

## Conexiones estructurales de madera con técnicas tradicionales de ensamblaje Structural timber connections with traditional assembly techniques

L. Islas-Salazar 

Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

### Resumen

El diseño de conexiones estructurales en madera sin elementos metálicos ha sido fundamental en la construcción tradicional y sigue siendo relevante en la ingeniería moderna. Las uniones como caja y espiga son duraderas, pero su análisis es complejo debido a las propiedades ortotrópicas de la madera y la falta de normativas específicas en México. A pesar de ello, se sugiere que las normativas vigentes pueden adaptarse para incluir estos ensamblajes. El pino es un material estructural común por su resistencia a la compresión, tracción y su durabilidad, además de ser económico y fácil de trabajar. Ejemplos internacionales, como las técnicas japonesas y escandinavas, demuestran que los ensamblajes de madera sin clavos siguen siendo útiles y eficaces en la actualidad. Se proponen conexiones articuladas que permiten absorber deformaciones sin comprometer la estabilidad, ofreciendo una solución funcional y flexible para estructuras de madera en entornos reales.

*Palabras Clave:* Conexiones, Madera, Normativa, Ensamblajes.

### Abstract

The design of timber structural connections without metal elements has been fundamental in traditional construction and is still relevant in modern engineering. Box and tenon connections are durable, but their analysis is complex due to the orthotropic properties of wood and the lack of specific regulations in Mexico. However, it is suggested that existing regulations can be adapted to include these assemblies. Pine is a common structural material because of its compressive strength, tensile strength and durability, as well as being economical and easy to work with. International examples, such as Japanese and Scandinavian techniques, demonstrate that nail-free timber assemblies are still useful and effective today. Hinged connections are proposed to absorb deformations without compromising stability, offering a functional and flexible solution for timber structures in real-world environments.

*Keywords:* Connections, Timber, Regulations, Assemblies

### 1. Introducción

El diseño de conexiones estructurales de madera, especialmente aquellas que no utilizan elementos metálicos, ha sido una técnica central en la construcción tradicional durante siglos y, en la actualidad, sigue siendo relevante en la ingeniería estructural moderna. Estas técnicas se destacan no solo por su durabilidad y estética, sino también por su capacidad para enfrentar las exigencias estructurales contemporáneas, como las cargas sísmicas y el respeto al patrimonio arquitectónico (PORTAL D'OFERTA TECNOLÒGICA, 2021). A nivel global, diversos estudios han demostrado que estas conexiones, como el ensamblaje caja y espiga, pueden ser efectivas para absorber deformaciones sin

comprometer la estabilidad estructural (García Mora & Moreno Jiménez, 2021) (Ministry of Foreign Affairs of Japan, 2022)

El análisis de las uniones en madera se enfrenta a retos particulares debido a la naturaleza ortotrópica del material, lo que significa que sus propiedades mecánicas varían según la dirección de la carga aplicada. Esta complejidad geométrica y material complica la modelación y el diseño estructural. En particular, los ensambles tradicionales requieren una comprensión detallada de cómo las fibras de la madera interactúan con las fuerzas externas, lo que agrega un nivel de complejidad que no siempre está cubierto por las normativas actuales (Nápoles Padrón, González Carbonell, & Olivares Díaz, ResearchGate, 2015). Esta complejidad se acentúa porque a pesar de la amplia tradición de uso de conexiones de

\*Autor para la correspondencia: is419859@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: is419859@uaeh.edu.mx (Lizet Islas-Salazar).

madera sin elementos metálicos, las normativas mexicanas, como las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Madera, no incluyen directrices específicas para estos tipos de ensamblajes. Esto contrasta con países como Japón o Suecia, donde estas técnicas están integradas en sus regulaciones de construcción, lo que subraya la necesidad de adaptar la normativa mexicana para incluir estas soluciones sostenibles y efectivas (Federal, 2004) (Morillas, 2018). Además, las conexiones tradicionales no siempre se ajustarían a los métodos de cálculo que se pudieran estandarizar.

Aunque los métodos de elementos finitos han sido empleados para simular el comportamiento mecánico de conexiones estructurales de madera, existen limitaciones en cuanto a esto. La creación de un modelo preciso puede ser complejo y demandar mucho tiempo, especialmente en estructuras con múltiples interacciones entre componentes (Nápoles Padrón, González Carbonell, & Olivares Díaz, ResearchGate, 2015). Además, resulta complicado representar con exactitud materiales que presentan comportamientos no lineales complejos, como la madera.

Este artículo tiene como objetivo analizar dos propuestas distintas de conexiones entre elementos de soporte (columna-viga) que permitan emplear estas uniones tradicionales en un entorno real. Las conexiones fueron diseñadas tomando como base las disposiciones generales de la normativa vigente, aunque estas no especifiquen explícitamente su aplicación a uniones tradicionales. Sin embargo, se plantea que dichas disposiciones podrían adaptarse para este tipo de ensamblajes, permitiendo un diseño más adecuado y funcional para edificaciones de baja y mediana altura.

### 1.1. Conexiones

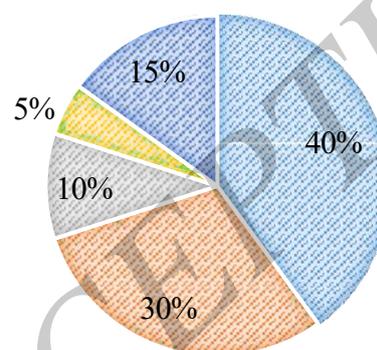
Las conexiones en la construcción de edificaciones son cruciales para el diseño de elementos estructurales, ya que una buena conexión asegura que la estructura funcione de manera segura y estable. Para diversos materiales de construcción, como el acero, el concreto reforzado y la madera, existen secciones específicas que regulan el diseño adecuado de estas conexiones. Sin embargo, en el caso de las conexiones de madera, las Normas Técnicas complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Madera en México no incluyen un apartado específico para las conexiones con ensamblajes tradicionales de madera que no utilizan elementos externos como clavos, pernos, pijas o placas dentadas y perforadas (Federal, 2004).

Este vacío normativo es relevante, ya que las conexiones tradicionales de madera, como las uniones de cola de milano, espiga y mortaja, han demostrado ser altamente efectiva y duraderas a lo largo de la historia (García Mora & Moreno Jiménez, 2021). Estas técnicas no solo preservan la estética y el valor cultural de las construcciones de madera, sino que también pueden ofrecer ventajas en términos de resistencia sísmica y flexibilidad estructural, lo que las convierte en una opción valiosa en contextos donde se requiere adaptabilidad ante cargas dinámicas (Morillas, 2018).

