

ESTUDIO TEORICO Y EXPERIMENTAL DE VIGAS DE MADERA DE SECCION TRANSVERSAL COMPUESTA (*)

Vicente Pérez Galáz (**)
Luis Leiva Araneda (***)

RESUMEN

El presente artículo compara el diseño teórico que presenta la norma chilena NCh 1198 "Madera-Construcciones en Madera-Cálculo" con los datos experimentales obtenidos en el ensayo a flexión de 480 vigas con sección transversal compuesta, cofecionadas con pino radiata aserrado y clavos de fabricación nacional.

El objetivo del estudio es verificar si las especificaciones de la norma NCh 1198 respecto a vigas con transversales compuestas son aplicables, con confiabilidad, cuando en su fabricación se usan materiales nacionales.

El artículo revisa brevemente la normativa nacional respecto al tema, resume la metodología seguida en la parte experimental y entrega los resultados a través de las medias de los parámetros seleccionados.

Entre las conclusiones más importantes se obtuvo que la madera usada tenía un contenido de humedad promedio de 10% y una densidad referencial de 510 kg/m³. La Rigidez Efectiva Teórica resultó ser significativamente menor a la obtenida experimentalmente, lo cual asegura un trabajo elástico de las vigas y además, se observó que para una misma carga, la deformación teórica es superior a la experimental, asegurando así un diseño conservador.

Estos resultados están indicando que los materiales nacionales se pueden usar con seguridad, empleando las especificaciones de cálculo de la norma NCh 1198 para secciones transversales compuestas. No obstante, lo conservadora que resulta, lleva a proponer futuros estudios de métodos óptimos.

Palabras Clave: Madera, Vigas, Compuestas.

(*) Proyecto FONDECYT 92 - 0498

(**) Ingeniero Civil, U. de Chile, Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Avda B. O'Higgins 3363, Santiago-Chile, 1994.

(***) Ingeniero Civil, Master of Science, Chalmers University of Technology de Suecia, Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Avda. B. O'Higgins 3363, Santiago-Chile, 1994.

ABSTRACT

This paper deals with the design of composite beams. The theoretical deflection of these beams calculated according to the Chilean Code Timber - Construction and Design (NCh 1198 Of. 91) are compared with the experimental data obtained from bending test series including 480 samples.

The aim of this study is to verify whether the specifications related to composite beams included in the NCh 1198 Code will lead to a safe design when using national materials. A brief overview of code recommendations on this topic is given.

The beams were constructed using local grown Radiata Pine and local made nails. The timber had 10 % moisture content and its density was 510 kg/m^3 . The experimental testing method is described and the results are presented through average values obtained for relevant parameters.

The theoretical stiffness was significantly less than the obtained experimentally. Due to this fact, following code specifications will lead to a conservative design. These results indicates that national materials can be safely used when designing with the NCh 1198 Code.

Keywords: *Timber, Beams, Composite.*

INTRODUCCION

Para emplear técnicamente la madera de pino radiata se han estudiado prolijamente sus propiedades físicas y mecánicas, lográndose con ello una elevada confianza cuando se la usa como elemento estructural en piezas rectangulares simples, tales como vigas, costaneras, pie-derechos, etc. La actual norma chilena NCh 1207 (INN, 1991) : " Pino radiata-Clasificación Visual para uso Estructural-Especificaciones de los Grados de Calidad", permite separar piezas según su resistencia y asignarle, confiablemente, una carga que esté de acuerdo con sus dimensiones. Un nutrido número de ensayos ha permitido respaldar esta norma y colocar así al pino radiata como material estructural alternativo.

Sin embargo, Chile tiene un consumo per cápita de apenas 0,1 m³, mientras que en E.E.U.U., Canadá y los Países Nórdicos, dicha cifra es 10 veces superior.

Una gran mayoría de los profesionales de la construcción desconoce, en alguna medida, las ventajas del uso de la madera como material estructural y debido a este desconocimiento, en Chile son muy pocos los profesionales que hacen uso de elementos compuestos de madera aserrada, tales como perfiles Te, Doble Te y otros, siendo ellos ampliamente usados en países desarrollados.

Como se dijo anteriormente, el pino radiata se ha estudiado profusamente, pero cabe destacar que la sección transversal rectangular no siempre es la más económica. Existen otras secciones transversales que permiten obtener resistencias adecuadas a la sollicitación que está actuando. Ellas se caracterizan por un menor volumen de material que las hace más económicas. Este es el caso de las secciones transversales compuestas Te, Doble Te, Cajón, etc. Para lograr estas conformaciones se usa madera aserrada o cepillada, clavando entre sí piezas rectangulares simples.

Por consiguiente, se puede apreciar la importancia de estudiar e investigar las secciones transversales compuestas, dado el desconocimiento de su diseño y el comportamiento que tienen frente a las sollicitaciones que actúan sobre la pieza en cuestión.

La norma chilena NCh 1198 (INN, 1991 a) "Madera-Construcciones en Madera-Cálculo" entrega un procedimiento de diseño estructural que es el especificado en la norma alemana DIN 1052 (González, 1989), para las secciones transversales compuestas. Pero no existen ensayos que lo ratifiquen para los materiales nacionales (madera y clavos). Podría suceder que éstos proporcionen diseños que difieran del entregado por el procedimiento teórico establecido en la norma NCh 1198.

Para el caso de vigas de madera con secciones transversales compuestas aparece un nuevo parámetro de variabilidad: el elemento de unión. Al definir el clavo de fabricación nacional se hace imprescindible la verificación experimental para determinar la aproximación de la expresión teórica que entrega la Norma NCh 1198, con la realidad. Las características de estos clavos, la densidad de la madera de pino radiata crecida en Chile, la presencia de nudos y de otras características reductoras de la resistencia de la madera, pueden distorsionar los planteamientos teóricos y provocar un divorcio entre la teoría y la experimentación. En tal caso será necesario corregir la Norma, variando el procedimiento teórico entregado por ella, para lograr que el diseño estructural sea consecuente con los ensayos obtenidos en los ensayos.

La presente investigación tiene como objetivo general realizar el estudio teórico y comparar con el comportamiento experimental de las vigas de madera con secciones transversales compuestas, tipo Te, Doble Te y Cajón, materializadas a través de la unión clavada de piezas simples de madera aserrada, usando materiales nacionales.

TEORIA FUNDAMENTAL

Se entrega, a continuación un análisis de la teoría de la ligazón elástica, con el objeto de establecer los conceptos básicos en que se fundamenta la teoría de Karl Mohler para este tipo de secciones transversales.

Tipos de Ligazón

En elementos de madera con sección transversal compuesta, el desarrollo de los esfuerzos internos en las distintas piezas constituyentes, depende de la flexibilidad de los medios de unión utilizados para unir las piezas que conforman la sección en sí. De esta manera se pueden considerar los siguientes casos :

- Ligazón Rígida.

Al flectarse una viga compuesta con ligazón rígida (adhesivo) entre sus componentes, no se producen corrimientos relativos entre puntos de borde correspondientes, ubicados en las superficies de contacto pertenecientes a las partes individuales. En este caso el diseño puede realizarse considerando la viga como si fuera de sección transversal homogénea, aceptando una sección igual a la suma de las secciones transversales individuales y aplicando la teoría clásica de flexión.

- Apoyo Simple.

Este caso corresponde a la disposición de dos o más piezas adosadas por simple apoyo, no existiendo ligazón alguna entre las mismas, excepto el roce natural. Aquí, pese a que las áreas totales serán iguales a la suma de las áreas individuales, en las inercias serán efectivas, únicamente, las de las piezas individuales, desapareciendo el efecto inercial conjunto caracterizado por el sumando de Steiner. Esto debido a los corrimientos no controlados que se producen entre las piezas individuales.

- Ligazón Elástica.

La situación intermedia, que es precisamente la que se trata en este estudio,

corresponde a la llamada "Ligazón Elástica" en la que al deflectarse la viga se producen corrimientos relativos entre las piezas, los que debido al efecto de los medios mecánicos de unión se ubican en una situación intermedia entre los casos anteriormente señalados. La aparición de estos corrimientos produce una distribución de esfuerzos internos en las piezas individuales que difiere considerablemente de la correspondiente a una ligazón rígida para una misma sección transversal.

