



CONCURSO

# INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN

MEMORIAS, INVESTIGACIONES PATENTES,  
PROYECTOS DE TÍTULOS

La VII Versión del Concurso, tiene como objetivo destacar a aquellos alumnos de las carreras de ingeniería y construcción civil que hayan desarrollado o se encuentren desarrollando memorias de título, proyectos de título, investigaciones o patentes en torno a la madera.



A decorative graphic on the left side of the slide. It features a series of concentric circles in shades of purple, centered in the upper-left quadrant. A thick white L-shaped line starts from the bottom of the circles and extends horizontally to the right, then vertically down to the bottom edge of the slide.

EQUIPO ING-5074

**Análisis experimental de  
ensayos a flexión aplicados  
a uniones carpinteras  
japonesas de empalme  
oblicuo**

# Objetivos

## Objetivo General

Determinar, a través de ensayos de flexión, el comportamiento estructural de los empalmes carpinteros tradicionales de madera japonesas tipo oblicuo, en madera de pino estructural seca, en comparación a una viga con conectores metálicos y a una viga de control sin empalme.

## Objetivos Específicos

- Determinar el Módulo de Ruptura (MOR) en flexión a través de los ensayos a realizar para el tipo de empalme oblicuo japonés, para la unión con conector metálico y para la viga de control sin empalme.
- Comparar los efectos que se producen en el empalme oblicuo, en relación a la viga unida con conector metálico y a la viga de control sin empalme, respecto a los esfuerzos de flexión aplicados.
- Concluir, de acuerdo a los resultados, los usos a los que puede estar sometido la viga con empalme oblicuo japonés, según las características estudiadas y a los ensayos realizados.



Imagen 1: Empalme rayo de júpiter en cercha (Gonzalez et al, 2019)

# Cualidades de la madera

## Material Biológico

A la madera se le puede categorizar como material biológico dado que está compuesta por moléculas de celulosa y lignina (Fritz, 2012).

## Anisotropía

Se le considera anisotrópico, dado que es un material compuesto por fibras y anillos, lo cual configura a la madera en diferentes direcciones o ejes: eje radial, eje tangencial y eje longitudinal (Fritz 2012).

## Higroscopicidad

La madera es un material higroscópico, capaz de absorber humedad y cederla al medio ambiente (Fritz, 2012).

## Resistencia al Fuego

La madera resiste la acción del fuego por su baja conductividad del calor y su estructura celular. Además, la madera tiene bajo coeficiente de dilatación térmica, por ello, son mínimos los empujes por calentamiento en apoyos y empotramientos, evitando así los colapsos (Fournier, 2008).

## Huella de Carbono

La madera tiene una baja generación de huella de carbono en comparación al resto de materiales, en todo su ciclo de vida. Además, la madera es un material captador del carbono producto del proceso de fotosíntesis que desarrolla. Este almacenaje del carbono es mantenido por la madera incluso más allá de su estado como árbol.



Imagen 2: Carbonización (Maderea, 2018).

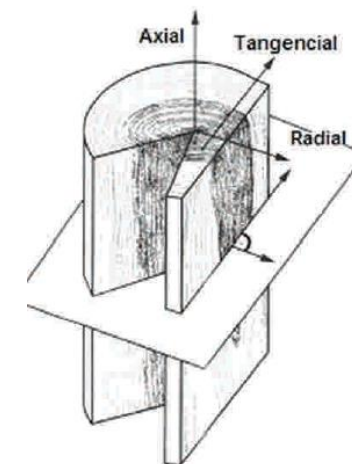


Imagen 3: Ejes de la madera (Fritz, 2012).

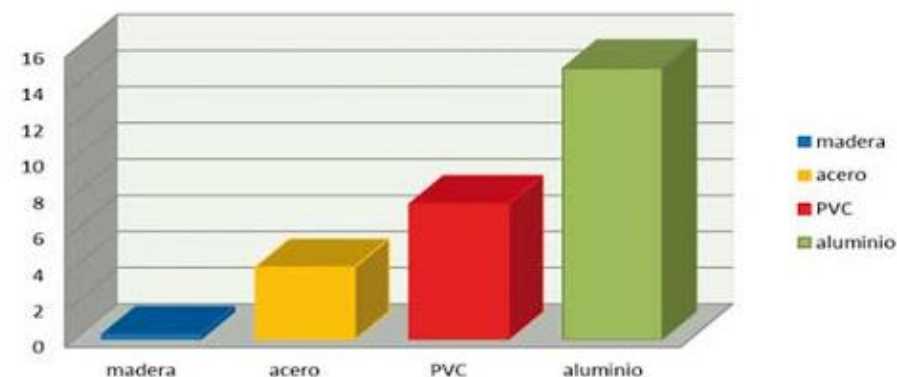


Imagen 4: Emisión de CO2 (t) para la fabricación de 1t de material (Cuteqma, 2017).

# Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de la madera están determinadas en base a la resistencia a las fuerzas externas. Estos esfuerzos por unidad de superficie se denominan tensión unitaria (Fritz, 2012). Si la carga ejercida en el cuerpo aumenta, se producen deformaciones. Estas deformaciones van aumentando a medida que la carga es mayor. A continuación, el siguiente gráfico explica este fenómeno, el cual muestra 4 zonas por las cuales atraviesa la probeta de ensayo.

