



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE  
CONSTRUCCIONES**

**Diseño y evaluación de miembros estructurales en Madera  
Laminada Encolada (M.L.E.) con uniones dentadas (finger joint), en  
Pino Radiata.**

**Trabajo de grado previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE  
CONSTRUCCIONES**

**Autores:**

**ROMEL ALEJANDRO GARCÍA ARMIJOS  
BYRON JOSÉ MUÑOZ GUEVARA**

**Director:**

**JOSÉ FERNANDO VÁZQUEZ CALERO**

**CUENCA – ECUADOR**

**2015**



## DEDICATORIA

A mis padres: Hernán y Julia, quienes fueron un apoyo incondicional en este largo trayecto de alcanzar este sueño que hoy está haciéndose realidad; de igual manera a mis hermanos: Patricia, Italo, Vinicio, Angélica, Esteban, Santiago (desde el cielo), sobrinos y demás familiares que siempre estuvieron presentes para brindarme su ayuda y consejos para seguir adelante en mis estudios, mil gracias por su apoyo.

Romel García A.

Dedico esta tesis a mis padres Manuel y Mercedes, que siempre fueron los que me impulsaron a superar todos los obstáculos que se me han presentado en la vida y de esta manera conseguir esta meta la cual forja una base sólida para lograr muchos éxitos en la vida.

Byron Muñoz G.



## **AGRADECIMIENTOS**

A la universidad, por brindarnos la oportunidad de superarnos, al personal administrativo y profesores de la Escuela de Ingeniería Civil y Gerencia de la Construcción de la Facultad de Ciencia y Tecnología por ser las personas que nos guiaron por el camino de la constancia y además nos brindaron su confianza y amistad a lo largo de nuestra estancia dentro de las aulas universitarias, en especial a nuestro tutor el Ing. José Vázquez quien fue el responsable de guiarnos con su amplio conocimiento y por ende tener éxito en la elaboración del presente trabajo.

De igual manera al Lic. Italo García y todas las personas que nos brindaron y compartieron sus experiencias y conocimientos sobre el tema desarrollado.

**Muchas gracias por su apoyo y colaboración.**

## “DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MIEMBROS ESTRUCTURALES EN MADERA LAMINADA ENCOLADA (M.L.E.) CON UNIONES DENTADAS (FINGER JOINT), EN PINO RADIATA”

### RESUMEN

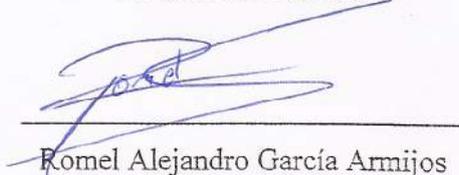
El presente trabajo pretende dar información técnica en lo que se refiere a tensiones de diseño, flexión en vigas, deformaciones, resistencia de las uniones de láminas dentadas, del adhesivo usado y al contar con información de las características mecánicas de la madera Pino Radiata producido en nuestro país, que se realizara mediante ensayos de laboratorio con la finalidad de obtener patrones de comparación de la madera local, con las características que exige la normativa chilena para producir miembros estructurales de madera laminada encolada y de esta manera contar con un mayor nivel de certeza al usar este tipo de elementos estructurales en la construcción.

**Palabras claves:** Miembros Estructurales, Propiedades Mecánicas, Finger Joint, Tensión de Diseño, Prensado, Pino Radiata.

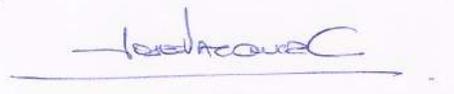


Ing. Paul Cornelio Cordero Díaz

**Director de Escuela**



Romel Alejandro García Armijos



Ing. José Fernando Vázquez Calero

**Director de Tesis**



Byron José Muñoz Guevara

**Autores**



**"DESIGN AND EVALUATION OF GLUED LAMINATED TIMBER (GLB)  
STRUCTURAL MEMBERS, WITH (FINGER JOINT) UNIONS, IN RADIATA  
PINE "**

**ABSTRACT**

This paper aims to provide technical information about tensile design, bending beams, deformations; strength of toothed sheets joints, and the adhesive used, as well as information on the mechanical properties of *Radiata* Pine wood, produced in our country. This is carried out by laboratory tests in order to obtain comparison patterns of local wood, with the characteristics required by the Chilean law to produce glulam or glued laminated timber structural members, and thus have a greater level of certainty when using this type of structural elements in construction.

**Keywords:** Structural Members, Mechanical Properties, Finger Joint, Tensile Design, Pressing, *Radiata* Pine.

Ing. Paul Cornelio Cordero Díaz  
**School Director**

Ing. José Fernando Vázquez Calero  
**Thesis Director**

Romel Alejandro García Armijos  
**Author**

Byron José Muñoz Guevara  
**Author**

Translated by,  
Lic. Lourdes Crespo



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>II</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Antecedentes .....	1
1.3 Justificación.....	3
<b>CAPÍTULO 2: OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
2.1 Objetivos generales .....	5
2.2 Objetivos específicos .....	5



<b>CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>6</b>
3.1 Generalidades.....	6
3.1.1 Definición de madera encolada.....	8
3.1.2 Componentes de la madera laminada.....	8
3.2 Base de cálculo (norma chilena).....	8
3.3 Tensiones admisibles, según NCh 2165.....	11
Fuente: (NCh 2165 – 1999, Tabla 1).....	11
3.3.1 Elementos en flexión.....	11
3.3.2 Elementos en compresión paralela.....	16
3.3.3 Tensiones admisibles en cizalle.....	18
3.3.4 Compresión y tracción normal a las fibras.....	18
3.3.5 Módulo de elasticidad.....	21
3.3.6 Humedad de servicio.....	21
3.4 Tensiones de diseño para M.L.E., según NCh 1198.....	22
3.4.1 Factores de modificación.....	23
3.4.2 Elementos en flexión.....	26
3.4.3 Flexión uniaxial en vigas simples.....	28
3.4.4 Cizalle en vigas.....	31
3.4.5 Cálculo de la deformación en vigas simples.....	33
3.4.6 Elementos en compresión paralela.....	37
3.4.7 Elementos en compresión normal a las fibras.....	42
3.4.8 Elementos sometidos a esfuerzos combinados.....	45



3.4.9	Flexión y compresión paralela .....	45
3.5	Diseño de viga recta de madera laminada.....	47
3.6	Obtención de datos experimentales.....	47
3.6.1	Determinación de la humedad de la madera .....	47
3.6.2	Determinación de la densidad en la madera.....	48
3.6.3	Clasificación estructural de la madera aserrada destinada a madera laminada. ....	48
3.6.4	Módulo de elasticidad .....	49
3.6.5	Ensayo de flexión.....	51
 <b>CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA.....</b>		<b>55</b>
4.1	Desarrollo experimental .....	56
4.1.1	Confiabilidad.....	57
4.1.2	Materiales.....	58
4.1.3	Clasificación de la madera utilizada en la confección de M.L.E. ....	67
4.1.4	Obtención de la humedad.....	68
4.1.5	Corrección de datos.....	69
4.1.6	Diseño de una viga recta y columna de madera laminada en Pino Radiata 69	
4.2	Análisis estadístico de los datos.....	70
4.2.1	Mediante medidas de tendencia central .....	70
4.2.2	Elaboración de tablas de resultados de ensayos.....	71



<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS .....</b>	<b>72</b>
5.1 Densidad.....	72
5.2 Obtención del módulo de elasticidad .....	73
5.3 Resistencia a la compresión .....	74
5.4 Humedad .....	75
5.5 Clasificación de la madera .....	75
5.6 Representación gráfica de resultados .....	76
5.6.1 Diagrama esfuerzo vs deformación.....	76
5.6.2 Representación gráfica del M.O.E. modificado .....	83
5.6.3 Representación gráfica del M.O.R. ....	84
5.6.4 Representación gráfica de la humedad.....	85
5.7 Diseño de columna de M.L.E.....	86
5.8 Diseño de viga de M.L.E.....	89
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>97</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.2.1 Grados para pino radiata como láminas para M.L.E. Clasificación mecánica.....	9
Tabla 3.2.2 Grados para pino radiata como laminas para M.L.E. Clasificación visual	9
Tabla 3.2.3 Especificaciones comunes a los dos grados de calidad definidos para madera aserrada destinada a la fabricación de laminados estructurales.....	10
Tabla 3.3.1 Tensiones básicas a utilizar en el cálculo de las tensiones admisibles de elementos laminados de Pino Radiata, en condiciones de uso seco .....	11
Tabla 3.3.2 Datos para evaluar la razón IK/IG .....	14
Tabla 3.3.3 Factores a usar en el cálculo de IK/IG. Factor de ponderación Z.....	14
Tabla 3.3.4 Razones de resistencia para las desviaciones de fibra correspondiente a los diferentes grados a considerar en el diseño por flexión de vigas de madera laminada .....	15
Tabla 3.3.5 Razones de resistencia para las tensiones básicas de flexión para elementos fabricados con madera Aserrada clasificada mecánicamente.....	15
Tabla 3.3.6 Datos de nudos destinados al cálculo de <b>RRcp</b> .....	17
Tabla 3.3.7 Razón de resistencia, para piezas de madera aserradas clasificada visualmente .....	18
Tabla 3.3.8 Factores de ajuste "n" aplicados a las propiedades mecánicas, en la obtención de tenciones básicas para la madera laminada Rbk 5%.....	21



Tabla 3.3.9 Factores de ajuste para condiciones de servicio húmedo $H \geq 16\%$ .....	22
Tabla 3.4.1 Factores de modificación por duración de la carga.....	24
Tabla 3.4.2 Corrección por temperatura .....	25
Tabla 3.4.3 Factores de modificación por trabajo conjunto, KC .....	26
Tabla 3.4.4 Longitudes efectivas de volcamiento, de elementos flexionados .....	27
Tabla 3.4.5 Condiciones de rebaje para que no afecte la viga .....	33
Tabla 3.4.6 Deformaciones máximas admisibles en vigas de madera.....	34
Tabla 3.4.7 Longitudes efectivas de pandeo, $l_p$ .....	39
Tabla 4.1.1 Resultados de laboratorio del adhesivo POLIMAX .....	64
Tabla 4.1.2 Resultados de laboratorio del adhesivo RESINCOLA .....	65
Tabla 5.1.1 Registro de las densidades ensayadas .....	72
Tabla 5.2.1 Datos para la obtención de módulos de elasticidad y rotura.....	73
Tabla 5.3.1 Datos para la obtención de la resistencia a compresión.....	74
Tabla 5.4.1 Datos para la obtención de humedad de la madera.....	75



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.2.1 Bodegas Viña, Chile. ....	2
Fig. 1.2.2 Bodegas Protos, España. ....	3
Fig. 3.1.1 Laminación horizontal, Laminación vertical. ....	7
Fig. 3.3.1 Relación que especifica RR (Ec. 3.3.5) en función del módulo de ruptura MOR y la razón $R = X = IKIG$ .....	13
Fig. 3.3.2 Esquema en la deducción de las tensiones básicas con 5% de exclusión..	20
Fig. 3.4.1 Procedimiento para la obtención de las tensiones de diseño .....	22
Fig. 3.4.2 Factor de modificación por duración de la carga.....	24
Fig. 3.4.3 Apuntalamiento individual de columnas .....	42
Fig. 3.4.4 Superficie solicitada en compresión normal .....	44
Fig. 3.4.5 Solicitaciones de flexión y compresión excéntricas .....	45
Fig. 3.6.1 Esquema del ensayo de flexión en láminas homogéneas .....	49
Fig. 3.6.2 Esquema de la zona elástica de la madera sometida a flexión.....	51
Fig. 3.6.3 Esquema ensayo a flexión de uniones dentadas .....	52
Fig. 3.6.1 Procesos experimentales desarrollados en el laboratorio universitario .....	56
Fig. 4.1.1 Elaboración de viga, que consta de 10 láminas .....	57



Fig. 4.1.2 Ubicación de Jima.....	58
Fig. 4.1.3 Canteadora, Maquinaria para mecanizar madera.....	59
Fig. 4.1.4 Cepilladora, maquinaria para mecanizar madera.....	59
Fig. 4.1.5 Sierra circular, maquinaria para mecanizar madera.....	60
Fig. 4.1.6 Maquinaria sin realizar las adaptaciones .....	60
Fig. 4.1.7 Maquinaria realizada las adaptaciones .....	61
Fig. 4.1.8 Instrumental usado .....	61
Fig. 4.1.9 Sierra eléctrica de mesa .....	62
Fig. 4.1.10 Prensa hidráulica.....	62
Fig. 4.1.11 Balanza electrónica (sentible).....	63
Fig. 4.1.12 Horno eléctrico .....	63
Fig. 4.1.13 Calibrador .....	64
Fig. 4.1.14 Foto de probetas para ensayos de compresión.....	66
Fig. 4.1.15 Probeta de ensayo a compresión, medidas en cm .....	66
Fig. 4.1.16 Fotos de probetas para ensayos de flexión.....	67
Fig. 4.1.17 Probeta de ensayo a flexión, medidas en cm .....	67
Fig. 4.1.18 Foto de ensayo de Flexión .....	68
Fig. 4.1.19 Fotos de probetas para determinar la humedad .....	69
Fig. 4.2.1 Función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria normal con media $\mu$ y varianza $\sigma^2$ .....	71



Fig. 5.6.1 Gráfica de variación del M.O.E. modificado para cada pieza .....	83
Fig. 5.6.2 Gráfica de distribución normal del M.O.E. ....	83
Fig. 5.6.3 Gráfica del M.O.R. para cada pieza.....	84
Fig. 5.6.4 Gráfica de distribución normal del M.O.R. ....	84
Fig. 5.6.5 Gráfica de variación de humedad en cada pieza.....	85
Fig. 5.6.6 Gráfica de la distribución normal de la humedad .....	85
Fig. 5.8.1 Fotografía de Pórtico de M.L.E. (4,50 de largo por 2,00 de alto) .....	92





Romel Alejandro García Armijos

Byron José Muñoz Guevara

Trabajo de Graduación

Ing. José Fernando Vázquez Calero Msc.

Julio, 2015

## **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MIEMBROS ESTRUCTURALES EN MADERA LAMINADA ENCOLADA (M.L.E.) CON UNIONES DENTADAS (FINGER JOINT), EN PINO RADIATA.**

### **INTRODUCCIÓN**

Debido a la estabilidad económica que presenta el país en los últimos años, es evidente observar obras civiles en construcción, las cuales necesitan una gran cantidad de recursos económicos para transformarse de materia prima en el producto final, por tal motivo es importante impulsar el uso de materiales alternativos que minimicen dichos costos y que sean amigables con el medio ambiente, la madera laminada encolada con Pino Radiata no necesita demasiados recursos para su transformación de materia prima a producto final, al reducir su sección de aserrado en láminas se aumenta su rendimiento, y al sustituir un metro cúbico de madera por otros materiales de construcción (hormigón, bloques o ladrillos) resulta en un significativo ahorro medio de entre 0,75 y 1 Tonelada de CO<sub>2</sub>.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> (Instituto internacional para el medio ambiente y el desarrolla, usando productos de madera para mitigar el cambio climático, 2004)



La investigación se basará en la elaboración de probetas de pino radiata, de las cuales se realizarán los ensayos en laboratorio como: resistencia de uniones encoladas, resistencia a la flexión, resistencia a tracción y cortante para determinar las características mecánicas del elemento, una vez obtenidos los datos estos serán analizados mediante procesos de estadística descriptiva con el fin de obtener medidas de tendencia central que posteriormente se utilizarán como parámetros de diseño, y sirva de incentivo para que los proyectistas la consideren un elemento estructural resistente y seguro.

Una vez definidos los valores de diseño, se procederá a realizar una guía de cálculo en base a la Norma Chilena “NCH 1198 del 2006, Madera – Construcciones en madera – Cálculo”.



## **CAPÍTULO 1**

### **FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

#### **1.1 Planteamiento del problema**

La dificultad de encontrar madera de gran longitud en forma natural, no a permitido cubrir grandes luces en estructuras de madera; la falta de información de las características mecánicas de la materia prima Pino Radiata, la restricción del mercado de productos prefabricados y el bajo nivel de industrialización de la madera en nuestro país; son motivos para ensayar en probetas y determinar sus propiedades mecánicas e incentivar el uso de este material que es renovable y amigable con el ambiente.

#### **1.2 Antecedentes**

El Ecuador, en conjunto con la comunidad Andina, en la década de los 80 participó en el proyecto de desarrollo tecnológico en el área de recursos forestales; con el propósito de investigar el uso integral de la madera para la construcción. Al concluir la misma, se realizaron publicaciones que sirvieron de base para la elaboración del “Capítulo 7: Construcción con Madera” de la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Sabiendo que el Ecuador se encuentra ubicado en una zona privilegiada del planeta para realizar plantaciones forestales, y con los estudios realizados en países de Europa, Estados Unidos, Chile, etc., donde esta técnica constructiva tiene normativas de seguridad, la cuales pueden ser adaptadas a la realidad de los materiales existentes

en el país, se puede incentivar a los promotores ecuatorianos a usar esta técnica que es amigable en el medio ambiente, de presencia estética y sobre todo segura.

La madera siempre ha estado presente en las construcciones del ser humano desde sus inicios, la M.L.E. aparece a principios del siglo XX; en 1905 surgen los sistemas de elementos laminados y unidos por medio de adhesivos desarrollados por el ingeniero alemán Otto Hetzer (DELLEPIANE, 2011).

Los sistemas estructurales están compuestos por distintos elementos como: vigas, columnas, arriostres, etc., (Fig. 1.2.1 - Fig. 1.2.2) que están unidos entre sí, para formar una estructura monolítica que dirija las cargas hacia la cimentación de la estructura de forma equilibrada. No obstante para realizar los cálculos de la estructura es necesario realizar un aislamiento de cada elemento, ya que cada uno de ellos realiza una función específica.

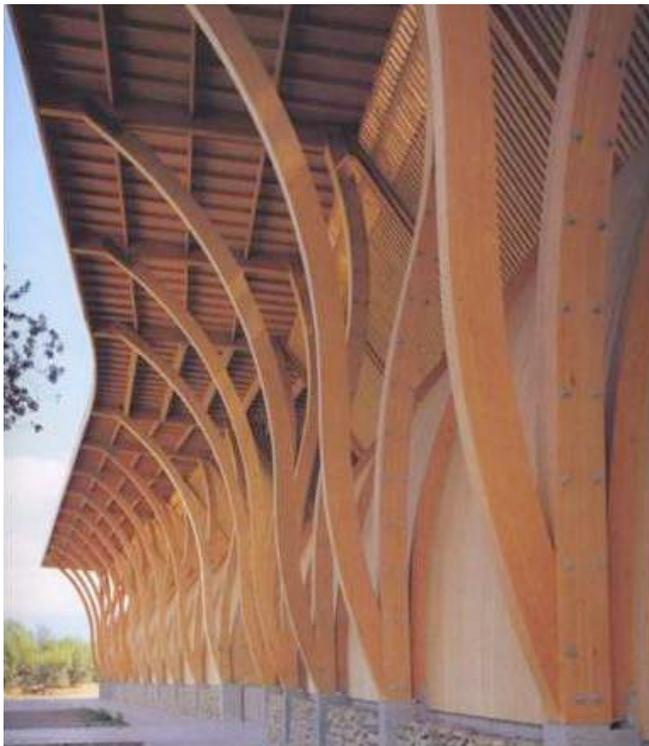


Fig. 1.2.1 Bodegas Viña, Chile.

Fuente: (Cruz, 2012)



Fig. 1.2.2 Bodegas Protos, España.

Fuente: (Rogers, 2012)

### 1.3 Justificación

Debido a las ventajas que tiene con respecto a otros materiales como el acero y el hormigón, en referencia a su peso específico, características físicas y mecánicas, la M.L.E. es un material versátil para adaptarse a la forma requerida sin perder su belleza natural.

A la vez es un material de construcción liviano, fácil de manipular manualmente y posee una buena resistencia al fuego tratándolo adecuadamente (el avance de la combustión es lento, 0,6 mm/min), (Pérez, 1992), ya que es un mal conductor de calor y forma una capa de carbón en el perímetro del elemento que ayuda a proteger la estructura interior de la madera para que no sufra alteraciones.

Afirmar e incentivar el uso de este método constructivo en el país, teniendo en consideración que las ciudades coloniales fueron construidas en gran porcentaje de madera y estas necesitan de mantenimiento adecuado, que deben ser realizados en



base a los mismos materiales usados en principio para no afectar la hegemonía de las urbes coloniales.

Implementar elementos prefabricados normalizados de M.L.E. en Pino Radiata para la construcción y de esta manera reducir los tiempos montaje de los elementos estructurales.

## **CAPÍTULO 2**

### **OBJETIVOS**

#### **2.1 Objetivos generales**

Obtener valores de tensiones de diseño, en los elementos estructurales de M.L.E. horizontal con uniones dentadas y de esta manera realizar el dimensionamiento para los elementos estructurales.

#### **2.2 Objetivos específicos**

Obtener las propiedades físicas y mecánicas de la madera laminada usando pino radiata:

- Módulo de elasticidad (MOE).
- Módulo de rotura (MOR).
- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la tracción.
- Resistencia a fuerzas cortantes.

Diseño de vigas y columnas de M.L.E. en pino radiata según la norma chilena NCH 1198 del 2006.

## CAPÍTULO 3

### MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Generalidades

La M.L.E. es la unión de láminas de madera a través de sus cantos, caras y extremos con su fibra en la misma dirección, mediante un adhesivo estructural conformando un elemento ilimitado en sección y largo, que funciona como una sola unidad estructural, manteniendo intactas las propiedades mecánicas de la madera e inclusive mejorándolas.

Los laminados encolados pueden diferenciarse por el sentido de la carga sobre el elemento:

- **Laminación horizontal:** Con las láminas colocadas paralelas al eje de flexión.
- **Laminación vertical:** Con las láminas verticales colocadas perpendicularmente al eje de flexión.

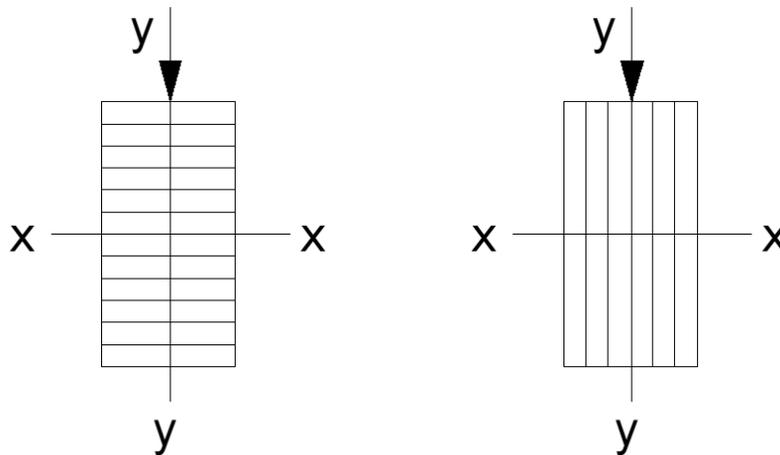


Fig. 3.1.1 Laminación horizontal, Laminación vertical.

Fuente: (Autores, 2015)

Como se ha determinado con anterioridad la M.L.E. posee algunas ventajas sobre la madera aserrada natural y nos permite obtener o crear cualquier tipo de sección y longitud sin tener en cuenta las limitaciones que nos presenta la naturaleza, conformando un solo miembro estructural homogéneo y compacto que funcionara mecánicamente mejor que un miembro estructural de madera aserrada natural de igual sección y longitud, por lo tanto, la norma chilena NCH 1189 aplica las mismas consideraciones constructivas de las M.L.E. y la madera aserrada natural.