Fundamentos de la Teoría de Ligazón Elástica

La teoría de ligazón elástica, que fue propuesta por R. Heiling en 1953, se basa en que : "Todo elemento de unión mecánico dispuesto discretamente en la superficie de contacto de las piezas constituyentes, le imprime a dicha superficie una determinada característica de rigidez que condicionará la magnitud de los corrimientos producidos. La distribución de los medios de unión debe ser tal que garantice, para cada uno de dichos elementos, un trabajo en la zona elástica".

Especificaciones de la Normativa Chilena

- Antecedentes Generales

El desarrollo del análisis teórico realizado por el investigador Karl Mohler, basado en la teoría de ligazón elástica, ha sido expuesto en diferentes publicaciones nacionales (Wagner, 1979; Aceitón y Fernández, 1992; Vallejos y Venegas, 1993), por tal motivo no se repetirá en éste trabajo y solo se resumirá el resultado de tal análisis para las cuatro secciones transversales compuestas que se incluyen en la norma NCh 1198 y en el presente trabajo.

La actual norma chilena NCh 1198 " Madera -Construcciones en madera - Cálculo ", fue declarada Oficial de la República en el segundo semestre de 1991. Esta se estudió para actualizar las especificaciones de la norma NCh 1198 EOf 77 e incorporar materias que no estaban incluidas en ella; por lo tanto, la norma actualmente vigente anula y reemplaza a la NCh 1198 EOf 77.

En ella, además, se establecen los métodos y procedimientos de diseño estructural que determinan las condiciones mínimas que deben cumplir los elementos y las uniones en las construcciones de madera aserrada, elaborada, laminada -encolada y postes de madera. Ella se aplica sobre la estructura de edificaciones corrientes de madera, en construcciones mixtas, andamiajes, moldajes, postes de madera, etc.

Especificaciones sobre Flexión Uniaxial en Vigas Compuestas

El Capítulo 8 de la norma NCh 1198, titulado " Dimensionamiento de Piezas Estructurales de Madera Aserrada ", en el párrafo 8.2.5 denominado " Flexión Uniaxial en Vigas Compuestas", contiene las especificaciones para proceder con el diseño de las vigas de sección transversal compuesta.

A continuación se procede con un análisis de los alcances de dicho párrafo.

- En el ítem 8.2.5.1 se establece :

" En la verificación tensional de piezas flexionadas de sección transversal compuesta, constituidas por elementos conectados entre sí en forma flexible (con clavos, pernos, conectores, etc.) debe considerarse, cuando resulte procedente, la flexibilidad de los medios de unión. "

- En el ítem 8.2.5.2 se establece :

" Para piezas de sección transversal compuesta con simetría simple (Figura N°1), las tensiones se deben evaluar de acuerdo con lo siguiente :

$$f_{f,i} = \frac{M}{I_{ef}} * \left\{ \gamma_i * a_i * \frac{A_i}{A_{in}} + \frac{h_i}{2} * \frac{l_i}{I_{ef}} \right\} * n_i * 10^6$$

$$f_{g,i} = \frac{M}{I_{ef}} * \gamma_i * a_i * \frac{A_i}{A_{in}} * n_i * 10^6$$

(con $i = 1, 2$ y 3)



Los términos definidos tienen el siguiente significado :

- M** = Momento flector, considerado de signo positivo, cuando induce solicitaciones de compresión en las fibras extremas del ala superior y de tracción en las fibras extremas del ala inferior, kN*m.
- ff, i** = Tensión de trabajo en flexión, en el borde de las piezas individuales (alas o almas), considerándose el signo de acuerdo con lo esquematizado en la Figura N°1, MPa.
- fg, i** = Tensión de trabajo en el centroide de las piezas individuales (alas o almas), considerándose el signo de acuerdo con lo esquematizado en la figura 1, MPa.
- ai** = Distancia entre los ejes de gravedad principales de las secciones transversales no debilitadas y el eje neutro de flexión condicionante del diseño, Y -Y, (mm).

La aplicación de las expresiones anteriores exige que :

$$0 < a_2 < 0,5 * h_2$$

- hi** = Espesores o alturas de las secciones transversales individuales (mm).
- yi** = Factores de reducción para el cálculo de I_{ef} .
- li, lin** = Momento de inercia de las seccion transversal individual no debilitada y debilitada, respectivamente (mm⁴).

$$I_i = b_i * h_i^3 / 12$$

- Ai, Ain** = Sección transversal no debilitada y debilitada de las piezas individuales, respectivamente (mm²).

$$A_i = b_i * h_i$$

- I_{ef}** = Momento de inercia eficaz de la sección transversal no debilitada (mm⁴).
- b_i** = Espesores de las secciones transversales individuales (mm).

E_i	=	Módulo de elasticidad de las piezas individuales componentes de la sección transversal compuesta, MPa.
E_r	=	Módulo de elasticidad referencial, elegido arbitrariamente, MPa.
n_i	=	E_i/E_r .

Agrega el ítem 8.2.5.2 : " Si no se desea realizar el cálculo exacto, los momentos de inercia de las secciones transversales individuales debilitadas, I_{xi} , pueden referirse a los ejes principales de los componentes de sección transversal no debilitadas. En vigas clavadas el cociente entre las propiedades estáticas de la sección transversal bruta y de la sección transversal debilitada puede considerarse igual a la unidad, siempre que el clavado no se realice con perforación guía. "

Por otra parte, el presente trabajo contempla, en su parte experimental, la utilización de pino radiata unido con clavos para la confección de vigas de sección transversal compuesta. Debido a la baja densidad de este tipo de madera no se hace necesaria la perforación guía en el clavado y por lo tanto, de acuerdo a lo estipulado en el párrafo anterior, se considera que la razón entre las propiedades estáticas es equivalente a la unidad.

De esta manera las tensiones de trabajo descritas para piezas de sección transversal compuesta con simetría simple quedan :

$$f_{f,i} = \frac{M}{I_{ef}} * \left\{ \gamma_i * a_i + \frac{h_i}{2} \right\} * n_i * 10^6$$

$$f_{g,i} = \frac{M}{I_{ef}} * \gamma_i * a_i * n_i * 10^6$$

(con $i = 1, 2$ y 3)

Las diferentes secciones transversales incluidas en la norma NCh 1198

quedan identificadas por ésta según se indica en la Figura N°1.

Las dimensiones están en mm y corresponden a las vigas utilizadas en la parte experimental de este estudio.

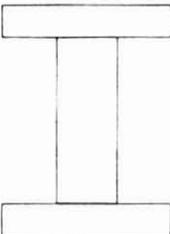
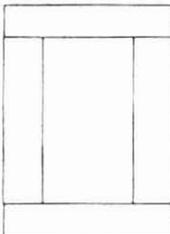
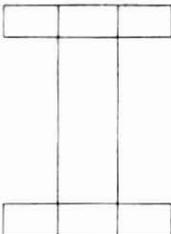
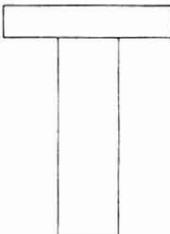
VIGA TIPO 1	VIGA TIPO 2	VIGA TIPO 3	VIGA TIPO 4
			
Ala : 38*150 Alma: 50*150	Ala : 50*100 Alma: 25*200	Ala : 50*50 Alma: 50*200	Ala : 38*150 Alma: 50*200

Figura N° 1. TIPOS DE VIGAS COMPUESTAS NORMALIZADAS.