Los ensayos en una probeta de madera se pueden realizar en diferentes direcciones, según la orientación de las fibras:

- Compresión Paralela
- Compresión Normal
- Flexión estática
- Cizalle
- Clivaje
- Tracción Paralela
- Tracción Normal

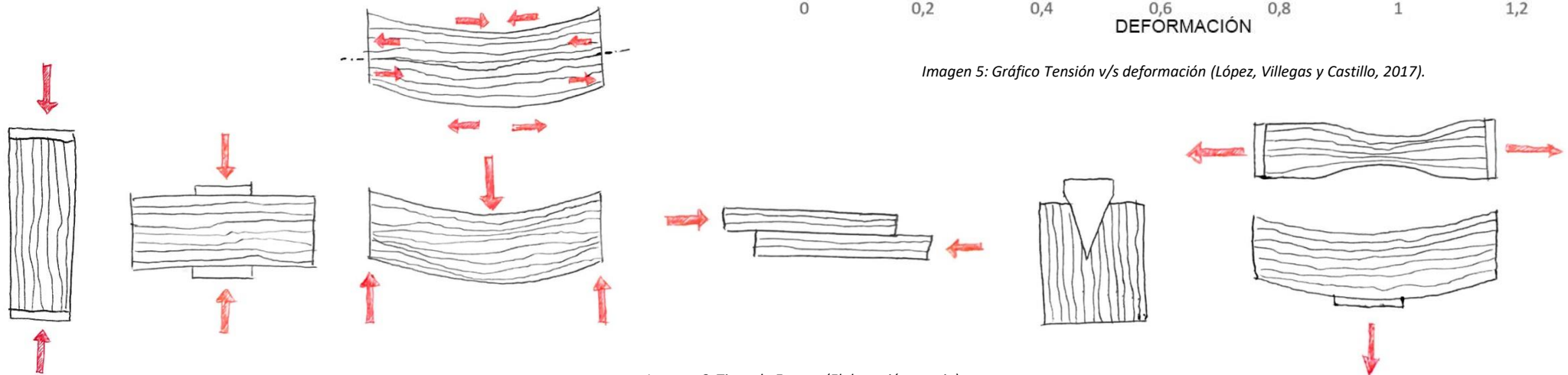


Imagen 6: Tipos de Ensayo (Elaboración propia).

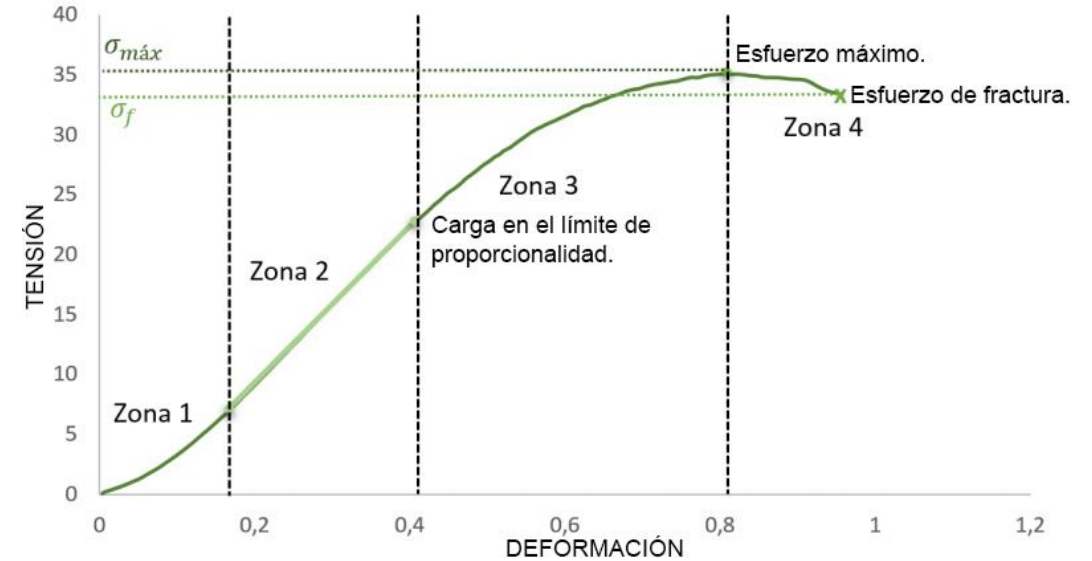


Imagen 5: Gráfico Tensión v/s deformación (López, Villegas y Castillo, 2017).

# Tipos de uniones en madera

## Empalmes

Los empalmes son aquellas uniones en un solo sentido realizadas a través de sus testas (Aira, 2013).

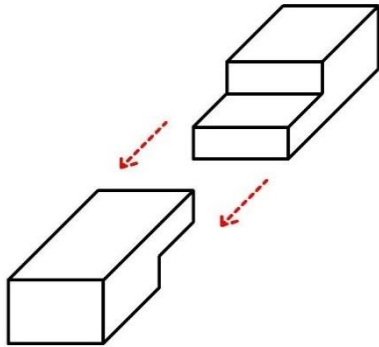


Imagen 7: Empalme (Elaboración propia).

Su objetivo es extender la longitud de una pieza, ya sea la luz de una viga, la altura de un pilar, etc.

## Ensamblajes

Los ensamblajes son uniones en varios sentidos. Dichas uniones forman ángulos entre si (Aira, 2013).

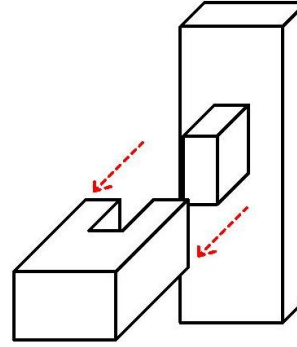


Imagen 8: Ensamble (Elaboración propia).

Los ensamblajes se dan en casos de uniones entre vigas y pilares, vigas con vigas en diferentes sentidos, cerchas, etc.

## Acoplamientos

Los acoplamientos son aquellas uniones que se realizan a través de sus caras o sus cantos en una misma dirección (González et al, 2019).

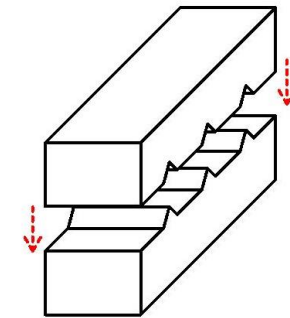


Imagen 9: Acoplamiento (Elaboración propia).

