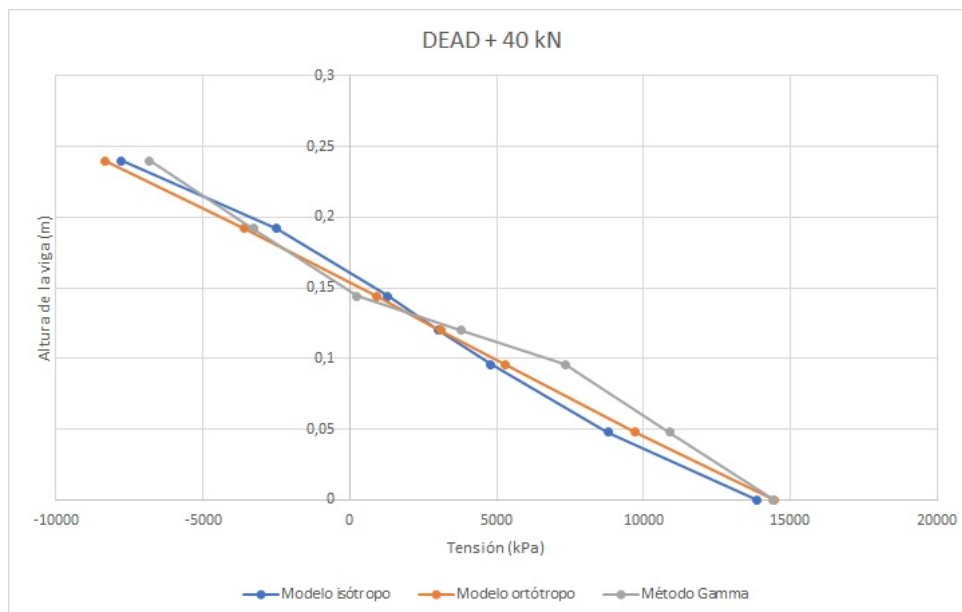


Figura 48: Distribución de tensiones en la madera con varillas.

Se puede observar que tanto en el modelo isótropo como en el ortótropo, para ambos estados de carga, se obtienen tensiones muy similares al Método Gamma. Por lo tanto, se puede concluir que las tensiones propuestas por el Eurocódigo 5 (UNE-EN-1995-1-1, 2006) son una aproximación razonable al comportamiento del material y que la distribución de tensiones en la madera es aproximadamente lineal.

5.7. Análisis de Resultados

En base a los resultados anteriores, se puede afirmar que el Método Gamma da resultados más próximos al comportamiento real de la estructura cuando el modelo cumple con las hipótesis de este método, en particular las condiciones de carga.

En aquellas estructuras que no se ajustan enteramente a las hipótesis y que tienen características más complejas, es más conveniente el uso de un modelo de elementos finitos, como el realizado en el software SAP2000. Además, cabe evaluar la posibilidad de usar un modelo tridimensional con elementos de área o si alcanza con un modelo de barras bidimensional que arroje resultados próximos.

Por último, en la [Subsección 5.5](#) se observó que las deformaciones obtenidas por el Método Gamma coincidían con aquellas del modelo computacional que representaba a la madera como material isótropo. Se concluyó que el Método Gamma trata a la madera como material isótropo, no contemplando las deformaciones por corte características de este material.

Al momento de diseñar una estructura real, como el entrepiso, esto puede llegar a ser un factor limitante en los Estados Límites de Servicio. En esos casos se deberá contemplar

las deformaciones por corte, pudiendo ser estas considerables. En la [Subsección 5.5](#) se destaca que a medida que aumenta la carga, este efecto se ve incrementado.

6. Conclusiones

Se cumplió el objetivo de estudiar el comportamiento a flexión de vigas compuestas madera-hormigón con madera de origen nacional, considerando el ejemplo de una probeta de laboratorio y de un entrepiso en condiciones reales. Además, se compararon los resultados del modelo teórico con aquellos de un modelo computacional para validar el Método Gamma.

En base a los resultados del modelo computacional, se concluye que el resultado del Método Gamma es más próximo al modelo de la madera definida como material isótropo que al modelo original. Esto significa que el Método Gamma no contempla la deformación por corte, tratando a la madera como si fuera un material isótropo.

Por otro lado, al estudiar la distribución de tensiones en el hormigón, se halló que los resultados del Método Gamma fueron muy distintos a aquellos del modelo computacional, incrementándose significativamente al aplicar una carga puntual. Una posible razón es que el Método Gamma se debe aplicar en vigas con cargas con momento distribuido sinusoidal o parabólicamente, excluyendo las cargas puntuales.

La distribución de tensiones en la madera, en cambio, dio resultados muy similares en el modelo teórico y en el computacional, validando así las fórmulas propuestas en el Eurocódigo 5 (UNE-EN-1995-1-1, 2006).