Otra de las ventajas que nos presentan los elementos de M.L.E. y por los cuales más se aprovecha este recurso constructivo, es la morfología de sus elementos, ya que podemos cubrir grandes luces de las estructuras sin importar que estas posean pórticos rectos o curvos y que su estructura quede expuesta a la vista de los usuarios.

Por otro lado las estructuras de M.L.E. en su mayoría son compuestas por uniones y anclajes metálicos que nos agilitan el proceso de montaje de las construcciones y nos confieren una gran rigidez en los nudos al ser elementos macizos y de características mecánicas diferentes a los de los miembros estructurales.

### **3.1.1 Definición de madera encolada**

Los elementos de M.L.E. están formados por la combinación de láminas de madera de espesor constante y diversas longitudes que se ensamblan longitudinalmente por múltiples entalladuras en los extremos y encoladas unas a otras que nos dan como producto final un elemento macizo.

### **3.1.2 Componentes de la madera laminada**

Para la investigación se utilizarán elementos constructivos existentes en el medio y en el mercado local como la madera de la variedad Pino Radiata para la elaboración de láminas como parte principal de los elementos de M.L.E. el adhesivo que se va a usar es RESINCOLA que es un adherente Poli vinílico.

## **3.2 Base de cálculo (norma chilena)**

La base de cálculo en la cual se fundamenta la investigación es la norma chilena NCh 1198 del 2006 ya que en nuestro país aún no se han desarrollado los suficientes estudios como para poder establecer una normativa sobre M.L.E, pero esto no quiere decir que la normativa ecuatoriana quede fuera de la investigación ya que en parte se adaptará parámetros como solicitaciones de carga, peso propio de los elementos y entre otros de la normativa local existente que es la NEC.

Se respetará los métodos y procedimientos de diseño estructural que determinan parámetros mínimos que deben cumplir los elementos y las uniones de los miembros de M.L.E. en la norma NCH 1198.

La norma Chilena aplica sobre estructuras de edificaciones corrientes de madera, elementos estructurales de madera en construcciones mixtas, pasarelas de uso peatonal, columnas de madera, etc.

Las piezas estructurales, ensambles o estructuras de cualquier tipo de edificación deben ser capaces de soportar, con adecuada estabilidad y rigidez, la totalidad de las cargas y otras solicitaciones que pueden ser razonablemente esperadas durante su

montaje, construcción y uso, sin exceder las tensiones de diseño y deformaciones admisibles que se establecen en la norma.

Este método se aplica según la norma NCh 2150. La cual clasifica en grado A y grado B a la madera, y se puede determinar por dos métodos alternos:

- **Mecánico:** La madera se clasifica mediante la determinación experimental del módulo de elasticidad de las piezas de madera aserrada.
- **Visual:** La madera se clasifica mediante una inspección ocular o visual, de los rasgos que se aprecia en cada pieza de madera.

Tabla 3.2.1 Grados para pino radiata como láminas para M.L.E. Clasificación mecánica

Clases según clasificación Mecánico	Módulo de elasticidad aparente de cada pieza de madera aserrada, $E_f$ (MPa)
Grado A	$E_f \geq 9000$
Grado B	$9000 > E_f \geq 4000$

Fuente: (NCh 2150 – 1991, Tabla 2)

Tabla 3.2.2 Grados para pino radiata como laminas para M.L.E. Clasificación visual

Características o defectos <sup>1)</sup>	Especificaciones para el:		Observación
	Grado A	Grado B	
<b>Agujeros – nudos sueltos – nudos firmes</b>	La suma de las magnitudes de todos los nudos contenidos en intervalos de 60 mm no deben exceder 35% del ancho de cara (0,35 a)		a: ancho de la cara
	De ½ del ancho de cara (0,5 a)		
<b>Alabeos</b>	Ver Tabla 3.2.3.		Ver nota de la Tabla 3.2.3.
<b>Aristas faltantes</b>	Se acepta en un canto a lo larga de la pieza, si la magnitud máxima del defecto es 4 mm la cual debe desaparecer cuando el elemento laminado sea cepillado.		
<b>Huecos</b>	Se aceptan huecos “secos”, con un ancho máximo de 3 mm y una longitud igual al ancho de la pieza siempre y cuando sean ocasionales.		
<b>Contenido de humedad</b>	No mayor al 16%		
<b>Desviación de la fibra, grietas y rajaduras</b>	Menor que 1:10	Menor que 1:8	
	Las piezas deben estar sin grietas, rajaduras o		

	abolladuras que formen un ángulo mayor o igual a 45° con la cara de la pieza.		
<b>Manchas</b>	Ver Tabla 3.2.3.		
<b>Pudrición y perforación</b>	No se acepta		
<b>Resina</b>	Ver Tabla 3.2.3.		
<b>Velocidad de crecimiento</b>	Más de 0,8 anillos por cada cm.	Más de 0,7 anillos por cada cm.	
1) Las definiciones y la forma de cuantificar los defectos se deben hacer de acuerdo a la NCh 992.			

Fuente: (NCh 2150 – 1991, Tabla 3)

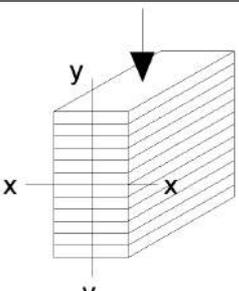
Tabla 3.2.3 Especificaciones comunes a los dos grados de calidad definidos para madera aserrada destinada a la fabricación de laminados estructurales

<b>Características o defectos <sup>1)</sup></b>		<b>Especificaciones</b>			
<b>Alabeos <sup>2)</sup></b>	<b>Acanaladura</b>	Se acepta con las magnitudes máximas siguientes:			
		<b>Espesor nominal, mm</b>	<b>Acanaladura máxima admisible, mm</b>		
			<b>Ancho nominal, mm</b>		
			100 o menos	150	200 ó más
		25	Ninguna	1	3
	38	Ninguna	1	2	
	50	Ninguna	Ninguna	1	
	<b>Arqueadura, encorvadura y torcedura</b>	Se acepta con una magnitud máxima de 1,2 cm en 360 cm de longitud			
<b>Contenido de humedad</b>		No mayor a 16%			
<b>Manchas y médula</b>		Se acepta la manchas azul y la presencia de médula sólo en el grado B, con excepción de las dos laminas externas, en ambos cantos del elemento laminada			
<b>Pudrición y perforación</b>		No se acepta			
<b>Resina</b>		No se aceptan piezas con alta contenido de resina en la superficie a encolar			
<b>Agujeros, nudos sueltos, nudos firmes</b>		Si estos defectos quedan ubicados en el 20% del extremo de la longitud de la pieza deben cumplir las especificaciones de la Tabla 3.2.2.			
<b>Nota:</b> Para láminas más delgadas (menor de 25 mm) estos requerimientos pueden rebajarse cuando se dispone de un adecuado sistema de prensado que elimine la distorsión durante el ensamblado.					

Fuente: (NCh 2150 – 1991, Tabla 1)

### 3.3 Tensiones admisibles, según NCh 2165

Tabla 3.3.1 Tensiones básicas a utilizar en el cálculo de las tensiones admisibles de elementos laminados de Pino Radiata, en condiciones de uso seco

Grado	Flexión Respecto al Eje X					Carga Axial		
	Laminación horizontal: Carga normal a la caras de las láminas					Compresión paralela	Tracción paralela	Módulo de elasticidad
	Flexión Fb,f MPa	Cizalle Fb,cz MPa	Tracción Normal Fb,tn MPa	Compresión Normal Fb,cn MPa	Módulo de Elasticidad EL,b,x MPa	Fc,p MPa	Fb,tp MPa	EL,b MPa
<b>A</b>	19	1,3	0,43	2,8	11000	13,0	9,3	10000
<b>B</b>	19	1,3	0,43	2,8	9000	13,0	9,3	8000

Fuente: (NCh 2165 – 1999, Tabla 1)

#### 3.3.1 Elementos en flexión

La norma está basada en la ASTM D 3737 – 87 obtiene las tensiones admisibles multiplicando una resistencia básica, por una razón de resistencia RR.

Planteando este concepto como nivel del módulo de rotura característico del material comercializado,  $MR_k$ , y del módulo de rotura característico de la madera libre de defectos,  $R_{b,k}$  resulta:

$$MR_k = R_{b,k} \times RR \tag{Ec. 3.3.1}$$

Según la NCh 2165 deduce la ecuación anterior a términos de tensión de flexión en Madera Laminada Homogénea.

$$f_f = f_{b,f} \times RR_f \times K \tag{Ec. 3.3.2}$$



En donde:

$f_f$  = Tensión admisible en flexión de la madera laminada, en MPa.

$f_{b,f}$  = Tensión básica en flexión, ver Tabla 3.3.1, en MPa.

$RR_f$  = Razón de resistencia en flexión.

$K$  = Factor de ajuste por altura ( $h$  en mm) de la viga.

Con:

$$K = 0,75 \quad \text{para } h > 375 \quad \text{Ec. 3.3.3}$$

$$K = 0,85 \quad \text{para } h \leq 375 \quad \text{Ec. 3.3.4}$$

La Razón de resistencia en flexión  $RR_f$ , “factor de modificación de tensiones”, que toma su valor de acuerdo a uno de los siguientes tres efectos (Ec. 3.3.2):

### 1) Nudosidades

$$RR_f = (1 + 3 \times R) \cdot (1 - R)^3 \cdot \left(1 - \frac{R}{2}\right) \quad \text{Ec. 3.3.5}$$

Con:

$$R = \frac{I_K}{I_G} \quad \text{Ec. 3.3.6}$$

En donde:

$I_K$  = Momento de inercia de los nudos en una sección transversal, en  $\text{mm}^4$ .

$I_G$  = Momento de inercia total de la sección, en  $\text{mm}^4$ .

Definidos en la NCh 2165 de 1991 A.1.1, de esta manera la influencia de los nudos sobre la resistencia depende tanto de su tamaño como de su ubicación respecto al plano neutro.

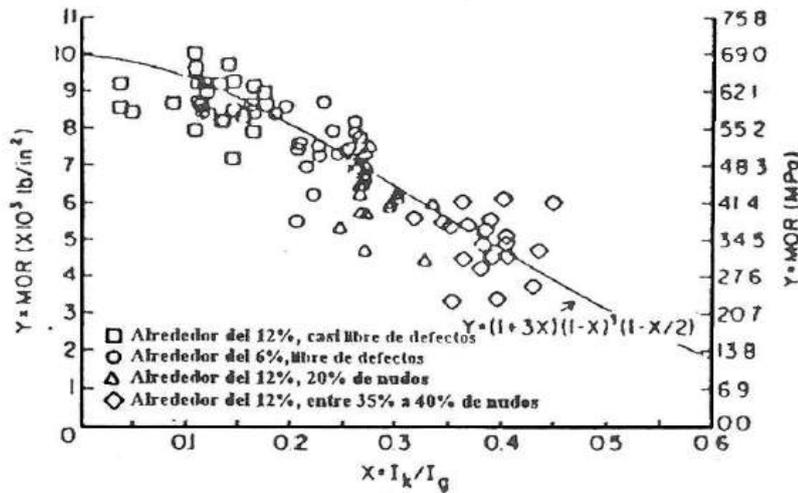


Fig. 3.3.1 Relación que especifica RR (Ec. 3.3.5) en función del módulo de ruptura MOR y la razón  $R = X = I_k / I_g$

Fuente: (Moody et al. 1989)

El cual (R) se calcula según metodología expuesta en la NCh 2165 – 1991 y adjuntando información recogida en terreno, lo que se estima mediante métodos estadísticos como:

$$R = \left( \frac{I_K}{I_G} \right) = x + d \times \frac{[\sum_0^n z^2]^{1/2}}{\sum_0^n z} \tag{Ec. 3.3.7}$$

En donde:

$x, d, z$  = Parámetros estadísticos de las nudosidades, definidas en Tabla 3.3.2 y Tabla 3.3.3.

Tabla 3.3.2 Datos para evaluar la razón IK/IG

Grado	Datos de nudos			
	Xi	$\sigma x, i$	Mi percentil de 99,5%	$di = mi - xi$
A	0,110	0,3769	0,730	0,620
B	0,145	0,4225	0,840	0,695

Fuente: (NCh 2165 – 1999, Tabla 8)

Tabla 3.3.3 Factores a usar en el cálculo de IK/IG. Factor de ponderación Z

Número de laminas $N = 2N$	Factor de ponderación para la enésima lamina $Z = N^3 - (N - 1)^3$	Factores para “2 n” laminas		
		$\sum Z = 2N^3$	$\sum Z^2 = 0,4(N(9N^4 - 5N^2 + 1))$	$\frac{\sqrt{\sum Z^2}}{\sum Z}$
1	0,25	0,25	0,0625	1,00
2	1,00	2,00	2,00	0,707
3	3,25	6,75	21,1875	0,682
4	7,00	16,00	100,00	0,625
5	12,25	31,25	321,3125	0,573
6	19,00	54,00	822,00	0,531
8	37,00	128,00	3560,00	0,466
10	61,00	250,00	11002,00	0,420
12	91,00	432,00	27564,00	0,384
14	127,00	686,00	59822,00	0,357
16	169,00	1024,00	116944,00	0,334
18	217,00	1458,00	211122,00	0,315
20	271,00	2000,00	358004,00	0,299
22	331,00	2662,00	577126,00	0,285
24	397,00	3456,00	892344,00	0,273
26	469,00	4394,00	1332266,00	0,263
28	547,00	5488,00	1930684,00	0,253
30	631,00	6750,00	2727006,00	0,245
40	1141,00	16000,00	11504008,00	0,212
50	1801,00	31250,00	35125010,00	0,190

Fuente: (NCh 2165 – 1999, Tabla 9)

## 2) Inclinación de la fibra:

 Valores de  $RR_f$  que se describen a continuación.

Tabla 3.3.4 Razones de resistencia para las desviaciones de fibra correspondiente a los diferentes grados a considerar en el diseño por flexión de vigas de madera laminada

Grado	Desviación de la fibra	Razón de resistencia	
		Tracción paralela a la fibra	Compresión paralela a la fibra
A	1:10	0,61	0,74
B	1:8	0,53	0,66

Fuente: (NCh 2165 – 1999, Tabla 2)

### 3) Acotados por el módulo de elasticidad:

Valores de  $RR_f$  descritos a continuación.

Tabla 3.3.5 Razones de resistencia para las tensiones básicas de flexión para elementos fabricados con madera Aserrada clasificada mecánicamente

Madera aserrada		Mínima razón de resistencia para:	
Grado	$El, MPa$	Tensión básica de flexión, laminación horizontal	Tensión básica de compresión, paralela a las fibras
A	$El \geq 9000$	0,55	0,56
B	$9000 > El \geq 4000$	0,50	0,50

Fuente: (NCh 2165 – 1999, Tabla 3)

#### 3.3.1.1 $RR_f$ para elementos laminados de acuerdo a la clasificación Visual o Mecánica en el cálculo de las tensiones admisibles

En flexión, las tensiones admisibles dependen del factor  $RR_f$ , el cual considera 3 efectos nombrados con anterioridad, que se asocian en función al tipo de clasificación que se realice a la madera, que forma parte del elemento estructural laminado.

- Para una clasificación visual la razón de resistencia en flexión  $RR_f$  (Ec. 3.3.2) de acuerdo al grado obtenido (A o B), debe ser el menor valor entre las

razones de resistencia definidas por: las nudosidades y desviación de la fibra, que su valor debe ser mayor o igual a los que indica la Tabla 3.3.5.

- Para una clasificación mecánica, la razón de resistencia  $RR_f$  en flexión se considera solo la razón de resistencia que es definida por: las nudosidades y el valor del módulo de elasticidad indicados en la Tabla 3.3.5.
- Los valores mínimos de  $RR_f$  para esta clasificación queda en función a la altura de viga.

En vigas de alturas  $h \leq 375$  mm se escoge los valores de la Tabla 3.3.5 columna 3, según el grado y de 0,5 si la viga es de altura  $h \geq 375$  mm, para cualquier grado (NCh 2165 – 1991, 5.1.1.1.4).

### 3.3.2 Elementos en compresión paralela

Según NCh 2165, la tensión admisible de compresión paralela que se establece a un elemento estructural conformado por láminas de un solo grado, se obtiene según la siguiente expresión:

$$f_{cp} = f_{b,cp} \times RR_{cp} \quad \text{Ec. 3.3.8}$$

En donde:

$f_{cp}$  = Tensión admisible de compresión paralela para madera laminada, en MPa.

$f_{b,cp}$  = Tensión básica en compresión paralela, ver Tabla 3.3.1, en MPa.

$RR_{cp}$  = Razón de resistencia en compresión paralela.

La Razón de resistencia en compresión paralela  $RR_{cp}$ , “factor de modificación de tensiones”, que toma su valor de acuerdo a uno de los siguientes tres efectos (Ec. 3.3.8):

**1) Nudosidades**

$$RR_{cp} = \frac{(Y_{cp})^3}{4} - (Y_{cp})^2 - \frac{Y_{cp}}{4} + 1 \tag{Ec. 3.3.9}$$

En donde:

$Y_{cp}$  = Tamaño del nudo máximo permitido por el grado de la lámina, expresada como una fracción decimal del ancho.

Con:

$$Y_{cp} = x_i + 2,576 \cdot \sigma_i \tag{Ec. 3.3.10}$$

$x_i$  = Tamaño promedio del nudo máximo aceptado por el grado de la lámina, expresada como una fracción decimal del ancho, ver Tabla 3.3.6.

$\sigma_i$  = Desviación estándar del tamaño del nudo máximo aceptado, expresado como una fracción decimal del ancho, ver Tabla 3.3.6.

Tabla 3.3.6 Datos de nudos destinados al cálculo de  $RR_{cp}$

Madera aserrada destinada a la fabricación de láminas		
Grado	Promedio, $x_i$	Desviación estándar, $\sigma_i$
A	0,074	0,133
B	0,213	0,164

Fuente: (NCh 2165 – 1999, Tabla 10)

**2) Inclinación de la fibra:**

Valores de  $RR_{cp}$  que se describen según Tabla 3.3.6.

Y para elementos constituidos por dos o tres láminas del mismo grado, se definen según la Tabla 3.3.7.

Tabla 3.3.7 Razón de resistencia, para piezas de madera aserradas clasificada visualmente

Grado	A	B
$RR_{cp}$	0,65	0,50

Fuente: (NCh 2165 – 1999, Tabla 4)

### 3) Acotados por el módulo de elasticidad:

Valores de  $RR_{cp}$  se determinan mediante lo escrito en la Ec. 3.3.9.

#### 3.3.3 Tensiones admisibles en cizalle

La tensión admisible de cizalle que se debe considerar a los elementos estructurales laminados horizontalmente y pertenecientes a un solo grado está definido por:

$$f_{cz} = f_{b,cz} \times RR_{cz} \quad \text{Ec. 3.3.11}$$

En donde:

$f_{cz}$  = Tensión admisible de cizalle, en MPa.

$f_{b,cz}$  = Tensión básica de cizalle, según Tabla 3.3.1, en MPa.

$RR_{cz}$  = Razón de resistencia para cizalle,  $RR_{cz} = 1$ , según (NCh 2165 – 1999, 5.1.4.2).

#### 3.3.4 Compresión y tracción normal a las fibras

La tensión admisible de compresión y tracción normal (perpendicular) a las fibras que se debe considerar a los elementos estructurales laminados horizontalmente y pertenecientes a un solo grado está definido por:

$$f_{cn} = f_{b,cn} \times RR_{cn} \quad \text{Ec. 3.3.12}$$

$$f_{tn} = f_{b,tn} \times RR_{tn} \quad \text{Ec. 3.3.13}$$

En donde:

$f_{cn}$  = Tensión admisible de compresión normal, en MPa.

$f_{tn}$  = Tensión admisible de tracción normal, en MPa.

$f_{b,cn}$  = Tensión básica en compresión normal, según Tabla 3.3.1, en MPa.

$f_{b,tn}$  = Tensión básica tracción normal, según Tabla 3.3.1, en MPa.

$RR_{cn}$  = Razón de resistencia para compresión normal,  $RR_{cn} = 1$ , según (NCh 2165 – 1999, 5.1.5.2).

$RR_{tn}$  = Razón de resistencia para tracción normal,  $RR_{tn} = 1$ , según (NCh 2165 – 1999, 5.1.5.2).

Las tensiones básicas de la especie forestal; resultados obtenidos del ensayo de vigas de madera laminada libre de defectos, a través del programa experimental desarrollado por el Instituto Forestal (1998), deduciendo el valor límite de la resistencia que se denomina “límite inferior de exclusión del 5%” o como comúnmente se denomina en las normas europeas “Valor característico”, y cuyos métodos para su determinación están normalizados en ASTM D 2555. Este límite asegura, con una certeza de 95% que la resistencia de una pieza de madera es superior al límite de resistencia elegido como base. Valor límite que es definido para una humedad de 12%, altura 300 mm, solicitado para una carga uniformemente distribuida, con una razón luz/altura=21, ajustado por un factor de carga y seguridad,  $n$  (2.1 para caso de flexión) que se refiere la duración del ensayo de 5 minutos aproximadamente, proyectando su resistencia a un periodo de 10 años.

$$f_{b,i} = \frac{R_{bk\ 5\%}}{n} \quad \text{Ec. 3.3.14}$$

En donde:

$f_{b,i}$  = Tensiones básicas.

$R_{bk\ 5\%}$  = Valor del percentil del 5% de exclusión, según ASTM D 198.

$n$  = Factor de carga y seguridad, ver Tabla 3.3.8.

Con:

$$R_{bk\ 5\%} = R_{bk\ media} - t \times Sr, \quad t = 1.645 \quad \text{Ec. 3.3.15}$$

En donde:

$R_{bk\ 5\%}$  = Valor del percentil del 5% de exclusión, según ASTM D 198.

$R_{bk\ media}$  = Resistencia media de la muestra.

$Sr$  = Desviación estándar de la muestra.

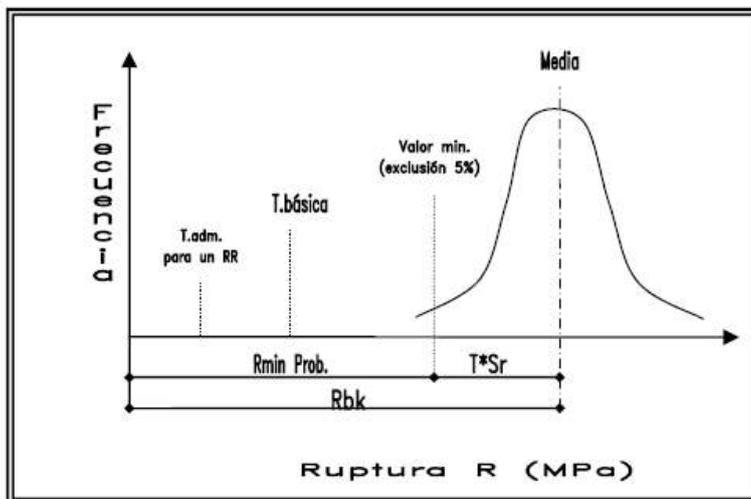


Fig. 3.3.2 Esquema en la deducción de las tensiones básicas con 5% de exclusión

Fuente: (ASTM D 198 – 1985)

Tabla 3.3.8 Factores de ajuste "n" aplicados a las propiedades mecánicas, en la obtención de tensiones básicas para la madera laminada  $R_{bk 5\%}$

Propiedad	Coníferas	Latifolia das
Flexión	2,10	2,30
Módulo de elasticidad	0,94	0,94
Tracción paralela	2,10	2,30
Compresión paralela	1,90	2,10
Cizalle	4,10	4,50
Tensión en el límite de proporcionalidad en compresión normal	1,50	1,50

Fuente: (ASTM D 198 – 1985)

### 3.3.5 Módulo de elasticidad

Para elementos clasificados como homogéneos el módulo de elasticidad admisible se obtiene según lo expuesto en 3.3 y corresponde al 95% del valor básico establecido en la Tabla 3.3.1.

$$E_f = 0,95 \times E_{L,b,x} \tag{Ec. 3.3.16}$$

### 3.3.6 Humedad de servicio

Se considera que las tensiones básicas para la madera laminada de pino se definen en condiciones secas, con una humedad promedio de 12%, cuyo contenido de humedad en servicio con valores individuales menores al 16%, si la madera presenta humedades mayores al 16% las tensiones admisibles que se obtengan según NCh 2165 – 1991 deben ser modificadas por factores de ajuste  $K_H$ . Eliminando de esta manera el riesgo de daño producido por deformaciones o distorsiones que se producen al momento de la construcción.