El objetivo principal es lograr una dimensión mayor de contacto, con la finalidad de obtener una pieza más reforzada.



# Uniones Tradicionales, mecánicas y encoladas

## Uniones Tradicionales

Las uniones tradicionales corresponden aquellas uniones que se realizan sólo con madera. Para lograr la unión, se realizan cortes, rebajes, embarbillados o cuñas en la madera, dependiendo del tipo de unión tradicional.

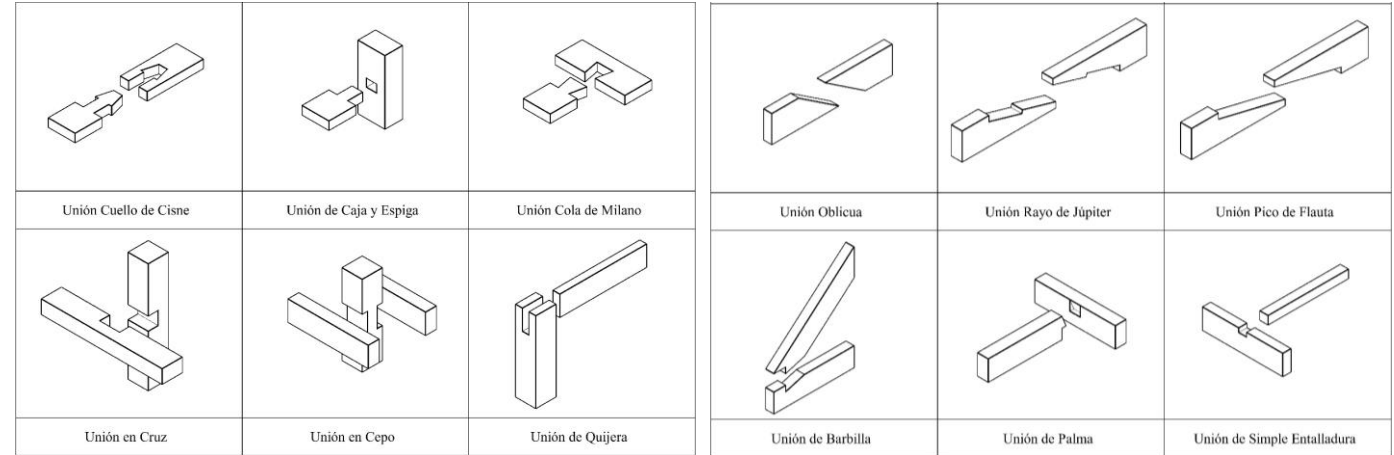
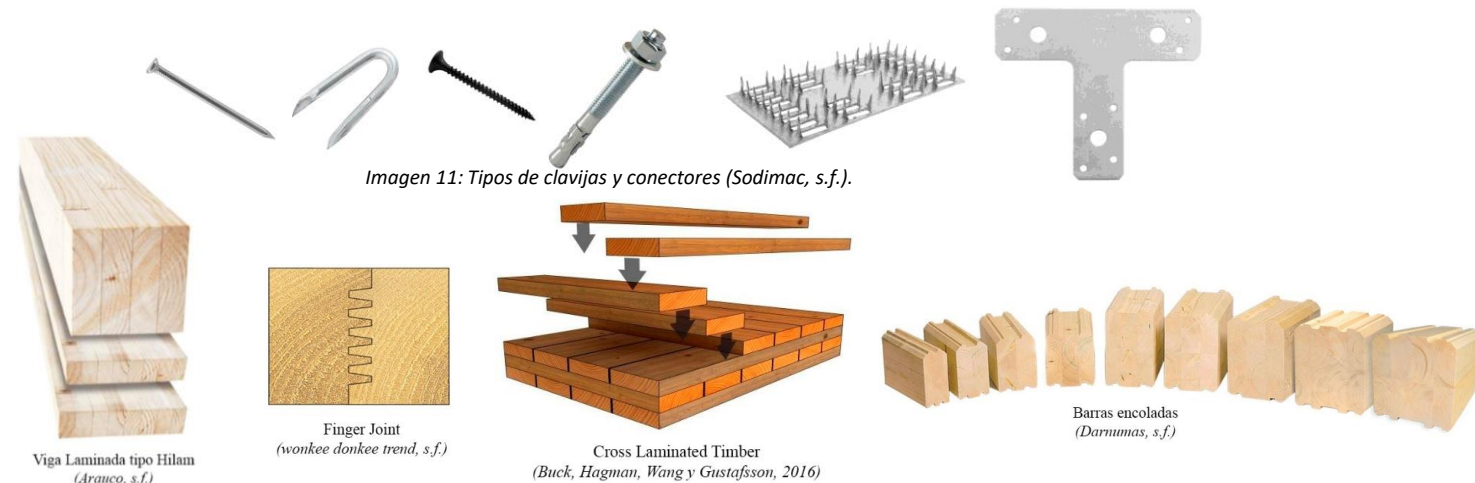


Imagen 10: Tipos de uniones tradicionales comunes (Elaboración propia).

## Uniones Mecánicas

Las uniones mecánicas son aquellas que utilizan herrajes, clavos, tornillos o pernos metálicos. Trabajan transmitiendo los esfuerzos a través de estas piezas, las cuales, al formar la unión, generan un aplastamiento localizado en la madera (Aira, 2013).



## Uniones Encoladas

Se les conoce por uniones encoladas, aquellas que requieren de adhesivos o pegamentos para rigidizar la unión.

Imagen 12: Tipos de uniones encoladas.

# Descripción del problema

Cuando las vigas trabajan a flexión es preferible no realizar empalmes. Sin embargo, la madera es un material finito y requiere de uniones si se habla de maderas aserradas o cepilladas. Por lo tanto, para extender luces y unir vigas por sus testas, se recomienda empalmar la viga en los momentos nulos de la curva. No obstante, según el esquema de corte de la imagen 13, se debe tener especial cuidado con los esfuerzos cortantes elevados.