Finalmente, los ítemes 8.2.5.3 y 8.2.5.4, de la norma NCh 1198, hacen referencia a las tensiones de trabajo :

" Las tensiones de trabajo en el borde (ff,i) no deben exceder la tensión de diseño en flexión (Ff,dis) calculada según el procedimiento especificado en la misma norma, en el subpárrafo 8.2.2.2 ".

$$\frac{ff,1}{Ff,dis} < 1 \quad \text{y} \quad \frac{ff,2}{Ff,dis} < 1$$

" Las tensiones de trabajo centroidales (fg,i) no deben exceder la tensión de diseño en tracción o compresión paralela según sea la naturaleza de la sollicitación a la cual está sometida la pieza i".

$$\frac{fg,1}{Ftp,dis} < 1 \quad \text{y} \quad \frac{fg,2}{Ftp,dis} < 1 \quad \text{y/o}$$

$$\frac{fg,1}{Fcp,dis} < 1 \quad \text{y} \quad \frac{fg,2}{Fcp,dis} < 1$$

En donde: Ftp, dis : Tensión de diseño en tracción.
Fcp, dis: Tensión de diseño en compresión paralela.

En el cálculo de los medios de unión, se debe considerar para el diseño el flujo de cizalle eficaz máximo, tcz, ef, i que se genera sobre cada junta de contacto entre los componentes de la sección transversal compuesta. Este se calcula considerando el momento de inercia eficaz, lef , y la expresión siguiente :

$$tcz, ef, i = \frac{Q \text{ máx. } (x)}{lef} * (\gamma * n1 * S1) \text{ [kN/mm]}$$

El espaciamiento promedio mínimo requerido entre los elementos de unión, sreq,i , queda dado por la expresión :

$$sreq. = \frac{N1, dis}{tcz, ef}$$

con :N1,dis = Capacidad de carga de diseño en una superficie de cizalle del elemento de unión, en kN.

La deducción completa y detallada de las fórmulas incluidas en éste párrafo se puede encontrar en Wagner, 1979; Aceitón y Fernández, 1992 y Vallejos y Venegas, 1993.



METODOLOGIA DE EXPERIMENTACION.

Antecedentes

Luego de revisar el análisis teórico del comportamiento de las vigas con secciones transversales, con simetría respecto a los dos ejes principales de inercia, y con el propósito de realizar una comparación entre el método teórico incluido en la norma chilena NCh 1198 y los resultados que se obtengan experimentalmente al ensayar probetas conformadas con materiales nacionales, es necesario implementar y ejecutar una fase experimental, en la cual se debe dejar claro cuales son los parámetros que se consideran para su posterior análisis. Entre éstos se encuentran : Tipo de sección, espaciamiento entre clavos, luz de ensayo de la probeta, número de repeticiones, etc.

Características de las Probetas

Las secciones compuestas que se incluyen en el presente trabajo son :

- a) Las tres con doble simetría respecto a los ejes principales de inercia : vigas doble te con tres y cinco piezas y la viga cajón.
- b) Viga con simetría simple (viga te).

Las vigas se materializaron mediante la unión con clavos y piezas simples de madera aserrada de pino radiata. La unión con clavos se realizó con una disposición en hilera.

Se debe destacar que los ensayos se deben efectuar con madera seca, es decir, con un contenido de humedad menor al 15 %, dado que la norma establece que pino radiata y el alamo deben ser utilizados en estado seco, debido a la facilidad de obtener humedades bajas en corto tiempo.

Los ensayos de las vigas se realizaron teniendo en cuenta los siguientes casos :

Sección doble-te de tres piezas: VIGA TIPO 1

- Ala	:	38 *150 mm
- Alma	:	50 * 150 mm
- Espaciamiento de clavos	:	e = 10 cm e = 20 cm
- Luz	:	400 cm

Sección cajón de cuatro piezas: VIGAS TIPO 2

- Ala	:	50 *100 mm
- Alma	:	2 (25 * 200) mm
- Espaciamiento de clavos	:	e = 10 cm e = 20 cm
- Luz	:	400 cm

Sección doble-te de cinco piezas: VIGAS TIPO 3

- Ala	:	2 (50 *50) mm
- Alma	:	50 * 200 mm
- Espaciamiento de clavos	:	e = 10 cm e = 20 cm
- Luz	:	400 cm

Sección te de dos piezas: VIGAS TIPO 4

- Ala	:	38 *150 mm
- Alma	:	50 * 200 mm
- Espaciamiento de clavos	:	e = 10 cm e = 20 cm
- Luz	:	400 cm

La cantidad de vigas ensayadas es la siguiente :

- Vigas tipo 1			
Espaciamientos	=	2	(10y 20 cm)
Repeticiones	=	60	
Sub-Total	:	$2 * 60$	= 120
- Vigas tipo 2			
Espaciamientos	=		
Repeticiones	=		
Sub-Total	:	$2 * 60$	= 120
- Vigas tipo 3			
Espaciamientos	=		
Repeticiones	=		
Sub-Total	:	$2 * 60$	= 120
- Vigas tipo 4			
Espaciamientos	=		
Repeticiones	=		
Sub-Total	:	$2 * 60$	= 120
TOTAL	:		480

Metodología de Ensayo

A continuación se describe la metodología de ensayo señalando los pasos que se siguieron desde que la madera ingresó al laboratorio hasta que las probetas confeccionadas fueron ensayadas hasta la ruptura.

Determinación de las Características Físicas de Cada Pieza. Una vez que las piezas de madera ingresaron al laboratorio se procedió a separarlas y numerarlas según escuadría, para luego medir con mayor precisión las dimensiones reales que cada pieza tenía, utilizando el pie de metro. Estas medidas permitieron conocer el volumen de cada pieza y luego, al pesarlas, encontrar su densidad referencial.

Luego, se midió el contenido de humedad con xilohigrómetro con el objeto

de verificar su estado, ya que se requiere que éstas estén en estado seco.

Determinación del Módulo de Elasticidad de Cada Pieza.

Para fabricar las vigas se requiere conocer el Módulo de Elasticidad de las piezas que las conforman. La norma NCh 2149 establece un método de ensayo no destructivo para clasificar estructuralmente la madera aserrada. El método permite encontrar el Módulo de Elasticidad en flexión de la pieza, cuando la sollicitación se aplica sobre una cara de ella. La pieza de madera aserrada es sometida a flexión, apoyada en sus extremos, aplicando una carga conocida en el centro de la luz de manera tal que no se produzcan tensiones de flexión superiores a 2,6 MPa. Este procedimiento se realiza por ambas caras o cantos, según corresponda.

Con el objeto de medir las deformaciones que se producen en el centro de la luz, se instala un medidor de deformación sobre un gramil con base magnética. Luego, con los datos así obtenidos se obtiene el módulo de elasticidad de la pieza, a través de la siguiente expresión :

$$E_f = \frac{P * L^3}{4 * b * h^3 * \delta}$$

En que :	E_f	=	Módulo de elasticidad en flexión, MPa.
	L	=	Luz de la viga (mm).
	b	=	Ancho de la viga (mm). (1)
	h	=	Altura de la viga (mm).
	P	=	Carga aplicada (N).
	δ	=	Deformación leída para la carga P (mm).

Construcción de las Probetas.

Para conformar las probetas a ensayar, se hizo una clasificación estructural de cada pieza a fin de determinar su grado, según lo estipulado en la NCh 1198. En ésta norma se especifica que el pino radiata se puede clasificar dentro

de cuatro Grados Estructurales, dependiendo del módulo de elasticidad obtenido en la pieza, de acuerdo al Cuadro N°1 :

- (1) : El ancho a considerar dependerá si la pieza a ensayar formará parte del Alma o del Ala de la sección transversal compuesta que conforma. Es decir, en el caso de que ella sea alma la pieza se cargará en su canto. Si ella constituirá ala, la carga se aplica en la cara.

Cuadro N° 1

GRADOS ESTRUCTURALES PARA PINO RADIATA

GRADO	E_f (kg/cm^2)
GS	$105.000 < E_f$
G1	$90.000 < E_f < 105.000$
G2	$70.000 < E_f < 90.000$
R	$E_f < 70.000$

De acuerdo a esta clasificación, se conforman las vigas de manera tal que las piezas destinadas a las alas pertenezcan a un mismo grado estructural. Igual criterio se aplica para las piezas que constituirán el alma cuando ellas son más de una. Este procedimiento se aplica para acercarse de la mejor manera posible a la realidad, en la que un calculista asigna el módulo de elasticidad de acuerdo a su grado estructural. Además, el análisis teórico expuesto en los párrafos anteriores requiere que los módulos de elasticidad de las piezas que se utilizarán como alas y almas, sean similares.

