



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

LA CASA URUGUAYA: PROYECTO EDUCATIVO DE CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA EFICIENTE DE MADERA

LA CASA URUGUAYA: AN EDUCATIONAL CONSTRUCTION PROJECT OF AN EFFICIENT TIMBER HOUSE

Laura Moya (P)(1); Abel Vega (2); Leandro Domenech (3); Stephany Arrejuria (4); Carlos Mazzei(5); Vanesa Baño (6)

(1) PhD Prof. Adjunto, Facultad de Arquitectura Universidad ORT Uruguay, Montevideo, Uruguay

(2) Dr. Prof visitante. IET, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

(3) Ing Civil, Prof. Asistente, IET, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

(4) Estudiante, Facultad de Arquitectura Universidad ORT Uruguay, Montevideo, Uruguay

(5) Estudiante, IET, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

(6) Dr. Prof. Adjunto, IET, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

Dirección para correspondencia: moya@ort.edu.uy; (P)

Resumen

El proyecto La Casa Uruguay (LCU) se enmarca en el concurso internacional Solar Decathlon 2015, que consiste en una competencia de proyectos de viviendas de interés social diseñados y construidos por grupos universitarios de Latinoamérica, con el objetivo de promover el uso de tecnologías innovadoras y la eficiencia energética. LCU fue diseñada y construida con madera de *Eucalyptus grandis* uruguayo, evitando el empleo de materiales con alta huella de carbono, y toda la energía necesaria para su funcionamiento proviene del sol. El paquete de documentos técnicos exigido por la organización Solar Decathlon 2015, incluyó además de los típicos recaudos gráficos y memorias constructivas y de cálculo, la certificación de calidad de la madera utilizada. Al no existir en Uruguay madera certificada, se procedió a analizar una muestra de piezas de tamaño estructural extraída del lote empleado en LCU. Cincuenta piezas fueron clasificadas visualmente, evaluado su contenido de humedad y ensayadas a flexión en 4 puntos. Fueron calculados los valores característicos y medios de módulo de elasticidad, resistencia a flexión y densidad y estimada la clase resistente. Los resultados obtenidos permitieron asignar el lote de piezas evaluadas a las clases de resistencia indicadas en la norma IRAM 9662-2, y utilizar dichos valores para el cálculo estructural de LCU.

Palabras-clave: vivienda, Eucalyptus grandis uruguayo, caracterización estructural, clase resistente

Abstract

La Casa Uruguay (LCU) is a project in the context of the international competition Solar Decathlon 2015, that consists of designing and building energy efficient houses by groups of university students. The technical package required not only detailed drawings and manuals but also material specifications. LCU was fully designed and build with Uruguayan *Eucalyptus grandis* timber. Since there is no strength graded timber in Uruguay, characterization of the material was required. Fifty *Eucalyptus grandis* structural beams were visually graded and evaluated their moisture content and mechanical properties (4-point bending test). Characteristic and mean values of modulus of elasticity, bending strength and density were determined and the corresponding strength class was assigned. The results allow to assign the set of pieces evaluated to the strength classes given in IRAM 9662-2 standard, and use those values for structural design of LCU.

Keywords: timber house, Uruguayan Eucalyptus grandis, structural characterization, strength class.



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto La Casa Uruguaya (LCU) se enmarca en la competencia internacional Solar Decathlon (SD 2015), realizada en Cali a fines de 2015. Consiste en una competencia entre propuestas de viviendas diseñadas y construidas por grupos de estudiantes, egresados y docentes de universidades latinoamericanas y europeas. El objetivo del SD 2015 fue la promoción del uso de tecnologías innovadoras y la eficiencia energética en viviendas de interés social, auto-sustentables con energía solar renovable y con huella de carbono mínima, factibles de ser construidas en serie. La competencia SDC 2015 incluyó la construcción completa de la vivienda en el país de origen, su desarmado y montaje en el predio de la Sede Meléndez de la Universidad del Valle, en Cali, donde junto a otras 14 viviendas competidoras, fueron evaluadas por expertos internacionales en relación a la eficiencia energética, proyecto arquitectónico, confort, materiales sustentables, etc. Un aspecto clave en la competencia fue el plazo de ejecución de la obra, ya que las viviendas debieron ser construidas y estar en condiciones para ser habitadas, en un plazo máximo de 10 días. Estas condiciones determinaron la elección de un sistema constructivo de entramado ligero prefabricado, con madera proveniente de plantaciones renovables.