Al respecto, las uniones más utilizadas para maderas, son los conectores metálicos. Esto, replicado en varios elementos, produce un sobrepeso de la estructura. Además, ante el fuego, estos conectores se transforman en puntos débiles de la estructura. Por esta razón, resulta necesario investigar el uso de empalmes con el uso exclusivo de la madera.

¿qué tipo de empalme carpintero puede ayudar a extender la luz de una viga y trabajar bien ante fuerzas de flexión?

“La unión que se plantee en dicha zona deberá cumplir las siguientes condiciones: **deberá soportar esfuerzos de cortante elevados, deberá soportar esfuerzos de tracción y compresión debidos a la flexión reducidos.**” (Landa, 1999, p.31)

Mecánicamente, las mejores soluciones corresponden aquellas **“uniones ortogonales de uno, dos, tres o más planos”** y **“las uniones oblicuas tanto inclinadas como verticales”** (Landa, 1999, p.31). No deben usarse uniones ortogonales longitudinales horizontales.

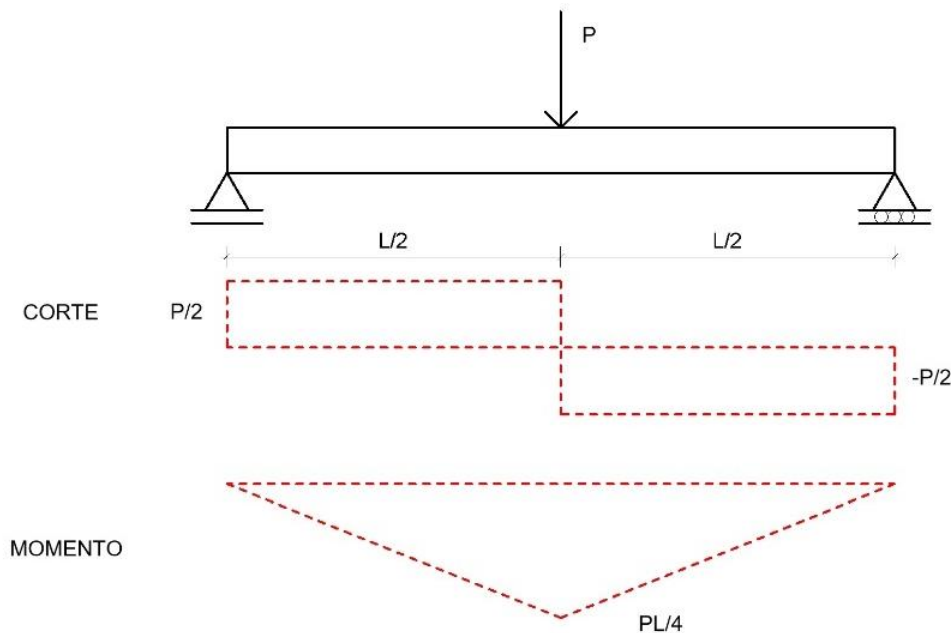


Imagen 13: Esquema de corte y momentos flectores (elaboración propia).

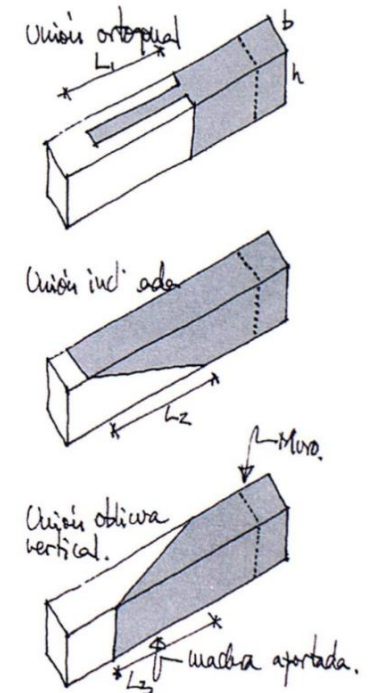


Imagen 14: Unión ortogonal, oblicua inclinada y oblicua vertical (Landa, 1999)



# Uniones carpinteras tradicionales japonesas

Dentro de las uniones tradicionales, las uniones carpinteras japonesas están por sobre el resto de las de otros países (González et al, 2019).

El Maestro Torashichi Sumiyoshi y el profesor Gengo Matsui, autores del libro “Wood joints in classical japanese architecture” (1989), recopilaron una serie de empalmes y ensambles recabados de la arquitectura tradicional japonesa.

## Ensamblajes Japoneses

- Media cola de milano (*Katasage Ari*)
- Cuña y cuña ciega (*Wari kusabi y Jigoku hozo*)
- Cola de milano alojada (*Okuri ari*)
- Sumiyoshi doble espiga (*Sumiyoshi double tenon*)
- Doble y triple clavija (*Double and Triple plug*)
- Conectores de suelo (*Dodai shiguchi*)
- Viga de la cadera (*Yosemune no sumi*)

## Empalmes Japoneses

- Cola de milano escalonado (*Koshikake aritsugi*)
- Cuello cisne escalonado (*Koshikake kamatsugi*)
- Oblicuos (*Okkake daisen tsugi, Kanawa tsugi, Shiribasami tsugi*)
- Espiga y caja (*Mechiire*)
- Oblicuos rebajados a la mitad (*Isuka tsugi*)
- Alojados (*Kakushi tsugi*)
- Columnas (*Hashira tsugi*)