En el caso de la sección transversal compuesta Tipo 4 (sección Te), el ala y el alma se escogen en forma aleatoria.

Ensayo de Flexión.

Este ensayo consiste en medir la deformación que se produce en el centro de la luz de una viga, para distintas cargas aplicadas, en el punto donde se está

aplicando. La carga es ejercida mediante la bomba hidráulica manual que es conectada a un gato hidráulico que actúa como carga puntual en el centro de la luz.

Para medir la deformación se instaló un dial en la fibra neutra del alma, bajo el punto de aplicación de la carga.

Para la lectura de la carga y la deformación se ocupa un sistema computacional a través del uso de un programa denominado Labtech, con el cual es posible recibir señales eléctricas que son leídas por el computador y archivadas en forma inmediata.

Para medir la carga se instala una celda de carga en el gato hidráulico de manera tal que al ser aplicada ésta, envíe una señal (en milivolts) al computador. Para la deformación, el sistema consiste en una vaina hueca por la cual se desliza una varilla metálica que al descender genera una diferencia de potencial (volts), que también es leída por el computador.

Para facilitar el trabajo, es posible transformar las unidades eléctricas obtenidas, en unidades de carga y deformación, por ejemplo: Kg-f y mm, usando un factor de escala entregado junto con el programa computacional. De esta manera los datos que se archivan quedan en Kg-f y mm.

Finalmente, con los datos obtenidos en esta fase es posible calcular la rigidez experimental, la carga de ruptura y la carga en el límite de proporcionalidad de cada probeta, lo que permite su posterior análisis y comparación con los resultados teóricos.

La expresión que permite encontrar la rigidez experimental se deduce de la ecuación de la elástica de una viga simplemente apoyada, resultando :

$$(EI)_{exp} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta}$$

$$\text{Si se acepta que: } m = \frac{P}{\delta} = \text{tg } \alpha$$

Esta expresión señala la inclinación de la recta de la zona elástica de la viga la que se puede obtener mediante una regresión lineal de los datos carga -

deformación y que se identifica como aquella que entrega el mayor coeficiente de correlación.

Luego, la expresión de la rigidez experimental queda como :

$$(EI)_{\text{exp}} = M * \frac{L^3}{48}$$

El primer paso que se lleva a cabo consiste en montar la probeta, instalar el dial en la fibra neutra y aplicar una carga inicial para darle estabilidad a ésta.

Dado que en el tiempo cero existe una deformación y una carga inicial, es necesario calibrar el computador con estos valores. La conexión del dial de deformación y la celda de carga al computador se realiza a través de una interfase.

Después de instalada la viga el programa computacional requiere de ciertos parámetros concernientes al formato de presentación y captación de datos. Es decir, se ingresa la duración del ensayo, la frecuencia con que el computador lee un dato, los canales abiertos para la entrada de información, el nombre del archivo en el que se guardarán los datos y los valores iniciales de carga y deformación.

Con los datos así ingresados en la pantalla y al hacer correr el programa, éste muestra dos gráficos : Carga - Tiempo (en la parte inferior) y Deformación - Tiempo (en la parte superior). Paralelamente se está generando un archivo, que como ya se explicó, tiene un formato numérico que puede ser leído en una pantalla electrónica.

Nomenclatura

Para identificar los distintos tipos de secciones transversales compuestas y el espaciamiento usado entre clavos se adoptó la siguiente convención :

Probeta : V i - j - k

con:	i	=	1, 2, 3 y 4
En que :	1	=	VIGA TIPO 1
	2	=	VIGA TIPO 2
	3	=	VIGA TIPO 3
	4	=	VIGA TIPO 4
	j	=	1, 2
En que :	1	=	e = espaciamiento = 10 cm
	2	=	e = espaciamiento = 20 cm
	k	=	1, 2, 3, 4,60
En que :	k	=	repetición

Por ejemplo la probeta: V 3-2-40 se trata de la sección transversal compuesta Tipo 3, que tiene 20 cm de espaciamiento entre clavos y que es la repetición N° 40 del tipo y espaciamiento definido anteriormente.

Desarrollo de la Experimentación

Objetivos

Obtención y tabulación de los datos que entregan los ensayos de las 480 probetas contempladas en el presente estudio, con la finalidad de calcular la rigidez teórica, la rigidez efectiva experimental, la carga en el límite de

proporcionalidad y la carga de ruptura de cada viga.

Antecedentes Preliminares

La ejecución de la fase experimental es una de las más importantes del estudio, ya que los resultados obtenidos en ella son los que determinarán si existen diferencias entre el método especificado por la norma NCh 1198 y los valores reales o experimentales, lo cual constituye, finalmente, el objetivo principal de este trabajo.

El hecho de utilizar el computador como herramienta de experimentación permite obtener una mayor cantidad de datos y, por lo tanto, analizar con mayor precisión cada ensayo.

Otro factor importante es la posibilidad de medir la deformación que se produce al momento en que la viga alcanza la ruptura, lo cual no es posible con el método anterior que implicaba el uso de un dial tradicional.

RESULTADOS OBTENIDOS

Con el fin de ordenar la información obtenida siguiendo los pasos anteriormente señalados, se entregan los resultados y observaciones según la secuencia indicada. En los casos en que la cantidad de datos es muy grande, la información se entrega a través de los estadígrafos de la población, constituida por una propiedad física, mecánica u otra propiedad.

Características Físicas de Cada Pieza.

Tomando en cuenta que las dimensiones de cada pieza son diferentes a lo largo de ella, se tomaron dos medidas (una en cada extremo) y se calculó el

promedio de ellas. Luego, éstas fueron usadas para calcular las propiedades geométricas de cada pieza referidas a los ejes principales de inercia de la sección transversal compuesta. Debido a la gran cantidad de valores que se obtuvo, éstos no se incluirán en este párrafo, entregando posteriormente solo aquellas propiedades geométricas que son relevantes en la comparación entre los parámetros que se han escogido como importantes.

En segundo lugar se midió el contenido de humedad de cada pieza. Para tomar en cuenta la gradiente de humedad, esta se determinó en tres puntos de cada pieza (en el centro y en los extremos). El promedio de los tres valores fue asignado a cada pieza.

Clasificación Estructural de Cada Pieza

Para obtener la clasificación estructural de cada pieza se hace necesario determinar el módulo de elasticidad de ella.

Para calcular el módulo de elasticidad se usó un peso de 0,765 Kg para las piezas de 38 * 150 mm y de 50 * 100 mm; un peso de 3,2965 Kg para las piezas de 25 * 200 mm y un peso de 4,0615 Kg para las de 50 * 200 mm . La diferencia entre los pesos radica en la necesidad de producir una deformación de fácil lectura en el reloj comparador (dial).

En los cálculos posteriores se usó el menor módulo de elasticidad determinado en la posición que tendrá la pieza en la viga, durante servicio.

Propiedades Resistentes de las Vigas Ensayadas

De los gráficos obtenidos para cada probeta se determinaron las cargas en el límite de proporcionalidad y la carga de ruptura y además se calculó la rigidez teórica.

Rigidez Experimental : (EI) exp.

Conocida la inclinación de la recta correspondiente a la zona elástica de la viga, en la curva carga-deformación es posible obtener la rigidez experimental.

Propiedades Resistentes Teóricas de las Vigas

Propiedades Geométricas.

Para cada elemento o pieza constituyente de una viga se procedió a la medición de sus dimensiones básicas, esto es:

espesor, ancho y longitud. De esta forma, fue posible determinar las propiedades geométricas que intervienen en las ecuaciones que entregan los valores del área de la sección transversal, del momento estático, del momento de inercia y de distancias que intervienen en dichas expresiones. Al reemplazar estos valores en las fórmulas que especifica la norma NCh 1198 se obtendrán los valores teóricos, que determinaría un calculista, en base a la norma y usando las dimensiones de las vigas que posteriormente se sometieron a ensayo.