### 1.2. Madera de pino

El pino es una de las especies más empleadas (ver Gráfico 1) en la construcción debido a sus propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión y tracción, lo que lo convierte en un material ideal para elementos estructurales como vigas y columnas. Además de su durabilidad y resistencia a la intemperie y a los insectos, el pino es económico y fácil de trabajar, lo que reduce costos de construcción y lo hace accesible para una amplia variedad de aplicaciones (Valle, 2020) (Construir con Madera, 2024)

■ Pino ■ Abeto ■ Roble ■ Cedro ■ Otras



Gráfica 1. Distribución porcentual de las especies de madera más utilizadas a nivel mundial (Bayucca, 2024)

Algunas de las principales características del pino en aplicaciones estructurales (Tipos de madera, 2024) incluyen:

- Resistencia a la compresión; adecuada para soportar cargas axiales en elementos estructurales como columnas
- Resistencia a la tracción; ideal para elementos sometidos a esfuerzos de tensión como vigas.
- Durabilidad; el pino es resistente a la pudrición y a los insectos, lo que extiende su vida útil en aplicaciones estructurales
- Facilidad de trabajo; es un material fácil de cortar y unir durante la construcción. Esto reduce los costos de fabricación y construcción
- Disponibilidad y costo; el pino es una madera abundante y de rápido crecimiento, lo que la convierte en una opción económica y accesible.

### 1.3 Normas y regularizaciones

Aunque las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Madera no incluyen un apartado específico para el diseño de ensamblajes tradicionales, ya que abarcar la diversidad de uniones posibles representa una tarea compleja. No obstante, es posible evaluar el comportamiento de las conexiones propuestas considerando su reacción en entornos reales. Este enfoque permite determinar la viabilidad de diseñarlas conforme a los criterios de la resistencia establecidos para miembros de madera maciza (Federal, 2004).

La incorporación de estas propuestas busca validar la integración de ensamblajes tradicionales dentro del marco normativo actual, manteniendo la seguridad de las edificaciones. Además, es esencial considerar la inclusión de directrices específicas para estos métodos en las normas vigentes. Tal inclusión no solo garantizará la integridad estructural, sino que también promovería conocer más el comportamiento de la madera y extendería un campo de nuevos diseños.

#### 1.4 Ensamblajes tradicionales

En muchos países, el uso de ensamblajes tradicionales de madera sigue siendo una práctica común, especialmente aquellas regiones con tradiciones muy apegadas en la construcción en madera. Por ejemplo, técnicas tradicionales como el Kigumi y el Sashimono, utilizadas en Japón, permiten la creación de estructuras sin el uso de clavos ni elementos metálicos (Ministry of Foreign Affairs of Japan, 2022). Las técnicas, utilizadas en la construcción de templos, santuarios y casas tradicionales, siguen siendo relevantes por su precisión y durabilidad. De manera similar, en Escandinavia, las técnicas de ensamblaje de madera, como la construcción de casas de troncos en Suecia y Noruega, continúan siendo una parte esencial de la arquitectura rural y moderna (The History of Falu Rödfärg, s.f.). En Suiza, especialmente en las regiones alpinas, se preservan técnicas para construir cabañas y chalets utilizando ensamblajes sin clavos (Schraner luxury realty, 2024). En las Montañas Apalaches de Estados Unidos, la construcción de casas de troncos sigue empleando métodos tradicionales de ensamblaje (Pioneer log homes, s.f.). En Canadá, en regiones como la Columbia Británica y Quebec, y en Rusia, especialmente en la región de Karelia, se utilizan técnicas similares para la construcción de cabañas y estructuras rurales.

#### 1.5 Proyectos internacionales y nacionales

En la actualidad, diversos países han mantenido y modernizado técnicas tradicionales de construcción en madera, integrándolas a estructuras contemporáneas que priorizan la sostenibilidad. Un ejemplo distinguido es el *Mjøstårnet* (figura 1), ubicado en Noruega, considerado el segundo edificio de madera más alto del mundo con una imponente altura de 85.4 metros distribuidos en 18 pisos. La estructura combina elementos prefabricados y técnicas avanzadas de ensamblaje (Moelven, 2025).

De igual manera, el edificio *Ascent*, ubicado en Milwaukee, Wisconsin, alcanza los 86.6 metros de altura (284 pies) y ha sido reconocido por el Consejo de Edificios Altos y Hábitat Urbano como el edificio híbrido más alto del mundo por su combinación de madera y concreto (Madera21, 2025). En Japón, el uso de un sistema de unión tradicional ha sido incorporado en proyectos como el *Nara Centennial Hall*.

En el contexto nacional, México tiene un parámetro limitado en este tipo de edificaciones, un ejemplo es el Jardín Anatole único ejemplo del uso de madera, sin embargo, no usa ensamblajes tradicionales sino conexiones metálicas. (México Desconocido, 2023)

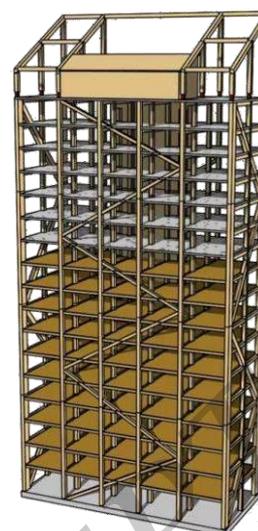


Figura 1. Edificio *Mjøstårnet*

Este análisis internacional de las técnicas tradicionales demuestra que los ensamblajes de madera sin elementos metálicos no solo han resistido el paso del tiempo, sino que también siguen siendo prácticos y funcionales en la actualidad, adaptándose a los contextos modernos de construcción.

#### 1.5 Comparación con otros métodos constructivos

En cuestión ambiental, la madera presenta ventajas significativas frente a materiales como el acero. La producción de una tonelada de acero genera aproximadamente 1.24 toneladas de CO<sub>2</sub>, mientras que una tonelada de madera puede absorber hasta 1.7 toneladas de CO<sub>2</sub>, tanto durante su crecimiento como una vez incorporada en una estructura (Forestal Maderero, 2016).