LCU fue construida con madera y paneles contrachapados de *Eucalyptus grandis* de producción nacional. El paquete de documentos técnicos exigido por la organización SD 2015, incluyó además de los recaudos gráficos y memorias constructivas y de cálculo, la certificación de calidad de la madera utilizada. Al no existir en Uruguay madera certificada, se procedió a analizar y caracterizar una muestra de piezas de tamaño estructural extraída del lote empleado en LCU. Los objetivos de este trabajo incluyeron la determinación de las propiedades estructurales de madera aserrada de *Eucalyptus grandis* y el diseño y cálculo estructural de LCU.

El diseño y la construcción de la casa estuvo a cargo de un grupo interdisciplinario de estudiantes y docentes de la Universidad ORT Uruguay y la empresa constructora de viviendas de madera Ñandé. Para el cálculo estructural se contó con la colaboración de docentes y estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

2. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo se dividió en dos partes: una, correspondiente a los ensayos experimentales de la madera para obtener las propiedades mecánicas para el cálculo estructural; y otra, correspondiente al diseño y cálculo estructural de LCU en base a dichas propiedades y utilizando normativa nacional e internacional.

2.1. Metodología experimental

Con el fin de conocer las propiedades estructurales de *E. grandis* uruguayo un lote de 51 piezas fue caracterizado obteniéndose los valores característicos de rigidez y resistencia de flexión y densidad fueron obtenidos de acuerdo a EN 384 (CEN 2010).

Previo a los ensayos mecánicos, las vigas de *E. grandis* fueron clasificadas visualmente de acuerdo a IRAM 9662-2 (IRAM 2005). Esta norma contempla dos clases visuales de calidad: C1 y C2, con criterios limitantes distintos.

Los ensayos de flexión en 4 puntos fueron realizados según EN 408 (CEN 2011), midiendo flecha en el punto medio según la dirección longitudinal según el esquema de la Figura 1.

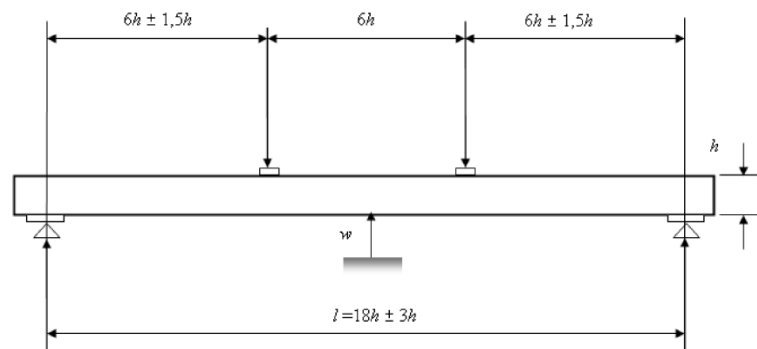


Figura 1. Ensayo de flexión en 4 puntos según EN 408

El módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) y la resistencia a flexión (f_m) de cada pieza fueron determinados subsecuentemente. Adicionalmente, fueron extraídas muestras para la determinación de la densidad (ρ) y del contenido de humedad. El módulo de elasticidad y la resistencia a flexión fueron corregidos al 12% de contenido de humedad y se calcularon los valores característicos de acuerdo a EN 384 (CEN 2010).