Cuando los materiales que conformaban una viga tenían diferentes módulos de elasticidad, se procedió con el método de "la sección transversal transformada", el cual toma el módulo de elasticidad del alma como módulo de referencia y afecta la dimensión horizontal de las alas multiplicándola por "n", en que

$$n = \frac{E_{\text{ala}}}{E_{\text{ref}}} = \frac{E_{\text{ala}}}{E_{\text{alma}}}$$

De ésta manera la rigidez teórica queda definida por :

$$(E_r * I_{ef}) = \text{Rigidez teórica}$$

$$\text{con : } I_{ef} = 2 * n * I_1 + I_2 + 2 * \gamma * n * A_1 * a^2$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + k} \quad k = \frac{\pi^2 * E_1 * A_1 * \bar{e}}{L^2 * C}$$

Propiedades Físicas

Para comprender el comportamiento que presentan las vigas de sección transversal compuesta al ser sometidas a flexión, resulta fundamental conocer, previamente, las características físicas de las probetas, ya que ellas pueden ser condicionantes de sus propiedades mecánicas.

En éste punto se estudian los resultados directos obtenidos en los ensayos, como también los que puedan ser deducidos de estos últimos, para ello se hizo uso de gráficos, cuadros con resumen de datos y elementos de estadística.

Humedad de las Vigas : El contenido de humedad de las distintas secciones está incluido en el Cuadro N°2.

Cuadro N° 2

HUMEDAD PROMEDIO DE LAS VIGAS

Tipo de Viga	Contenido de Humedad Promedio (%)
V 1-1	10,6
V 1-2	10,5
V 2-1	9,8
V 2-2	10,0
V 3-1	11,0
V 3-2	10,5
V 4-1	10,3
V 4-2	10,8

Se establece claramente una diferencia de, aproximadamente, un 1% entre los diferentes tipos de secciones transversales compuestas.

Peso de la Viga : El peso promedio de las secciones transversales compuestas en estudio, se incluye en el Cuadro N°3.

Cuadro N° 3

PESO PROMEDIO DE LAS VIGAS

Tipo de Viga	Peso Promedio (kg/m)
V 1-1	9,6
V 1-2	9,6
V 2-1	10,1
V 2-2	10,0
V 3-1	9,6
V 3-2	9,5
V 4-1	7,9
V 4-2	7,9

Obviamente la sección tipo cajón posee un mayor peso, pues es la que mayor cantidad de madera requiere para su fabricación: 0,1760 m³, contra 0,0691 m³ de la viga tipo 4 y 0,08 m³ de las vigas tipo V 1 y tipo V 3.

Densidad referencial de las vigas (Pérez, 1990): Los promedios de las densidades referenciales que se obtuvieron experimentalmente se incluyen en el Cuadro N°4.

Cuadro N° 4

DENSIDAD REFERENCIAL PROMEDIO DE LAS VIGAS

Tipo de Viga	Densidad Promedio (kg/m ³)
V 1-1	508,6
V 1-2	505,8
V 2-1	506,6
V 2-2	502,3
V 3-1	482,4
V 3-2	474,3
V 4-1	502,6
V 4-2	504,2

Como se puede ver, esta propiedad presenta poca variación entre los tipos de vigas, existiendo una leve baja en la madera destinada a las vigas tipo V 3.

Propiedades Mecánicas

Plím : Carga correspondiente al punto en el cual las cargas dejan de ser proporcionales a las deformaciones y que señala el término del comportamiento elástico del elemento constructivo. Calculada mediante una regresión lineal (Aceitón y Fernández, 1992). Los valores encontrados para esta variable se incluyen en el Cuadro N°5.



Cuadro N° 5

PROMEDIO DE LAS CARGAS EN LIMITE DE PROPORCIONALIDAD EN LAS VIGAS

Tipo de Viga	Carga en el Límite de Proporcionalidad (kg)
V 1-1	498,8
V 1-2	283,0
V 2-1	1.189,6
V 2-2	988,8
V 3-1	948,1
V 3-2	785,5
V 4-1	647,7
V 4-2	547,8

En esta Tabla se observa que la viga tipo V 2 es la que presenta mejor comportamiento estructural, el peor corresponde a la viga tipo V 1. Las vigas tipo V 3 y V 4 quedan en posiciones intermedias. Siempre ocurre que las vigas unidas con clavos espaciados a 20 cm dan resistencias menores que aquellas unidas con clavos separados a 10 cm.

Se puede, además, demostrar que los coeficientes de variación para la mayoría de los tipos de vigas están en un rango que normalmente se encuentra en los resultados empíricos para este material. La excepción la constituye la viga tipo 3 que está constituida por 5 piezas, de las cuales cuatro tienen bajas dimensiones, las que se extraen en el aserradero, del centro del árbol y por lo tanto contienen médula, madera juvenil, densidad baja, todo lo cual redundará en una alta dispersión de los datos.

Prup : Carga correspondiente al momento en que la viga colapsa, este valor no necesariamente coincide con la mayor carga que resiste la sección transversal, pero sí con la máxima deformación que ésta acepta antes de la rotura. Los resultados de la Carga de Ruptura se incluyen en el Cuadro N°6.

Cuadro N° 6

CARGA DE RUPTURA PROMEDIO DE LAS VIGAS.

Tipo de Viga	Carga de Ruptura (kg)
V 1-1	1.498,0
V 1-2	1.162,5
V 2-1	2.590,1
V 2-2	2.169,4
V 3-1	2.234,3
V 3-2	1.968,4
V 4-1	1.677,8
V 4-2	1.568,7

Aquí también se observa que los valores de ruptura que se obtienen para el espaciamiento menor, son más elevados que aquellos obtenidos para una distancia entre clavos de 20 cm. Las diferencias entre estos espaciamientos son: 28,9% para la viga tipo V 1; 19,4% para la viga tipo V 2 ; 13,5% para la viga tipo V 3 y 7% para la viga tipo V 4.

(EI) exp : Rigidez Experimental obtenida para los distintos tipos de vigas, parámetro se calculó con la ecuación :

$$(EI) \text{ exp} = m \cdot \frac{L^3}{48}$$

con: L = Luz de ensayo
 m = Coeficiente angular recta carga-deformación

Cuadro N° 7

RIGIDEZ EXPERIMENTAL PROMEDIO DE LAS VIGAS.

Tipo de Viga	Rigidez Experimental Promedio (kg * cm ²)
V 1-1	6,231 * 10 ⁸
V 1-2	5,090 * 10 ⁸
V 2-1	7,813 * 10 ⁸
V 2-2	6,250 * 10 ⁸
V 3-1	6,503 * 10 ⁸
V 3-2	6,000 * 10 ⁸
V 4-1	9,119 * 10 ⁸
V 4-2	7,278 * 10 ⁸

La viga más rígida resulta la tipo V 4, fundamentalmente porque tal valor sólo depende del alma de la sección transversal (viga te) y esa pieza, para estas vigas, resultó de buena calidad. Luego, en orden decreciente, se ubican la viga tipo V2 (viga cajón) y, posteriormente, las vigas V3 y V1.

Para la Rigidez Experimental nuevamente se presenta el caso que: "a menor espaciamiento, mayor Rigidez."

Se entrega, a continuación, el Cuadro N° 8 en el cual se incluyen ambas rigideces : Experimental y Teórica, a fin de poder comparar los resultados empíricos con los teóricos, usando la misma viga como individuos de ambas poblaciones.

En dicho Cuadro es posible verificar que la Rigidez Experimental es siempre mayor que la Rigidez Teórica. La última columna del Cuadro N°8 entrega la razón entre ambos tipos de rigideces, para las distintas secciones transversales compuestas.

Es conveniente recordar que la Rigidez Teórica resulta de aplicar las dimensiones reales de cada tipo de viga fabricada, en las fórmulas entregadas por la norma NCh 1198.

Cuadro N° 8

RIGIDECES TEORICAS Y EXPERIMENTALES DE LAS VIGAS ENSAYADAS.