La siguiente tabla compara las características generales entre ensamblajes tradicionales de madera y conexiones con elementos metálicos (Civil Engineering and Geomechanics Series, 2022):

Característica	Ensamblajes tradicionales	Conectores metálicos
Durabilidad	Alta	Alta
Costo	Baja	Alta
Estética	Alta	Variable
Comportamiento sísmico	Buena ductilidad	Variable
Normativas	Escasas o ausentes	Altamente regulado

Esta comparación evidencia el potencial de los ensamblajes tradicionales como alternativa viable, especialmente en regiones sísmicas o en proyectos con objetivos sostenibles.

## 2. Ensamblajes

Las conexiones propuestas (figura 2 y 3) corresponden a apoyos articulados, cuya configuración permite el movimiento relativo entre los elementos estructurales conectados, facilitando la absorción de deformaciones inducidas por las cargas aplicadas. Este tipo de conexiones son particularmente adecuados para sistemas donde es necesario acomodar rotaciones en el plano de la estructura, sin comprometer la estabilidad.

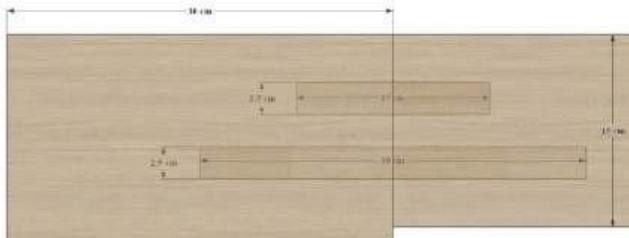


Figura 2. Primera conexión propuesta



Figura 3. Segunda conexión propuesta

El material seleccionado para el análisis es la madera de pino, una de las especies más utilizadas en el ámbito de la construcción estructural.

### 2.1. Composición de la conexión uno

El diseño de las conexiones propuestas se basa en ensamblajes de madera entre columnas y vigas utilizando conectores de madera sin la intervención de elementos metálicos. Estos ensamblajes tradicionales han sido optimizados a lo largo de los siglos para soportar diversas cargas sin comprometer la integridad estructural. En el diseño propuesto, los conectores de madera encajados a presión permiten la transmisión eficiente de cargas y momentos, lo que asegura una conexión sólida entre los elementos estructurales (Luca Brunetti, 2022).

La columna, de 3 metros de altura y una sección cuadrada de 30 cm x 30 cm (figura 4), cuenta con dos orificios superiores de 7.5 cm de profundidad y una sección transversal de 2.5 cm x 2.5 cm. Estos orificios permiten la inserción de conectores de 15 cm de longitud total. Los siguientes dos orificios tienen una mayor profundidad, de 15 cm, manteniendo la misma sección de 2.5 cm x 2.5 cm (figura 7 y 8) . Estos alojarán conectores de 30 cm, de longitud, proporcionando una mayor estabilidad en la conexión (figura 5 y 6).



Figura 4. Dimensiones de la base de la columna

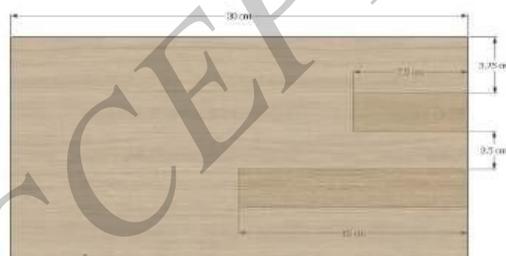


Figura 5. Vista lateral de la columna

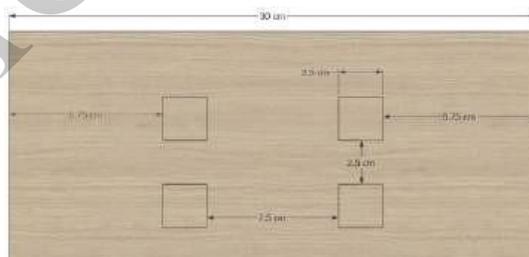


Figura 6. Vista frontal de la columna



Figura 7. Vista lateral de los conectores

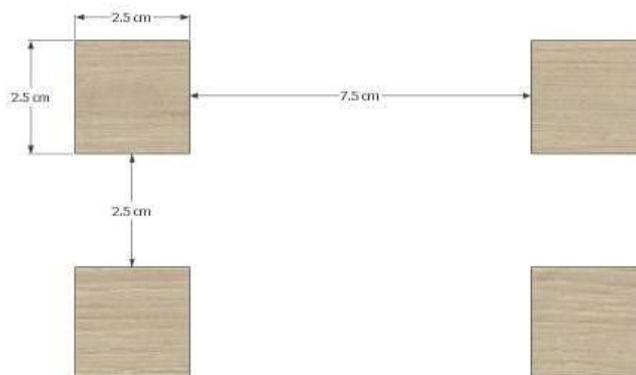


Figura 8. Vista frontal de los conectores

La viga tiene una sección de 30 cm de base y 15 cm de altura, con una longitud de 2 metros (figura 9,10 y 11). La geometría de la viga está diseñada para ensamblarse de manera precisa con la columna, permitiendo la transferencia de cargas a través de los pernos de madera.



Figura 9. Dimensiones de la sección de la viga.