A partir del módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) se calculó el módulo de elasticidad local ($E_{0,m}$) el cual define el valor característico de elasticidad, de acuerdo a (1):

$$E_{0,m} = E_{m,g} \cdot 1,3 - 2690 \quad (1)$$

El valor característico de la resistencia a flexión se determinó según (2):

$$f_{m,k} = f_{05} \cdot k_s \cdot k_v \quad (2)$$

donde f_{05} es el valor del 5° percentil de la resistencia a flexión, $k_v = 1$ (por estar clasificada visualmente) y $k_s = 0,8$ (corrección por tamaño de muestra)

Además, se aplicó la corrección por altura de sección, dividiendo la resistencia a flexión por k_h :

$$k_h = (150/h)^{0,2} \quad (3)$$

Las otras propiedades mecánicas se obtuvieron mediante las ecuaciones empíricas de EN 384 (CEN 2010).

2.2. Diseño y cálculo estructural

2.2.1. Diseño

El diseño fue realizado por estudiantes de Arquitectura de la Universidad ORT Uruguay, bajo supervisión docente. Las imágenes del presente trabajo fueron elaboradas con el software de diseño de estructuras de madera CADWORK.



Figura 1. Diseño de La Casa Uruguay

2.2.2. Cálculo estructural

Las acciones sobre la edificación consideradas para el cálculo fueron:

Carga Permanente (CP): 0,42 kN/m²

Sobrecarga de uso uniforme (SM): 2 kN/m²

Viento sobre las paredes: 0,64 kN/m²

Viento (Vs): 0,52 kN/m²

El cálculo estructural fue realizado de acuerdo a los requisitos generales para el diseño de edificaciones del Eurocódigo 5, EN 1995-1-1 (CEN 2006), utilizado para la obtención de esfuerzos software CYPE y SAP2000.

El comportamiento de LCU frente a las acciones del viento fue evaluado mediante un modelo tridimensional basado en el método de los elementos finitos (MEF) generado en SAP2000. El objetivo del modelo fue verificar que los desplazamientos horizontales resultan tolerables bajo las acciones del viento.

El modelo MEF mostrado en la Figura 2, simula el comportamiento elástico lineal de la casa en tres dimensiones bajo la acción del viento en las dos direcciones perpendiculares. Los componentes del entramado ligero (montantes, soleras, dinteles, etc) fueron modelados mediante elementos de línea, mientras que los paneles de contrachapado mediante elementos de área *Shell Thick*. El mallado se realizó buscando la mayor uniformidad posible, incluso en zonas de dinteles. LCU se consideró completamente apoyada en la fundación y todas las uniones madera-madera se supusieron articuladas. Los materiales se introdujeron de manera de simular las propiedades presentadas más adelante, en el capítulo de resultados.