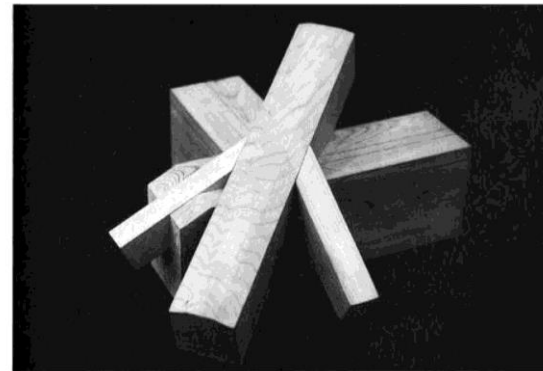
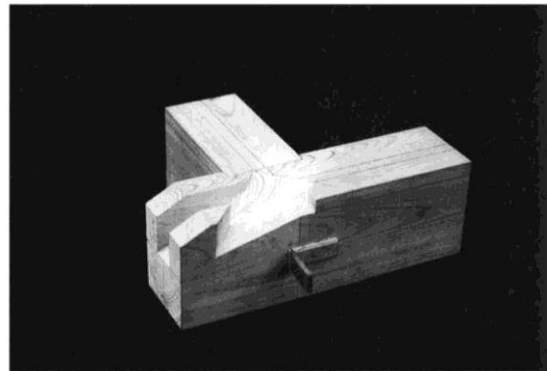


Imagen 15: Yosemune no sumi (Sumiyoshi et al, 1989).

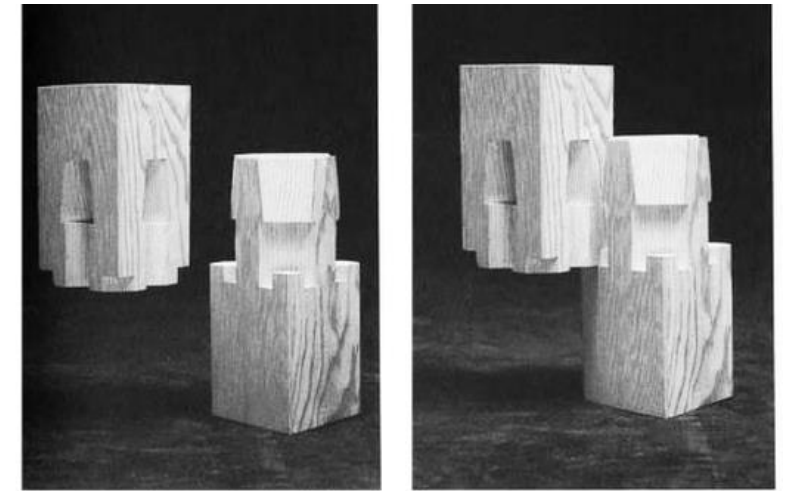


Imagen 16: Hashira Tsugi (Sumiyoshi et al, 1989).

# Empalmes oblicuos

Los empalmes oblicuos deben su nombre dado que los planos que se superponen para generar la unión son inclinados. En estos tipos de empalmes se pueden encontrar similitudes a los denominados “rayo de júpiter” o “pico de flauta”, no obstante, todos estos son inclinados. La mejor opción para poder unir vigas y extender luces corresponden a empalmes ortogonales longitudinales verticales y oblicuos. Los empalmes del tipo oblicuos japoneses, combinan estas dos formas geométricas, logrando buenas resistencias a fuerzas de tracción (Sumiyoshi et al, 1989).

**Rabbeted oblique scarf splice**  
*(Okkake daisen tsugi)*



Imagen 17: Empalme oblicuo alojado (Sumiyoshi et al, 1989).

**Mortised rabbeted oblique splice**  
*(Kanawa tsugi)*

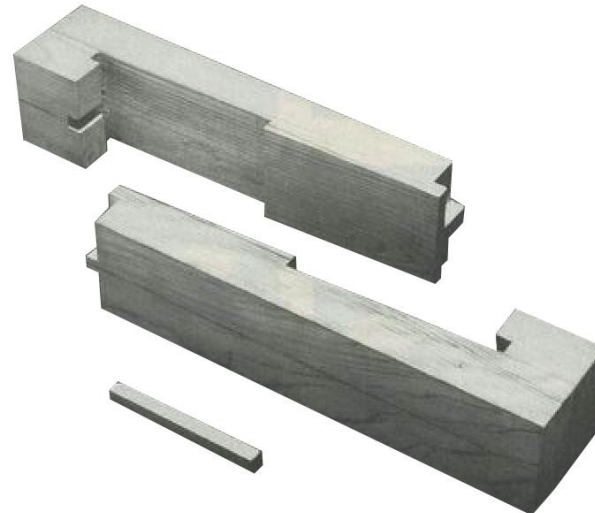


Imagen 18: Empalme oblicuo embutido (Sumiyoshi et al, 1989).

**Blind stubbed, housed rabbeted oblique scarf splice**  
*(Shiribasami tsugi)*



Imagen 19: Empalme oblicuo embutido, con talón ciego (Sumiyoshi et al, 1989).

# Propiedades Mecánicas de empalmes oblicuos

Frente a esfuerzos de tracción y compresión, los empalmes oblicuos tienen buen comportamiento. Respecto a los esfuerzos de flexión, los empalmes oblicuos pueden actuar en ambos sentidos (unión oblicua vertical y unión oblicua inclinada) para efectos de una viga apoyada. Al respecto, Landa, 1999, señala que **las uniones oblicuas verticales y las uniones oblicuas inclinadas actúan diferente si es que los esfuerzos de la unión se aplican al centro del vano o cerca de los apoyos.**

Para empalmes encolados, la pendiente de la geometría debe cambiar según el caso al cual sirva (imagen 20 y 21). En el caso de la unión cerca de los apoyos, si el empalme oblicuo cumple con las condiciones señaladas, para ambas orientaciones, puede devolver al elemento de madera en dicho punto un 100% de capacidad resistente, mientras que en el caso de la unión en el centro del vano, puede devolver al elemento de madera en dicho punto, un 100% de capacidad resistente, en el caso del empalme oblicuo vertical, y un 75% en el caso del empalme oblicuo inclinado. Todo lo anterior se cumple, si el empalme incluye clavijas o cuñas que atraviesen la unión en el plano traccionado (Landa, 1999).