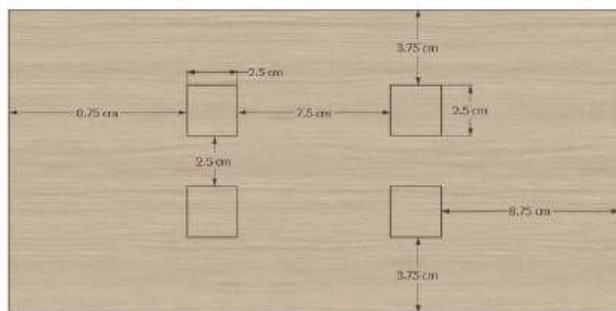


Figura 10. Vista frontal de la viga



Figura 11. Vista lateral de la viga



Figura 12. Dimensiones de la base de la columna

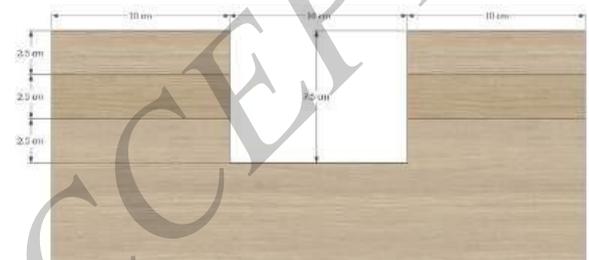


Figura 13. Vista lateral de la columna



Figura 14. Vista frontal de la columna



Figura 15. Conector principal de la segunda conexión

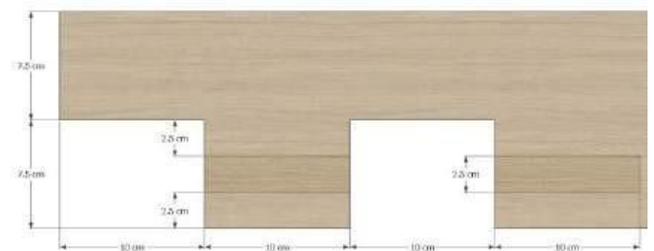


Figura 16. Vista lateral de la viga

## 2.2. Composición de la conexión dos.

La conexión propuesta involucra una columna de madera con dimensiones de 30 cm x 30 cm (figura 12). En la parte superior de la columna, se ha realizado un recorte en forma de "U" (figura 13), para facilitar este tipo de ensamblaje con la viga. Este diseño permite que la viga se acomode de manera precisa sobre la columna, asegurando una correcta alineación y contacto entre ambos elementos (figura 14,15,16 y 17).

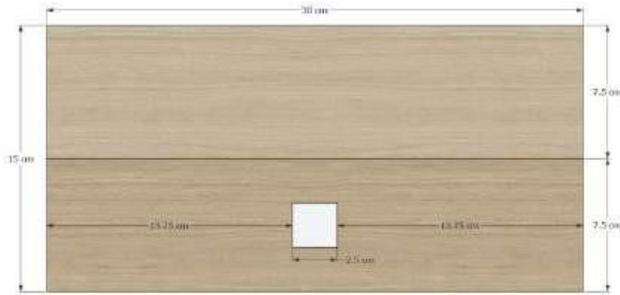


Figura 17. Vista frontal de la viga

Los conectores propuestos son de forma cuadrada, ya que sus bordes ayudan a prevenir el deslizamiento dentro del orificio. Esta característica los hace ideales para conexiones en las que se anticipa movimiento lateral o fuerzas de tracción. Una vez instalados, los conectores cuadrados tienden a proporcionar una sujeción más firme, gracias a la fricción generada por sus caras planas en contacto con las paredes del agujero. Por lo tanto, en aplicaciones donde la estabilidad lateral es crítica, como en estructuras de madera sometidas a fuerzas de tracción, los pernos cuadrados pueden ser más efectivos (Herzog, Natterer, Schweitzer, Volz, & Winter, 2008).

### 3. Análisis de cargas

Para evaluar el comportamiento estructural del sistema, se consideró un marco simple en el que se analizó el peso propio de la viga (ver Tabla 1), calculado a partir del peso volumétrico del pino seco (560 kg/m<sup>3</sup>).

Tabla 2. Análisis de cargas del marco.

Componente	Peso volumétrico (kg/cm <sup>3</sup> )	Espesor (cm)	Peso (kg/cm <sup>2</sup> )
Viga de madera de pino	0.00056	(30*15)	50.4
<b>TOTAL</b>			<b>50.4</b>

Adicionalmente, se aplicó un factor de sobrecarga de entrepiso de 200 kg/m<sup>2</sup> para estimar el momento flector y la deflexión de la viga bajo condiciones de carga normal.

Tabla 3. Resultados de Cortantes y momento a diferentes longitudes

Longitud de análisis (cm)	Cortante (Kg)	Momento (Kg-cm)
0	-225.2	0
50	-112.6	8445
100	0	11260
150	112.6	8445
200	225.2	6.939E-13

El momento de diseño calculado será el más crítico el cual será de 11,260 kg-cm (ver tabla 2). Para resistir este momento, se propone utilizar madera de pino de clase B, seleccionada en condición seca y clasificada según la norma general de clasificación estructural. La elección de esta madera se basa en su capacidad para proporcionar la resistencia necesaria bajo las

condiciones de carga estimadas, cumpliendo con los requisitos de seguridad y durabilidad. Además, al ser un material de clase B, cuenta con propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones estructurales que involucran esfuerzos moderados, como en el presente caso. A continuación, se evaluarán las propiedades de la sección transversal y su capacidad para resistir el momento aplicado.

### 4. Diseño estructural de la viga

#### 4.1. Revisión por flexión en viga

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción de la ciudad de México (Federal, 2004), en la sección 3.2 “Miembros bajo carga transversales” para calcular la resistencia a flexión de un elemento de madera con sección rectangular se utiliza la ecuación (1):

$$M_R = F_R * f_{fu} * S_{\phi} \quad (1)$$

Donde:

- $F_R$  es el factor para elementos en flexión, tabla 2.4 “factores de resistencia para madera maciza y madera contrachapada” (Federal, 2004), con un valor definido de 0.80
- $S$  es el módulo de sección para elementos rectangulares, ecuación (2):

$$S = \frac{b * d^2}{6.00} \quad (2)$$

Sustituyendo las dimensiones de la sección:

$$S_{(cm^3)} = \frac{30 * 15^2}{6} = 1,125$$

El valor del esfuerzo en flexión  $f_{fu}$  se determina mediante la ecuación (3):

$$f_{fu} = f_{fu}' * K_h * K_d * K_c * K_p * K_{cl} \quad (3)$$

Donde:

- $f_{fu}'$  es el valor especificado de esfuerzo en flexión para madera de coníferas, clase B, tomado de la tabla 2.1 de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño en Madera (Federal, 2004), con un valor de 100 kg/cm<sup>2</sup>.
- $K_h$  es el factor de modificación por contenido de humedad para madera seca, con un valor de 1.00.
- $K_d$  es el factor de modificación por duración de la carga (carga muerta más carga viva), con un valor de 1.00.
- $K_c$  es el factor de compartición de carga, aplicable solo en sistemas con tres o más miembros paralelos, separados 61 cm de centro a centro. En este caso,  $K_c = 1.00$  ya que no aplica.
- $K_p$  es el factor de modificación por peralte, aplicable si “d” es menor a 14 cm. Dado que la altura de la viga es de 15 cm, este valor se toma como 1.00.
- $K_{cl}$  es el factor por clasificación, que para madera clasificada bajo la regla general tiene un valor de 0.80.