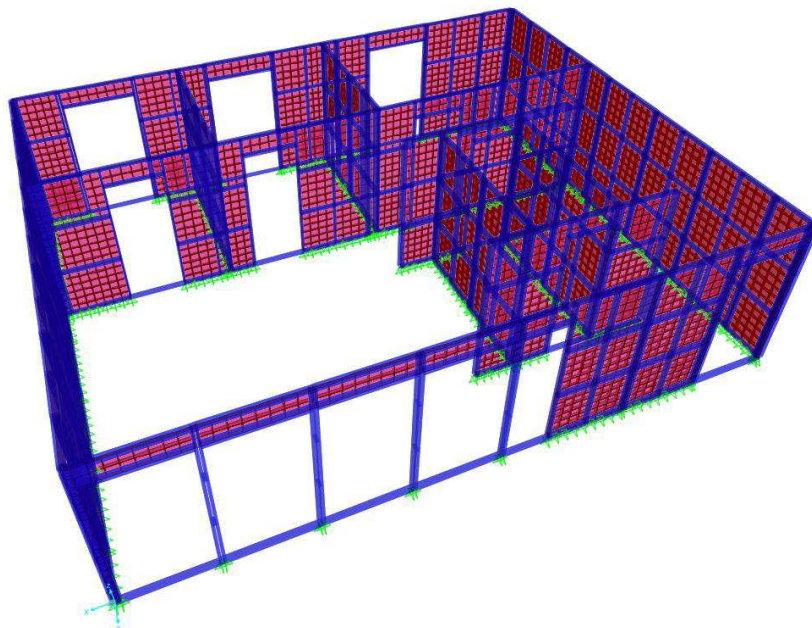


Figura 2. Modelo MEF realizado en SAP2000

Los resultados muestran que el desplazamiento horizontal máximo a la altura de la cubierta es bastante inferior a 1 mm en las dos direcciones, por lo cual se verifica la limitación recomendada en la bibliografía de que el desplazamiento horizontal sea menor a la altura del edificio sobre 300 (Argüelles et al 2000; CEN 2006). La Figura 3 presenta como ejemplo, los desplazamientos para una de las fachadas de LCU. El dimensionado fue realizado en base a hojas de cálculo propias.

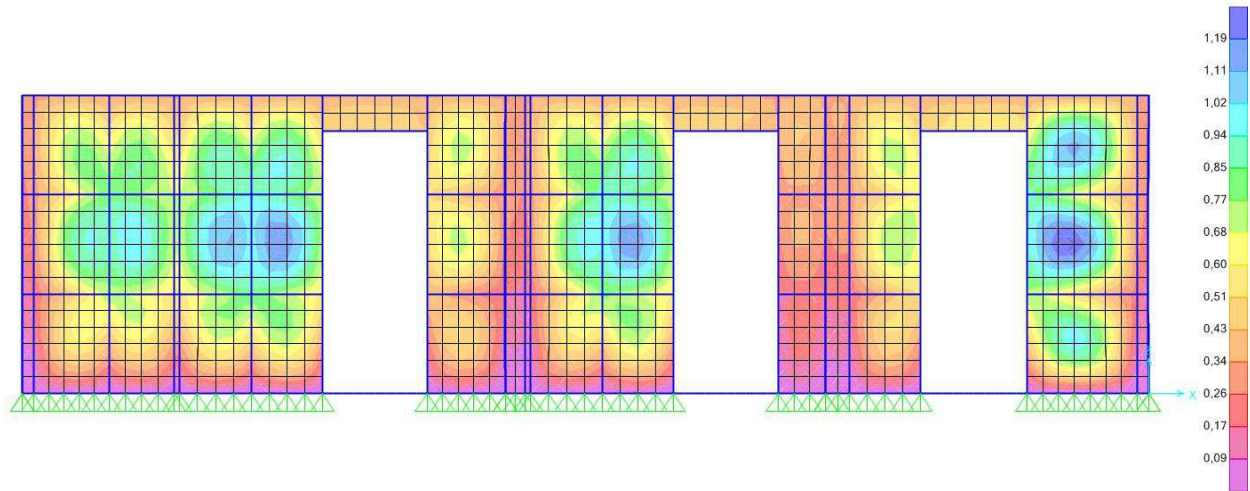


Figura 3. Desplazamientos para la fachada oeste

3. RESULTADOS

3.1. Propiedades mecánicas de la madera de *Eucalyptus grandis*

La Tabla 1 muestra los valores medios y característicos de resistencia, rigidez y densidad del lote evaluado, para cada clase visual.

Tabla 1. Valores medios y característicos de resistencia, rigidez y densidad del lote evaluado

	Calidad visual (IRAM 9662-2)				Todas
	C1	C2	C1+C2	R	
n	12	20	32	19	51
%	24	39	63	37	100
E_{0,m}	13,00	13,39	13,24	12,89	13,11
f_{m,medio} (N/mm²)	52,29	46,44	48,64	43,59	46,75
f_{m,k}	28,61	20,71	20,81	19,6	20,28
ρ_{media} (kg/m³)	484,03	481,18	482,25	489,13	484,81
ρ_k (kg/m³)	425,42	434,50	429,90	428,55	426,80

Considerando que las piezas clasificadas C1 y C2 son válidas estructuralmente, y agrupando las dos clases visuales en una, los valores de cálculo corregidos de acuerdo a EN 384 (CEN 2010), son los indicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de cálculo de la madera de *Eucalyptus grandis* de procedencia uruguaya