¿Qué efectos tendría eliminar los químicos y adhesivos, que son nocivos para la salud, y dejar solo uniones madera con madera?

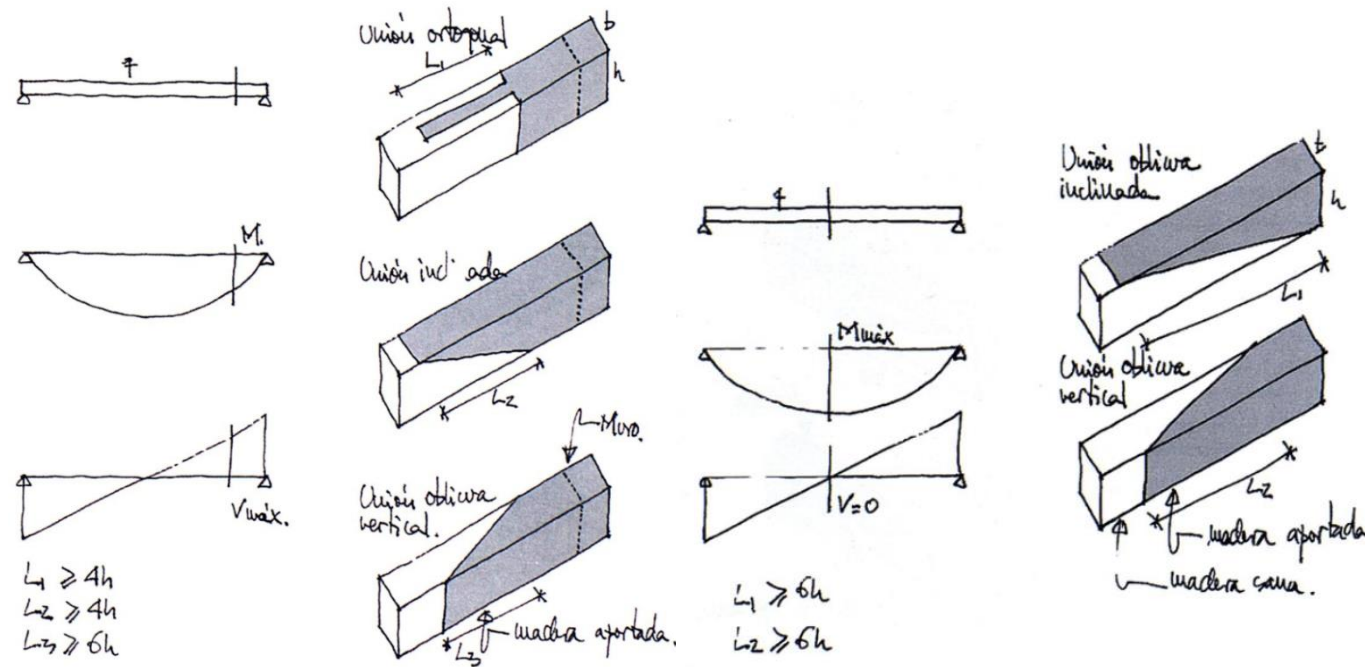


Imagen 20: Condiciones para uniones cerca de los apoyos (Landa, 1999).

Imagen 21: Condiciones para uniones en el centro del vano (Landa, 1999).

# Material de trabajo

Para realizar los ensayos de flexión estática, se utiliza **madera comercial de pino radiata estructural MSD de 41x138x760mm** obtenida de la empresa Arauco. Se opta por elegir, dentro de los 3 empalmes oblicuos japoneses presentados, utilizar solo dos de ellos: **Rabbeted oblique scarf splice y Mortised rabbeted oblique splice**. El tercer empalme estudiado (Blind stubbed, rabbeted oblique scarf splice), no será ensayado, lo anterior debido a que, según lo analizado y descrito por Sumiyoshi et al, 1989, su comportamiento mecánico es prácticamente idéntico al empalme oblicuo embutido y tiene una forma geométrica bastante similar, diferenciándose sólo en aspectos netamente estéticos.

En el caso del empalme oblicuo embutido, realizar la orientación en vertical no fue factible, debido a los costos y tiempos elevados de fabricación.

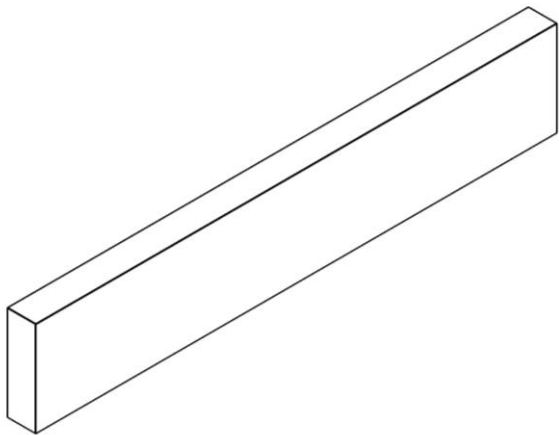


Imagen 22: Probeta de control (elaboración propia)

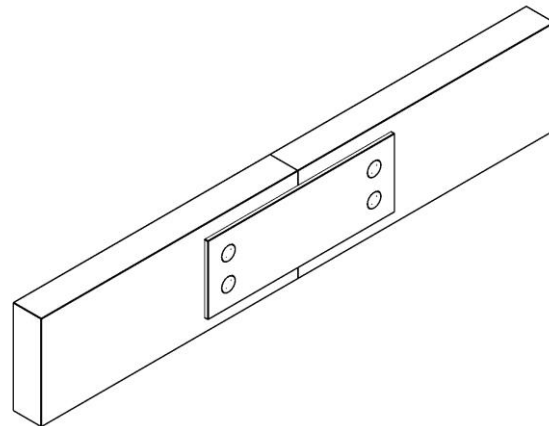


Imagen 23: Viga con conector mecánico (elaboración propia)