Sustituyendo los valores:

$$f_{vu} = 1 * 1 * 1 * 1 * 0.8 = 80 \text{ kg/cm}^2$$

El factor de estabilidad lateral “ $\varphi$ ” se define como la relación entre la altura  $d$  y el ancho  $b$  de la sección, ecuación (4):

$$\varphi = \frac{d}{b} = \frac{15}{30} = 0.5 \quad (4)$$

Dado que  $\varphi < 1$ , no es necesario soporte lateral adicional, por lo que  $\varphi = 1$

Finalmente, la resistencia a flexión se calcula como:

$$M_R (\text{kg-cm}) = 0.8 * 80 * 1125 * 1 = 72\,000$$

Al comparar este valor con el momento máximo calculado de 11,260 kg-cm, se observa que el momento resistente es significativamente mayor que el momento aplicado. Por lo tanto, el elemento de madera cumple con los requisitos de resistencia a flexión.

#### 4.2. Revisión a cortante de la viga

Según las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (Federal, 2004), en la sección 3.2.4 Resistencia a cortante, la resistencia a cortante de un elemento de madera con sección rectangular se determina mediante la ecuación (5):

$$V_R = \frac{F_R * f_{vu} * b * d}{1.5} \quad (5)$$

Donde:

- $F_R$  es el factor para elementos en cortante, con un valor de 0.70.
- $b$  es el ancho de la sección en cm.
- $d$  es la altura de la sección en cm.
- $f_{vu}$  es el esfuerzo en cortante, calculado como la ecuación (6):

$$f_{vu} = f_{vu}' * K_h * K_d * K_c * K_r * K_v \quad (6)$$

Los valores de los factores de modificación son los siguientes:

- $f_{vu}'$  esfuerzo en cortante para madera de clase B, tomado de la tabla de resistencias especificadas, con un valor de 12 kg/cm<sup>2</sup>
- $K_h$  factor de modificación por contenido de humedad para madera seca, con un valor de 1.00.
- $K_d$  factor de duración de carga, 1.00.
- $K_c$  factor por compartición de carga, 1.00.
- $K_r$  factor por relación de esbeltez, 1.00.
- $K_v$  factor de modificación por volumen, 1.00.

Por lo tanto, el esfuerzo en cortante es:

$$f_{vu} = 12 * 1 * 1 * 1 * 1 * 1 = 12$$

Sustituyendo los valores en la fórmula de resistencia a cortante:

$$V_R (\text{kg}) = \frac{0.7 * 12 * 30 * 15}{1.5} = 5040$$

Al comparar este valor con el cortante máximo de 225.2 kg, se observa que el cortante máximo es mucho menor que la resistencia a cortante de diseño, por lo que el elemento es seguro ante el cortante.

#### 4.3. Revisión por deflexión en la viga

Para el cálculo de la deflexión, se utiliza la ecuación (7):

$$\delta = \frac{5 * L^2}{48 * E * I} (M_c + 0.1(M_a + M_b)) \quad (7)$$

Donde los momentos y la longitud de la viga para el cálculo de las deflexiones son:

$$\begin{aligned} M_c (\text{kg-m}) &= 112.60 \\ M_a (\text{kg-m}) &= 6.94E-15 \\ M_b (\text{kg-m}) &= 0.00 \\ L (\text{cm}) &= 200 \end{aligned}$$

El módulo de elasticidad “ $E$ ” de la madera de pino seca, considerado en el quinto percentil como 80,000 kg/cm<sup>2</sup>, y ajustado mediante la ecuación (8)

$$E = E_{0.5} = K_h * K_p * K_{cl} = \frac{E}{0.5} = \frac{80,000}{0.5} = 160,000 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (8)$$

El momento de inercia de la sección, calculada como la ecuación (9):

$$I_{(\text{cm}^4)} = \frac{b * d^3}{12} = \frac{30 * 15^3}{12} = 8,437.50 \quad (9)$$

Sustituyendo los valores en la fórmula de deflexión:

$$\delta = \frac{5 * 200^2}{48 * 160,000 * 8,437.5} * (112.6 + 0.1(6.94E-15 + 0))$$

$$\delta = 0.087 \text{ cm}$$

Dado que la deflexión máxima permitida es de  $L/240 = 200/240 = 0.83$  cm, el valor obtenido de 0.087 cm está dentro del límite aceptable. El análisis demuestra que la viga propuesta, con una sección transversal de 30 cm x 15 cm, es capaz de resistir las cargas aplicadas sin exceder los límites de resistencia a flexión y cortante establecidos por las Normas Técnicas Complementarias (Federal, 2004)..

#### 5. Diseño estructural de la columna

En este caso, al tratarse de un marco simple, la columna está sometida tanto a flexión como a carga axial en una sola dirección. Los esfuerzos principales son los siguientes:

$$P (\text{kg}) = 376.40$$

$$M1 \text{ (kg*cm)} = 3379.00$$

$$M2 \text{ (kg*cm)} = 6855.00$$

La sección propuesta para la columna es de 30 x 30 cm, lo que da un área de sección de:

$$A \text{ (cm}^2\text{)} = 900.00$$

### 5.1 Cálculo de la resistencia a carga axial

La resistencia a la carga axial se calcula con la ecuación (10):

$$P_R = F_R * f_{cu} * A \quad (10)$$

Donde:

- $F_R$  es el factor de resistencia, con un valor de 0.70.
- $f_{cu}$  es el esfuerzo en compresión paralela a la fibra, modificado por varios factores se calcula como la ecuación (11):

$$f_{cu} = f_{cu}' * K_h * K_d * K_c * K_p * K_{cl} \quad (11)$$

Los valores de los factores son:

- $f_{cu}'$  es el esfuerzo en compresión especificado para madera de coníferas clase B, 95 kg/cm<sup>2</sup>.
- $K_h$  es el factor de modificación por contenido de humedad, 1.00.
- $K_d$  es el factor de modificación por duración de carga, 1.00.
- $K_c$  es el factor por compartición de carga, 1.00.
- $K_p$  es el factor por peralte (no aplicable ya que  $d$  es mayor a 14 cm), 1.00.
- $K_{cl}$  es el factor de clasificación, 0.80.

Sustituyendo los valores:

$$f_{cu} \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 95 * 1 * 1 * 1 * 1 * 0.80 = 76$$

Finalmente, la resistencia de diseño a compresión es:

$$P_R \text{ (kg)} = 0.7 * 76 * 900 = 47,880$$

### 5.2 Esbeltez de la Columna

La esbeltez se evaluará de forma independiente para cada elemento conectado. Dado que la columna tiene una longitud sin soporte lateral de 300 cm, la longitud efectiva para miembros no arriestrados se calcula con la ecuación (12)

$$L_e = \frac{k * L_u}{r} \leq 40 \quad (12)$$

Donde:

- $k=0.80$  es el factor recomendado.
- $r$  es el radio de giro mínimo de la sección, calculado con la ecuación (13)

$$r = \frac{\sqrt{b * d^3}}{12 * A} \quad (13)$$

$$r \text{ (cm)} = 8.66$$

Sustituyendo los valores:

$$L_e \text{ (cm)} = \frac{0.8 * 300}{8.66} = 27.71 \leq 40$$

Dado que la longitud efectiva es menor que el límite de esbeltez, los efectos de pandeo se pueden despreciar.

### 5.3 Interacción de flexión uniaxial y carga axial

El siguiente paso es calcular el momento amplificado  $M_c$ , para lo cual se utiliza la ecuación (14)

$$M_c = \delta * M_o \geq M_2 \quad (14)$$

Donde:

$M_o$  es el momento máximo sin amplificar, que en este caso es igual a 6,855 kg-cm

$\delta$  es el factor de amplificación de momentos, calculado con la ecuación (15)

$$\delta = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{P_{cr}}} \quad (15)$$

El factor de corrección por condición de apoyo es  $C_m = 1.00$

La carga crítica de pandeo se determina con la ecuación (16)

$$P_{cr} = F_R * \frac{\pi^2 * E_{0.05} * I}{(k * L_u)^2} * K_p * K_{cl} \quad (16)$$

Donde:

- $E_{0.05}$  es el módulo de elasticidad del quinto percentil, 50,000 kg/cm<sup>2</sup>
- $I$  es la inercia de la sección, 67,500 cm<sup>4</sup>
- $K_p$  es el factor de modificación por peralte, 1
- $K_{cl}$  es el factor de clasificación, 0.8

Sustituyendo los valores:

$$P_{cr} = 0.7 * \frac{\pi^2 * 50000 * 67500}{(0.8 * 300)^2} * 1.00 * 0.80$$

$$P_{cr} \text{ (kg)} = 323,846.39$$

El factor de amplificación de momentos es:

$$\delta = \frac{1}{1 - \frac{376.4}{323,846.39}} = 1.001$$

Por lo tanto, el momento amplificado es:

$$M_c \text{ (kg-m)} = 1.001 * 6855 = 6862.98$$

### 5.4 Verificación de Flexo-Compresión

La integración para flexión uniaxial se verifica utilizando la relación de la ecuación (17)

$$\frac{P_u}{P_R} + \frac{M_c}{M_R} \leq 1.00 \quad (17)$$

Donde:

$M_R$  es la resistencia a flexión, calculada con la ecuación (18 y 19)

$$M_R = F_T * f'_{fu} * S * f_i \quad (18)$$

$$f'_{fu} = 100 * 1 * 1 * 0.8 = 80$$

$$S \text{ (cm}^3\text{)} = \frac{d^3}{6} = \frac{30^3}{6} = 4500 \quad (19)$$

Finalmente:

$$M_c \text{ (kg-m)} = 0.80 * 80 * 4500 * 1 = 288,000$$

Comprobando la relación:

$$\frac{376.4}{47,880} + \frac{6862.98}{288,000} = 0.0317 \leq 1.00$$

La columna, con una sección de 30 cm x 30 cm y una altura de 3 metros, está sujeta a esfuerzos combinados de flexión y compresión axial. Se evaluó su resistencia a la carga axial utilizando la fórmula para elementos comprimidos de madera, y se determinó que la resistencia de la columna es suficiente para soportar las cargas aplicadas sin riesgo de pandeo, ya que la relación de esbeltez calculada se encuentra dentro de los límites establecidos.

## 6. Diseño de conexiones

### 6.1. Conexión uno: viga - columna

La primera conexión propuesta para el marco involucra una unión rígida entre viga y columna, donde se restringen tanto las rotaciones como los desplazamientos en ambas direcciones. Esto se logra mediante el uso de cuatro pernos de madera encajados a presión, lo que permite la transmisión del momento hacia la parte superior de la columna (figura 18).

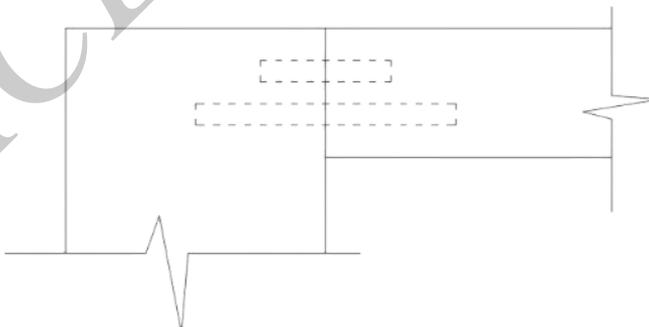


Figura 18. Vista lateral conexión uno viga - columna.

Este ensamblaje tradicional de madera utiliza una columna vertical y una viga horizontal, unidas mediante pernos de madera a presión. La columna, ubicada a la izquierda, presenta cortes precisos para permitir el paso de los pernos, que fijan firmemente la viga. La viga, situada a la derecha, también posee perforaciones para la inserción de los pernos, creando una conexión robusta sin necesidad de elementos metálicos. Los dos rectángulos representan estos pernos, que atraviesan ambas piezas, brindando una fijación sólida y precisa.

Se supone que las conexiones están sometidas a fuerzas actuantes que permiten evaluar si los conectores pueden resistir el esfuerzo cortante. El momento resistente de cada perno es de 239.58 kg-cm, pero para soportar el momento máximo en una distancia de 15 cm, se requieren 12 conectores en total para asegurar que la resistencia supere el momento aplicado:

$$M_R \text{ (kg-cm)} = 239.58 > 218.88$$

En cuanto a la evaluación de la fuerza cortante, los pernos también cumplen con los requerimientos, ya que resisten hasta 80.5 kg, superando la carga de corte:

$$V_R \text{ (kg)} = 80.5 > 58.4$$

### 6.2. Conexión dos: viga - columna

En este segundo ensamblaje, la columna presenta un corte en forma de "U" profundo en su centro, donde se inserta la viga, que tiene un corte complementario para un ajuste perfecto. Esta unión en "U" distribuye las cargas de manera uniforme, proporcionando una conexión estable. Además, el conector de madera atraviesa tanto la columna como la viga, asegurando una fijación firme sin necesidad de elementos metálicos (figura 19).