Propiedades de resistencia (N/mm ²)						Propiedades de rigidez (kN/mm ²)			Densidad (kg/m ³)	
f _{m,k}	f _{t,0,k}	f _{t,90,k}	f _{c,0,k}	f _{c,90,k}	f _{v,k}	E _{0,m}	E _{90,m}	G _m	ρ _m	ρ _k
20,81	12,49	0,6	19,60	6,45	4,0	13,24	0,88	0,83	485	430

3.2. Dimensionado de los elementos estructurales

3.2.1. Dimensionado del forjado de piso

El forjado de piso se conforma con módulos de 1220 x 2440 mm, contruidos con tres tirantes, separados cada 610 mm, una solera superior y otra inferior, un cortafuego y dos placas de contrachapado, una por la cara superior de 18 mm y otra por la cara inferior de 12 mm. Estos módulos apoyan sobre vigas principales.

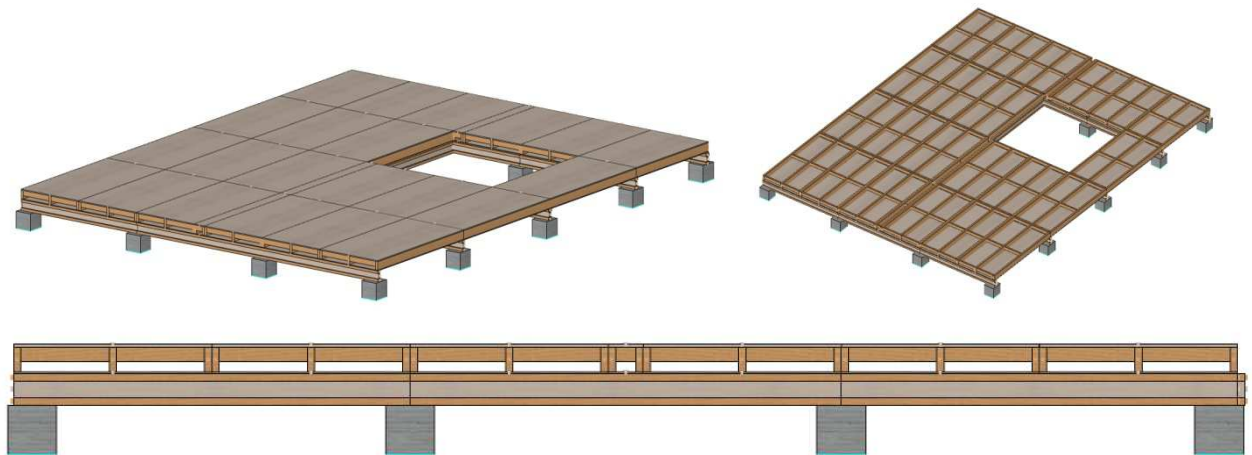


Figura 4. Detalle de los elementos que componen el forjado de piso

Tabla 3. Dimensionado de los componentes del forjado de piso

Elemento	b (mm)	h (mm)
Vigas principales	89	190
Tirantes secundarios	36,5	89
Cortafuegos	36,5	
Contrachapado superior		18
Contrachapado inferior		12

3.2.2. Dimensionado de las paredes exteriores e interiores

Las paredes se conforman con módulos de 1220 x 2440 mm, contruidos con tres montantes, separados cada 610 mm, una solera superior y otra inferior, un cortafuego y dos placas de contrachapado de 12 mm c/u por la cara externa y otra de 12 mm por la cara interna.