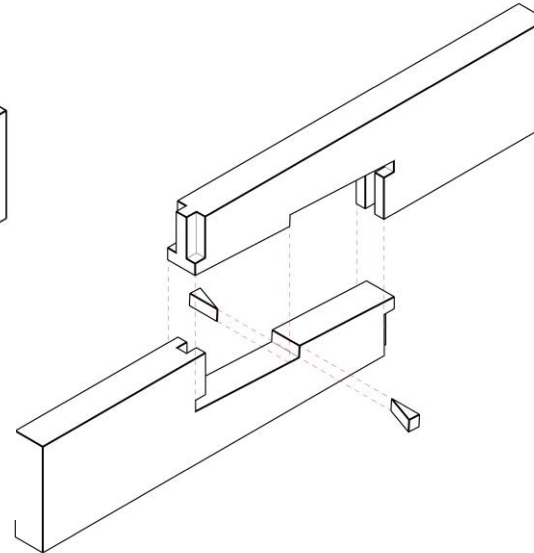


Imagen 24: Viga con empalme oblicuo embutido inclinado (elaboración propia)

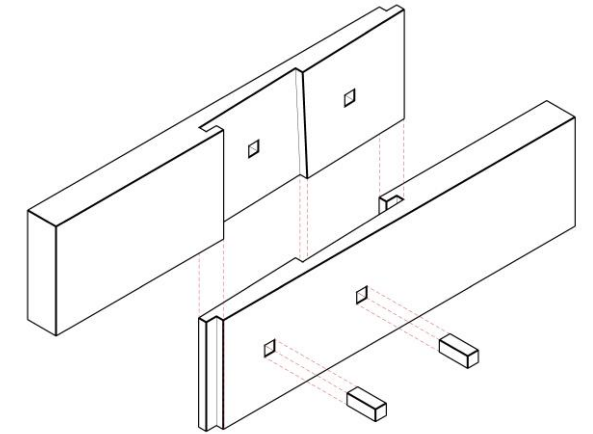


Imagen 25: Viga con empalme oblicuo embutido vertical (elaboración propia)

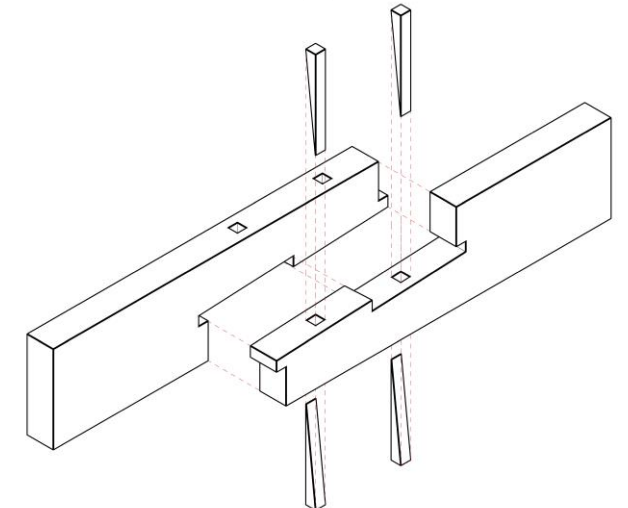


Imagen 26: Viga con empalme oblicuo alojado inclinado (elaboración propia)



# Ensayos

La cantidad de probetas ensayadas por cada tipología corresponde a un mínimo de 3. Cada una con las mismas características. Por lo tanto, el total de probetas a ensayar corresponde a 15.

Para el ensayo de las probetas se utilizaron las dependencias del DECON de la Escuela de Construcción Civil, de la Universidad Católica de Chile. Dentro del laboratorio de ensayos se utilizó la máquina de ensayo a flexión estática de luz corta a 3 puntos denominada Toni Technik modelo 2070 del año 2003.

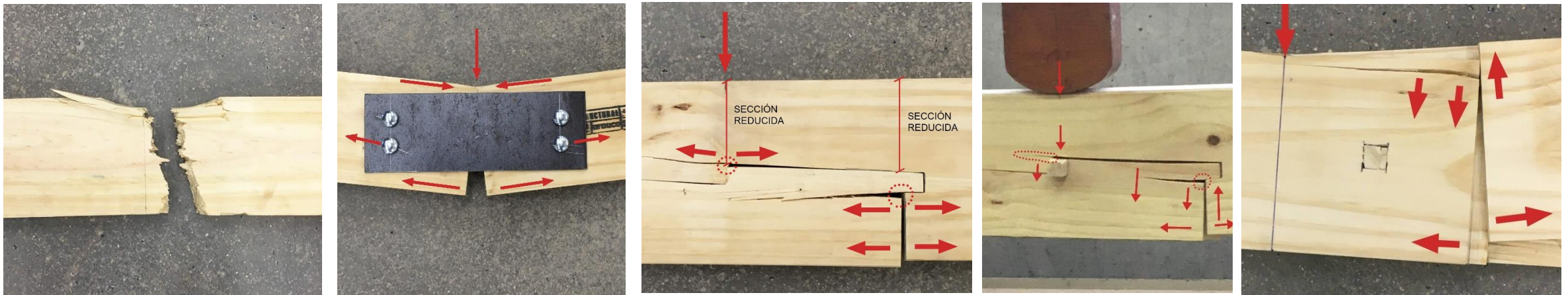


Imagen 27: Fotografías tomadas de los ensayos realizados (elaboración propia)

La probeta de control falla por tracción y compresión, generando una grieta en el eje de la fuerza aplicada.

La viga con conector metálico falla en la zona de compresión de las fibras. La zona traccionada se separa y desplaza los pernos inferiores.

Las vigas con empalme inclinado sufren una grieta en el vértice superior de la unión central vertical. Esto es producto de la reducción de la sección en el eje central, lo que ocasiona que los esfuerzos de tracción se concentren en dicho punto. La grieta en la zona inferior es más profunda.

La viga con empalme vertical se comporta mejor que las inclinadas. El empalme falla en la zona traccionada.



# Resultados

La fórmula utilizada para calcular el módulo de ruptura (MOR), es la siguiente:

$$MOR = \frac{1,5 \cdot L \cdot P_r}{b \cdot h^2} \cdot 0,0980665 \text{ (Mpa)}$$

Donde:

MOR = Módulo de ruptura (Mpa)

L = Luz del ensayo (cm)

$P_r$  = Carga de ruptura (kg)

b = ancho de la probeta (cm)

h = altura de la probeta (cm)

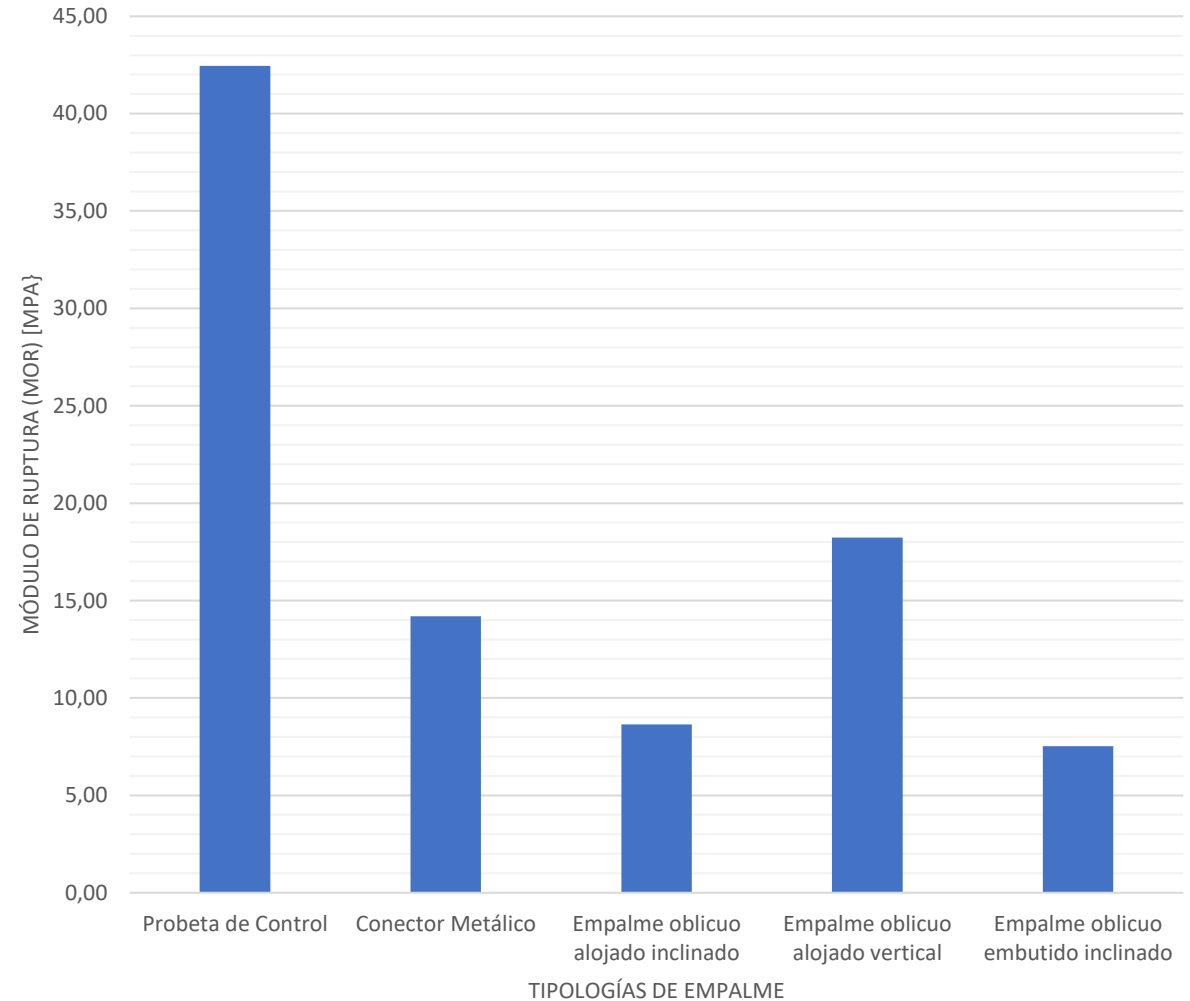


Imagen 28: Gráfico que mide el promedio de los MOR de las 3 probetas de cada tipología (elaboración propia)

## Conclusiones

Los resultados obtenidos en los ensayos de flexión estática, fueron mucho mejores en empalmes oblicuos verticales que los inclinados. Estos últimos tienden a rajarse fácilmente ya que las secciones transversales se reducen, por lo que ya no trabajan con la misma resistencia ante esfuerzos de flexión y perjudican el comportamiento global de la viga.

Por otro lado, los empalmes oblicuos japoneses verticales tienen un mejor comportamiento estructural, dado que concentran los esfuerzos en la zona comprimida, donde la madera actúa mejor que en la zona traccionada.

Comparando los módulos de ruptura de la viga de control y la viga con conector metálico, los empalmes oblicuos japoneses verticales, al encontrarse levemente por sobre los esfuerzos logrados por los conectores metálicos, se consideran una alternativa viable en el ámbito comercial.

Por último, de acuerdo a lo ensayado, no se recomienda el uso de estos empalmes en grandes luces. Lo mejor es utilizarlas en luces menores o en las zonas de la viga cercanas a los apoyos, donde los momentos son menores, dado que ninguno de los dos empalmes devuelve el 100% de resistencia al material para utilizarse en el centro del vano.



*Imagen 29: Fotografía del ensayo de flexión a empalme oblicuo alojado vertical (elaboración propia)*