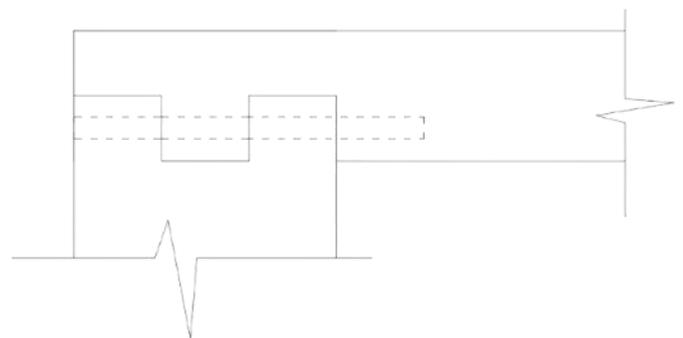


Figura 19. Vista lateral conexión dos, viga - columna

La disposición impide el desplazamiento vertical gracias al amplio contacto entre las superficies y aumenta la rigidez general del sistema. La forma en "U" también evita el desplazamiento lateral, mientras que los conectores refuerzan la resistencia al movimiento horizontal. La posibilidad de rotación se elimina casi por completo, dado que las fuerzas torsionales se distribuyen de manera eficiente. Finalmente, el encaje profundo y las múltiples superficies de contacto impiden el deslizamiento longitudinal.

### 6.2.1 Cálculo de esfuerzos en la conexión 2

Se realizó un análisis de las cargas laterales, considerando las más críticas, como las fuerzas sísmicas y de viento. Para estructuras de este tipo, las cargas de viento solo se vuelven críticas en elementos como pies derechos, mientras que, en vigas, la carga muerta contrarresta estos efectos. El espectro de diseño sísmico se obtuvo mediante el software PRODISIS, (figura 20).

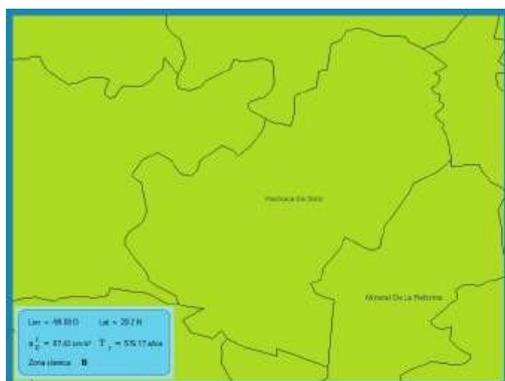


Figura 20. Ubicación seleccionada para obtener el espectro de diseño.

Arrojando las siguientes fuerzas en los ejes “X” y “Y”, siendo el más crítico el eje “X” (ver tabla 3).

Tabla 4. Resultados de la evaluación por sismo.

Longitud de análisis (cm)	Cortante (Kg)	Momento (Kg-cm)
0	4.92	388.43
10	4.92	385.85
20	4.92	383.28
30	4.92	380.70
40	4.92	378.12

Para este tipo de conexión es necesario de dos conectores puesto que con uno solo el momento que se presenta es mayor al que resiste.

$$M_R (\text{kg-cm}) = 239.58 > 194.215$$

A diferencia del cortante que un solo perno es capaz de soportar la fuerza de cizalle que se presenta en cualquiera de sus puntos.

$$V_R (\text{kg}) = 80.5 > 4.92$$

### 6.3. Comportamiento estructural de las uniones.

Se evaluó el comportamiento de las uniones bajo fuerzas externas, considerando tanto las deformaciones como las resistencias en condiciones de carga sísmica. El análisis de los conectores de madera mostró que, en algunos casos, pueden producirse fisuras cuando las cargas exceden los límites de desplazamiento permitidos. Sin embargo, al utilizar conectores

múltiples y bien distribuidos, se neutralizan estos efectos, mejorando la ductilidad y capacidad de carga de las uniones propuestas (Luca Brunetti, 2022). Para una mejor comprensión, es recomendable realizar pruebas de tracción.

La capacidad de deformación que tienen las uniones depende de la dirección de las fuerzas que se transmiten con respecto a la dirección de la fibra estas también pueden influir sobre el comportamiento de la unión y en función de la desangulación se puede desarrollar en la madera tensiones de tracción normal a la dirección de la fibra que pueden reducir la ductilidad y la capacidad de carga de la unión como resultado de partituras prematuras en la madera.

Esto es más frecuente cuando los conectores de unión poseen secciones transversales mayores, pero en función que esta se reduce, la desangulación-fuerza fibra no afecta la capacidad resistente ni la ductilidad de la unión puesto que en la primera conexión los conectores de unión propuestos son varios y neutraliza estos efectos.

## 7. Conclusiones

Es fundamental que las normativas de construcción en México se adapten para incluir directrices específicas que regulen el uso de ensamblajes tradicionales de madera. El uso contemporáneo de ensamblajes tradicionales en estructuras emblemáticas como el *Mjøstårnet* en Noruega, *Ascent* en Wisconsin o el *Nara Centennial Hall* en Japón han demostrado ser no solo estéticamente valiosas, sino también estructuralmente eficientes, particularmente en contextos de alta actividad sísmica. La integración de estas prácticas en la normativa vigente no solo contribuiría a preservar el patrimonio arquitectónico, sino que también ofrecería soluciones sostenibles y seguras para la construcción moderna donde se busca reducir el impacto ambiental.

## Agradecimientos

Agradezco al M. en Ing. Jesús Eduardo Ramírez Castañeda por su valiosa guía en la elección del tema, así como a Julio César Sosa Argüelles por su constante apoyo a lo largo del proceso.