Tipo de Viga	(EI) exp (kg * cm ²)	(EI) teor (kg * cm ²)	(EI) exp/(EI) teor
V 1-1	6,231 * 10 ⁸	2,431 * 10 ⁸	2,563
V 1-2	5,090 * 10 ⁸	1,763 * 10 ⁸	2,887
V 2-1	7,813 * 10 ⁸	5,584 * 10 ⁸	1,399
V 2-2	6,250 * 10 ⁸	4,146 * 10 ⁸	1,507
V 3-1	6,503 * 10 ⁸	4,661 * 10 ⁸	1,395
V 3-2	6,000 * 10 ⁸	3,317 * 10 ⁸	1,961
V 4-1	9,119 * 10 ⁸	5,002 * 10 ⁸	1,823
V 4-2	7,278 * 10 ⁸	4,398 * 10 ⁸	1,655

Dos grandes conclusiones se obtienen de este Cuadro:

i) El valor promedio de la rigidez de una viga, determinado experimentalmente, resulta mayor que el calculado mediante las especificaciones de la norma NCh 1198.

ii) La rigidez de una viga con sección transversal compuesta es inversamente proporcional al espaciamiento de los clavos que unen los diferentes elementos que conforman la sección. Es decir, a menor distancia entre clavos, mayor rigidez.

Análisis de los Modos de Falla de las Vigas

Antes de comentar los tipos de falla y sus causas, en las distintas vigas y en sus piezas componentes, es necesario indicar que la madera tiene ciertas características que reducen su resistencia y que se les denomina "defectos". Estos, están contemplados en la clasificación estructural que se hizo en las diferentes piezas. Cada grado cuantifica y limita los defectos que pueden estar presentes en las piezas que clasifican en tal grado.

Algunos de los defectos más frecuentes que se encontraron en la madera de pino radiata usada, son:

- Agujeros : Aberturas ligeramente ovaladas que se presentan en la madera

y que pueden originarse al desprenderse un nudo, en la pieza.

- Alabeo : Diversas distorsiones que presenta el eje longitudinal de una pieza, tanto en el sentido longitudinal como transversal, no proporcionando caras planas. Esta falla se origina en un mal secado de la madera.

- Aserrío imperfecto : Defectos de las dimensiones de la pieza tanto en su ancho, espesor, largo, etc.

Estos dos últimos defectos mencionados fueron los que más dificultaron la fabricación de las probetas.

-Fibra desviada : Falta de paralelismo de la fibra con el eje de la pieza.

-Nudos : Se originan en ramas embutidas en el tronco del árbol, las cuales aparecen en la elaboración de la madera.

Esta es una de las fallas que se encontraron con mayor frecuencia. La resistencia de una pieza con otra sólo se diferencia en la cantidad y en el tamaño de nudos presentes en cada pieza.

- Rajaduras y partiduras : Separación total o parcial de las fibras de la madera por diferencias ocurridas en la contracción de la madera, durante el secado.

Después de la descripción de los defectos presentes en la madera ocupada, se muestra un resumen con las fallas de ruptura que prevalecieron en cada uno de los tipos de vigas ensayadas.

a) VIGA TIPO V 1 (Viga Doble Te con tres piezas). Las fallas observadas en las vigas correspondieron a fallas por flexo-tracción en la fibra extrema inferior del alma. Esto coincide con el diagrama de tensiones de flexión en este tipo de viga. Además, en este tipo de viga, en algunas probetas, adicionalmente se produjo la ruptura del ala traccionada. Nunca se dio la situación en que fallaran ambas alas.

b) VIGA TIPO V 2 (Viga Cajón). En este caso, la presencia de nudos resulta fundamental en la falla de ruptura, ya que en el 95 % de los casos, la ruptura se originó en un nudo ubicado en el alma, en la zona más traccionada (borde inferior). El ala inferior se rompe (en el 85% de los casos) en zonas en las cuales se rompió el alma. En el 15% de los casos restantes el ala sólo se desclava sin alcanzar la ruptura.

c) VIGA TIPO V 3 (Viga Doble Te con cinco piezas). En general, las fallas son parecidas a las ocurridas en la sección transversal de la viga tipo V 1.

d) VIGA TIPO V 4 (Viga Te con dos piezas) . Las vigas sufren un desclavamiento del ala en la zona sobre la falla del alma, lo que incide en la no ruptura del ala. En sólo unos pocos casos el ala se rompe. En el 65 % de los casos la causa de la rotura es la presencia de un nudo en la zona traccionada del alma. En el 35% de los casos restantes, las vigas fallan bruscamente por tracción en el borde inferior, en el centro de la luz.

En resumen, se puede afirmar que las fallas, en la ruptura, cumplen con lo indicado en la teoría, originándose en el canto más traccionado, en aquel punto donde la tracción es mayor.

Sin embargo, la falla no se produce necesariamente en el centro de la luz, sino que queda condicionada a la presencia de nudos de tamaño importante. Se observó que en un 78% de los casos fue así.

Análisis de Tensiones y Deformaciones

- Carga Máxima Experimental y Carga Admisible Teórica

En la curva carga-deformación de una viga solicitada en flexión, existen tres puntos de interés : la carga admisible, la carga en el límite de proporcionalidad y la carga de ruptura.

Para la razón : carga de ruptura/carga admisible, tanto en la norma alemana (DIN) como en la norma americana (ASTM), se especifica un valor para esta razón. En la primera el valor es igual a 2,75 y en la segunda a 2,1.

Es de interés conocer lo que sucede en los casos que se estudian en este proyecto. El valor de la carga de ruptura se obtiene de los gráficos encontrados para cada una de las vigas. El valor de la carga admisible teórica se puede obtener aceptando que la tensión de diseño es igual a la tensión de trabajo (lo que implica suponer que la madera trabaja a un 100% respecto a la tensión de diseño), siguiendo el procedimiento señalado a continuación :

El valor de la tensión de trabajo a utilizar corresponde a la tensión máxima del alma, ya que éste es el caso más desfavorable para las vigas estudiadas.

Luego, la expresión a usar en el caso de las vigas con doble simetría es:

$$f_{f, 2} = \frac{M}{I_{ef}} * \frac{h^2}{2} * n^2$$

Para la sección transversal con simetría simple (viga te) :

$$f_{f, 2} = \frac{M}{I_{ef}} * \left(\gamma^2 * a^2 + \frac{h^2}{2} \right)$$

Los parámetros que aparecen en estas expresiones ya fueron explicados en éste trabajo.

- M, correspondiente al Momento Máximo en la viga es calculado con :

$$M = P * L/4 \quad (\text{kN-m})$$

- La tensión de diseño de la pieza que conforma el alma, se calcula de acuerdo a la metodología entregada por la norma NCh 1198, necesitando para ello valores de humedad, tiempo de duración de la carga y geometría de la pieza.

$$F_{dis} = F_{adm} * K_h * K_D * K_{hf} \quad (\text{MPa})$$

Los otros factores de modificación mencionados en la norma no son aplicables a este caso.

con: F_{adm} = Según Tabla N° 4 de la norma NCh 1198.
 K_h = Factor de Modificación por contenido de humedad.
 K_D = Factor de Modificación por duración de la carga.
 K_{hf} = Factor de Modificación por altura de la pieza.

- Al igualar la tensión de trabajo (según etapa 1) con la tensión de diseño (calculada según etapa 3) se puede despejar el Momento solicitante del que, según etapa 2, se puede conocer la carga admisible teórica.

Los casos estudiados consideran que el Grado Estructural del alma es igual al correspondiente del ala. Esto se realiza con el objeto de simplificar los cálculos posteriores. Estos casos están indicados en el Cuadro N°9, en el que, además, se incluye el valor de la carga en el límite de proporcionalidad y la carga de ruptura, para los distintos grados estudiados.