En cuanto al análisis de colaboración, se tiene que la rigidez eficaz de la sección compuesta dependerá en gran medida de las dimensiones de la viga y las características de los conectores a colocar. Al momento de diseñar, sería interesante considerar como definir estas variables para disminuir los costos y tener el mayor índice de colaboración posible, optimizando así el comportamiento de la viga.

Al momento de elegir qué conector usar, concluimos que los tornillos tienen mayor facilidad constructiva y resistencia. Por otro lado, las varillas tienen mayor disponibilidad en el mercado local y resultan una opción más económica con buena resistencia. La elección final dependerá principalmente de las dimensiones del proyecto y la posibilidad de trabajar con mano de obra especializada.

Tras estudiar la bibliografía disponible, se encontraron numerosas investigaciones sobre compuestos madera-hormigón, mostrando resultados exitosos del uso de este tipo de estructuras en otros países. Es fundamental el desarrollo de investigaciones con producto nacional para adquirir experiencia y conocimiento teórico sobre su comportamiento estructural. Solo así se podrá impulsar el uso de compuestos madera-hormigón, con todas las ventajas que conllevan: el impacto ambiental, la rapidez de ejecución y la posibilidad de reparar estructuras antiguas de madera.

Esperamos que las investigaciones sobre este tema generen un cambio en la mentalidad de los profesionales al momento de diseñar una estructura y que podamos seguir los pasos de los países europeos y norteamericanos donde ya es la norma elegir este tipo de materiales

renovables, autóctonos y eficientes.

7. Referencias bibliográficas

Blass H.J., Aune, P., Choo B.S., Gortlacher R., Griffiths D.R., Hilson B.O., Racher P., Steck G. (1995). Timber Engineering STEP. Almere, Países Bajos.

Código Técnico de la Edificación (2006). Norma, Ministerio de Fomento, Gobierno de España, Madrid, España.

Domenech, L., Durán, M., Contreres, A., Baño, V. (2019). Comportamiento a corte de compuestos madera - hormigón fabricados de madera laminada encolada uruguaya. Montevideo, Uruguay.

EHE (2008). Instrucción de Hormigón Estructural. Norma, Ministerio de Fomento, Gobierno de España, Madrid, España.

Faggiano, B., Marzo, A., Mazzolani, F.M., Calado, L.M. (2009). Analysis of rectangular-shaped collar connectors for composite timber-steel-concrete floors. Lisboa, Portugal.

Feldmann, M., Heinemeyer, C., Volling, B.(2020). Design Guide for Floor Vibrations. Arcelor Mittal, Ciudad de Luxemburgo, Luxemburgo.

Fournier, R. (2008). Construcción sostenible y madera: realidades, mitos y oportunidades. San José, Costa Rica.

García Messeguer, A., Morán Cabré, F., Arroyo Portero, J.C. (2009). Jiménez Montoya, Hormigón Armado. 15a edición. Barcelona, España.

Jiang, Y., Hu, X., Hong, W.,Zhang, J., Fanggian, H. (2020). Experimental study on notched connectors for glulam-lightweight concrete composite beams. Wuxi, China.

Lacis, R. (2015). Circular hollow section connector in timber-concrete composite structural elements. Riga, Latvia.

Miotto, J.L., Alves Dias, A. (2010). Glulam-concrete Composites: Experimental Investigation into the Connection System. San Pablo, Brasil.

Ministerio de ganadería, agricultura y pesca. (2018). Superficie efectiva en hectáreas por uso forestal y especies por departamento. Montevideo, Uruguay.

N'H International (2021). www.neueholzbau.ch

Revista Galería (2020). <https://galeria.montevideo.com.uy/Revista-Galeria/El-detras-de-escena-de-las-obras-del-Museo-de-Arte-Americano-un-contenedor-de-suenos-uc775577>

Romero, F. (2018) En madera, otra forma de construir: el material constructivo sostenible del siglo XXI. Madrid, España.

Rothoblaas (2019). Connector for Timber Concrete floors. Cortaccia, Italia.

TRADA (2021). www.trada.co.uk

UNE-EN ISO 898-1 (1999). Características mecánicas de los elementos de fijación fabricados de aceros al carbono y de aceros aleados. Parte 1: Pernos, tornillos y bulones. Norma, Comité Europeo de Normalización, Bruselas, Bélgica.

UNE-EN-1990 (2003). Eurocódigo 0. Bases de cálculo de estructuras. Norma, Comité Europeo de Normalización, Bruselas, Bélgica.

UNE-EN-1995-1-1 (2006). Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Norma, Comité Europeo de Normalización, Bruselas, Bélgica.

UNE-EN-14080 (2013). Eurocódigo . Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Norma, Comité Europeo de Normalización, Bruselas, Bélgica.

UNIT 33 (1991). Cargas a utilizar en el proyecto de edificios. Norma, Comité de Cálculo de Estructuras. Montevideo, Uruguay.

Universidad ORT (2017). <https://www.ort.edu.uy/43058/32/la-madera-construye-su-futuro-en-uruguay.html>