## Referencias

- Andres, A. A. (2019). *Madera Sustentable como material de construcción de edificaciones contra el cambio climático*. Santa María: Tesis USM.
- Bayucca, R. (12 de Junio de 2024). *The Most Common Woods Used For Construction*. Obtenido de Specialty Wood: <https://usvintagewood.com/construction-woods/>
- Construir con Madera. (3 de Junio de 2024). *Tipos de Madera*. Obtenido de Madera de pino. Características y usos más comunes: <https://www.construirconmadera.es/madera-pino/>
- Federal, G. d. (6 de Octubre de 2004). *NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y*

- CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA.** Obtenido de Gaceta oficial del distrito federal:  
[https://paot.org.mx/centro/gaceta/2004/octubre04/06octubre04\\_bis.pdf](https://paot.org.mx/centro/gaceta/2004/octubre04/06octubre04_bis.pdf)
- Forestal Maderero. (16 de Febrero de 2016). *¿Cuánto CO2 se almacena en 1 kg de madera?* Obtenido de *¿Cuánto CO2 se almacena en 1 kg de madera?*:  
<https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/cuanto-co2-se-almacena-en-1-kg-de-madera.html>
- García Mora, J. J., & Moreno Jiménez, S. J. (2021). *Estructuras en madera.* Obtenido de Nociones básicas:  
[https://proyectodescartes.org/iCartesiLibri/materiales\\_didacticos/Estructuras\\_en\\_madera/index.html?page=2](https://proyectodescartes.org/iCartesiLibri/materiales_didacticos/Estructuras_en_madera/index.html?page=2)
- Herzog, T., Natterer, J., Schweitzer, R., Volz, M., & Winter, W. (2008). *Timber Construction Manual.* Obtenido de  
[https://books.google.com.ec/books?id=uWvRAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=uWvRAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Isozaki, A. (10 de Junio de 2019). *Nara Centennial Hall 1992-1998.* Obtenido de  
<https://arqa.com/arquitectura/nara-centennial-hall-1992-1998.html>
- Luca Brunetti, G. (2022). *CIVIL ENGINEERING AND GEOMECHANICS SERIES.* Obtenido de Design and Construction of Bioclimatic Wooden Greenhouses 3:  
[https://www.google.com.mx/books/edition/Design\\_and\\_Construction\\_of\\_Bioclimatic\\_W/IiKjEAAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=Herzog,+T.,+Natterer,+J.,+Schweitzer,+R.,+Volz,+M.,+%26+Winter,+W.+%2008.+Timber+construction+manual.+Birkh%C3%A4user&pg=PA248&printsec=frontcover](https://www.google.com.mx/books/edition/Design_and_Construction_of_Bioclimatic_W/IiKjEAAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=Herzog,+T.,+Natterer,+J.,+Schweitzer,+R.,+Volz,+M.,+%26+Winter,+W.+%2008.+Timber+construction+manual.+Birkh%C3%A4user&pg=PA248&printsec=frontcover)
- Madera21. (2025). *El rascacielos Ascent en Milwaukee se convierte en el edificio de madera más alto del mundo.* Obtenido de <https://www.madera21.cl/el-rascacielos-ascent-en-milwaukee-se-convierte-en-el-edificio-de-madera-mas-alto-del-mundo/>
- México Desconocido. (2023). *Jardín Anatole, el primer edificio de madera en México.* Obtenido de Jardín Anatole, el primer edificio de madera en México:  
<https://www.mexicodesconocido.com.mx/jardin-anatole-el-primer-edificio-de-madera-en-mexico.html>
- Ministerio de Educación Nacional. (2011). *Materiales y Materia prima madera.* Buenos Aires: Encuentro. Obtenido de inet: <https://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/madera.pdf>
- Ministry of Foreign Affairs of Japan. (2022). *Japan: A Culture Nurtured by Wood.* Obtenido de Traditional Building Techniques Passed Down Through the Ages: <https://web-japan.org/niponica/niponica32/en/feature/feature02.html>
- Moelven. (2025). *Mjøstårnet.* Obtenido de [https://www.moelven.com/mjostarnet/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.moelven.com/mjostarnet/?utm_source=chatgpt.com)
- Morillas, L. (2018). *Proyecto sismoresistente de estructuras de madera.* Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/28066/MORILLAS-FSC.pdf?sequence=1>
- Nápoles Padrón, E., González Carbonell, R., & Olivares Díaz, E. (September de 2015). *ResearchGate.* Obtenido de UNA INTRODUCCION AL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS: APLICACIONES Y EJEMPLOS:  
[https://www.researchgate.net/publication/283151622\\_Una\\_introduccion\\_al\\_Analisis\\_por\\_Elementos\\_Finitos\\_aplicaciones\\_y\\_ejemplos?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InNpZ251cCI6InBhZ2U0iJzZWVY2giLCJwb3NpdGlvbil6InBhZ2VIZWFkZl1ifX0](https://www.researchgate.net/publication/283151622_Una_introduccion_al_Analisis_por_Elementos_Finitos_aplicaciones_y_ejemplos?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InNpZ251cCI6InBhZ2U0iJzZWVY2giLCJwb3NpdGlvbil6InBhZ2VIZWFkZl1ifX0)
- Pioneer log homes. (s.f.). *The Finest Handcrafted Cedar Log Homes On Earth.* Obtenido de <https://www.pioneerloghomesofbc.com>
- PORTAL D'OFERTA TECNOLÒGICA. (21 de Diciembre de 2021). *SISTEMA ESTRUCTURAL DE MADERA SIN ELEMENTOS METÁLICOS.* Obtenido de <https://innoua.ua.es/ca/Sistema%20estructural%20de%20madera%20sin%20elementos%20met%C3%A1licos-2721>
- Schraner luxury realty. (8 de Julio de 2024). *The Evolution of Alpine Architecture: From Traditional Chalets to Contemporary Luxury Homes.* Obtenido de <https://schraner-verbier.ch/blog/the-evolution-of-alpine-architecture-from-traditional-chalets-to-contemporary-luxury-homes/>
- The History of Falu Rödfärg. (s.f.). *The History of the Red Cottage.* Obtenido de <https://falurodfarg.com/en/about/the-story-of-the-red-cottage/>
- Tipos de madera. (3 de Junio de 2024). *Madera de pino. Características y usos más comunes.* Obtenido de <https://www.construirconmadera.es/madera-pino/>
- Valle, G. (14 de Diciembre de 2020). *19 Types of wood used in home construction.* Obtenido de <https://www.yourownarchitect.com/19-types-of-wood-used-in-home-construction/>