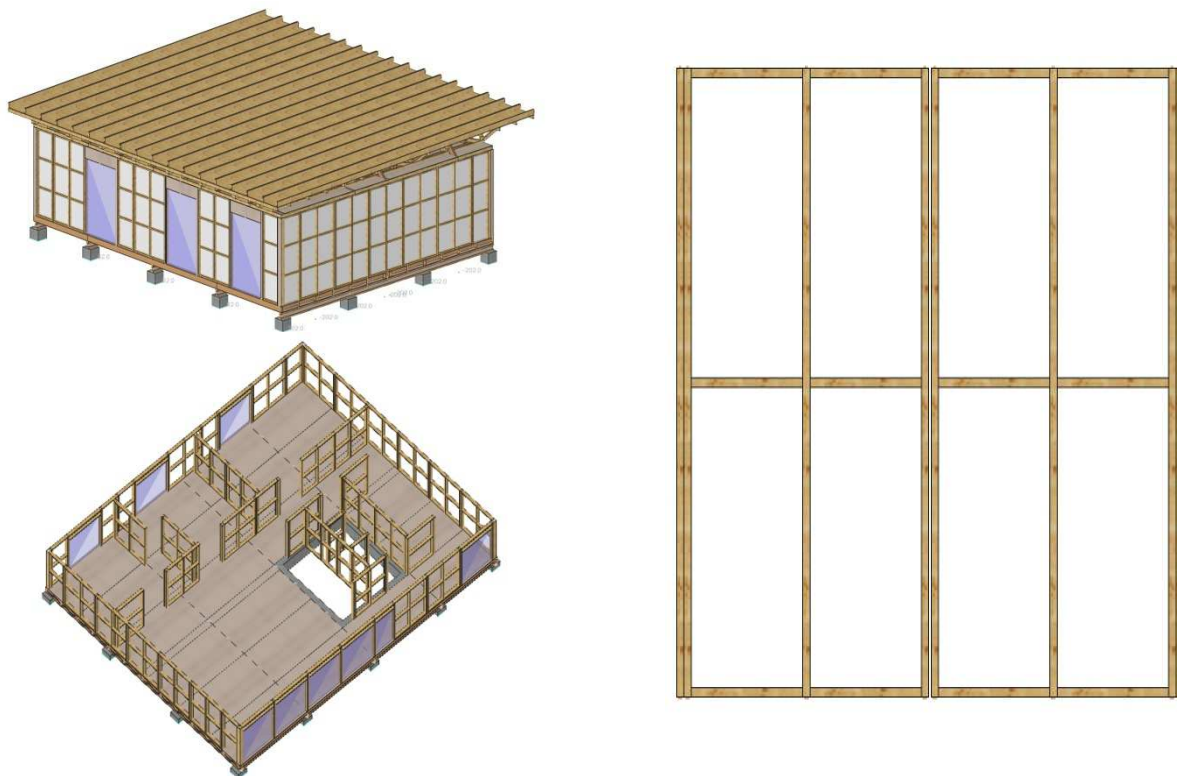


Figura 5. Paredes exteriores e interiores

Tabla 4. Dimensionado de las paredes

Elemento	b (mm)	h (mm)
Montantes (c/610 mm)	36,5	89
Soleras (superior e inferior)	89	36,5
Cortafuego	89	36,5

3.2.3. Dimensionado de la cubierta

La estructura de la cubierta consiste en una serie paneles en forma de “U” de 640 mm de ancho y 2440 mm de longitud, compuestos por dos tirantes (23 x 150 mm) y contrachapado de 15 mm, que apoyan

sobre tirantes secundarios (45 x 45 mm) cada 1220 mm, y éstos sobre cerchas separadas cada 1220 mm. Las cerchas van arriostradas ortogonalmente por dos vigas reticuladas y coplanares con ellas.



Figura 6. Estructura cubierta superior

Tabla 5. Dimensionado de las cerchas de la cubierta

Elemento	b (mm)	h (mm)
Cordón superior	2 (36,5)	89
Cordón inferior	2 (36,5)	89
Diagonales	36,5	89
Verticales	36,5	89

3.3. Análisis de uniones

Las uniones en las estructuras de entramado ligero generalmente se resuelven con clavos lisos y clavadora. Este procedimiento resulta óptimo en la mayoría de los casos ya que permite reducir el tiempo de construcción y la necesidad de contar con mano de obra especializada, por lo que se logra una alta productividad (Sánchez et al. 1995). Como contrapartida, muchas veces las uniones se realizan sin un cálculo adecuado y necesario del punto singular. Un punto de interés resulta la unión entre cerchas de la cubierta y paredes. Esta unión podría requerir un número elevado de clavos y resultar inviable y por ello sería necesario proponer otra solución estructural. En el caso de LCU, debido a sus características geométricas, el viento de succión es la acción predominante sobre la cubierta, siendo la unión entre las cerchas y las paredes un punto clave en el diseño.