Tabla 3.3.9 Factores de ajuste para condiciones de servicio húmedo  $H \geq 16\%$

Tensiones admisibles	Factores $K_H$ de ajuste para Condiciones de Servicio Húmedo
Flexión	0,800
Compresión paralela a la fibra	0,730
Tracción paralela a la fibra	0,800
Módulo de elasticidad	0,833
Cizalle	0,875
Compresión normal a la fibra	0,667
Tracción normal a la fibra	0,875

Fuente: (NCh 2165 – 1999, Tabla 7)

### 3.4 Tensiones de diseño para M.L.E., según NCh 1198

Las tensiones de diseño se obtienen del producto de las cargas admisibles por unos factores de modificación que se exponen de acuerdo a la norma NCh 1198 del 2006.

Para la obtención de estos valores es necesario seguir un proceso, que se ve simplificado en el siguiente cuadro:

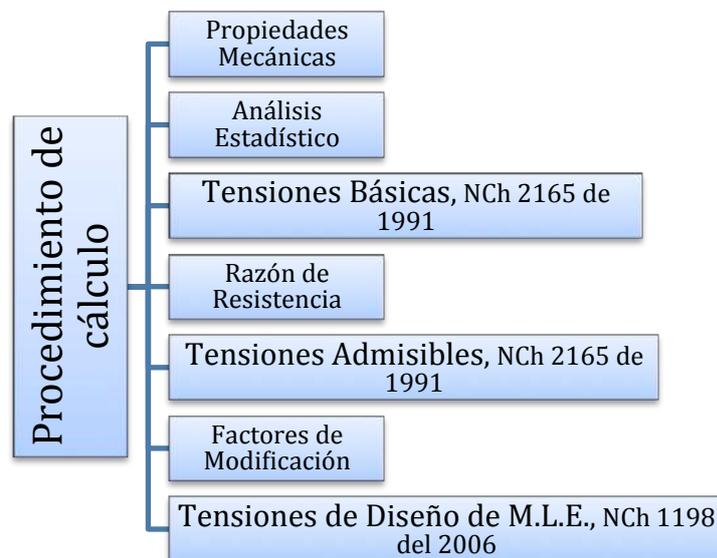


Fig. 3.4.1 Procedimiento para la obtención de las tensiones de diseño

Fuente: (Corma, 2003)

Todos los elementos estructurales, deben ser capaces de soportar establemente y rígidamente, la totalidad de la carga que actúa, tanto en uso como en el montaje, sin tener que sobrepasar las tensiones de diseño y deformaciones admisibles que se establecen en la norma NCh 1198 del 2006 (NCh 1198 – 2006, 4.1).

El diseño debe considerar las combinaciones de carga que se estimen probables, la concentración de cargas, considerando la probabilidad de simultaneidad de ocurrencia de los distintos componentes de la combinación (NCh 1198 – 2006, 4.3).

$$\text{Tensión de trabajo} \leq \text{Tensión de diseño} \quad \text{Ec. 3.4.1}$$

$$\text{Deformación solicitada} \leq \text{Deformación admisible} \quad \text{Ec. 3.4.2}$$

### 3.4.1 Factores de modificación

Para determinar las tensiones de diseño que se asignan a los elementos estructurales laminados, se deben considerar factores de modificación que se dividen en dos clases que son:

- Factores de modificación de aplicación general.
- Factores de modificación de aplicación particular, depende de qué tipo de carga este soportando el elemento.

#### 3.4.1.1 Factores de modificación de aplicación general

##### 3.4.1.1.1 Factor de modificación por duración de la carga, $K_D$

La resistencia de la madera es inversamente proporcional a la duración de la carga. Las tensiones admisibles han sido establecidas considerando la duración de 10 años de la carga (NCh 1198 – 2006, Anexo G), según sea la duración de la carga que afecta a la estructura, se aplicará el factor de modificación siguiente:

$$K_D = \frac{1,747}{t^{0,0464}} + 0,295 \quad \text{Ec. 3.4.3}$$

En donde:

$t$  = Duración de la carga, en segundos ver Tabla 3.4.1 ó Fig. 3.4.2.

Cuando se combinen cargas de diferente duración, se usara el factor correspondiente a la carga de menor duración.

Tabla 3.4.1 Factores de modificación por duración de la carga

<b>Carga permanente</b>	<b>0,90</b>
<b>Carga normal</b>	1,00
<b>Dos meses</b>	1,15
<b>Siete días</b>	1,25
<b>Viento o sismo</b>	1,60
<b>Impacto</b>	2,00

Fuente: (NCh 1198 – 2006, Anexo G)

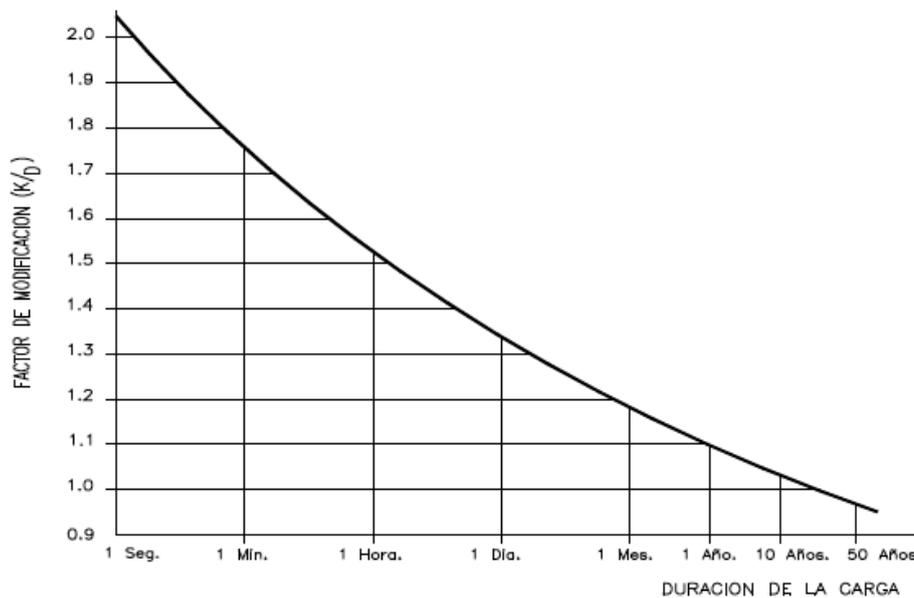


Fig. 3.4.2 Factor de modificación por duración de la carga

Fuente: (NCh 1198 – 2006, Anexo G)

### 3.4.1.1.2 Factor de modificación por temperatura, $K_T$

Por razones excepcionales las condiciones de servicio de la estructura tengan temperaturas ambientales diferentes a las normales, se deberá modificar el valor de las propiedades mecánicas admisibles (NCh 1198 – 2006, 6.1.4), según la siguiente expresión:

$$K_T = (1 \pm \Delta T \cdot C_t) \tag{Ec. 3.4.4}$$

En donde:

$\Delta T$  = Variación de la temperatura respecto a 20° C.

$C_t$  = Corrección por temperatura, según Tabla 3.4.2.

Tabla 3.4.2 Corrección por temperatura

PROPIEDAD	CONTENIDO DE HUMEDAD %	INCREMENTO POR ENFRIAMIENTO Bajo 20° C (No inferior a -180° C) $C_t$	DECREMENTO POR CALENTAMIENTO Sobre 20° C (No superior a 67° C) $C_t$
Módulo de Elasticidad	0	+ 0,0007	- 0,0007
Otras Propiedades	20	+ 0,0027	- 0,0038
	0	+ 0,0031	- 0,0031
	12	+ 0,0058	- 0,0088

Fuente: (NCh 1198 – 2006, Anexo H)

### 3.4.1.1.3 Factor de modificación por tratamiento químico, $K_Q$

Cuando la madera debe ser sometida a procesos de ignifugación que incrementen su higroscopicidad, debiliten su integridad física o alteren sus propiedades mecánicas, se deberá modificar el valor de las tensiones admisibles, pudiendo adoptarse para estos efectos el valor de corrección:

$$K_Q = 0,90 \tag{Ec. 3.4.5}$$

### 3.4.1.1.4 Factor de modificación por trabajo conjunto, $K_C$

Las tensiones admisibles de elementos estructurales que estén formados por tres o más elementos que se encuentren separados no más de 61 cm y que en conjunto soporten la carga aplicada, debe ser multiplicada por  $K_C$ , de acuerdo a la Tabla 3.4.3.

Tabla 3.4.3 Factores de modificación por trabajo conjunto,  $K_C$

Tensión admisible afectada	Madera aserrada cuya menor dimensión en (mm) es:	
	< 114 mm	≥ 114 mm
Flexión	1,15	1,15
Cizalle longitudinal	1,15	1,00
Compresión paralela a las fibras	1,00	1,00
Compresión normal a las fibras	1,00	1,00
Tracción paralela a las fibras	1,00	1,00
Módulo de elasticidad en flexión	1,00	1,00

Fuente: (Corma, 2003)

### 3.4.1.2 Factores de modificación de aplicación particular

Estos factores se describirán más adelante, de acuerdo a la sollicitación de la carga sobre el elemento estructural.

### 3.4.2 Elementos en flexión

Se debe verificar que se cumpla lo siguiente:

- 1.1. Las tensiones de trabajo no deben sobrepasar las tensiones de diseño.
- 1.2. Las deformaciones de cálculo no sobrepasen los límites especificados en la norma NCh 1198 del 2006.

$$\frac{f_{i,tr}}{f_{i,dis}} \leq 1 \qquad \frac{\delta_{calc}}{\delta_{max,adm}} \leq 1 \qquad \text{Ec. 3.4.6}$$

En donde:

$f_{i,tr}$  = Tensión de trabajo según la sollicitación de la carga.

$f_{i,dis}$  = Tensión de diseño, según la sollicitación de la carga.

$\delta_{calc}$  = Deformación de cálculo.

$\delta_{max,adm}$  = Deformación máxima admisible, según

Tabla 3.4.6.

### 3.4.2.1 Distancia entre apoyos laterales, $l_a$

Si solo se cuenta con apoyos en los extremos,  $l_a$  es igual a la luz de la viga o si es volado será lo longitud del voladizo; y si se cuenta con apoyos que impidan el desplazamiento lateral en los cantos flexo – comprimidos,  $l_a$  equivale a la distancia entre apoyos (viguetas) y esta distancia será cero si se considera el elemento como parte de un arriostramiento.

### 3.4.2.2 Longitud efectiva de volcamiento, $l_v$

Se evalúan de acuerdo a lo determinado en Tabla 3.4.4.

Tabla 3.4.4 Longitudes efectivas de volcamiento, de elementos flexionados

Vigas simplemente apoyadas	Si $l_a/h < 7$	Si $l_a/h \geq 7$
<b>Carga uniformemente distribuida</b>	$2,06 l_a$	$1,63 l_a + 3h$
Carga concentrada en el centro sin apoyo lateral intermedio	$1,80 l_a$	$1,37 l_a + 3h$
Carga concentrada en el centro, con apoyo lateral en el centro	$1,11 l_a$	
Dos cargas concentradas de igual magnitud aplicadas en L/3 cada una, con apoyo lateral en L/3	$1,68 l_a$	
Tres cargas concentradas de igual magnitud aplicadas en L/4 cada una, con apoyo lateral en L/4	$1,54 l_a$	
Cuatro cargas concentradas de igual magnitud aplicadas en L/5 cada una, con apoyo lateral en L/5	$1,68 l_a$	
Cinco cargas concentradas de igual magnitud aplicadas en L/6 cada una, con apoyo lateral en L/6	$1,73 l_a$	
Seis cargas concentradas de igual magnitud aplicadas en L/7 cada una, con apoyo lateral en L/7	$1,78 l_a$	
Siete o más cargas concentradas de igual magnitud separadas uniformemente, con apoyo lateral en los puntos de aplicación de la	$1,84 l_a$	

carga		
Momentos iguales y de distinto signo en los extremos	1,84 $l_a$	
<b>Vigas en voladizo</b>	Si $l_a/h < 7$	Si $l_a/h \geq 7$
Carga uniformemente distribuida	1,33 $l_a$	0,90 $l_a + 3h$
Carga concentrada en extremo libre	1,87 $l_a$	1,44 $l_a + 3h$
<b>Otras Condiciones: Vigas simplemente apoyadas o en voladizo</b>		
$l_v = 2,06 l_a$	$l_a/h < 7$	
$l_v = 1,63 l_a + 3 h$	$7 \leq l_a/h \leq 14,3$	
$l_v = 1,84 l_a$	$l_a/h > 14,3$	
<b>Nota:</b> $l_a$ = Distancia entre apoyos laterales de las zonas flexo – comprimidas de la viga.		

Fuente: (NCh 1198 – 2006, Tabla 10)

### 3.4.2.3 Restricciones de volcamiento

La esbeltez de volcamiento,  $\lambda_v$ , no debe exceder el valor de 50, y se evalúa con la siguiente expresión:

$$\lambda_v = \sqrt{\frac{l_v \cdot h}{b^2}} \tag{Ec. 3.4.7}$$

En donde:

$l_v$  = Longitud efectiva de volcamiento, en mm, ver Tabla 3.4.4.

$h$  = Altura de la viga, en mm.

$b$  = Base de la viga, en mm.

### 3.4.3 Flexión uniaxial en vigas simples

La tensión de trabajo se calcula según la expresión:

$$f_{f,tr} = \frac{M_{max}}{W_n} \quad \text{Ec. 3.4.8}$$

En donde:

$f_{f,tr}$  = Tensión de trabajo de flexión en la fibra extrema, en MPa.

$M_{max}$  = Momento máximo de flexión, en N.mm.

$W_n$  = Módulo de flexión de la sección transversal neta, respecto al eje neutro, en mm<sup>3</sup>.

#### 3.4.3.1 Tensiones de diseño en flexión

- a) **En la zona flexo – traccionada de elementos flexionados, según la expresión:**

$$F_{ft,dis} = f_f \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_C \cdot K_V \quad \text{Ec. 3.4.9}$$

- b) **En la zona flexo – comprimida de elementos flexionados, según la expresión:**

$$F_{fv,dis} = f_f \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_C \cdot K_{\lambda V} \quad \text{Ec. 3.4.10}$$

En donde:

$F_{ft,dis}$  = Tensión de diseño en flexión en el borde traccionado, en MPa.

$F_{fv,dis}$  = Tensión de diseño en flexión considerando efectos de inestabilidad por volcamiento, en MPa.

$f_f$  = Tensión admisible en flexión, determinado según Ec. 3.3.2.

$K_H$  = Factor de modificación por contenido de humedad, determinado según Tabla 3.3.9.

$K_D$  = Factor de modificación por duración de la carga, determinado según Ec. 3.4.3.

$K_C$  = Factor de modificación por trabajo conjunto, determinado según Tabla 3.4.3.

$K_V$  = Factor de modificación por volumen, determinados según 3.4.3.1.1.

$K_{\lambda V}$  = Factor de modificación por volcamiento, determinados según 3.4.3.1.2.

#### 3.4.3.1.1 Factor de modificación por volumen, $K_V$

La relación entre la resistencia de la madera y el tamaño del elemento, es mientras mayor sea el volumen menor resulta la tensión de rotura.

Este factor es solo aplicable solo para tensiones admisibles en flexión, además no es acumulativa con  $K_{\lambda V}$ , pues reducen tensiones en diferentes áreas de la viga:  $K_V$  afecta la zona traccionada mientras que  $K_{\lambda V}$  la zona comprimida (NCh 1198 – 2006, 10.3.2).

$$K_V = \left(\frac{6,40}{L}\right)^{1/10} \times \left(\frac{300}{h}\right)^{1/10} \times \left(\frac{135}{b}\right)^{1/10} \leq 1,0 \quad \text{Ec. 3.4.11}$$

En donde:

$L$  = Longitud de la viga entre puntos de inflexión de momentos, en m.

$h$  = Altura de la viga, en mm.

$b$  = Ancho de la viga, en mm.

#### 3.4.3.1.2 Factor de modificación por volcamiento, $K_{\lambda V}$

Todos los elementos estructurales sometidos a flexión deben estar apoyados lateralmente en sus extremos con el fin de evitar desplazamientos laterales y

rotaciones en torno al eje axial (NCh 1198 – 2006, 7.2.2.4), además se ha considerado que:

1.  $K_{\lambda V} = 1$ , para elementos estructurales solicitados en flexión que no tienen apoyos laterales a lo largo de la luz, siempre que la razón altura – ancho, no exceda de  $2 \left( \frac{h}{b} \right) \leq 2$ .
2. Para las situaciones que no cumplan lo escrito en el párrafo anterior, el factor de modificación por volcamiento, se calcula según la siguiente expresión:

$$K_{\lambda v} = \frac{1 + \left( \frac{F_{fE,ml}}{F_{f,dis}^*} \right)}{1,90} - \sqrt{\left[ \frac{1 + \left( \frac{F_{fE,ml}}{F_{f,dis}^*} \right)}{1,90} \right]^2 - \frac{\left( \frac{F_{fE,ml}}{F_{f,dis}^*} \right)}{0,95}} \quad \text{Ec. 3.4.12}$$

Con:

$$F_{fE,ml} = \frac{0,61 \cdot E_{dis}}{\lambda_v^2} \quad \text{Ec. 3.4.13}$$

En donde:

$F_{f,dis}^*$  = Tensión admisible de flexión determinada en la Tabla 3.3.1, ponderando por todos los factores de modificación aplicables, excepto  $K_V$  y  $K_{\lambda v}$ .

$E_{dis}$  = Módulo de elasticidad de diseño, en MPa, ver Ec. 3.3.16.

$\lambda_v$  = Esbeltez de volcamiento, definido en la Ec. 3.4.7.

### 3.4.4 Cizalle en vigas

La falla en elementos flexionados se alcanza siempre longitudinalmente, por lo que no es necesario verificar la resistencia de cizalle transversal.

### 3.4.4.1 Tensión de trabajo

La máxima tensión de trabajo de cizalle para elementos flexionados, se calcula según la siguiente expresión:

$$f_{cz,tr} = \frac{1,5 \cdot Q}{b \cdot h} \quad \text{Ec. 3.4.14}$$

En donde:

$f_{cz,tr}$  = Tensión de trabajo de cizalle longitudinal, en MPa.

$Q$  = Esfuerzo de corte máximo, en N.

$b$  = Base de la viga (normal a la dirección de la carga), en mm.

$h$  = Altura de la viga (paralela a la dirección de la carga), en mm.

### 3.4.4.2 Tensión de diseño de cizalle longitudinal

$$F_{cz,dis} = f_{cz} \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_r \quad \text{Ec. 3.4.15}$$

En donde:

$F_{cz,dis}$  = Tensión de diseño de cizalle longitudinal, en MPa.

$f_{cz}$  = Tensión admisible de cizalle longitudinal, determinado según Ec. 3.3.11.

$K_H$  = Factor de modificación por contenido de humedad, determinado según Tabla 3.3.9.

$K_D$  = Factor de modificación por duración de la carga, determinado según Ec. 3.4.3.

$K_r$  = Factor de modificación por rebaje, especificado en 3.4.4.2.1.

### 3.4.4.2.1 Factor de modificación por rebaje

No es recomendable realizar rebajes esto debilita la sección, cuando es indispensable realizarlos se debe considerar lo siguiente:

Tabla 3.4.5 Condiciones de rebaje para que no afecte la viga

	Profundidad	Notas
Zona flexo – traccionado	Hasta $\frac{1}{10}$ de la altura	Profundidad máxima de 75 mm.
Zona flexo – comprimido	Hasta $\frac{2}{5}$ de la altura	Longitud máxima de $\frac{1}{3}$ de la luz

Fuente: (NCh 1198 – 2006, 10.6)

### 3.4.5 Cálculo de la deformación en vigas simples

Las vigas simples que resisten cargas individuales, se verifica la deformación considerando el módulo de elasticidad característico (NCh 1198 – 2006, 7.2.4.1):

$$E_{fk} = 0,6 \times E_f \quad \text{Ec. 3.4.16}$$

En donde:

$E_{fk}$  = Módulo de elasticidad característico, en MPa.

$E_f$  = Módulo de flexión del elemento, en MPa.

Para definir  $E_f$  la norma NCh 1198 – 2006, 10.5.2 nos indica la siguiente expresión, o puede observarse en la Tabla 3.3.1.

$$E_f = 15 \times G \quad \text{Ec. 3.4.17}$$

En donde:

$G$  = Módulo de corte, en MPa.

En vigas simples de Pino radiata, la misma norma nos recomienda hacer una corrección del módulo de elasticidad debido a la altura de la viga.

$$K_{hf} = \left(\frac{h}{180}\right)^{\frac{1}{4}} \leq 1 \tag{Ec. 3.4.18}$$

En donde:

$K_{hf}$  = Factor de modificación.

$h$  = Altura de la sección transversal, en mm.

Las deformaciones máximas admisibles en elementos sometidos a flexión están definidos, de acuerdo al tipo de estructura, los materiales de recubrimiento (paredes, cielorraso, etc.) y no se cuente con requerimientos especiales se puede una la

Tabla 3.4.6.

Tabla 3.4.6 Deformaciones máximas admisibles en vigas de madera

Tipo de viga	Deformaciones máximas admisibles considerando	
	Exclusivamente sobrecarga	Peso propio más sobrecarga
<b>Vigas de techo:</b>		
Construcciones industriales y agrícolas	-	L/200 ó L/400
Oficinas y construcciones habitacionales		
Con cielorrasos enyesados o similares	L/360	L/300
Sin cielorrasos enyesados o similares	-	L/300
<b>Vigas de piso</b>		
Construcciones en general	L/360	L/300
Pasarelas peatonales		L/400 ó L/1200
<b>Nota:</b> L= Luz efectiva de la viga		

Fuente: (NCh 1198 – 2006, Tabla 13)

### 3.4.5.1 Contra – flechas

Cuando se omita el cálculo de contra – flechas, estas deben de encajar por lo menos en L/300 (madera seca, H< 20%), L/200 (madera en proceso de secado) y L/150 (En voladizos); En elementos verticales no debe sobrepasar de L/200.

En donde:

$H$  = Contenido de humedad de la madera.

Para limitar problemas de vibración en los pisos, se debe controlar que la deformación debida a las sobrecargas se servicio no exceda  $L/360$  en vigas de hasta 4,50 m de largo, y  $L/480$  para luces de hasta 9,00 m. (NCh 1198 – 2006, 7.2.4.10).

### 3.4.5.2 Deformaciones de flujo plástico en el tiempo (creep)

En elementos sometidos a flexión y cuando las cargas de naturaleza permanente ( $g$ ), excedan el 50% de la carga total ( $q$ ).

La expresión de la deformación total de un elemento flexionado,  $\delta_{tot}$ , se calcula según la expresión:

$$\delta_{tot} = \delta_e \times \left( 1 + \rho \times \frac{g}{q} \right) \quad \text{Ec. 3.4.19}$$

En donde:

$\delta_{tot}$  = Deformación total, en mm.