Cuadro N° 9

VIGAS ANALIZADAS. CARGA PROMEDIO EN EL LIMITE DE PROPORCIONALIDAD Y CARGA PROMEDIO DE RUPTURA

Viga Tipo	Grado	Carga en el Limite (kg)	Carga de Rotura (kg)
V 1-1	GS	316	1.377
V 1-2	G2	183	741
V 2-1	GS	1.043	3.178
	G1	1.578	2.780
	G2	1.226	2.245
V 2-2	GS	799	2.608
	G2	879	2.329
V 3-1	GS	908	2.466
	G1	625	2.150
	G2	1.902	1.902
V 3-2	GS	800	2.702
	G1	1.138	2.710
	G2	681	2.170
V 4-1	GS	727	1.792
	G1	637	1.550
	G2	510	870
V 4-2	GS	612	1.854
	G1	373	1.149

Luego, con los valores encontrados anteriormente se puede conocer el Factor de Seguridad, correspondiente a la razón entre la Carga máxima experimental y la Carga admisible teórica, por un lado, además de la razón entre la Carga máxima experimental y la Carga en el límite de proporcionalidad, determinado experimentalmente en cada una de las vigas estudiadas. Cuadro N°10.

Cuadro N° 10

FACTOR DE SEGURIDAD

Viga Tipo	Grado	P máx/Pad, teor	P máx/P llim
V 1-1	GS	3.820	4.358
V 1-2	G2	3.308	4.049
V 2-1	GS	4.405	3.047
	G1	6.192	1.761
	G2	7.353	1.831
V 2-2	GS	5.228	3.264
	G2	5.311	2.650
V 3-1	GS	4.200	2.716
	G1	5.327	3.440
	G2	10.788	1.000
V 3-2	GS	5.167	3.378
	G1	7.480	2.381
	G2	11.088	2.768
V 4-1	GS	2.098	2.402
	G1	(1) 1.736	2.433
	G2	2.390	1.706
V 4-2	GS	2.417	3.029
	G1	2.168	3.080

(1): Valor menor que la razón especificada por las normas americanas.

- Deformación Teórica en Comparación con Deformación Experimental

En este párrafo se trata de observar lo que sucede en el gráfico Carga-Deformación (obtenido experimentalmente), para una viga en particular, si se superpone una curva teórica, encontrada con la expresión de la deformada de una viga simplemente apoyada.

Esta última se calcula como sigue:

$$d \text{ téor} = \frac{P * L^3}{48 * (EI) \text{ téor}}$$

con: P : Carga concentrada (Kg).
L : Luz de la viga (m).

(EI) teor : Rigidez teórica según NCh 1198

La relación anterior es válida sólo hasta el límite elástico. En el caso de la viga V2-1-01, cuyo gráfico se muestra en la Figura N°2, se observa lo siguiente:

P1 : Carga en el límite elástico encontrada a través de una regresión lineal en que el número de puntos escogidos está determinado por el coeficiente de correlación ortogonal, aceptándose un valor mínimo de 0,995 . El último punto es el correspondiente al límite elástico.

P2 : Carga admisible teórica calculada.

P3 : Carga admisible correspondiente a una deformación igual al valor $L/360$.

En el gráfico se puede observar que la carga en el límite elástico (P1) es mayor que la carga admisible experimental (P3) y esta última mayor que la carga admisible teórica (P2), obtenida a través del análisis de tensiones.

La curva teórica está por debajo de la experimental indicando que para una carga cualquiera, la deformación experimental es menor que la deformación teórica.

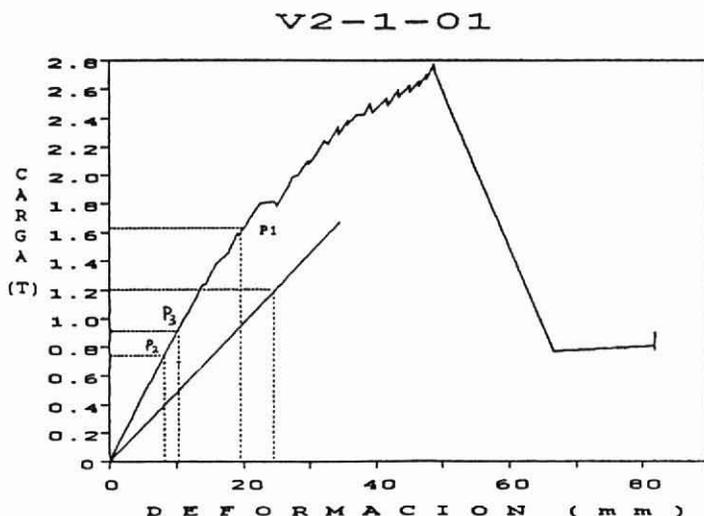


Figura N° 2. GRAFICO CARGA / DEFORMACION

Los valores teóricos de la deformación resultan ser superiores en un 85% a los experimentales (Cuadro N°11).

Cuadro N° 11

DEFORMACION TEORICA Y EXPERIMENTAL. V2-1-01

Carga (kg)	d exp (mm)	d teor (mm)	d teor/d exp
P1	48,80	34,71	84,6
P2	10,56	19,54	85,0
P3	8,15	15,10	85,3

Si se observa lo que ocurre con las rigideces teórica y experimental, se obtiene que la primera es mayor en un 84.4 %, lo que avala la relación inversa que existe con la deformación.

CONCLUSIONES

El objetivo principal de este proyecto es estudiar el comportamiento teórico y experimental de las secciones transversales compuestas de piezas de madera aserrada, clavadas entre sí, con el fin de realizar una verificación de la norma NCh 1198 con respecto a la metodología de cálculo allí especificada, para vigas construidas con materiales nacionales.

Al término de este estudio, se puede hacer una serie de alcances respecto a la teoría empleada en éste y a la fase experimental ejecutada, que se transforma en lo más importante del proyecto.

Teoría

La norma NCh 1198 entrega una metodología de cálculo de vigas con sección transversal compuesta, basada íntegramente en la Norma Alemana DIN 1052, la que está fundamentada en la Teoría de Karl Möhler.

En el caso de la norma chilena cabe destacar :

- No entrega una metodología de diseño para los distintos tipos de secciones por separado, sino que lo hace para una sección generalizada. Las expresiones que se entregan no llevan de igual manera a las deducidas por Karl Möhler, ya que éstas no son válidas para secciones con simetría simple, como es el caso de la viga con sección Te.

- La existencia de dichos errores, puede llevar a una confusión, corriéndose el peligro de realizar un mal diseño.

Para el caso de la Norma Alemana y de la Norma Chilena se puede indicar lo siguiente :

- En ambos métodos, para incorporar elementos de simplificación, se impone como elástica de la viga una función de desarrollo sinusoidal, independiente del estado de carga que la solicite. Como consecuencia, los resultados obtenidos se aproximarán a los reales, en la medida que el estado de carga solicitante produzca una elástica lo más aproximada posible a un desarrollo sinusoidal. Esto indica, entonces, que para una viga que esté solicitada por una carga aplicada en el tercio de la luz, por ejemplo, los resultados simplificados diferirán en forma apreciable de la solución exacta.

Metodología de Experimentación

Uno de los objetivos específicos del estudio consiste en implementar y ejecutar una fase experimental, la que se llevó a efecto en el Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería en Obras Civiles de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile (USACH). El equipo principal de esta fase consistió en un Marco de Prueba metálico el cual fue financiado por los aportes de FONDECYT y de la USACH.



Respecto a la calidad de la madera se puede decir :

- La madera empleada es de buena calidad y fue adquirida en estado verde, por lo que se hizo necesario secarla en el laboratorio. Se llegó a un Contenido de Humedad, promedio final, de 10%, aproximadamente.
- Como consecuencia de lo anterior se obtuvo que las piezas de mayor espesor y las provenientes del centro del árbol (madera juvenil), resultaron afectadas con defectos importantes, principalmente alabeos. Esto lleva a concluir que una madera de buena calidad, en estado verde, no implica resultados satisfactorios si el secado es deficiente.
- Otro defecto que se observó con gran frecuencia es la falta de homogeneidad de las dimensiones de las piezas.
- Para que el uso de la madera como material de construcción estructural, tenga un auge comparable al de países desarrollados, es imprescindible que se tome conciencia de las bondades de ella y se mejoren los procesos de elaboración, controlando el producto final, mediante inspecciones de calidad.