A modo de ejemplo, se realizó el cálculo estructural de una unión madera-madera (entre cerchas de la cubierta y montantes de las paredes), unida mediante pernos, según las ecuaciones de Johansen del Eurocódigo 5, parte 1-1 (CEN 2006). La unión, esquemáticamente representada en la Figura 7, se diseñó para una fuerza de 15 kN debida a la reacción en el apoyo que provoca la succión del viento en estado límite último. Los resultados para resolver la unión con clavos y con pernos se muestran en la Tabla 6.

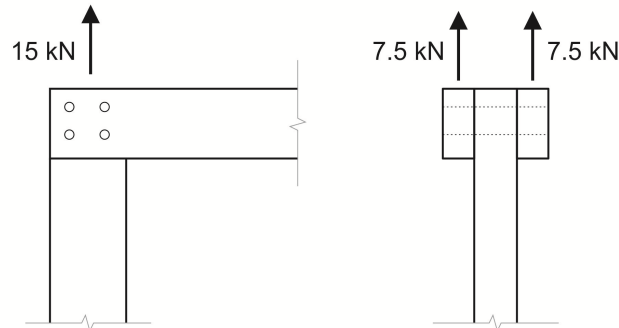


Figura 7. Representación esquemática de la unión madera-madera

Tabla 6. Resultados para la unión madera-madera

Elementos metálicos	Diámetro (mm)	Cantidad necesaria
Clavos	2,5	>50
Tornillos	5	13
Pernos	8	4
Pernos	10	3

Dado que las piezas tienen una altura de 89 mm, ninguna de las soluciones verifica los valores mínimos de las separaciones entre elementos metálicos y las distancias a los bordes y a las testas establecidos en el Eurocódigo 5, parte 1-1 (CEN 2006). Por lo tanto, resulta necesaria una unión mediante un herraje metálico entre las cerchas de la cubierta y los montantes.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el diseño de una vivienda de entramado ligero fabricada con madera de *Eucalyptus grandis* uruguayo. El trabajo incluyó la determinación de las propiedades estructurales de la madera aserrada de acuerdo a la normativa europea y el diseño y cálculo de los elementos estructurales para las acciones típicas que inciden en este tipo de edificaciones. Normalmente estas estructuras prefabricadas no contemplan los vientos locales que, en el caso de succión, pasan a ser clave en el diseño.

BIBLIOGRAFÍA

Argüelles, R.; Arriaga, F.; Martínez, J. J. (2000). Estructuras de madera: Diseño y cálculo. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho (AITIM), Madrid

Comité Europeo de Normalización. CEN (2010). UNE-EN 384. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

Comité Europeo de Normalización. CEN (2011). UNE-EN 408. Madera estructural. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid

Comité Europeo de Normalización (CEN) (2006). UNE-EN 1995-1-1: Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera: Parte 1.1: Reglas generales y reglas para edificación. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid

Comité Europeo de Normalización. CEN (2004). UNE EN 13183-1/AC. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

Comité Europeo de Normalización. (2006/A2:2015). UNE EN 1995-1-1 . Eurocódigo 5-Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, Madrid

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2005). IRAM 9662-2. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 2: Tablas de eucalipto (*Eucalyptus grandis*). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires

Sánchez, J. E.; Arriaga, F.; Arriaga, C.; González, M. A.; Peraza, F.; Rodríguez, M. A. (1995). Casas de madera. Sistemas constructivos a base de madera aplicados a viviendas unifamiliares. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho (AITIM), Madrid