$\delta_e$  = Deformación elástica instantánea determinada por la totalidad de las cargas que solicitan al elemento, en mm.

$\rho$  = Factor de creep.

$g$  = Componente de carga de naturaleza permanente.

$q$  = Carga total de diseño, en N.

El factor de deformación instantánea,  $\delta_e$ , se calcula según la expresión:

$$\delta_e = \frac{5 \times q \times L^4}{384 \times (0,6 \times E) \times I} \quad \text{Ec. 3.4.20}$$

En donde:

$L$  = Longitud del elemento, en mm.

$E$  = Módulo de elasticidad longitudinal, en N/mm<sup>2</sup>.

$I$  = Inercia de la sección transversal, en mm<sup>4</sup>.

El factor de creep,  $\rho$ , se calcula según la expresión:

$$\rho = \frac{1}{k_{\delta}} - 1 \quad \text{Ec. 3.4.21}$$

En donde:

$$k_{\delta} = \frac{3}{2} - \frac{g}{q}, \text{madera con humedad} < 15\%. \quad \text{Ec. 3.4.22}$$

$$k_{\delta} = \frac{5}{2} - \frac{4}{3} \times \frac{g}{q}, \text{madera con humedad} \geq 15\%. \quad \text{Ec. 3.4.23}$$

En vigas simplemente apoyadas cuando la relación  $L/h < 20$ , es necesario verificar la deformación por cortante,  $\delta_Q$ , que se puede aproximar con la siguiente expresión:

$$\delta_Q = \frac{12 \times M}{G \times A} \quad \text{Ec. 3.4.24}$$

En donde:

$\delta_Q$  = Deformación por cortante, en mm.

$M$  = Momento flector máximo, en N.

$G$  = Módulo de corte, en MPa.

$A$  = Sección transversal de la viga, en mm<sup>2</sup>.

Cuando sea necesario considerar la componente de deformación por creep.

$$\delta_{Q,tot} = \delta_Q \times \left( 1 + 2\rho \cdot \frac{g}{q} \right), \quad mm \quad \text{Ec. 3.4.25}$$

### 3.4.6 Elementos en compresión paralela

Se debe considerar que la carga aplicada al elemento debe ser concéntrica, alineada al eje longitudinal del elemento (madera).

#### 3.4.6.1 Longitud efectiva de pandeo, $l_p$

Es la distancia que existe entre dos puntos de inflexión adyacentes, donde la deformación toma forma de una curvatura simple y se denomina:

$$l_p = K \times l \quad \text{Ec. 3.4.26}$$

En donde:

$K$  = Factor de longitud efectiva.

$l$  = Longitud real de la columna, en cm.

Cuando se tiene una longitud efectiva menor, menor será el pandeo y mayor la capacidad de carga de la columna, la Tabla 3.4.7. muestra factores de longitud efectiva para las condiciones de apoyo señaladas.

#### 3.4.6.2 Restricciones de esbeltez

Para elementos principales:

$$\lambda = l_p / r < 170 \quad \text{Ec. 3.4.27}$$

Y para elementos que consten dentro de un sistema arriostrado:

$$\lambda = \frac{l_p}{r} \leq 200 \quad \text{Ec. 3.4.28}$$



Con:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \text{Ec. 3.4.29}$$

En donde:

$r$  = Radio de giro que condiciona el pandeo, en cm.

$I$  = Inercia de la sección transversal, en  $\text{cm}^4$ .

$A$  = Area de la sección transversal, en  $\text{cm}^2$ .

### 3.4.6.3 Tensión de trabajo

Para columnas simples, se calcula según la expresión:

$$f_{cp} = \frac{N}{A} \quad \text{Ec. 3.4.30}$$

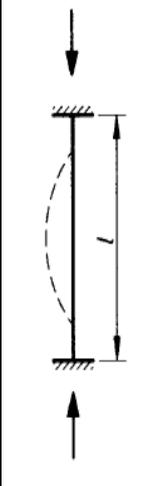
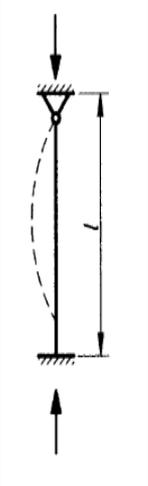
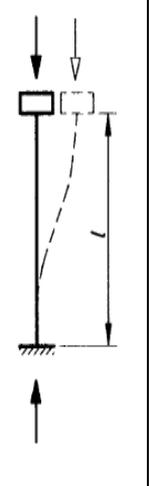
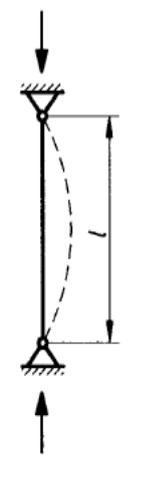
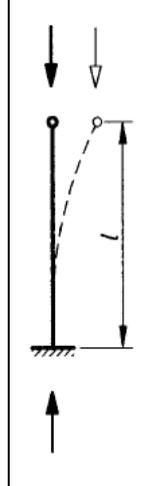
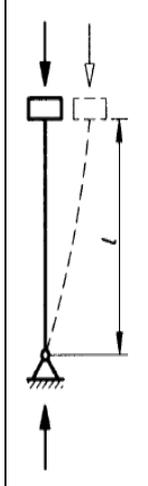
En donde:

$f_{cp}$  = Tensión de trabajo por compresión paralela, en MPa.

$N$  = Carga axial aplicada, en N.

$A$  = Sección transversal, en  $\text{mm}^2$ .

Tabla 3.4.7 Longitudes efectivas de pandeo,  $l_p$

Configuración de pandeo						
Valores para K	0,70	0,85	1,50	1,0	2,50	2,50
Condiciones de apoyo	 <ul style="list-style-type: none"> <li> Impedimento de giros y desplazamientos</li> <li> Libertad de giro, impedimento de desplazamiento</li> <li> Impedimento de giro, libertad de desplazamiento</li> <li> Libertad de giro y desplazamiento</li> </ul>					

Fuente: (NCh 1198 – 2006, Tabla 16)

### 3.4.6.4 Tensión de diseño en compresión paralela

Existen dos casos de estudio:

- A. Si el elemento no presenta problemas de inestabilidad lateral ( $\lambda < 10$ ), (NCh 1198 – 2006, 7.3.2.2, literal a); se calcula según la expresión:**

$$F_{cp,dis} = f_{cp} \times K_H \times K_D \tag{Ec. 3.4.31}$$

En donde:

$F_{cp,dis}$  = Tensión de diseño en compresión paralela, en MPa.

$f_{cp}$  = Tensión admisible en compresión paralela, MPa, según Ec. 3.3.8.

$K_H$  = Factor de modificación por contenido de humedad, determinado según Tabla 3.3.9.

$K_D$  = Factor de modificación por duración de la carga, determinado según Ec. 3.4.3.

**B. Si el elemento presenta problemas de inestabilidad lateral, ( $\lambda \geq 10$ ), (NCh 1198 – 2006, 7.3.2.2, literal b); se calcula según la expresión:**

$$F_{cp,\lambda,dis} = F_{cp,dis} \times K_\lambda \quad \text{Ec. 3.4.32}$$

En donde:

$F_{cp,\lambda,dis}$  = Tensión de diseño en compresión paralela, en MPa.

$F_{cp,dis}$  = Tensión de diseño calculada, según literal a), en MPa.

$K_\lambda$  = Factor de modificación por esbeltez, calculado según 3.4.6.4.1.

#### 3.4.6.4.1 El factor de modificación por esbeltez, $K_\lambda$

Se calcula según la expresión:

$$K_\lambda = A - \sqrt{A^2 - B} \quad \text{Ec. 3.4.33}$$

Con:

$$A = \frac{\frac{F_{cE,ml}}{F_{cp,dis}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda}{300}\right) + 1}{1,80} \quad \text{Ec. 3.4.34}$$

$$B = \frac{F_{cE,ml}}{0,9 \cdot F_{cp,dis}} \quad \text{Ec. 3.4.35}$$

$$F_{cE,ml} = \frac{5,0 \cdot E_{dis}}{\lambda^2} \quad \text{Ec. 3.4.36}$$

En donde:

$E_{dis}$  = Módulo de elasticidad de diseño, según Tabla 3.3.1, en MPa.

$F_{cp,dis}$  = Tensión de diseño calculada, según 3.4.6.4 A, en MPa.

$\lambda$  = Esbeltez regulada del diseño.

### 3.4.6.5 Empalmes

Para conseguir piezas de mayor longitud es necesario hacer un empalme, y para ello existen varias formas, nosotros nos centraremos en los empalmes a tope que se realizan manteniendo una presión y alineación entre los elementos.

Las tensiones de aplastamiento en empalmes solicitados según la dirección de la fibra, se evalúan de la misma manera que 3.4.6.3, teniendo que controlar que la tensión no exceda el 75% de la tensión de diseño,  $F_{cp,dis}$  (según Ec. 3.4.31).

### 3.4.6.6 Arriostramientos de elementos comprimidos

Son elementos que sirven para reducir la distancia de longitud de pandeo de una columna, que deben ser diseñadas para que resistan una fuerza de magnitud,  $K$ , que para madera laminada se determina de la siguiente manera:

$$K = N/100 \quad \text{Ec. 3.4.37}$$

En donde:

$K$  = Fuerza de apuntalamiento del arriostramiento, en KN.

$N$  = Fuerza máxima de compresión de la columna, en KN.

Si el arriostre colabora simultáneamente con varias columnas, se deben ir sumando las cargas de cada sección ver Fig. 3.4.3.

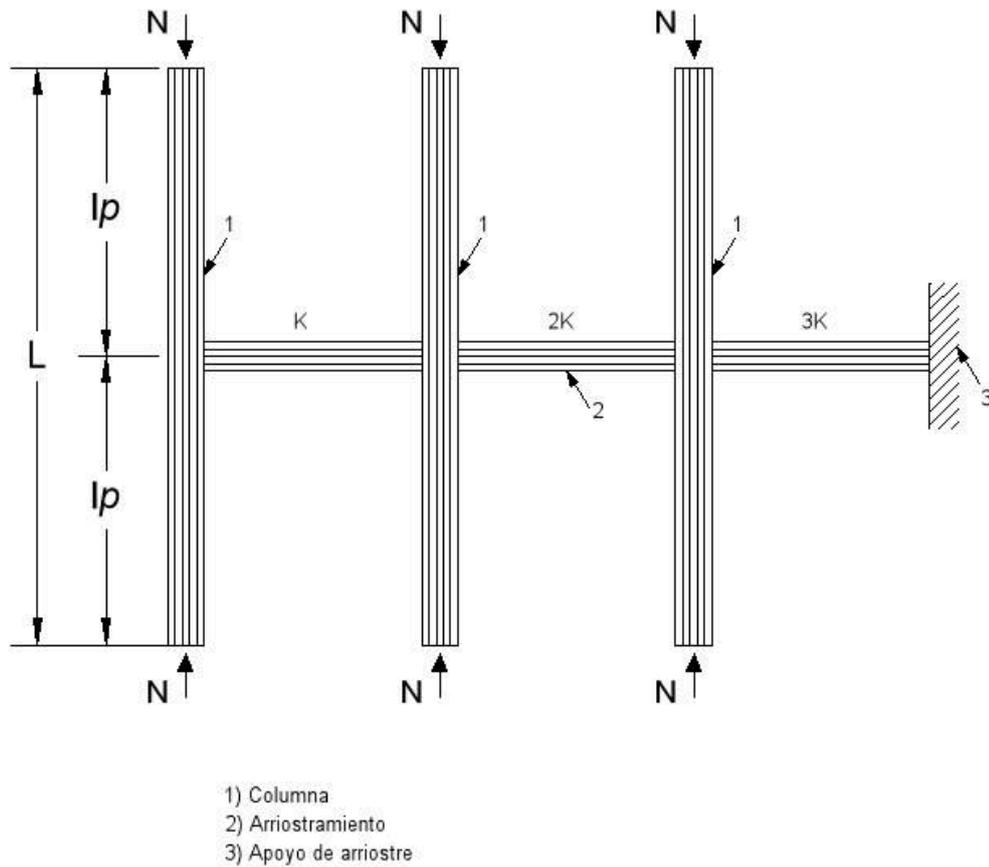


Fig. 3.4.3 Apuntalamiento individual de columnas

Fuente: (Autores, 2015)

### 3.4.7 Elementos en compresión normal a las fibras

#### 3.4.7.1 Tensión de trabajo

Se calcula considerando un área neta, que no puede ser menor al 75% de la sección transversal bruta y se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{cn,tr} = \frac{R}{A_n} \quad \text{Ec. 3.4.38}$$

En donde:

$f_{cn,tr}$  = Tensión de trabajo en compresión normal, en MPa.

$R$  = Carga aplicada, en N.

$A_n$  = Área neta de la sección transversal, en mm<sup>2</sup>.

### 3.4.7.2 Tensión de diseño en tracción paralela a la fibra, $F_{tp,dis}$

Se determina de la siguiente expresión:

$$F_{cn,dis} = f_{cn} \times K_H \times K_{cn} \quad \text{Ec. 3.4.39}$$

En donde:

$F_{cn,dis}$  = Tensión de diseño en compresión normal, en MPa.

$f_{cn}$  = Tensión admisible en tracción paralela, en MPa, según Ec. 3.3.12.

$K_H$  = Factor de modificación por contenido de humedad, determinado según Tabla 3.3.9.

$K_{cn}$  = Factor de modificación por aplastamiento, determinado según 3.4.7.2.1.

#### 3.4.7.2.1 Factor de modificación por aplastamiento, $K_{cn}$

Si una superficie aplastada está separada de otra una longitud,  $d$ , mayor a 150 mm, se podrá incrementar el valor de la tensión admisible, en compresión normal:

- 1 Si la longitud de aplastamiento ( $l$ ) no supera los 150 mm ( $l \leq 150$ )
- 2 Si la distancia entre la superficie aplastada y el extremo ( $s$ ) del elemento se cumple con:

$s \geq 100$ mm	Si:	$h > 60$ mm
$s \geq 75$ mm	Si:	$h \leq 60$ mm

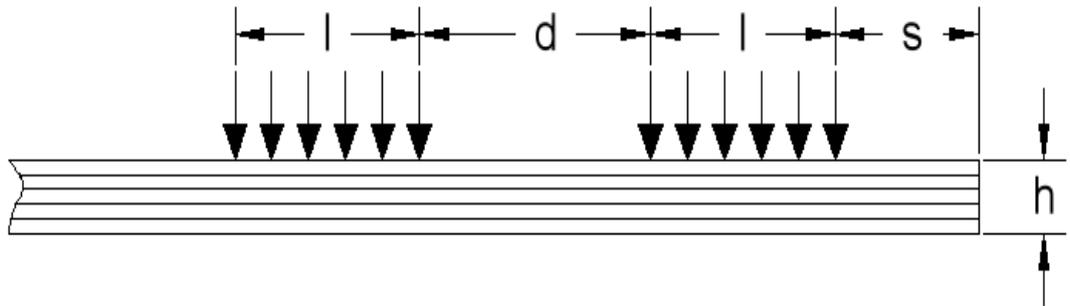


Fig. 3.4.4 Superficie solicitada en compresión normal

Fuente: (Autores, 2015)

El factor de modificación por aplastamiento se calcula según la siguiente expresión:

$$K_{cn} = \left(\frac{150}{l}\right)^{1/4} \leq 1,80 \quad \text{Ec. 3.4.40}$$

Si no se cumple lo anterior el factor toma el valor de:

$$K_{cn} = 0,80 \quad \text{Ec. 3.4.41}$$

### 3.4.8 Elementos sometidos a esfuerzos combinados

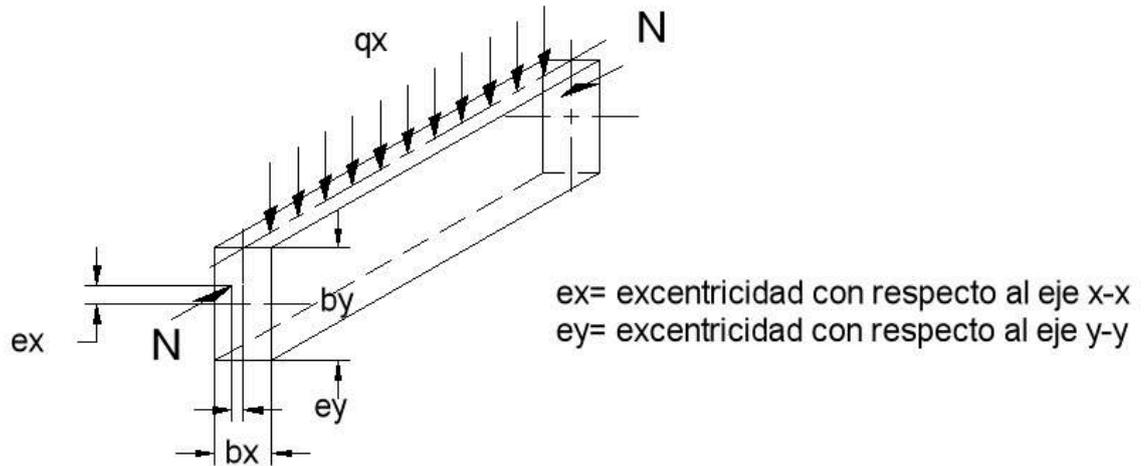


Fig. 3.4.5 Solicitaciones de flexión y compresión excéntricas

Fuente: (Autores, 2015)

### 3.4.9 Flexión y compresión paralela

Los elementos sometidos a combinación de esfuerzos, flexión respecto a uno o ambos ejes principales y a compresión axial (ver Fig. 3.4.5) se dimensionan de manera que se verifique la siguiente expresión:

$$\left(\frac{f_c}{f_{c\lambda,dis}}\right)^2 + \frac{f_{fx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F_{cEx}}\right) \cdot F_{fx,dis}} + \frac{f_{fy}}{\left[1 - \frac{f_c}{F_{cEy}} - \left(\frac{f_{fx}}{F_{fE}}\right)^2\right] \cdot F_{fy,dis}} \leq 1 \quad \text{Ec. 3.4.42}$$

Con:

$$f_c < F_{cEx} = \frac{5 \cdot E_{x,dis}}{\lambda_x^2}, \quad \text{para flexión simple y desviada} \quad \text{Ec. 3.4.43}$$

$$f_c < F_{cEy} = \frac{5 \cdot E_{y,dis}}{\lambda_y^2}, \quad \text{para flexión desviada} \quad \text{Ec. 3.4.44}$$

$$f_{fx} < F_{fE} = \frac{0,61 \cdot E_{y,dis}}{\lambda_v^2}, \quad \text{para flexión desviada} \quad \text{Ec. 3.4.45}$$

$$\lambda_x = \frac{l \cdot K_x}{r_x} \quad \text{Ec. 3.4.46}$$

$$\lambda_y = \frac{l \cdot K_y}{r_y} \quad \text{Ec. 3.4.47}$$

En donde:

$f_c$  = Tensión efectiva de compresión paralela a la fibra, MPa.

$f_{fx}$  = Tensión efectiva de flexión de canto, carga aplicada sobre el canto del elemento, MPa.

$f_{fy}$  = Tensión efectiva de flexión de cara, carga aplicada sobre la cara del elemento, MPa.

$f_{c\lambda,dis}$  = Tensión de diseño admisible en compresión paralela modificada por la esbeltez mayor, determinado según 3.4.6.4 B, MPa.

$F_{fx,dis}$  = Tensión de diseño admisible en flexión para cargas aplicadas sobre el canto, determinado según 3.4.3.1 b), MPa.

$F_{fy,dis}$  = Tensión de diseño admisible en flexión para cargas aplicadas sobre la cara, determinado según 3.4.3.1 b), MPa.

$E_{x,dis}$  = Módulo de elasticidad de diseño para flexión con respecto al eje x – x, MPa.

$E_{y,dis}$  = Módulo de elasticidad de diseño para flexión con respecto al eje y – y, MPa.

$\lambda_x$  = Pandeo en el plano de flexión producida por cargas actuantes sobre el canto del elemento.

$\lambda_y$  = Pandeo en el plano de flexión producida por cargas actuantes sobre la cara del elemento.

$\lambda_v$  = Esbeltez de volcamiento, definido en Ec. 3.4.7.

$F_{fE}$  = Tensión de diseño de volcamiento elástico en vigas, determinado según 3.4.3.1 b), MPa.

### 3.5 Diseño de viga recta de madera laminada.

Según la normativa chilena vigente establece condiciones para determinar una sección mínima de madera considerando las mismas condiciones constructivas.

Se toma en cuenta los métodos de diseño según NCh 1198 – 2006 para el diseño de una viga recta de madera laminada encolada de Pino Radiata simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida con laminación horizontal de composición homogénea y de sección constante.

### 3.6 Obtención de datos experimentales

#### 3.6.1 Determinación de la humedad de la madera

Es muy importante conocer el contenido de humedad de las piezas de madera ya que si presentan altos contenidos de humedad, afecta directamente las propiedades mecánicas de la madera. Para la determinación del porcentaje de humedad se debe cumplir con lo que establece la norma chilena NCh 176 – 84

$$H = \frac{(P_h - P_s)}{P_s} \times 100 \quad \text{Ec. 3.6.1}$$

En donde:

$H$  = Contenido de humedad, en %.

$P_h$  = Peso húmedo, en gr.

$P_s$  = Peso seco, en gr.

### 3.6.2 Determinación de la densidad en la madera

La madera presenta poros y es un material celular, por lo que la cantidad de materia sólida que posee un volumen de madera es un indicador de sus propiedades mecánicas. La densidad formada por la masa y el volumen de la madera se obtiene mediante la expresión de la norma NCh 176 – 84.

$$D_s = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. 3.6.2}$$

Con:

$$V = b \times h \times l \quad \text{Ec. 3.6.3}$$

En donde:

$D_s$  = Densidad del elemento, en Kg/cm<sup>3</sup>.

$m$  = Masa, en kg.

$V$  = Volumen, en cm<sup>3</sup>.

$b, h, L$  = Ancho, alto y largo, dimensiones promedios del elemento, en cm.

### 3.6.3 Clasificación estructural de la madera aserrada destinada a madera laminada.

La norma chilena da a conocer dos métodos de clasificación estructural de la madera: la clasificación visual y la clasificación mecánica. Ambos son considerados como técnicas alternativas de clasificación, estableciendo los requisitos en la norma NCh 2150 – 89 para las distintas tipificaciones de la clasificación de la madera aserrada de pino.

La clasificación mecánica es un método que da a conocer la resistencia en forma más precisa por lo que nos permite obtener mejores rendimientos al momento de su

aplicación y además, a nivel experimental es un método que es más accesible que la clasificación visual ya que se requiere de experiencia para dicha clasificación.

### 3.6.3.1 Clasificación mecánica.

Nos permite la obtención del módulo de elasticidad en flexión que establece la norma NCh 2149 – 89, de la madera de pino en un ensayo no destructivo, aplicando una carga puntual midiendo la diferencia de su deformación producida dentro del rango elástico. La distancia entre los apoyos, humedad, velocidad y magnitud de la fuerza aplicada etc., Son datos que define la normativa, que permiten organizar por clases o grados de calidad previamente definidos en la norma NCh 2150 – 89 Este proceso se puede aplicar generando las cargas en su canto o en la cara de la pieza, considerando el incremento de la carga o su excesiva deformación respectivamente.

### 3.6.4 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad en flexión es la medida de la rigidez del material. Su cálculo está en función de la razón entre el esfuerzo por unidad de superficie y la deformación por unidad de longitud.

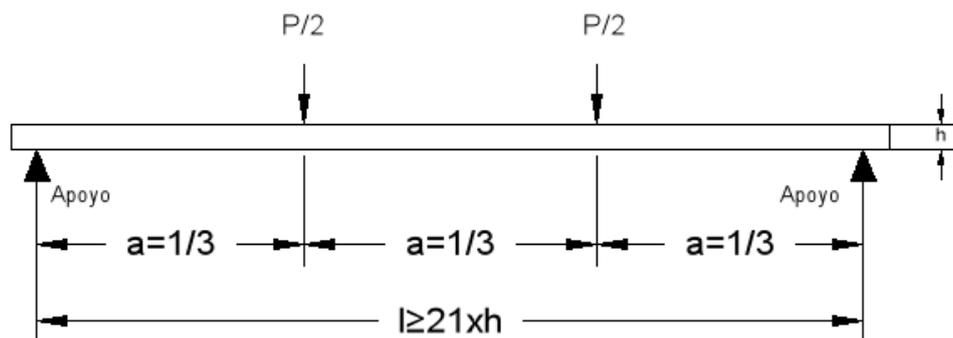


Fig. 3.6.1 Esquema del ensayo de flexión en láminas homogéneas

Fuente: (Norma JAS – 2000)

La ecuación que permite el análisis de una pieza, con carga puntual, es:

$$MOE = \frac{23 \times \Delta P \times l^3 \times 9,81}{108 \times b \times h^3 \times \Delta \delta \times 100} \quad \text{Ec. 3.6.4}$$

$$MOR = \frac{P_b \times l \times 9,81}{b \times h^2 \times 100} \quad \text{Ec. 3.6.5}$$

$$\Delta \delta = \frac{\left(\frac{P}{2}\right) \times a}{24 \times MOE \times I} \quad \text{Ec. 3.6.6}$$

En donde:

$\Delta \delta$  = Deformación producto de la carga P, en cm.

$\Delta P$  = Diferencia de carga aplicada en el rango elástico, en kgf.

$l$  = Distancia entre apoyos de la probeta, en cm.

$P_b$  = Carga máxima, en kgf.

$b$  = Ancho de la probeta, en cm.

$h$  = Espesor de la probeta, en cm.

$I$  = Inercia de la sección transversal del elemento, en  $\text{cm}^4$ .

$MOE$  = Módulo de elasticidad, en MPa.

$MOR$  = Módulo de ruptura, en MPa.

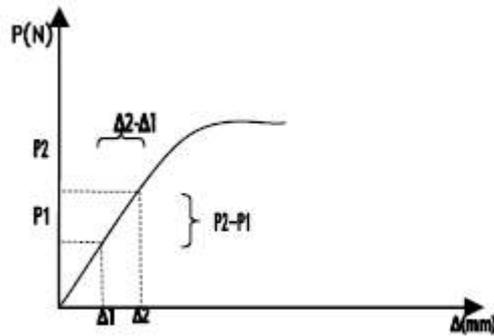


Fig. 3.6.2 Esquema de la zona elástica de la madera sometida a flexión

Fuente: (Pineda, 2008)

### 3.6.5 Ensayo de flexión

La normativa define tres ensayos a flexión para la madera:

- NCh 987 – 86 el ensayo a flexión estática para probetas libre de defectos, en el cual se obtiene la tensión unitaria máxima que soporta un material antes de fallar, indicando las propiedades mecánicas que definen las tensiones básicas de la madera acerrada.
- NCh 2148 - 89, define el ensayo a flexión “aplicado a las láminas de pino que forman parte de las vigas de madera laminada”, destinado al control de las uniones en el proceso de fabricación.
- NCh 2149 - 89, la cual fue mencionada en la obtención del Módulo de elasticidad que presenta un ensayo a flexión no destructivo.

La normativa chilena actual, no define ensayos para vigas tipo, en madera laminada, las tensiones básicas en flexión, que posee la NCh 2165 Of.91 para madera laminada, se basan en ensayos según ASTM D 198.

### 3.6.5.1 Descripción del ensayo a flexión.

La carga se aplica en la cara de la pieza, en dos puntos ubicados a una distancia mayor a 50mm de la zona de unión, La razón  $(2a/h)$  formada por: el doble de la distancia  $(2a)$  entre un apoyo y el punto de carga próximo con la altura de la probeta  $(h)$  debe estar comprendida entre 14 y 20, como se muestra en la figura siguiente.

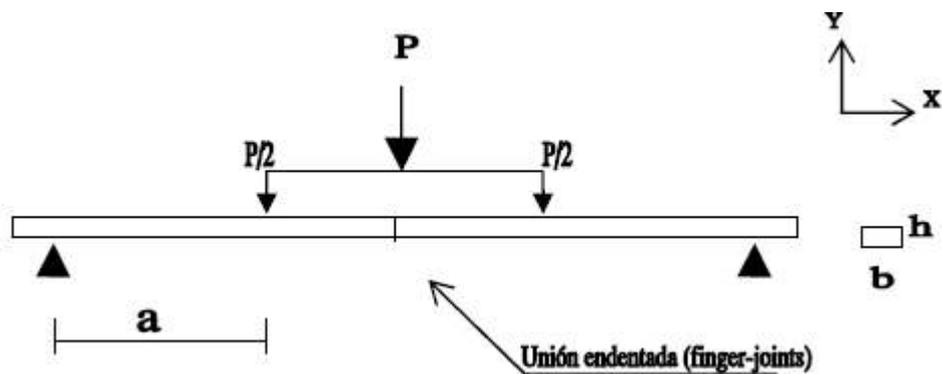


Fig. 3.6.3 Esquema ensayo a flexión de uniones dentadas

Fuente: (NCh 2148 – 1989)

### 3.6.5.2 Tensión de flexión.

$$\sigma_{m,d} = \frac{M}{W} \tag{Ec. 3.6.7}$$

Con:

$$\sigma_{m,d} = \frac{3 \times P \times a}{b \times h^2} \tag{Ec. 3.6.8}$$

**En donde:**

$\sigma_{m,d}$  = Tensión de flexión, en MPa.

$M$  = Momento máximo flector, en N.mm.

$W$  = Modulo resistente, en  $\text{mm}^3$ .

$P$  = Carga aplicada, en N.

$a$  = Distancia desde el apoyo al punto de aplicación, en mm.

$h$  = Espesor del elemento, en mm.

$b$  = Ancho del elemento, en mm.

### 3.6.5.3 Deformación en flexión

Descenso en el punto medio ( $L/2$ ) del elemento, debido a dos cargas puntuales simétricas, ubicadas a una distancia “ $a$ ”, desde los puntos de apoyo respectivamente.

$$\sigma_{Pto,1/2} = \frac{\left(\frac{P}{2}\right) \times a \times (3L^2 - 4a^2)}{24 \times E \times I} \quad \text{Ec. 3.6.9}$$

Con:

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad \text{Ec. 3.6.10}$$

En donde:

$\delta_{Pto,1/2}$  = Deformación por flexión, en mm.

$\left(\frac{P}{2}\right)$  = Carga aplicada a una distancia “ $a$ ”, en N.

$a$  = Distancia desde el apoyo al punto de aplicación, en mm.

$L$  = Distancia entre los apoyos, en mm.

$E$  = Módulo de elasticidad, en MPa.

$I$  = Inercia de la sección transversal del elemento, en  $\text{mm}^4$ .

$h$  = Espesor del elemento, en mm.

$b$  = Ancho del elemento, en mm.

### 3.6.5.4 Módulo de elasticidad en flexión

Para diferentes cargas, que se encuentren dentro del rango elástico, de la Ec. 3.6.11 se obtiene:

$$E = \frac{a \times (3L^2 - 4a^2)}{24 \times I} \times \frac{\left(\frac{P_2}{2}\right) - \left(\frac{P_1}{2}\right)}{\left(\delta_{2_{\text{Pto}, \frac{1}{2}}}\right) - \left(\delta_{1_{\text{Pto}, \frac{1}{2}}}\right)} \quad \text{Ec. 3.6.11}$$

En donde:

$\left(\frac{P_1}{2}\right)$  y  $\left(\frac{P_2}{2}\right)$  = Cargas diferenciadas por un incremento, que generan una deformación.

$\left(\delta_{2_{\text{Pto}, \frac{1}{2}}}\right)$  y  $\left(\delta_{1_{\text{Pto}, \frac{1}{2}}}\right)$  = Deformaciones generadas por el incremento de carga.

$I$  = Inercia de la sección transversal del elemento, en  $\text{mm}^4$ .



## **CAPÍTULO 4**

### **METODOLOGÍA**

Mediante el financiamiento y elaboración propia de probetas de madera, que fueron sometidas a distintos ensayos y con el asesoramiento del tutor del proyecto, se establece un plan de trabajo para el análisis del problema y el desarrollo de los objetivos descritos, en cuatro etapas que son:

- Investigación de la norma chilena para el diseño de elementos estructurales de madera.
- Recopilación de antecedentes y obtención de elementos a ensayar.
- Proceso experimental realizado en el laboratorio de Ingeniería Civil De la Universidad del Azuay.
- Análisis de los resultados obtenidos.



Fig. 3.6.1 Procesos experimentales desarrollados en el laboratorio universitario

Fuente: (Autores, 2015)

#### 4.1 Desarrollo experimental

El miembro estructural para el ensayo a flexión en el laboratorio, es una viga recta de madera con laminación horizontal encolada en pino radiata con uniones dentadas de sección constante de carácter homogénea con una luz de 4,50 metros, una altura de 18,5 centímetros y un ancho de 9,2 centímetros; la viga consta de 10 capas de láminas de madera aserrada de un espesor de 18 milímetros, adheridas con resincola que es un adherente Poli vinílico (ver Fig. 4.1.1.).

La recopilación de datos se lo realizo en primera instancia con la medición de volumen, peso y de esta manera obtenemos la densidad para determinar los parámetros que nos permitan calcular el contenido de humedad del material y las características físicas del material, seguido de esto se realizó los ensayos a compresión y flexión de las piezas de madera utilizando una prensa debidamente calibrada del laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Del Azuay, realizando ensayos a compresión del material y adaptando la prensa de manera adecuada para realizar los ensayos a flexión de las piezas de madera, obteniendo de esta manera

datos sobre las características mecánicas del material en base a su carga vs deformación, y esfuerzos de rotura del material.



Fig. 4.1.1 Elaboración de viga, que consta de 10 láminas

Fuente: (Autores, 2015)

#### **4.1.1 Confiabilidad**

Se recopiló madera de un bosque de la parroquia de Jima perteneciente a la provincia del Azuay ubicada a 60 kilómetros al sur-oriente de la ciudad de Cuenca (ver Fig. 4.1.2), se distribuyó el material para poder realizar varias repeticiones de ensayos a compresión y flexión del material y la capacidad resistente del adhesivo que se usó para la fabricación de la viga M.L.E. con el fin de observar el comportamiento de los elementos ensayados y su relación con los parámetros establecidos por las normas de diseño que aseguran un 95% de confiabilidad.



Fig. 4.1.2 Ubicación de Jima

Fuente: (Google maps, Tomada el 20 de mayo de 2015)

#### 4.1.2 Materiales

Para el mecanizado de las probetas que fueron sometidas a los ensayos de laboratorio se usó el siguiente instrumental y maquinaria:

- **Canteadora:** Maquinaria que se usa para igualar los cantos del tablón de madera.



Fig. 4.1.3 Canteadora, Maquinaria para mecanizar madera

Fuente: (Autores, 2015)

- **Cepilladora:** Maquina que se utilizó para llegar a un acabado más fino a las láminas de madera y alcanzar el espesor deseado.



Fig. 4.1.4 Cepilladora, maquinaria para mecanizar madera

Fuente: (Autores, 2015)

- **Sierra circular:** Maquina cortadora de madera.



Fig. 4.1.5 Sierra circular, maquinaria para mecanizar madera

Fuente: (Autores, 2015)

- **Maquina adaptada con fresas para Finger Joint:** Maquinaria usada para la elaboración de la unión dentada en los extremos de las láminas de madera.



Fig. 4.1.6 Maquinaria sin realizar las adaptaciones

Fuente: (Autores, 2015)



Fig. 4.1.7 Maquinaria realizada las adaptaciones

Fuente: (Autores, 2015)

- **Instrumental:** Se utilizó elementos como flexómetros, espátula, brocha, calibradores, niveles, cámara fotográfica, caballetes de apoyo, prensas manuales, tabloncillos de madera, pegamento (resincola), tornillos, taladro, sierra eléctrica, martillos, gatas hidráulicas y equipo de protección personal.



Fig. 4.1.8 Instrumental usado

Fuente: (Autores, 2015)



Fig. 4.1.9 Sierra eléctrica de mesa

Fuente: (Autores, 2015)

Por otro lado para los ensayos realizados en el laboratorio se requirió los siguientes artefactos:

- **Máquina de compresión de concreto:** Con este equipo se realizó varios tipos de ensayos adaptándolo a los requerimientos para la obtención de los datos primordiales para la investigación como son pruebas a flexión, compresión y resistencia del adhesivo.



Fig. 4.1.10 Prensa hidráulica

Fuente: (Autores, 2015)

- **Balanza electrónica:** Equipo usado para la medición de masa de los elementos a ensayar.

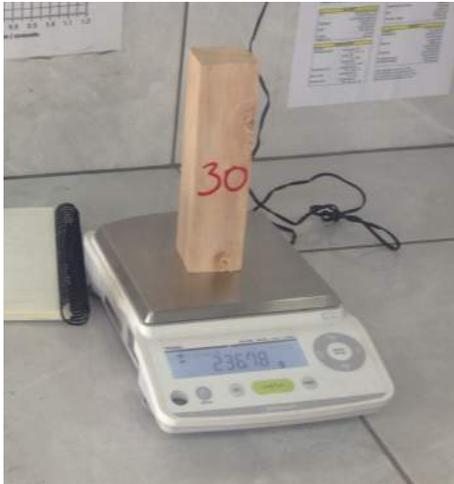


Fig. 4.1.11 Balanza electrónica (sentible)

Fuente: (Autores, 2015)

- **Horno eléctrico:** Equipo usado para la deshidratación de la madera.



Fig. 4.1.12 Horno eléctrico

Fuente: (Autores, 2015)

- **Calibrador:** Instrumento de precisión para realizar las medidas de las probetas a ser ensayadas.



Fig. 4.1.13 Calibrador

Fuente: (Autores, 2015)

El adhesivo que se utilizó para la aglomeración de las láminas de madera es un adherente poli vinílico llamado **Resincola** que posee un tiempo de secado moderado, presenta una adhesión firme, resistente, no se daña por enfriamiento, este adhesivo ha sido recomendado por su buen desempeño en superficies de madera, mejora su firmeza con el uso de presión; también por la experimentación que se realizó en laboratorio al comparar con otro adhesivo nos dio mejores resultados que se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 4.1.1 Resultados de laboratorio del adhesivo POLIMAX

Muestra	L1 (mm)	L2 (mm)	L1' (mm)	L2' (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kg)
1	49,5	49	49,5	7,1	1393,78	121
2	49,1	49,8	49,1	7,2	1392,02	160
3	49,4	49,6	49,4	6,9	1393,43	140
4	49,45	49,3	49,45	7,55	1407,19	180
5	49,15	49,2	49,15	6,5	1368,29	180

6	49,15	49,4	49,15	8,2	1412,96	210
7	49,4	49,2	49,4	8	1414,91	230
8	49,2	49	49,2	9,4	1438,63	170
9	49,2	49,6	49,2	10,5	1474,59	170
10	49,2	49,5	49,2	9,3	7958,93	180
11	49,5	49,4	49,5	10,4	1481,03	170
12	49,6	49,4	49,6	10	1475,1	180
13	49	48,5	49	10,9	1460,06	180
14	49,1	49,8	49,1	7	1387,07	180
15	49	49,2	49	11,2	1477,91	190
16	49,2	49,8	49,2	11	1489,95	170
17	48,2	49,1	48,2	10,5	1427,88	170
					<b>Promedio (Kg)</b>	<b>175,35</b>

Fuente: (Autores, 2015)

Tabla 4.1.2 Resultados de laboratorio del adhesivo RESINCOLA

Muestra	L1 (mm)	L2 (mm)	L1' (mm)	L2' (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kg)
1	49	48,9	49	12,7	1510,11	200
2	49,2	48,8	49,2	6,6	1367,1	210
3	49,2	49,4	49,2	7,9	1407,52	200
4	49,2	49,1	49,2	6,1	1359	210
5	49,3	49,5	49,3	10,1	1467,18	230
6	49,2	49,2	49,2	6,6	1372,68	210
7	49,2	49,3	49,2	7,3	1391,31	220
8	49,5	49,3	49,5	7,6	1410,37	230
9	49,5	49,3	49,5	6,3	1378,26	230
10	49,2	49,4	49,2	11,4	1493,79	230
11	49	48,9	49	8,8	1414,66	240
12	49,4	49,5	49,4	6,1	1372,24	225
13	49,2	49,6	49,2	6,2	1368,38	210
14	49,3	49,6	49,3	10,4	1476,08	210
15	49,4	49,3	49,4	6,9	1389,2	220
16	49,1	49	49,1	5	1326,8	230
17	49,5	49,1	49,5	7,3	1400,12	240
					<b>Promedio (kg)</b>	<b>220,29</b>

Fuente: (Autores, 2015)

Para los ensayos a compresión se utilizó 30 pilotes de las siguientes dimensiones:  $21 \times 4,8 \times 4,8$  cm para los ensayos a flexión de la madera aserrada se cortó 30 láminas de una dimensión de  $46 \times 8 \times 2$  cm.



Fig. 4.1.14 Foto de probetas para ensayos de compresión

Fuente: (Autores, 2015)

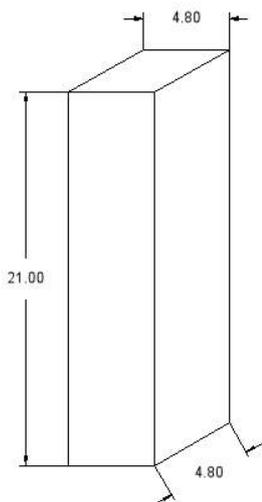


Fig. 4.1.15 Probeta de ensayo a compresión, medidas en cm

Fuente: (Autores, 2015)



Fig. 4.1.16 Fotos de probetas para ensayos de flexión

Fuente: (Autores, 2015)

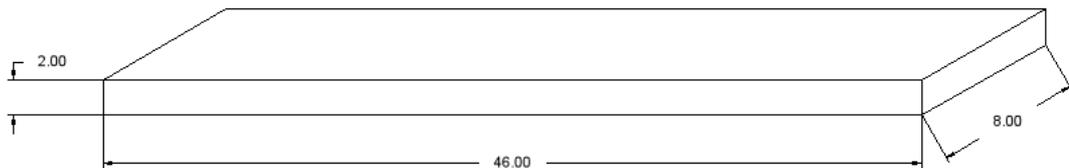


Fig. 4.1.17 Probeta de ensayo a flexión, medidas en cm

Fuente: (Autores, 2015)

### 4.1.3 Clasificación de la madera utilizada en la confección de M.L.E.

Una vez determinado el peso y el volumen de las piezas de madera en el laboratorio según el procedimiento de la norma NCh 176 – 84, se procede al cálculo de la densidad de las maderas aserradas y las vigas de madera laminada.

#### 4.1.3.1 Obtención del módulo de elasticidad

Se realizó los ensayos a flexión de acuerdo al modelo de carga que se indica en la Fig. 3.6.1, con elementos de madera aserrada y elementos de M.L.E. para su posterior comparación y procesamiento de datos. Se utilizó 30 láminas de madera

aserrada las cuales fueron sometidas a flexión obteniendo datos de carga vs deformación y se calculó del módulo de elasticidad y el módulo de rotura, los datos experimentales nos sirven para comparar con las propiedades mecánicas de la viga de madera laminada para que de esta manera quede demostrado el mejor comportamiento de la viga de M.L.E. a las solicitaciones de carga.



Fig. 4.1.18 Foto de ensayo de Flexión

Fuente: (Autores, 2015)

#### **4.1.4 Obtención de la humedad**

Esta es calculada a partir de muestras extraídas de la madera aserrada que son pesadas en su estado natural y luego de permanecer 24 horas en el horno a una temperatura de 100° C se las vuelve a pesar y determinamos su contenido de humedad con el cálculo del porcentaje de la diferencia de su masa, para obtener un dato estadístico se realizaron ensayos con 14 probetas.



Fig. 4.1.19 Fotos de probetas para determinar la humedad

Fuente: (Autores, 2015)

#### **4.1.5 Corrección de datos**

Los valores de las propiedades mecánicas del material se obtienen mediante ensayos normalizados, por este motivo se aplican correcciones a las resistencias cuando existan factores como, duración del ensayo, contenido de humedad, luz y altura de la probeta, los cuales no coincidan con las referencias definidas por la norma chilena.

#### **4.1.6 Diseño de una viga recta y columna de madera laminada en Pino Radiata**

Para definir la sección transversal de un miembro estructural de madera laminada, las piezas que lo conforman deberán ser clasificadas, con el fin de que sus propiedades mecánicas sean óptimas para resistir las cargas de diseño en las condiciones de servicio que se disponen en las normas.



Según la norma **NCH 1198 - 2006**, previo al cálculo de las tensiones de diseño se requiere que:

Para clasificar la madera aserrada que va a ser destinada a la confección de miembros estructurales de M.L.E., se utiliza la norma **NCH 2150 – 89** la cual da a conocer dos métodos de clasificación mecánica y visual, siendo el método de clasificación visual el más utilizado en la confección de elementos estructurales laminados, el cual visualmente se determina el comportamiento de la madera.

## **4.2 Análisis estadístico de los datos**

Una vez obtenidos los datos de las probetas ensayadas en el laboratorio, estos deben ser analizados y tabulados para obtener valores que representen las características de la madera que se encuentra en nuestro país, y realizar los diseños de los diferentes elementos estructurales que se necesiten para la construcción de una edificación.

### **4.2.1 Mediante medidas de tendencia central**

Para determinar las medidas de tendencia central se deberá fijar un tamaño de muestra aleatoria para no sesgar los resultados que se obtengan, los valores se obtendrán mediante un análisis experimental, el cual se lo realizó con una discretización estadística de los datos obtenidos; procedimientos que nos permiten una mayor confiabilidad puesto que se descartan valores que a pesar de haber sido ensayados sus medidas se encuentran muy dispersas de las medidas de tendencia central de la muestra.

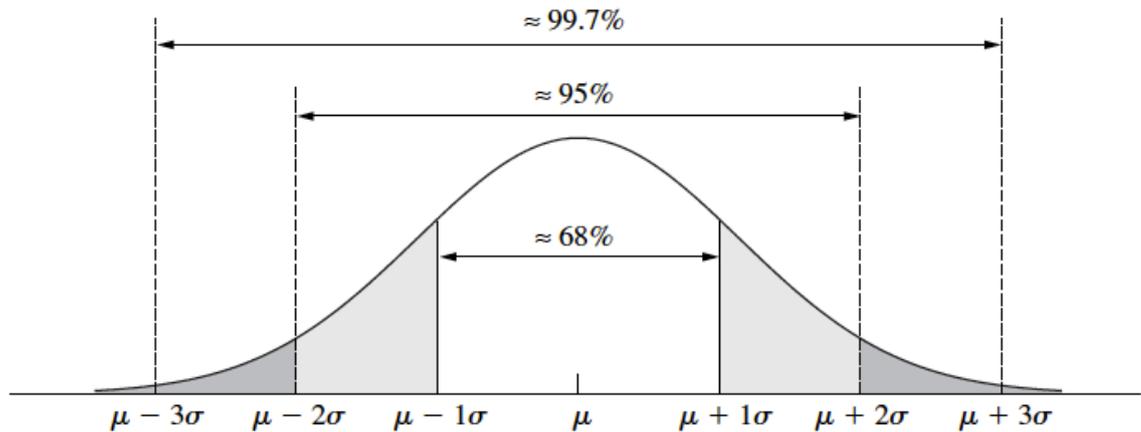


Fig. 4.2.1 Función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria normal con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$

Fuente: (Navidi, 2006)

#### 4.2.2 Elaboración de tablas de resultados de ensayos

Mediante las tablas se establecen las propiedades mecánicas de las piezas de madera ensayadas previamente en el laboratorio en base a sus dimensiones y demás características físicas, determinando de esta manera su módulo de flexión, su módulo de rotura y la deformación máxima que pueden llegar a tener estos elementos.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS

#### 5.1 Densidad

Tabla 5.1.1 Registro de las densidades ensayadas

Pieza	Masa (gr)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
1	41,59	75	0,555	554,53
1'	37,50	70	0,536	535,71
3	45,70	80	0,571	571,25
3'	48,40	75	0,645	645,33
4	41,91	70	0,599	598,71
4'	44,98	70	0,643	642,57
6	33,44	70	0,478	477,71
6'	35,72	70	0,510	510,29
7	41,42	70	0,592	591,71
9	47,25	70	0,675	675,00
10	40,38	70	0,577	576,86
11	43,31	80	0,541	541,38
12	55,65	80	0,696	695,63
17	36,84	70	0,526	526,29
<b>Promedio de valores</b>	<b>42,44</b>	<b>72,86</b>		<b>581,64</b>
<b>Mediana</b>				<b>574,05</b>
<b>Desv. Estándar</b>				<b>64,11</b>

Fuente: (Autores, 2015)

## 5.2 Obtención del módulo de elasticidad

Tabla 5.2.1 Datos para la obtención de módulos de elasticidad y rotura

Pieza	L (cm)	B (cm)	h (cm)	Li (cm)	Lf (cm)	$\delta$ (cm)	Pmax (Kgf)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (modific.) (MPa)
1	46	8,20	2,03	26,80	29,40	2,60	636	6167,31	84,98	-
2	46	7,90	2,03	26,80	29,60	2,80	690	7582,67	95,64	-
3	46	8,10	2,03	26,60	28,40	1,80	1040	17339,41	140,60	-
4	46	8,07	2,03	26,60	28,40	1,80	660	11044,76	89,56	11044,76
5	46	8,00	2,05	26,50	28,50	2,00	690	10179,21	92,61	10179,21
6	46	8,07	2,01	26,50	28,70	2,20	1000	14104,65	138,41	14104,65
7	46	8,02	2,03	26,50	27,50	1,00	460	13942,54	62,81	13942,54
8	46	8,11	2,02	26,60	28,30	1,70	810	14494,65	110,46	14494,65
9	46	8,12	2,02	26,60	28,30	1,70	640	11438,46	87,17	11438,46
10	46	8,14	2,03	26,60	28,10	1,50	600	11945,22	80,72	11945,22
11	46	8,05	2,04	26,60	27,60	1,00	340	10116,71	45,80	10116,71
12	46	8,11	2,03	26,60	28,50	1,90	600	9465,32	81,01	9465,32
13	46	8,07	2,02	26,60	28,20	1,60	970	18534,07	132,93	-
14	46	8,04	2,02	26,60	28,50	1,90	350	5652,63	48,14	-
15	46	8,06	2,00	26,60	28,70	2,10	640	9611,30	89,58	9611,30
16	46	8,14	2,02	26,60	27,50	0,90	610	20542,60	82,88	-
17	46	8,08	2,02	26,60	28,88	2,28	720	9642,26	98,55	9642,26
18	46	7,89	2,00	26,60	28,30	1,70	510	9664,98	72,92	9664,98
19	46	8,09	2,02	26,60	28,50	1,90	530	8506,80	72,45	-
20	46	8,13	2,01	26,50	28,20	1,70	880	15944,16	120,90	15944,16
21	46	8,01	2,03	26,60	28,60	2,00	810	12290,82	110,74	12290,82
22	46	8,09	2,00	26,60	29,30	2,70	790	9193,30	110,17	9193,30
23	46	8,12	2,03	26,60	27,70	1,10	700	19050,56	94,40	-
24	46	8,02	2,03	26,60	28,50	1,90	710	11326,32	96,94	11326,32
25	46	8,12	2,03	26,60	29,00	2,40	1000	12473,58	134,86	12473,58
26	46	8,17	2,02	26,60	28,90	2,30	780	10240,88	105,58	10240,88
27	46	8,08	2,03	26,60	28,30	1,70	710	12564,83	96,22	12564,83
28	46	7,97	2,02	26,55	28,00	1,45	560	11955,13	77,71	11955,13
29	46	8,11	2,02	26,65	27,29	0,64	590	28044,24	80,46	-
30	46	8,09	2,02	26,55	29,10	2,55	560	6697,18	76,55	-
									<b>Desviación estándar</b>	<b>1916,38</b>
									<b>Promedio</b>	<b>11581,95</b>

Fuente: (Autores, 2015)

### 5.3 Resistencia a la compresión

Tabla 5.3.1 Datos para la obtención de la resistencia a compresión

Pilotes de madera sometidos a compresión								
Pieza	Altura inicial (cm)	Altura Final (cm)	Base (cm)	Ancho (cm)	Peso (gr)	Carga (Kg)	Esfuerzo (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)
1		20,80	4,90	4,94	271,31	7500	309,84	30,38
2		20,20	4,91	4,89	229,01	7660	319,04	31,29
3	21,10	19,86	4,89	4,92	263,35	4840	201,17	19,73
4	20,90	19,95	4,89	4,96	216,11	5300	218,52	21,43
5	21,30	20,50	4,95	4,90	246,80	8000	329,83	32,35
6	21,30	20,40	4,74	4,91	260,68	6580	282,73	27,73
7	21,20	19,40	4,88	4,90	260,26	5660	236,70	23,21
8	21,40	20,70	4,90	4,93	232,22	7990	330,75	32,44
9	21,50	20,20	4,94	4,90	271,59	7800	322,23	31,60
10	21,50	20,50	4,93	4,90	219,51	7660	317,09	31,10
11	20,60	20,40	4,91	4,90	274,00	4790	199,09	19,52
12	21,20	20,90	4,90	4,94	251,87	8700	359,42	35,25
13	21,00	20,60	4,93	4,92	259,56	9350	385,48	37,80
14	21,30	20,80	4,90	4,95	249,54	7980	329,00	32,26
15	21,50	21,10	4,92	4,94	242,76	6210	255,51	25,06
16	21,30	20,70	4,87	4,91	262,04	5580	233,36	22,88
17	20,80	20,30	4,90	4,74	259,06	6040	260,05	25,50
18	20,50	20,10	4,92	4,94	249,05	7660	315,16	30,91
19	21,10	20,70	4,92	4,95	270,31	6630	272,23	26,70
20	20,80	20,40	4,90	4,92	231,41	7510	311,51	30,55
21	21,00	20,70	4,93	4,92	247,98	8600	354,56	34,77
22	20,80	20,60	4,91	4,90	255,45	7340	305,08	29,92
23	20,80	20,30	4,95	4,93	286,30	5890	241,36	23,67
24	21,20	20,40	4,93	4,88	254,89	7470	310,49	30,45
25	20,90	20,20	4,91	4,94	268,80	10180	419,70	41,16
26	21,20	21,00	4,91	4,96	284,80	8900	365,45	35,84
27	21,41	21,30	4,92	4,95	244,08	7210	296,05	29,03
28	21,30	20,90	4,93	4,92	274,86	7430	306,32	30,04
29	21,60	21,40	4,94	4,93	294,05	10070	413,48	40,55
30	21,40	20,90	4,89	4,91	236,78	6380	265,72	26,06
<b>Promedio</b>						<b>7579,44</b>	<b>302,23</b>	<b>29,64</b>

Fuente: (Autores, 2015)

### 5.4 Humedad

Tabla 5.4.1 Datos para la obtención de humedad de la madera

MUESTRA	Peso húmedo (Ph)	Peso seco (Ps)	Humedad (%)
1	41,59	37,31	11,47
2	37,5	34,15	9,81
3	45,7	41,3	10,65
4	48,4	43,59	11,03
5	41,91	38,06	10,12
6	44,98	40,57	10,87
7	33,44	30,44	9,86
8	35,72	32,77	9,00
9	41,42	37,87	9,37
10	47,25	42,37	11,52
11	40,38	36,81	9,70
12	43,31	39,41	9,90
13	55,65	50,09	11,10
14	36,84	33,25	10,80
		<b>Promedio</b>	<b>10,37</b>

Fuente: (Autores, 2015)

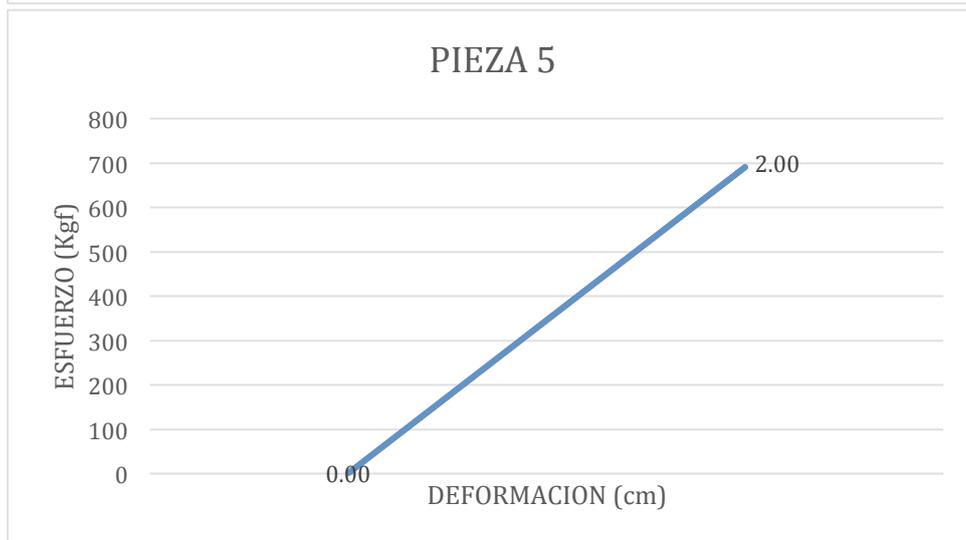
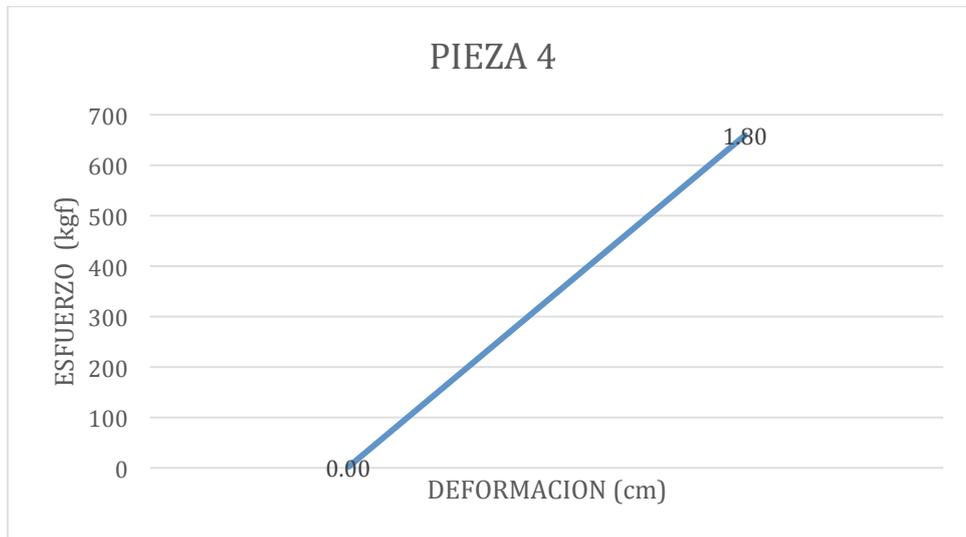
### 5.5 Clasificación de la madera

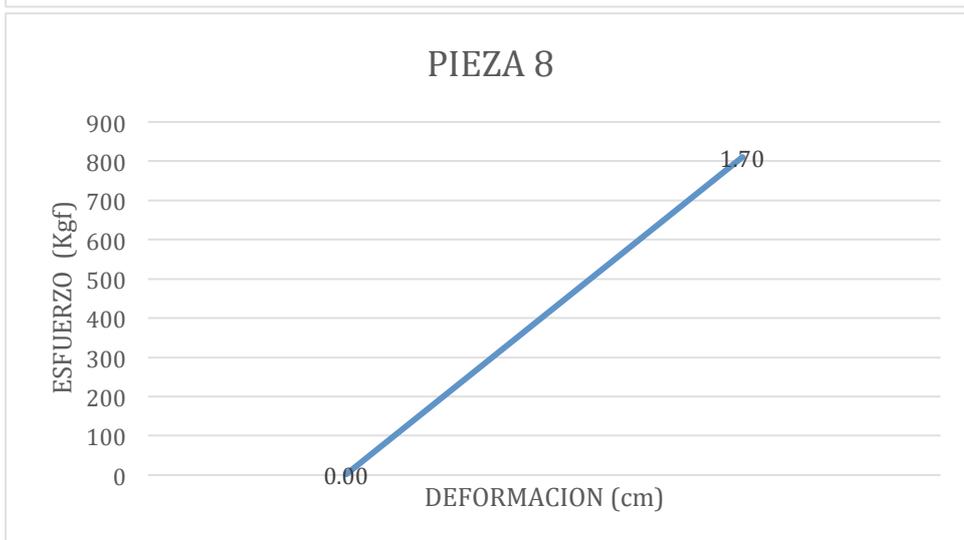
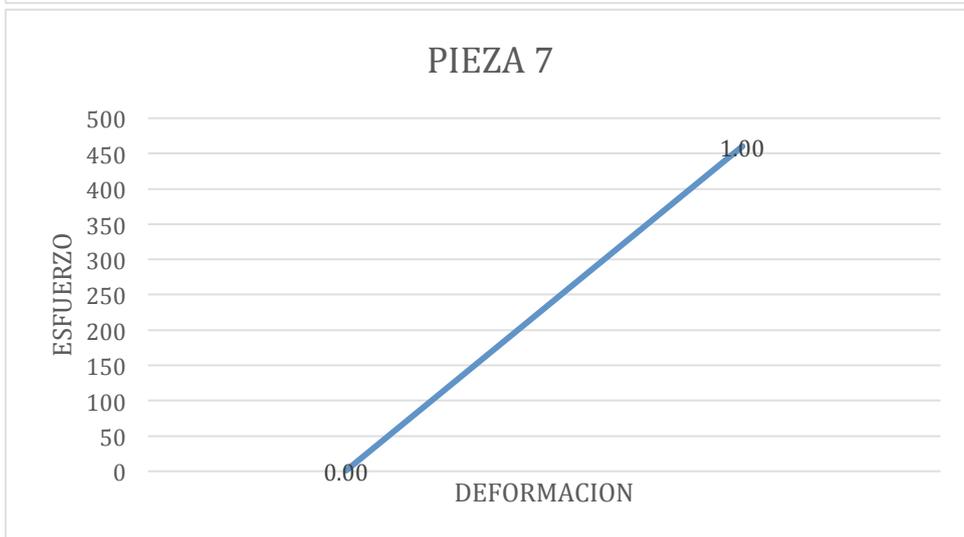
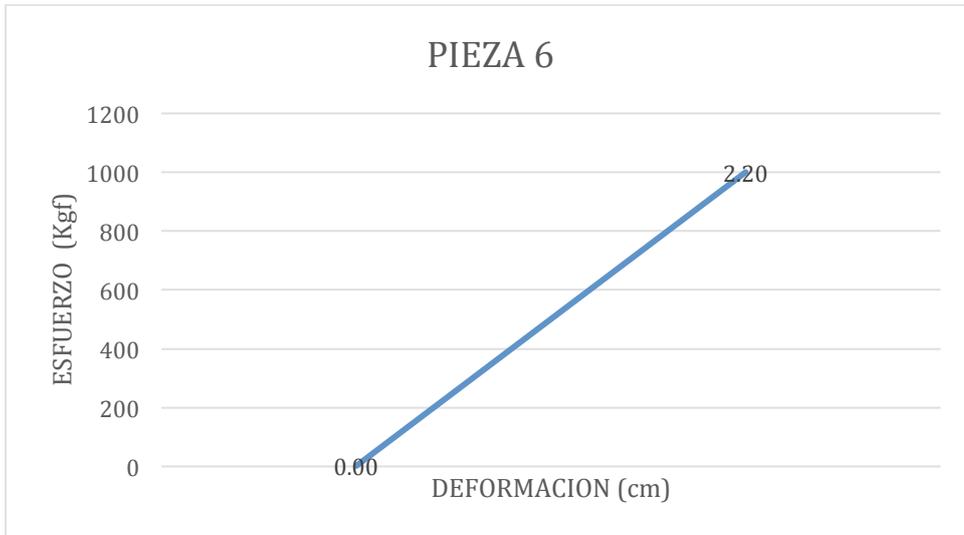
Se realizó una clasificación visual de la madera de acuerdo a la Tabla 3.2.2.

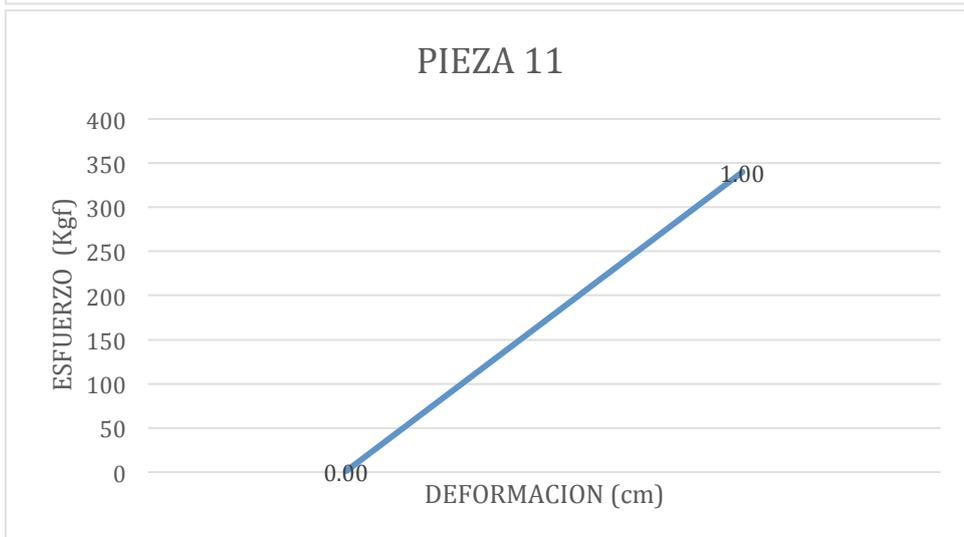
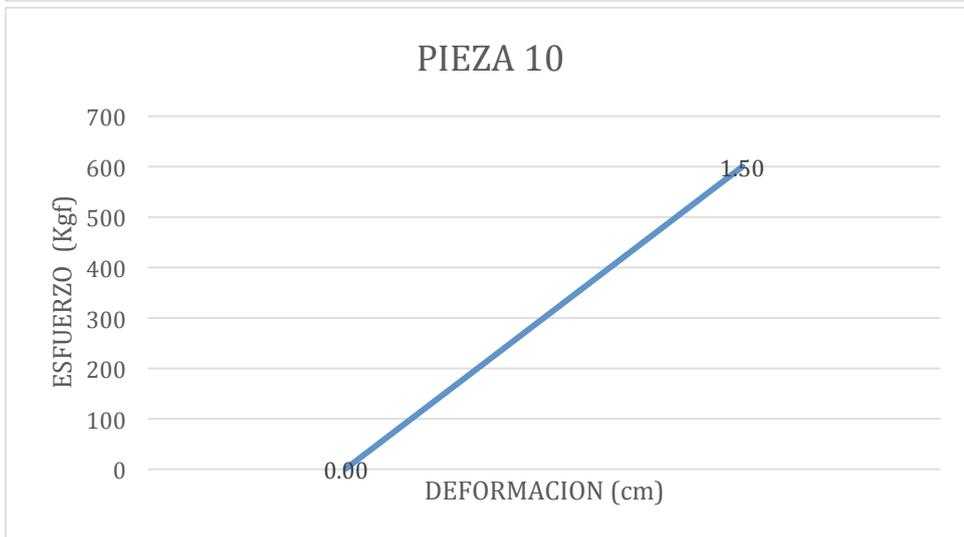
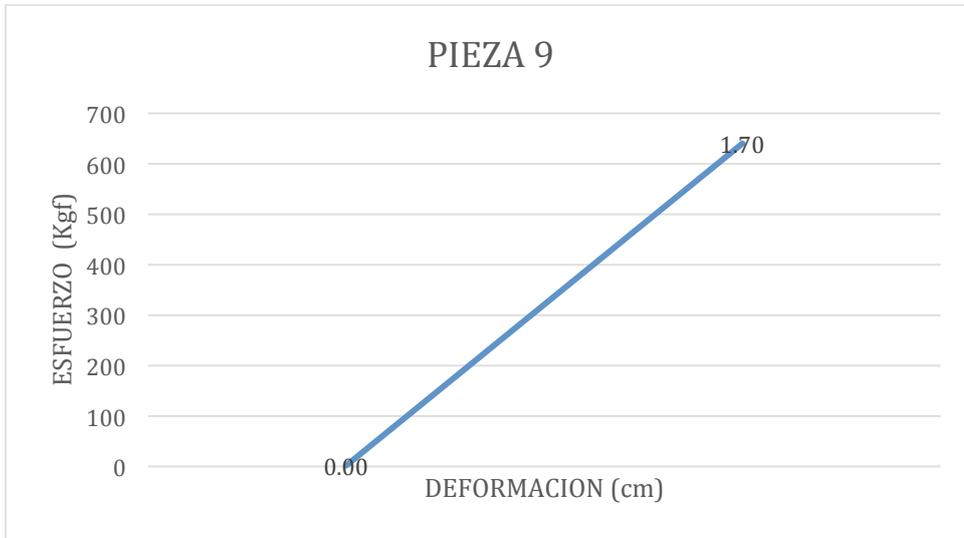
Se obteniendo como resultado que la madera que se usó para la construcción de la viga y las columnas de M.L.E. es de un grado A.

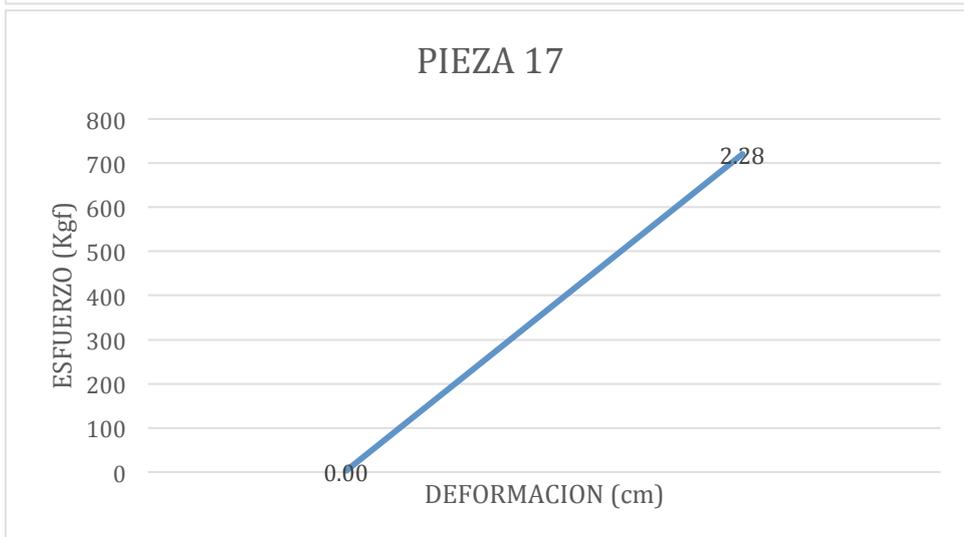
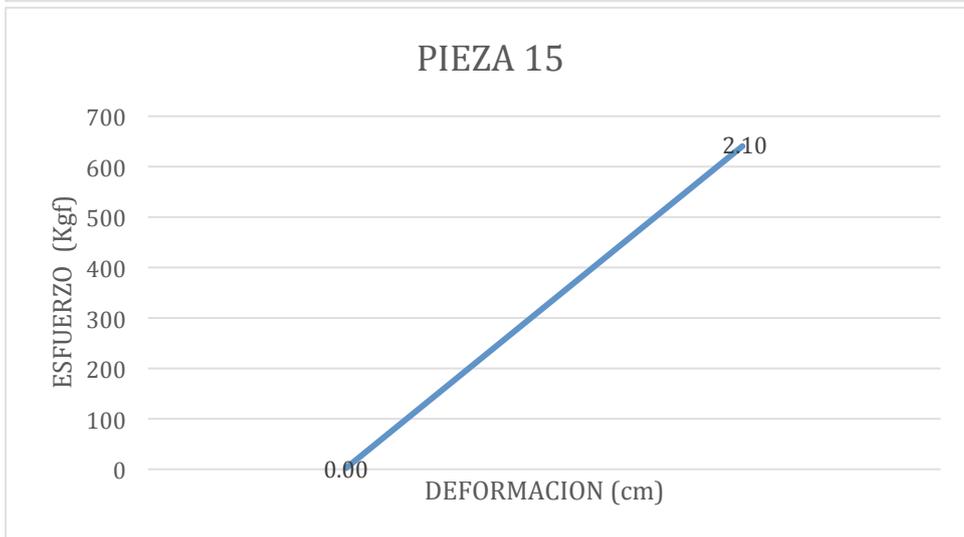
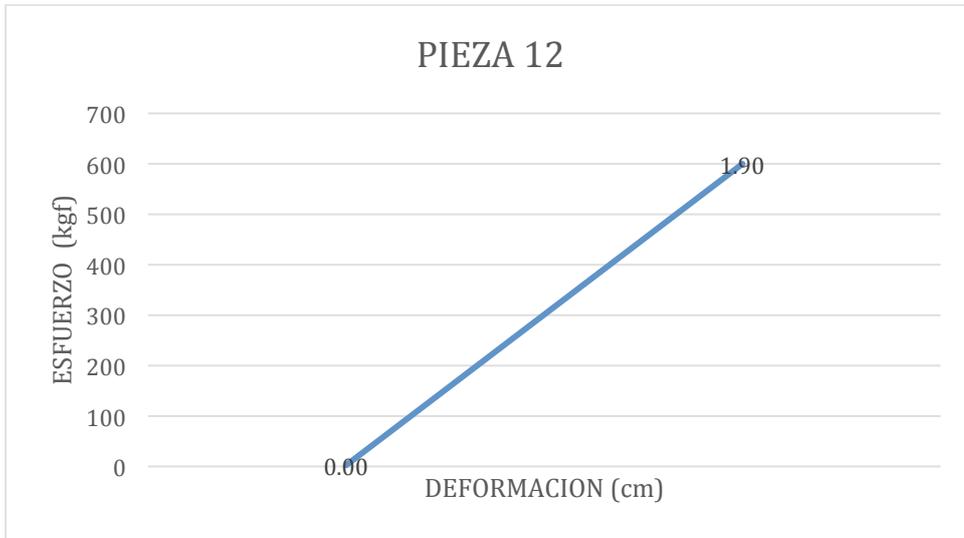
## 5.6 Representación gráfica de resultados

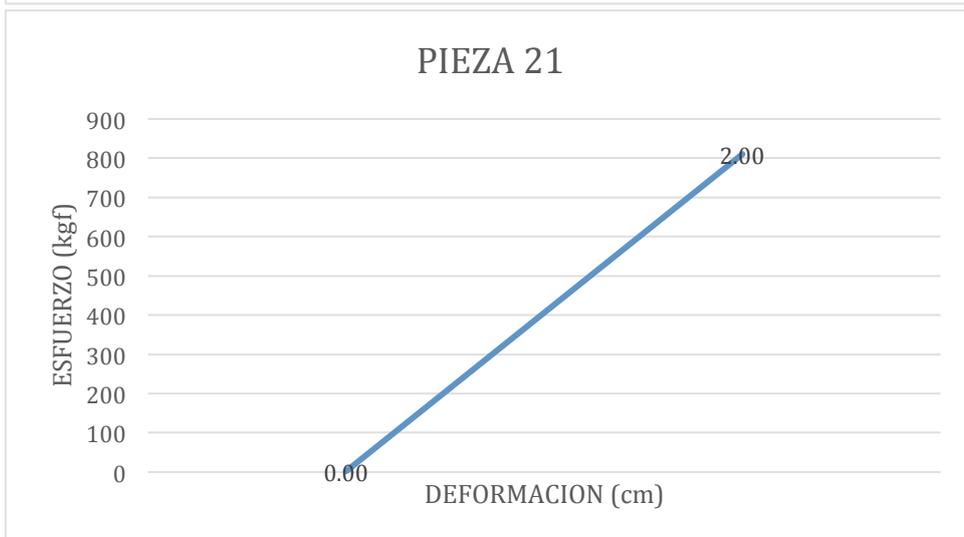
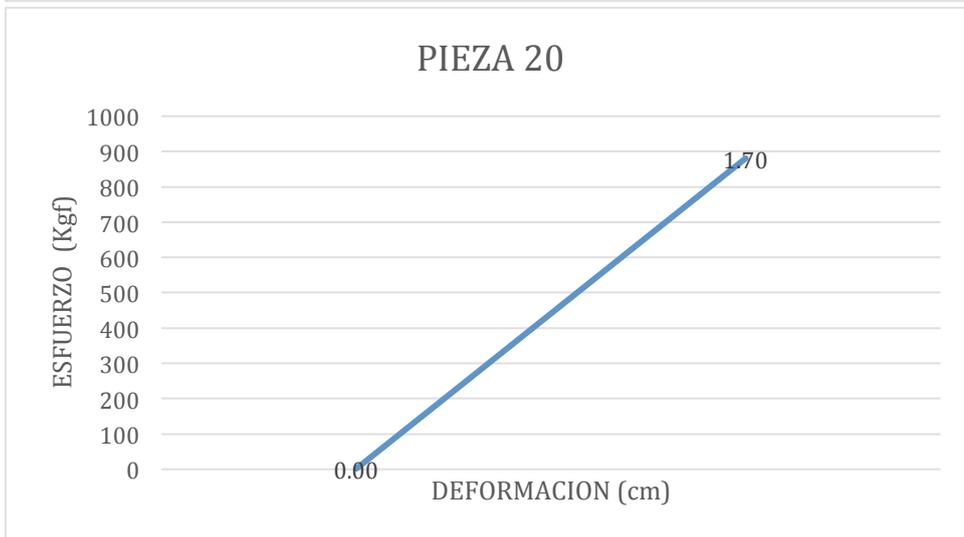
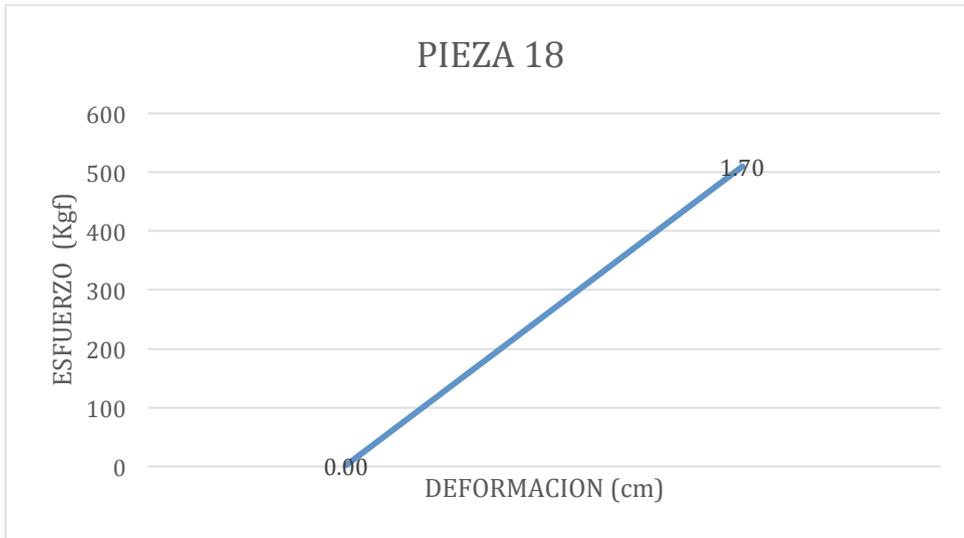
### 5.6.1 Diagrama esfuerzo vs deformación

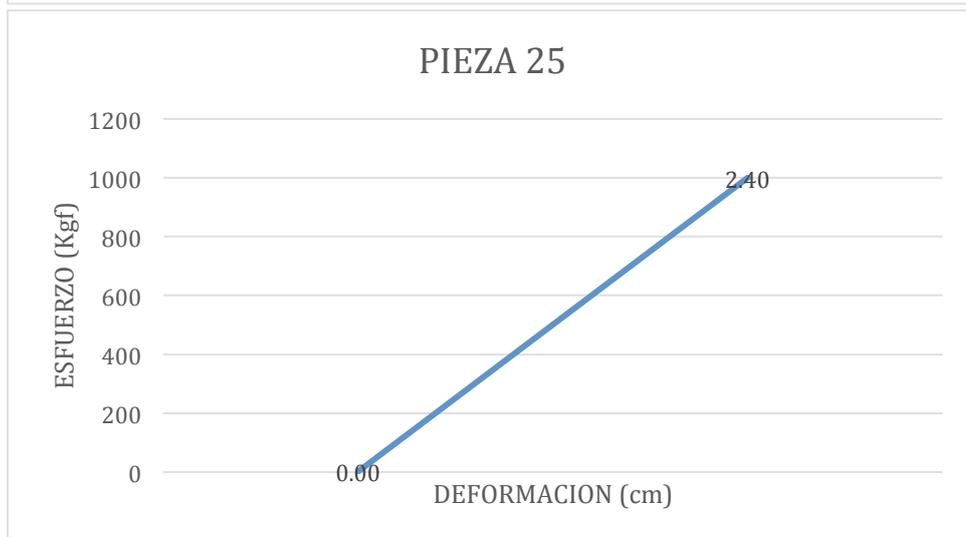
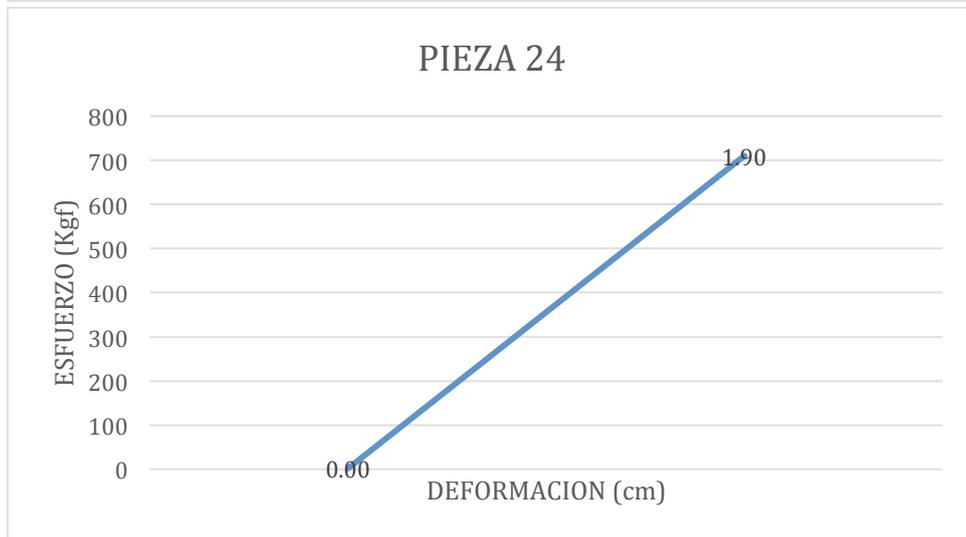
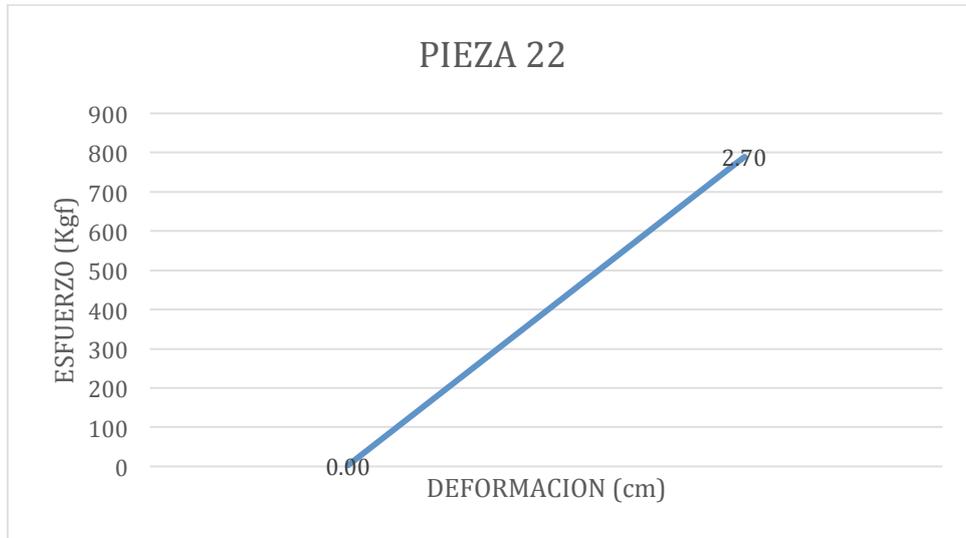


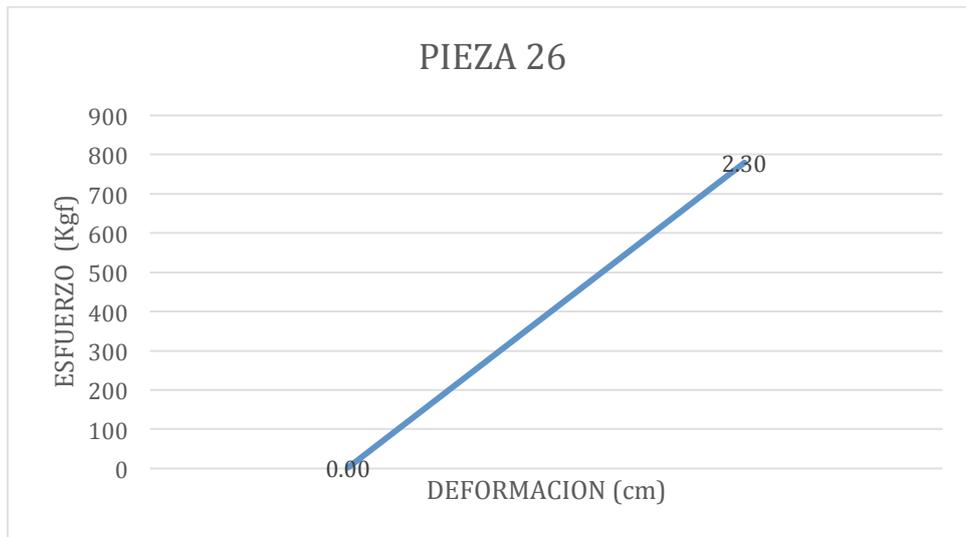












Fuente: (Autores, 2015)

**5.6.2 Representación gráfica del M.O.E. modificado**

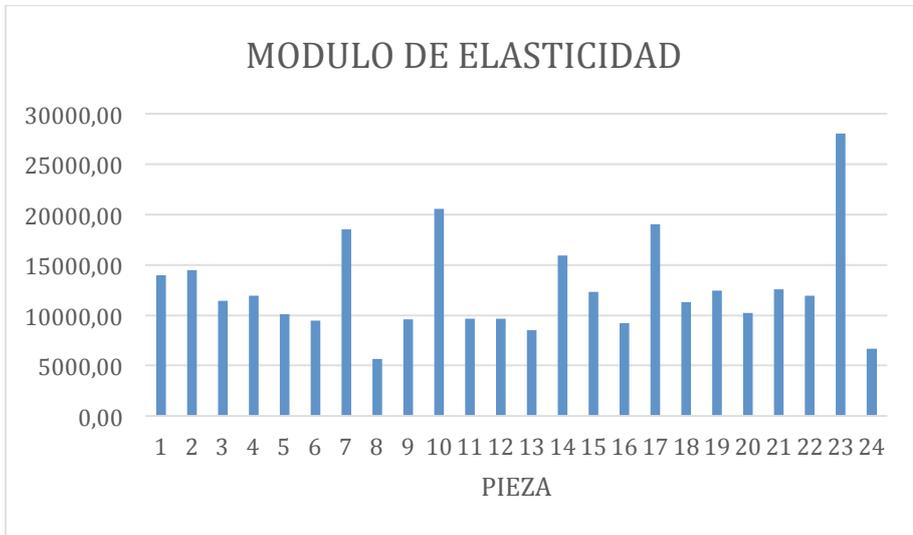


Fig. 5.6.1 Gráfica de variación del M.O.E. modificado para cada pieza

Fuente: (Autores, 2015)

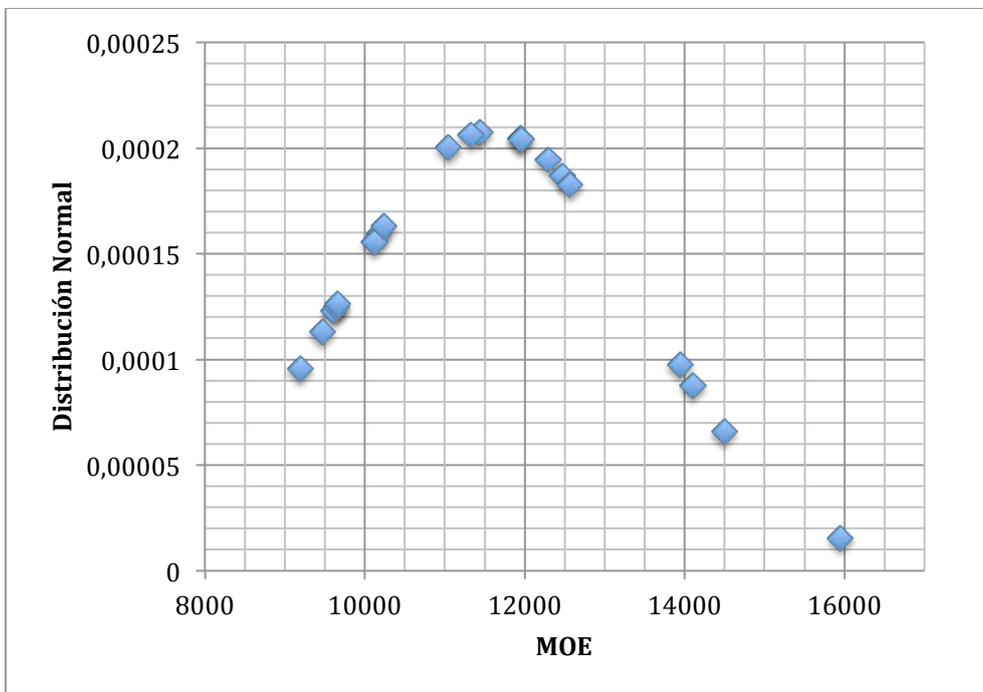


Fig. 5.6.2 Gráfica de distribución normal del M.O.E.

Fuente: (Autores, 2015)

### 5.6.3 Representación gráfica del M.O.R.

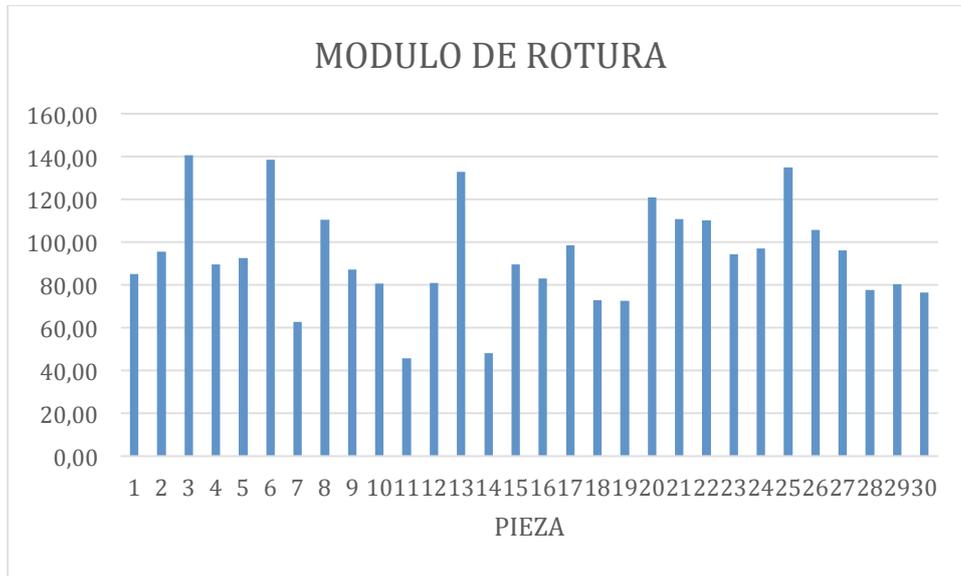


Fig. 5.6.3 Gráfica del M.O.R. para cada pieza

Fuente: (Autores, 2015)

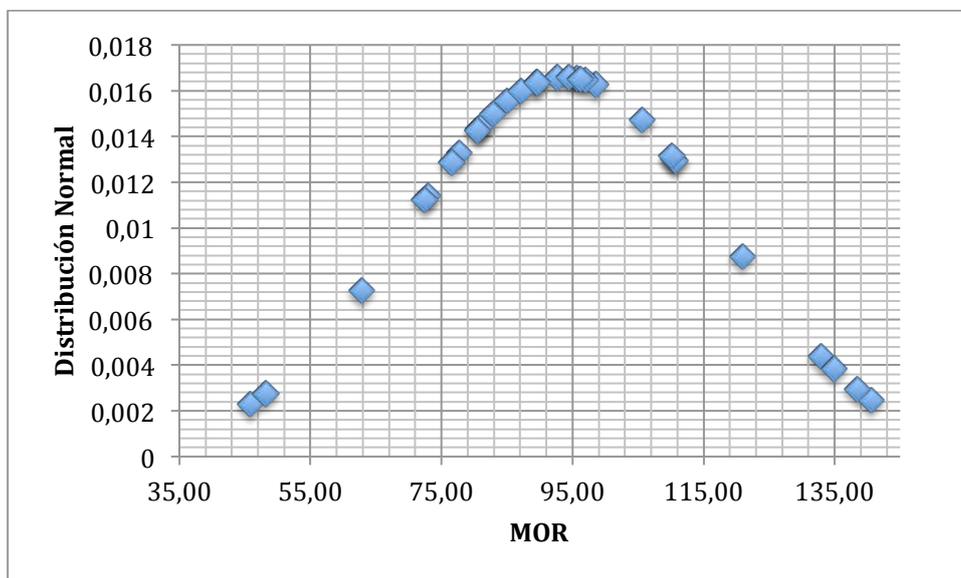


Fig. 5.6.4 Gráfica de distribución normal del M.O.R.

Fuente: (Autores, 2015)

### 5.6.4 Representación gráfica de la humedad

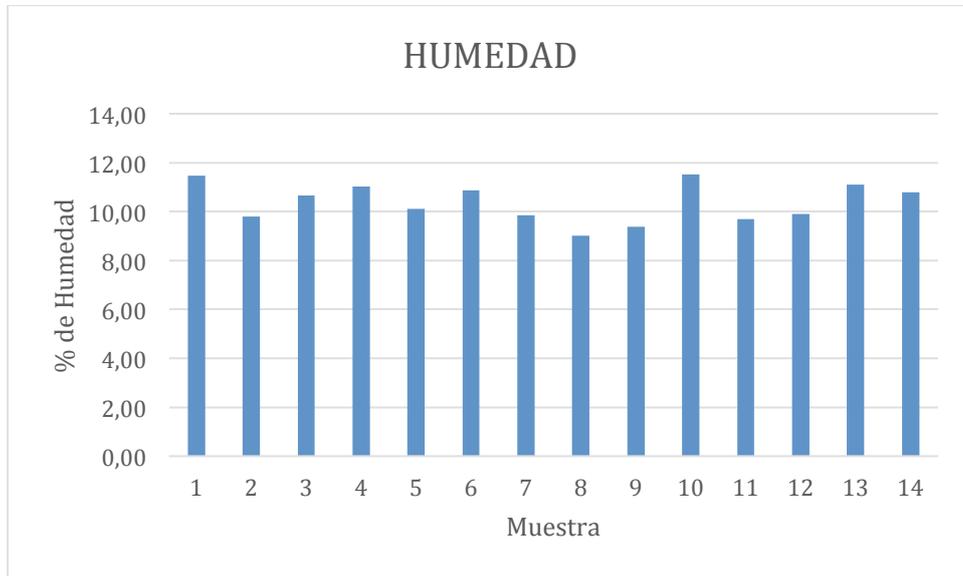


Fig. 5.6.5 Gráfica de variación de humedad en cada pieza

Fuente: (Autores, 2015)

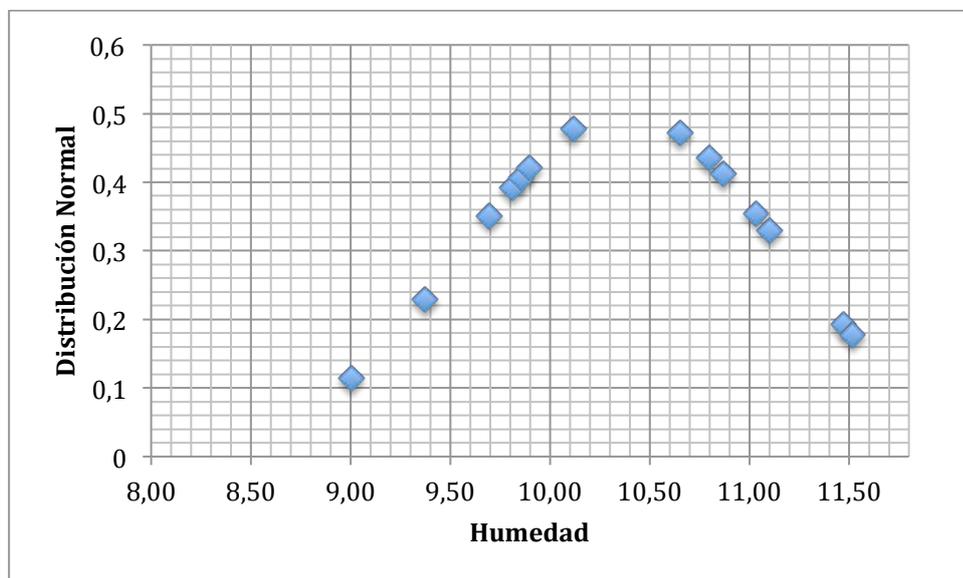


Fig. 5.6.6 Gráfica de la distribución normal de la humedad

Fuente: (Autores, 2015)



## 5.7 Diseño de columna de M.L.E.

### Dimensiones de la columna

Sección transversal

$$b(\text{cm})= 9,30$$

$$h(\text{cm})= 11,00\text{cm}$$

Área de la columna

$$A(\text{cm}^2)=9,30 \times 11,00 = 102,30$$

Longitud de la columna

$$L(\text{cm})= 210,00$$

$l_p=1$  (longitud efectiva de pandeo, debido a su restricción en los apoyos)

Esbeltez reguladora del diseño

$$\lambda = \frac{l_p}{i} \leq 170$$

Inercia de la sección transversal

$$I = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{11 \times 9,3^3}{12} = 737,33 \text{ cm}^4$$

$i$  : Radio de giro

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{737,33}{102,30}} = 2,635 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{210}{2,685} = 78,212 < 170$$

Tensión admisible en compresión paralela

$$f_{cp} = \frac{N}{A} (MPa)$$

$$F_{cp,\lambda,dis} = F_{cp,dis} \times K_{\lambda}, \text{ ( si } \lambda \geq 10 \text{ )}$$

$$F_{cp,dis} = f_{cp} \times K_H \times K_D$$

$$F_{cp} = f_{b,cp} \times RR_{cp}$$

Factor de modificación por humedad

$$K_H = (1 - \Delta H - \Delta R)$$

$$K_H = 1 \text{ (Madera con humedad menor al 12\%)}$$

Madera Tipo "A" (Clasificación visual Tabla 3.2)

Tensión básica en compresión paralela

$$f_{b,cp} = 13 \text{ MPa}$$

Razón de resistencia en compresión paralela

$$RR = \frac{(Y_{cp})^3}{4} - (Y_{cp})^2 - \frac{Y_{cp}}{4} + 1$$

Tamaño del nudo máximo permitido por el grado de la lámina, expresada como una fracción decimal del ancho

$$Y_{cp} = xi + 2,576 \cdot \sigma i$$

$$Y_{cp} = 0,074 + 2,576 \times 0,133 = 0,417$$

$$RR = \frac{(0,417)^3}{4} - (0,417)^2 - \frac{0,417}{4} + 1$$

$$RR = 0,74$$

$$F_{cp} = 13 \times 0,74 = 9,62 \text{ MPa}$$

Factor de modificación por duración de carga

$$K_D = \frac{1,747}{t^{0,0464}} + 0,295$$

t = Duración de la carga en segundos

$$K_D = \frac{1,747}{31536000^{0,0464}} + 0,295 = 1,079$$

$$F_{cp,dis} = 9,62 \times 1 \times 1,079 = 10,38 \text{ MPa}$$

Factor de modificación por esbeltez

$$K_\lambda = A - \sqrt{A^2 - B}$$

$$A = \frac{\frac{F_{cE,ml}}{F_{cp,dis}} \left(1 + \frac{\lambda}{200}\right) + 1}{2 \times 0,9}$$

$$B = \frac{F_{cE,ml}}{0,9 \cdot F_{cp,dis}}$$

$$F_{cE} = \frac{5 \times E_{dis}}{\lambda^2} \text{ MPa}$$

$$F_{cE} = \frac{5 \times 11000}{78,212^2} = 8,99 \text{ MPa}$$

$$A = \frac{\frac{8,99}{10,38} \left(1 + \frac{78,212}{200}\right) + 1}{1,80} = 1,23$$

$$B = \frac{8,99}{0,9 \cdot 10,38} = 0,96$$

$$K_\lambda = 1,23 - \sqrt{1,23^2 - 0,96} = 0,49$$

**Tensión de diseño calculada**

$$F_{cp,\lambda,dis} = 10,38 \times 0,49 = 5,08 \text{ MPa}$$



### 5.8 Diseño de viga de M.L.E.

Altura de la viga

$$h(\text{cm})= 18,50$$

Número de láminas que componen la viga

$$n= 10$$

Ancho de la viga

$$b(\text{cm})= 9,30$$

Longitud

$$L(\text{cm})= 450$$

Inercia en (x)

$$I (\text{cm}^4) = 4907.01$$

Módulo de corte

$$G= E/15$$

Grado A:

Tensiones básicas

Tensión admisible flexión  $f_{bf}= 19 \text{ MPa}$

Tensión básica en flexión  $f_{bcz}= 1,3 \text{ MPa}$

Módulo de elasticidad  $E_{L,b}= 11000 \text{ MPa}$

Humedad de servicio= 12%

### Tensiones admisibles

Tensión admisible en flexión

$$f_f = f_{bf} * RR_f * K$$

Factor de ajuste por altura de la viga  $K = 0,75$ ,

Tensión básica en flexión  $f_{bf}=19$  MPa

Razón de resistencia en flexión  $RR_{fn}$

$$R = \left( \frac{I_K}{I_G} \right)$$

$I_K$  = Momento de inercia de los nudos en una sección transversal, en  $\text{mm}^4$ .

$I_G$  = Momento de inercia total de la sección, en  $\text{mm}^4$ .

$$I_K = x + d \times \frac{[\sum_0^n z^2]^{1/2}}{\sum_0^n z} = 0,11 + 0,62 \times \frac{\sqrt{358004}}{2000} = 0,306$$

$$RR_{fn} = (1 + 3 \times R) \times (1 - R)^3 \times \left(1 - \frac{R}{2}\right) = 0,543$$

### Tensión admisible en flexión

$$F_f = 19 \times 0,543 \times 0,75 = 7,734 \text{ MPa}$$

### Tensión admisible en cizalle

$$F_{CZ} = f_{bcz} \times RR_{CZ} = 1,3 \times 1 = 1,3 \text{ MPa}$$

### Módulo de elasticidad admisible

$$E_L = 0,95 \times E_{L,b} = 0,95 \times 11000 = 10450 \text{ MPa} = 106560 \text{ Kg/cm}^2$$

### Tensión de diseño

Factor de modificación por duración de carga ( $t=10$  años)  $K_D = 1$

Factor de modificación por trabajo en conjunto  $K_c = 1$

Longitud efectiva de volcamiento  $l_v$

Razón entre distancia de los apoyos y altura de la viga  $= \frac{l_a}{h} = \frac{450}{18,5} = 24,32$

$$l_v = 1,63 \times l_a + 3 \times h = 7890 \text{ mm}$$

Restricción de volcamiento

$$\lambda_v = \sqrt{\frac{(I_v \times h)}{b^2}} = \sqrt{\frac{7890 \times 185}{92^2}} = 13,13 \leq 50 \text{ ok}$$

Factor de modificación por volcamiento

$K_{\lambda v}$ , con  $h/b = 2$  ok

$$F_{fE,ml} = \frac{0,61 \times E_{dis}}{\lambda_v^2} = 0,61 \times \frac{10450}{13,13^2} = 36,97 \text{ MPa}$$

$$F_{f,dis}: f_f \times K_D \times K_c = 7,734 \times 1 \times 1 = 7,734 \text{ MPa}$$

$$K_{\lambda v} = \frac{1 + \left(\frac{F_{fE,ml}}{F_{f,dis}}\right)}{1,90} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{F_{fE,ml}}{F_{f,dis}}\right)}{19}\right)^2 - \frac{\left(\frac{F_{fE,ml}}{F_{f,dis}}\right)}{0,95}}$$

$$K_{\lambda v} = \frac{1 + \left(\frac{13,221}{8,011}\right)}{1,9} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{13,211}{8,011}\right)}{19}\right)^2 - \frac{\left(\frac{13,211}{8,011}\right)}{0,95}}$$

$$K_{\lambda v} = 0,938$$

**Factor de modificación por volumen  $K_V$** 

$$K_V = \left(\frac{6,40}{L}\right)^{1/10} \times \left(\frac{300}{h}\right)^{1/10} \times \left(\frac{135}{b}\right)^{1/10} \leq 1,0$$

$$K_v = \left(\frac{6,40}{4,5}\right)^{\frac{1}{10}} \times \left(\frac{300}{185}\right)^{\frac{1}{10}} \times \left(\frac{135}{92}\right)^{\frac{1}{10}} = 1,13 > 1,0$$

**Tensión de diseño de cizalle longitudinal****Tensión de diseño calculada**

$$F_{cz,dis} = F_{cz} \times K_H \times K_D = 1,3 \times 1 \times 1 = 1,3 \text{ MPa} = 13 \text{ 25 Kgf/cm}^2$$



Fig. 5.8.1 Fotografía de Pórtico de M.L.E. (4,50 de largo por 2,00 de alto)

Fuente: (Autores, 2015)

## CONCLUSIONES

- Luego de realizar los ensayos para determinar las propiedades mecánicas de la madera se obtuvo como resultado lo siguiente:
  - Módulo de elasticidad (MOE)= 11.581,95 MPa
  - Módulo de rotura (MOR)= 93,73 MPa
  - Resistencia a la compresión= 29,64 MPa
  - Resistencia a la tracción= 9,30 MPa
  - Resistencia a fuerzas cortantes= 1,30 MPa
  
- Tomando en cuenta los resultados de laboratorio en la obtención de las propiedades mecánicas de la madera de Pino Radiata de nuestro medio; al ser resultados ligeramente más altos que la norma chilena NCh-2165 se puede aplicar con total confianza esta norma para el diseño de estructuras o de miembros estructurales de M.L.E. de nuestro medio.
  
- Se construyó una viga de M.L.E. de 4,50 metros de longitud y con una sección transversal de 9,20 x 18,50 centímetros, con laminación horizontal con uniones finger joint, conformada por 10 láminas de madera aserrada adheridas una a otra mediante un poli vinílico llamado Resincola y se obtuvo las siguientes tensiones admisibles:
  - Tensión admisible en flexión = 7,734 MPa
  - Tensión admisible en cizalle = 1,3 MPa
  - Módulo de elasticidad admisible = 10.450,00 MPa
  
- Otro elemento estructural que fue construido, es una columna de M.L.E. de 2.20 metros de longitud con una sección transversal de 9.3 x 11.0 centímetros la cual también sus láminas se conectan mediante uniones finger joint y

adheridas por el poli vinílico Resincola del cual se determinó la tensión admisible que se le puede solicitar al elemento.

- Tensión de diseño en compresión normal= 5.08 MPa
- El proyecto se realizó mediante ensayos destructivos de dos tipos de pegamento los cuales son: Resincola y Poly Max; al observar que el adhesivo llamado Resincola presentó mayor capacidad resistente, menor viscosidad, mayor tiempo de fraguado se decidió realizar la confección de la viga y columna de M.L.E. con este pegamento, que presenta un 26% más de resistencia, lo cual se sustenta en, la Tabla 4.1.1 Resultados de laboratorio del adhesivo POLIMAX y Tabla 4.1.2 Resultados de laboratorio del adhesivo RESINCOLA.
- Finalmente se puede concluir que la construcción de estructuras de M.L.E. es viable en nuestro medio ya que existen los recursos para poder desarrollar este tipo de construcción en el país, nos presenta ventajas sobre la madera aserrada ya que se puede optimizar el uso del material generando menor desperdicio, se puede cubrir grandes distancias con un solo elemento estructural homogéneo por la conexión finger joint de sus laminas, otra de las ventajas de este material es su bajo peso en comparación con el acero y el hormigón lo que facilita su montaje y transporte sin olvidarnos que es un material renovable que con un manejo responsable se generará un menor impacto al medio ambiente.

## BIBLIOGRAFÍA

CRUZ, J. (Febrero de 2012). La madera como elemento constructivo en estructuras singulares tendencias. *QL INGENIERIA* .

DELLEPIANE, A. (2011). *Estructuras de madera laminada*.

INFOR (Instituto Forestal). (2000). *Manual de Interpretación de la Norma Japonesa para la Fabricación de Productos de Madera Laminada Estructural*. Santiago, Chile.

INSTITUTO INTERNACIONAL PARA EL MEDIOAMBIENTE Y EL DESARROLLO, USANDO PRODUCTOS DE MADERA PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMÁTICO . (2004).

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN . (1989). *NCh 2148 - Madera laminada encolada estructural – Requisitos e inspección*. Santiago, Chile.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN . (1991). *NCh 2150 - Madera laminada encolada - Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de pino radiata*. Santiago, Chile.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN . (1999). *NCh 2165 - Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata*. Santiago, Chile.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN . (2006). *NCh 1198 Madera - Construcciones en madera - Cálculo*. Santiago, Chile.

NAVIDI, W. (2006). *Estadística para Ingenieros*. CD Mexico, Mexico: Mc GRAW - HILL/ INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.



PEREZ, V. (1992). *Manual de Madera Laminada*. Santiago, Chile: INFOR.

PINEDA, E. (2008). *Evaluación Teórico - Experimental de la Norma Chilena NCH 1198.OF2006 y su equivalente Europea, Eurocódigo 5, en la obtención de tensiones de diseño para vigas rectas de madera laminada encolada con uniones endentadas en Pino Radiata*. Valdivia, Chile.

ROGERS, R. (Febrero de 2012). La madera como elemento constructivo en estructuras singulares tendencias. *QL INGENIERIA* .

## ANEXOS

**Fotografías de los tablones de pino antes de ser mecanizados.**



**Fotografías de los tablonos siendo canteados.**



### Fotografías de tabloncitos canteados



### Fotografías de cepillado de la madera



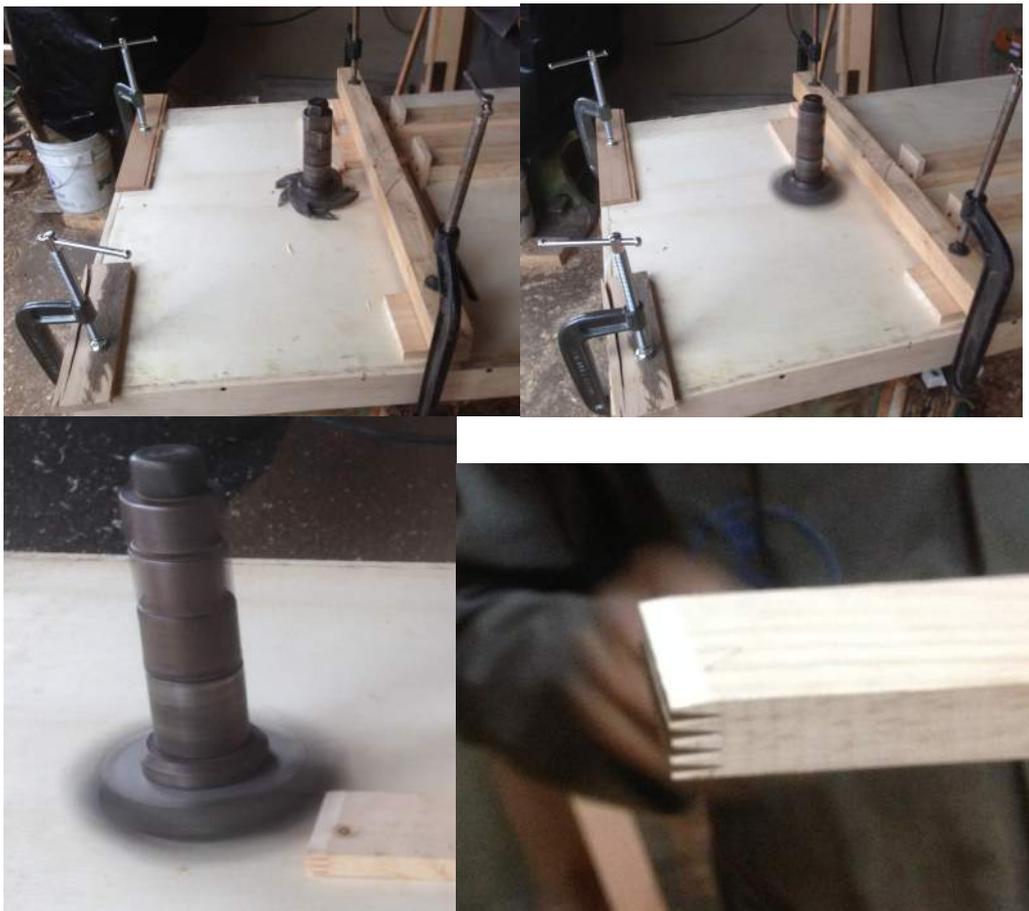
### Fotografías de aserrado de la madera



### Fotografías de corte de probetas



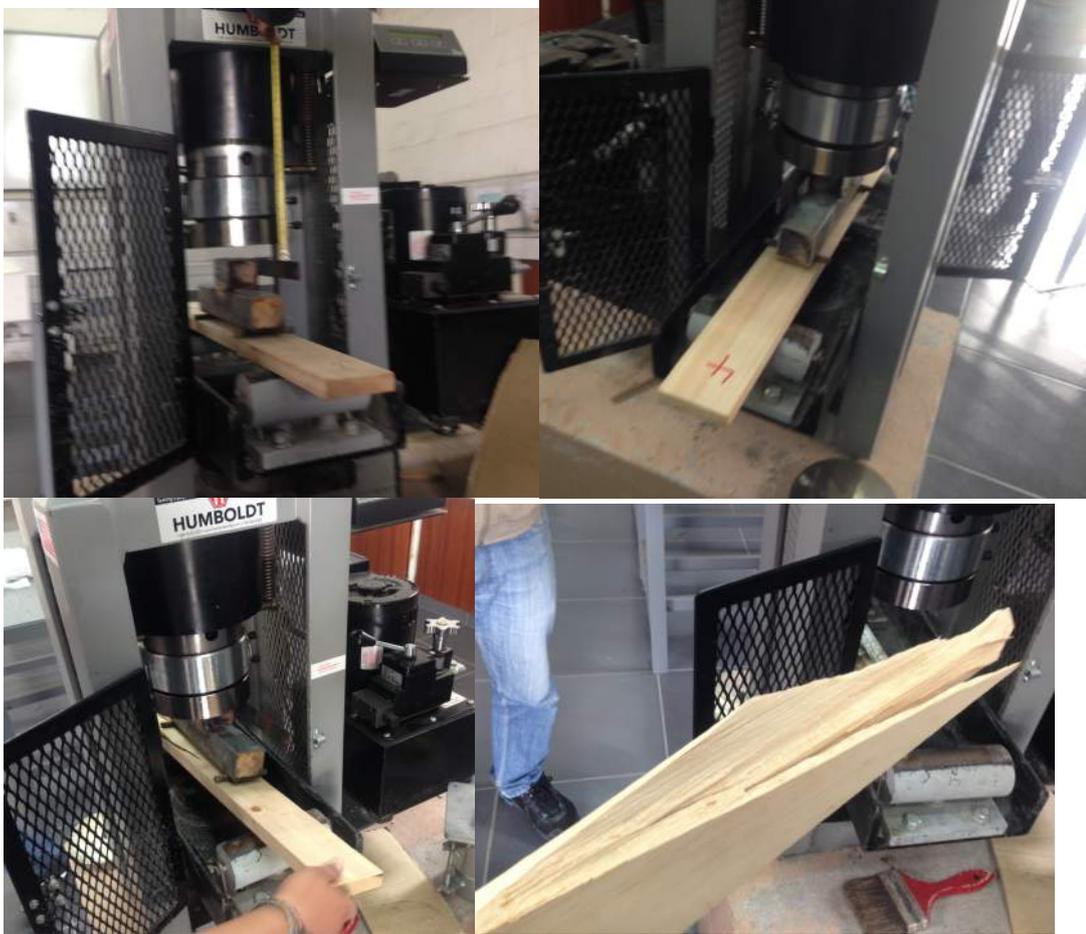
### Fotografías de elaboración de finger joint



### Fotografías de ensayo a compresión



### Fotografías de ensayos flexión



### Fotografías de preparación de probetas de resistencia del adhesivo



**Fotografías de ensayos de resistencia del adhesivo**



**Fotografías de ensayos para determinar contenido de humedad y densidad**



### Fotografías del encolado de la viga



### Fotografía del prensado de la viga



### Fotografías de perfil la viga