Respecto a la Clasificación Estructural de las piezas :

- El método escogido está especificado en la norma NCh 2149 y consiste en medir el Módulo de Elasticidad de cada pieza. Es de relativa confiabilidad debido, principalmente, a que algunas piezas estaban deformadas a causa del secado deficiente. Dicho método es confiable si se realiza en madera recta.

Resultaría de interés realizar una comparación entre este método y el de clasificación visual (NCh 1207) con el objeto de verificar la calidad resultante de las piezas, según ambos métodos.

Respecto a la conformación de las probetas :

- Producto de los defectos de secado (alabeos) se dificultó la confección de las vigas.
- La sección transversal compuesta tipo V2, viga cajón, fue la de mayor dificultad en su fabricación, tanto por los defectos de secado como por el bajo espesor que se le asignó al alma (23 mm), lo que complicó el clavado.

Respecto a la experimentación :

- El equipo de experimentación, que considera el uso del computador como

herramienta fundamental, facilita la realización de los ensayos puesto que los datos son leídos y procesados por el computador, con lo que se logra un análisis más profundo y detallado.

Este hecho permite la realización de la curva Carga-Deformación hasta la ruptura y evita errores de apreciación en las mediciones.

Resultados

Con los datos obtenidos en la experimentación se calcularon las propiedades más relevantes de las secciones tipos, de las cuales se puede decir :

Respecto a las propiedades físicas :

- Como se dijo anteriormente, el contenido de humedad resultó homogéneo e igual a un 10% , aproximadamente.
- La densidad referencial obtenida de las probetas es de 510 Kg/m^3 . Por ser ésta una medida propia del material, resultó muy homogénea para los distintos tipos de vigas confeccionados.

Respecto a las propiedades mecánicas :

- La Rigidez Efectiva Teórica obtenida a través de las especificaciones de la norma NCh 1198 resultó ser significativamente menor a la obtenida experimentalmente para las cuatro secciones transversales compuestas, con ambos espaciamientos de clavos.
- Estos resultados estarían indicando que los materiales nacionales se pueden usar con seguridad, empleando las especificaciones de cálculo de la norma NCh 1198 para secciones transversales compuestas. No obstante, lo conservadora que resulta lleva a proponer futuros estudios de métodos óptimos.
- La Rigidez Efectiva Experimental, resultó mayor para todas las secciones que presentan un corrimiento horizontal de sus partes, con un espaciamiento de 10 cm, con respecto a las mismas con un espaciamiento de 20 cm.
- En la sección tipo V3, en la que la Rigidez Experimental es levemente

mayor para espaciamientos de 10 cm, respecto a la de 20 cm, se puede hacer notar que este tipo de sección es la única que tiene un corrimiento vertical de las piezas que la componen. Por lo tanto, un mayor número de clavos dispuestos horizontalmente en secciones compuestas no tiene incidencia alguna en la Rigidez Efectiva de las vigas.

- La Carga de Ruptura resultó estar condicionada al espaciamiento entre clavos para la secciones con doble simetría.
- Se deduce, entonces, la influencia que tiene el ala traccionada en la capacidad resistente de la viga a la ruptura, puesto que ésta colabora al alma a resistir la tensión que se genera en la fibra más traccionada.
- Esta última afirmación fue completamente corroborada, visualmente, durante los ensayos realizados.
- Por último, en las secciones con simetría simple se verificó la poca ayuda que presta el ala en la capacidad de carga que ofrece la viga, siendo ésta absorbida plenamente por el alma de la viga.

Respecto al Factor de Seguridad para la carga máxima:

- En general, los valores del factor de seguridad encontrados aseguran el trabajo de las vigas en la zona elástica. Esto basado en las especificaciones de las normas alemana y norteamericana. Pocas son las excepciones donde lo anterior no se cumple, pero en ellas resultaron pocos individuos que cumplieran las condiciones de la población que se compara.

Respecto a las deformaciones teóricas y experimentales:

- Se observó que para una misma carga, la deformación teórica es superior a la experimental, asegurando así un diseño conservador.
- Como la deformación está relacionada inversamente con la Rigidez, se puede deducir que si la Rigidez Teórica es menor que la Rigidez Experimental, en ciertos porcentajes, la Deformación Teórica será mayor que la Experimental, en los mismos porcentajes.

Respecto a los modos de falla de las distintas vigas ensayadas, se puede señalar:

- Se observa una uniformidad en el modo de falla, ya que siempre se originó en la fibra más traccionada del alma.

- La falla no se produce necesariamente en el centro de la luz, donde la flecha y el Momento de flexión son máximos para este tipo de carga, carga concentrada en el centro de la luz, sino que queda condicionada a la presencia de defectos importantes (nudos) que ubican la Sección Crítica de la viga.
- En el caso de la viga tipo V2 (viga cajón), la falla del ala inferior está ligada a la falla del alma ya que el ala colapsa bajo la zona en que lo hace el alma. El ala superior sufre un desclavamiento sobre la falla del alma, lo que incide en la no ruptura de ella.

Respecto al Módulo de Corrimiento :

Para realizar el cálculo teórico de las vigas se consideró un Módulo de Corrimiento (C) igual a 600 Kg/cm (González, 1989), que es un valor especificado por la Norma Alemana DIN 1052 y adoptado por la Norma Chilena 1198. Luego se puede afirmar lo siguiente :

- Existen dos criterios para medir el valor de C (Wagner, 1979). En el primero la unión queda sometida a cizalle directo, en el segundo se obtiene a través de un ensayo de flexión de vigas con sección transversal compuesta.
- El primer criterio requiere una metodología de experimentación específica, la cual debe ser tratada con mayor detenimiento y no corresponde a los objetivos de este proyecto.
- El segundo criterio podría ser utilizado en este estudio, pero los valores obtenidos difícilmente se acercarán a la realidad, puesto que el método supone un Módulo de Elasticidad constante para todas las piezas de madera que conforman la sección transversal compuesta.
- Se puede concluir en la necesidad de abordar el tema del Módulo de Corrimiento de manera más precisa, haciendo uso de métodos de ensayo adecuados (González, 1989) para poder comparar los resultados con los indicados en la norma NCh 1198.

Los resultados que se obtuvieron son favorables para los materiales nacionales de las calidades normalmente usadas en la construcción.



REFERENCIAS

Aceitón, M. y Fernández, V., 1992. Estudio Teórico y Experimental de Vigas de Sección Transversal Compuesta. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Santiago.

DIN 1052, 1986. Holzbauwerke, Berechnung und Aufuhrung, Vorlage, Benth Verlag.

Estelle Luis, 1992. Apuntes de Cátedra: Estadística Aplicada a la Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Santiago.

Fernández, Sergio, 1988. Elementos de Diseño Estructural, Material Didáctico de Capacitación N° 18, Departamento de Ingeniería Civil en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile.

González J., 1989. Cálculo de Vigas de Madera de Sección Transversal Compuesta sobre la Base de Ligazón Elástica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN), 1991. Madera Aserrada de Pino Radiata - NCH 1207, Santiago, Chile.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (INN), 1991 a. Madera -Construcciones en Madera - Cálculo. NCH 1198, Santiago, Chile.

Pérez Galaz Vicente, 1990. Manual de Calculo de Construcciones en Madera. Volumen 1, División Industrias, Instituto Forestal, Corporación de Fomento de la Producción, Santiago, Chile.

Popov Egor P., 1989. Mecánica de Materiales, Primera Edición Reimpresa, México.

Vallejos, M. y Venegas, F., 1993. Estudio Teórico de Vigas de Sección Transversal Compuesta. Segunda Parte. Sección Cajón y Te. Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.

Wagner M., Mario, 1979. El Fundamento de las Especificaciones de la Norma Alemana DIN 1052 Relativa al Diseño de Piezas Estructurales de Madera de Sección Transversal Compuesta, Solicitadas a Flexión y Compresión. Informe Técnico N°45, Sección Construcción, Departamento de Obras Civiles, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago.