

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
Departamento de Manejo de Bosques y Medio Ambiente



EFFECTO DEL CALENTAMIENTO EN AGUA SOBRE EL TRABAJO EN  
FLEXION EN MADERA VERDE DE Eucalyptus globulus



MARCO JERONIMO MIRANDA FARIAS

MEMORIA DE TITULO  
PRESENTADA A LA FACULTAD DE  
CIENCIAS FORESTALES DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCION  
PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO FORESTAL

CONCEPCION - CHILE

1997

EFECTO DEL CALENTAMIENTO EN AGUA SOBRE EL TRABAJO EN  
FLEXIÓN EN MADERA VERDE DE Eucalyptus globulus

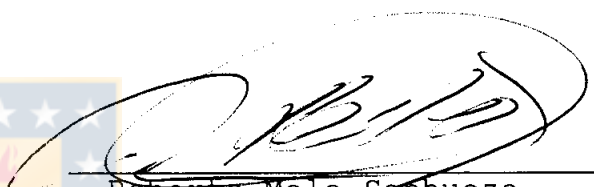
Profesor Asesor



---

Luis Valenzuela Hurtado.  
Profesor Asociado.  
Ingeniero de Ejecución en  
Maderas, Ph.D.

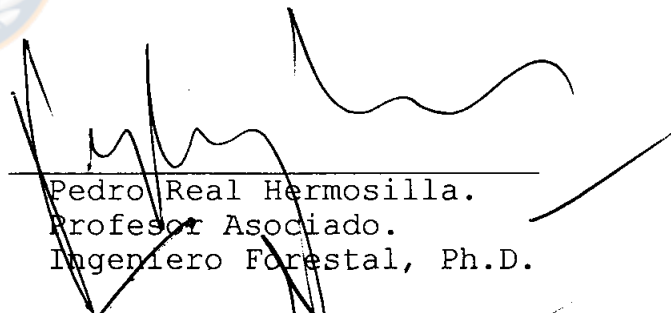
Profesor Co-asesor



---

Roberto Melo Sanhueza.  
Profesor Titular.  
Ingeniero Civil Químico.

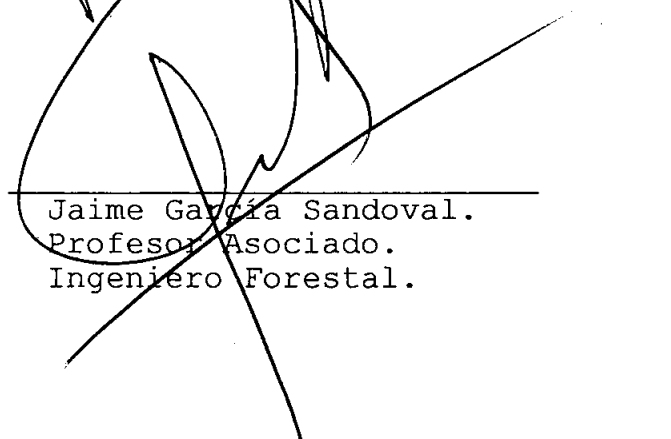
Director Departamento  
Manejo de Bosques y  
Medio Ambiente



---

Pedro Real Hermosilla.  
Profesor Asociado.  
Ingeniero Forestal, Ph.D.

Decano Facultad  
Ciencias Forestales



---

Jaime García Sandoval.  
Profesor Asociado.  
Ingeniero Forestal.



Quisiera al finalizar este estudio agradecer principalmente a Dios por este momento, al incansable apoyo de mi familia y de Sandra la mujer que amo, y como olvidar a mi amigo y compañero Mario Zapata a quién también agradezco su apoyo y amistad.

## INDICE DE MATERIAS

CAPITULOS	PAGINA
I INTRODUCCION .....	1
II OBJETIVOS .....	5
III MATERIALES Y METODOS .....	6
3.1 Metodologia experimental .....	6
3.2 Metodologia analítica .....	8
3.2.1 Mediciones .....	8
3.2.2 Análisis estadístico .....	10
IV RESULTADOS Y DISCUSION .....	12
4.1 Trabajo Elástico .....	13
4.2 Trabajo Plástico .....	15
4.3 Trabajo hasta la carga máxima .....	18
4.4 Coeficiente de Tetmajer .....	21
4.5 Módulo plástico de Janka .....	23
4.6 Módulo de Tenacidad .....	26
V CONCLUSIONES .....	29
VI RESUMEN .....	31
SUMMARY .....	32
VII BIBLIOGRAFIA .....	33
VIII APENDICE .....	36
IX ANEXO .....	46

## INDICE DE TABLAS

TABLA N°	PAGINA
<u>En el texto</u>	
1	Número de probetas según tiempo y temperatura de calentamiento ..... 7
2	Resultados del análisis de regresión lineal múltiple para el trabajo elástico ( $W_{el}$ ), separado por zona del fuste y como un todo . 14
3	Resultados del análisis de regresión lineal múltiple para el trabajo plástico ( $W_{pl}$ ) separado por zona del fuste y como un todo . 17
4	Resultados del análisis de regresión lineal múltiple para el trabajo hasta la carga máxima ( $W_{ml}$ ) separado por zona del fuste y como un todo ..... 20
5	Resultados del análisis de regresión lineal múltiple para el módulo plástico de Janka ( $Z$ ) separado por zona del fuste y como un todo . 25
6	Resultados del análisis de regresión lineal múltiple para el módulo de tenacidad ( $\alpha$ ) separado por zona del fuste y como un todo . 28
<u>En el Apéndice</u>	
1	Resumen de parámetros de energía en flexión y otras variables utilizadas, separados por zona del fuste ( exterior e interior ) ..... 41

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA N°	PAGINA
<u>En el texto</u>	
1	Representación gráfica de carga-deflexión ..... 9
2	Relación entre el trabajo elástico ( $W_{el}$ ) en flexión paralela y el tiempo de calentamiento para la zona exterior (A), interior (B) y en forma general ..... 13
3	Relación entre el trabajo plástico ( $W_{pl}$ ) en flexión paralela y el tiempo de calentamiento para la zona exterior (A), interior (B) y en forma general ..... 16
4	Relación entre el trabajo hasta la carga máxima ( $W_{ml}$ ) en flexión paralela y el tiempo de calentamiento para la zona exterior (A), interior (B) y en forma general ..... 19
5	Relación entre el coeficiente de Tetmajer ( $\eta$ ) en flexión paralela y el tiempo de calentamiento para la zona exterior (A), interior (B) y en forma general ..... 22
6	Relación entre el módulo plástico de Janka ( $Z$ ) en flexión paralela y el tiempo de calentamiento para la zona exterior (A), interior (B) y en forma general ..... 23
7	Relación entre el módulo de tenacidad ( $\alpha$ ) en flexión paralela y el tiempo de calentamiento para la zona exterior (A), interior (B) y en forma general ..... 26

FIGURA N°

PAGINA

En el apendice

1	Representación gráfica de carga deflexión promedio para las diversas temperaturas en la zona interior y exterior, para 12 horas de calentamiento .....	37
2	Representación gráfica de carga deflexión promedio para las diversas temperaturas en la zona interior y exterior, para 24 horas de calentamiento .....	38
3	Representación gráfica de carga deflexión promedio para las diversas temperaturas en la zona interior y exterior, para 48 horas de calentamiento .....	39
4	Representación gráfica del porcentaje que representa el trabajo elástico ( $W_{el}$ ) sobre el trabajo hasta la carga máxima ( $W_{ml}$ ) con el calentamiento, para la zona exterior (A) y la zona interior .....	40
5	Representación gráfica del porcentaje que representa el trabajo plástico ( $W_{pl}$ ) sobre el trabajo hasta la carga máxima ( $W_{ml}$ ) con el calentamiento, para la zona exterior (A) y la zona interior .....	40

En el anexo

1	Diagrama de corte para las viguetas .....	48
2	Forma y dimensiones de las probetas correspondientes a los ensayos de flexión ..	49

## I. INTRODUCCION

Según antecedentes históricos, ya en el año 1894 se efectuaban en la VIII Región plantaciones forestales utilizando el género eucalyptus ( Contesse, 1987 ).

Factores como su buen crecimiento y excelentes características pulpables ( Melo et al., 1981; citado por Prado y Barros, 1989 ) permiten que, Eucalyptus globulus presentando una densidad media de 540 kg/m<sup>3</sup> y con los valores más altos de compresión, tracción y flexión dentro de su género ( Pérez, 1982; Pérez, 1983; ambos citados por Prado y Barros, 1989 ) sea la especie de eucalyptus más usada en Chile.

Sus múltiples usos van desde una comercialización con fines energéticos ( carbón y leña ), pasando por madera aserrada y estructural, hasta procesos altamente tecnificados como la fabricación de papel, tableros y chapas ( Prado y Barros, 1989 ).

Con respecto a la fabricación de tableros y contrachapados Gutiérrez ( 1987 ), establece tres etapas en su obtención: preparación de la troza, obtención de la chapa y proceso de secado y formación del tablero.

Dentro de la fase de preparación de la troza, se encuentra el macerado o calentamiento en agua, práctica que facilita el proceso de corte principalmente en maderas con altas



densidades ( coigüe, eucalyptus ) ( Gutiérrez, 1987; Wood handbook, 1955 ) disminuye la ocurrencia de grietas ( Lutz, 1974; citado por Kubler, 1977 ), acorta el tiempo de secado ( Campbell, 1960; citado por Hillis y Rozsa, 1978 ) y reduce para Eucalyptus globulus inconvenientes naturales como su alta humedad y tendencia al colapso en estado verde ( MacMillan, 1978; FAO, 1979; citado por Prado y Barros, 1989; Skolmen, 1967 ).

Pero es indudable que la madera se ve afectada también debido al calentamiento, siendo un hecho la pérdida de resistencia y rigidez ( Kollman y Côté, 1968 ), mayores pérdidas se registran al calentar maderas húmedas ( Panshin y Forsaith, 1952 ).

Por otro lado las pérdidas aumentan también con el aumento de la densidad en la madera ( Bodig y Jaine, 1982 ), así afirma que el grado de cambio de la resistencia depende del peso específico y de la humedad en la madera ( Wangaard, 1950 ), siendo la incidencia de ésta última mayor a altas temperaturas ( Östman, 1985 ).

Físicamente la madera pierde peso con el calentamiento ( Nicholas y Thomas, 1968 ), profundiza su color ( Noack, 1969 ) y para maderas verdes reduce su punto de saturación de la fibra ( Yokota y Tarkow, 1962 ).

Todos estos cambios que experimenta la madera por el aumento de la temperatura, sean estos favorables o desfavorables para su uso, tienen su origen en el

comportamiento químico de la madera ante el calentamiento ( Hillis y Rozsa, 1985 ). Con respecto a ello Hillis ( 1984 ), establece que químicamente el calentamiento produce alteraciones en la celulosa, hemicelulosas, lignina y extraíbles. Potukin et al. ( 1975; citado por Hillis, 1984 ) calentando madera de pino por 7 horas a una temperatura de 130°C, estableció que se redujo el contenido de pentosas de un 11 % a un 9 % y ligeramente el contenido de celulosa.

Si se analiza la presencia de agua durante el calentamiento de madera, tenemos el efecto en conjunto de temperatura y humedad. Sato et al. ( 1990 ) sometiendo a calentamiento en condiciones de saturación de agua 22 especies arbóreas ( tanto latifoliadas como coníferas ) estableció que el ablandamiento producido en la madera bajo los 60°C se debe al ablandamiento de las hemicelulosas, mientras que sobre los 60°C es producto del ablandamiento de la lignina. También analizando la interacción de temperatura y humedad, Kürschner y Melcerová ( 1965 ), revelaron la formación de ácidos orgánicos producto del calentamiento en presencia de agua. Estos ácidos pueden catalizar la hidrólisis de la hemicelulosa ( Hillis, 1975; McGinnis et al., 1984 ; citado por Philip, 1988 ).

Una forma de cuantificar los efectos de la temperatura sobre la madera y su utilización, es analizando la respuesta de ésta a las diversas propiedades mecánicas.

Se sabe que el grado en que la temperatura afecta a las propiedades mecánicas en orden decreciente es: compresión, módulo de ruptura, cizalle, elasticidad en flexión y resistencia a la tracción, y que además al ensayar madera de coníferas después de haber sido calentada por 10 horas en agua a una temperatura de 300°F el módulo de ruptura disminuyó en un 30 % y la resistencia al impacto en más de un 40 % ( Panshin y De Zeeuw, 1980 ).

Dentro del estudio de la variación en las propiedades de la madera con el aumento de la temperatura en condiciones de saturación, Mujica y Nova ( 1995 ) calentaron en agua madera verde de Eucalyptus globulus estableciendo una disminución de la resistencia y elasticidad y un aumento de la plasticidad, sin embargo en este estudio no se analizó el comportamiento de los parámetros de energía en flexión.

En base a dicho estudio se analiza el comportamiento de los parámetros de energía en flexión, ya que además dentro de la literatura revisada no existe ningún estudio de este tipo, estableciéndose para ello los siguientes objetivos:.

## II. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Determinar el efecto inmediato del tiempo de exposición y la temperatura de macerado en agua, sobre el trabajo en flexión para madera verde de *Eucalyptus globulus*.

### 2.2 Objetivos específicos

1. Determinar la variación de los parámetros de energía en flexión paralela a la fibra con respecto a la posición radial dentro del fuste.
2. Relacionar los parámetros de energía en flexión con otros parámetros físicos y mecánicos.

### III. MATERIALES Y METODOS

Se debe distinguir, en este estudio, entre una metodología experimental ( correspondiente al trabajo realizado por Mujica y Nova, 1995 ) y una metodología analítica de la información.

#### 3.1 Metodología experimental

Mujica y Nova observaron a nivel de laboratorio el efecto inmediato de la temperatura y el tiempo de calentamiento en agua, sobre algunas propiedades mecánicas de la madera verde de Eucalyptus globulus perteneciente a la zona de Arauco VIII Región, calentando a varios niveles de temperatura y por distintos tiempos de exposición, y ensayando mecánicamente las probetas inmediatamente después de haber sido tratadas. Los resultados obtenidos se compararon con un estado control correspondiente a temperatura ambiente ( 20 ° C ) con cero horas de exposición.

Los ensayos mecánicos fueron: Tracción perpendicular a la fibra ( radial y tangencial ), Compresión perpendicular a la fibra ( radial, tangencial y mixta ) y Flexión paralela a la fibra ( radial ), además determinaron la densidad básica de las probetas ensayadas y su variación dimensional debido al calentamiento.

Se definieron dos zonas dentro de la troza, una interior y otra exterior ( ver anexo ), se consideraron tres niveles de temperatura de calentamiento y tres periodos de exposición, además de un estado control que corresponde a temperatura ambiente, en total para la propiedad de flexión se realizaron 200 ensayos ( TABLA 1 ).

TABLA 1. NUMERO DE PROBETAS, SEGUN TIEMPOS Y TEMPERATURAS DE CALENTAMIENTO.

TIEMPO [HRS]	TEMPERATURA							
	AMBIENTE		40 ° C		60 ° C		80 ° C	
	Ext.	Int.	Ext.	Int.	Ext.	Int.	Ext.	Int.
0	10	10	-	-	-	-	-	-
12	-	-	10	10	10	10	10	10
24	-	-	10	10	10	10	10	10
48	-	-	10	10	10	10	10	10

Para mayor información acerca del experimento realizado por Mujica y Nova, Tesis de grado, Universidad del Bio - Bio 1995, referirse al capítulo de Anexos.

### 3.2 Metodología analítica

Se trata de estudiar el efecto inmediato de la temperatura, el tiempo de calentamiento y la posición en la troza, sobre el trabajo el flexión paralela a la fibra para madera verde de Eucalyptus globulus.

Esto se logró analizando la información entregada por los 200 ensayos en flexión paralela a la fibra realizados por Mujica y Nova ( 1995 ).

**3.2.1 Mediciones.** Para obtener el Trabajo ( Elástico, Plástico y hasta la Carga Máxima ), el Coeficiente de Tetmajer (  $\eta$  ), el Módulo plástico de Janka (  $Z$  ) y el Módulo de Tenacidad (  $\alpha$  ), se midió el área bajo la curva de la representación gráfica de carga-deflexión ( Figura 1 ), con la ayuda de un Planímetro Polar Zero Setting.

El área bajo la curva carga-deflexión hasta el **límite proporcional** (  $P_p$  ), representa el **Area Elástica** (  $A_{el}$  ), así mismo, el área desde el límite proporcional hasta la **máxima carga** (  $P_m$  ), representa el **Area Plástica** (  $A_{pl}$  ). El área elástica se obtiene calculando el área del triángulo formado por  $Y_o$ ,  $Y_p$ ,  $P_p$ . Con el Planímetro se midió el área total y con ello el área plástica se obtuvo por diferencia entre área total y área elástica.

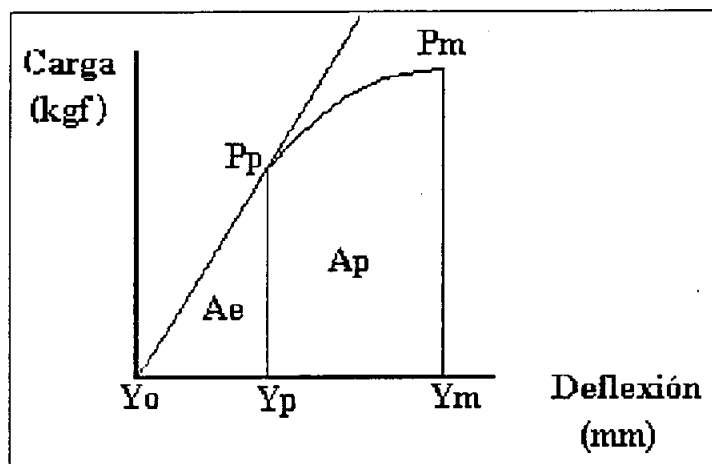


Figura 1. Representación gráfica de carga - deflexión.

Para cada probeta ensayada en flexión se determinó, el Trabajo Elástico ( Wel ), Trabajo Plástico ( Wpl ), Trabajo hasta la Carga Máxima ( Wml ), Coeficiente de Tetmajer (  $\eta$  ), Módulo Plástico de Janka ( .Z ) y el Módulo de Tenacidad (  $\alpha$  ), utilizando las siguientes expresiones matemáticas:

$$W_{el} = \frac{1}{2} \times (P_p \times Y_p) \quad ( \text{Kgfc} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3 )$$

$$W_{pl} = \frac{A_{pl} \times Q}{Vol} \quad ( \text{Kgfc} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3 )$$

$$W_{ml} = \frac{A_t \times Q}{Vol} \quad ( \text{Kgfc} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3 )$$



$$\eta = \frac{At}{Pm \times Ym} \quad ( \text{Adimensional} )$$

$$Z = \frac{Ym - Yp}{Pm - Pp} \quad ( \text{cm/Kgf} )$$

$$\alpha = \frac{At}{Ym} \quad ( \text{Kgf} )$$

Donde :

At = Ael + Apl.

Q = Factor que convierte 1 cm<sup>2</sup> de gráfico a unidades de kgf-cm.

Pp = Carga hasta el límite proporcional ( Kgf ).

Pm = Carga hasta la ocurrencia de la falla ( Kgf ).

Yp = Deflexión hasta el límite proporcional ( cm ).

Ym = Deflexión hasta la ocurrencia de la falla ( cm ).

Vol = Volumen de la probeta ensayada ( cm<sup>3</sup> ).

**3.2.2 Análisis estadístico.** Para efectuar el análisis estadístico se asumió un Diseño Factorial de tres factores ( tiempo, temperatura y posición ), se asumen correctos los cinco supuestos estadísticos ( linealidad, aditividad, aleatorización, normalidad y homogeneidad de varianzas ) se realizaron análisis de varianza para cada una de las seis propiedades medidas, tanto para la zona exterior como para la zona interior, a un nivel de significancia del 5 %.

Finalmente se efectuaron análisis de regresión lineal múltiple utilizando, en todos los casos, las variables

independientes tiempo, temperatura de calentamiento, densidad básica de la madera y módulo de elasticidad ( MOE ) seleccionando entre un conjunto de modelos propuestos, según un criterio estadístico ( bondad del modelo ( prueba F ), coeficiente de determinación (  $r^2$  ), cuadrado medio del error ( mse ), coeficiente de variación ( c.v. ), simplicidad del modelo ) para cinco propiedades en la zona interior, exterior y considerando los datos en conjunto. Debido a que el **coeficiente de Tetmajer (  $\eta$  )** es un indicador de los defectos en la madera y puesto que las probetas ensayadas se encontraban libres de ellos, no se justifica un ajuste de regresión múltiple para esta propiedad.

Dentro de cada modelo seleccionado se determinó la significancia ( con un  $\alpha$  de 1 y 5 % ) de las variables independientes seleccionadas basándose en el resultado de la prueba T.

Todo el análisis estadístico ( análisis de varianza y regresiones lineales múltiples ) se realizó en el software **SAS ( SOFTWARE ANALYSIS STATISCAL )**.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSION

A continuación se presentan los resultados del análisis de los parámetros de energía en flexión, separados por zona del fuste.

Se efectuaron análisis de varianza para cada propiedad en ambas zonas, a un nivel de significancia del 5%. Posteriormente se realizaron análisis de regresión múltiple, ( excepto para el coeficiente de Tetmajer ) para la zona interior ( 100 observaciones ), exterior ( 100 observaciones ) y para los datos en conjunto ( análisis general ) ( 200 observaciones ) utilizando en todos los casos el tiempo, la temperatura de calentamiento, la densidad básica y el módulo de elasticidad como variables independientes.

Los resultados, tanto de varianza como de regresión múltiple, se presentan por propiedad analizada.

En el capítulo de Apéndice se incluyen gráficas de carga-deflexión y porcentaje que representa el trabajo elástico y trabajo plástico en el trabajo hasta la carga máxima por zona del fuste y tratamiento.

#### 4.1 TRABAJO ELASTICO ( Wel )

En la Figura 2 se presenta el comportamiento registrado por el trabajo elástico ( Wel ) con el tiempo y la temperatura de calentamiento.

Como una medida de la energía absorbida por una viga cuando es forzada hasta el límite elástico ( Valenzuela y Nakayama, 1991 ), Wel presenta una disminución con el calentamiento en agua, esto debido a que las propiedades de resistencia y elasticidad varían inversamente con la temperatura ( Panshin y De Zeeuw, 1980 ).

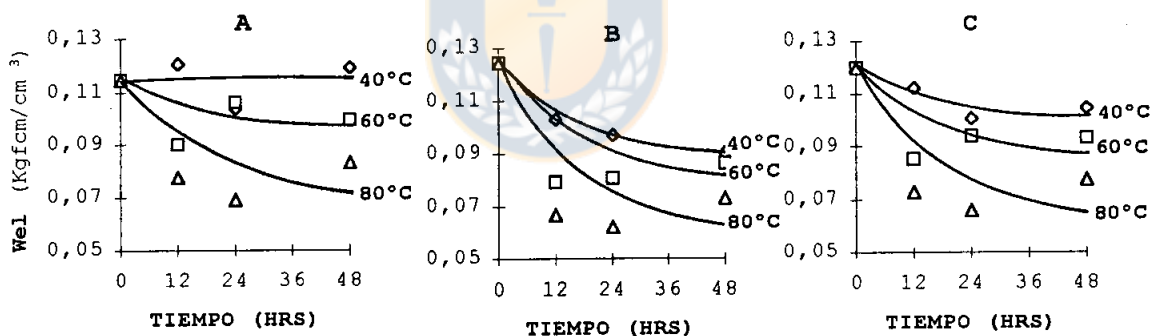


Figura 2. Relación entre el trabajo elástico ( Wel ) y el tiempo de calentamiento para la zona exterior ( A ), interior ( B ) y en general ( C ).  
40°C ◊; 60°C ◻; 80°C ◻.

Aunque la zona interior reveló un valor control mayor que la zona exterior, su disminución debido al calentamiento fue mayor, llegando en el tratamiento a 80° C y 48 horas de

exposición a un valor de 0.072 Kgfc/cm<sup>3</sup>, esto es un 57 % menor que el valor control que alcanzó a 0.125 Kgfc/cm<sup>3</sup>.

Posición dentro del fuste ( valor F de 17.61, 1 y 180 grados de libertad ) y temperatura de calentamiento ( con un F de 73.16, 2 y 180 grados de libertad ) fueron factores significativos, en el analisis de varianza, sobre el Wel.

TABLA 2. RESULTADO DEL ANALISIS DE REGRESION LINEAL MULTIPLE PARA EL TRABAJO ELASTICO ( Wel ) SEPARADO POR ZONA DEL FUSTE Y COMO UN TODO.

Zona del Fuste	Variable Dependiente	Parámetro Estimado	Error Estándar	Valor T Para H0: Parámetro =0	Medidas de Asociación y Precisión
EXTERIOR	1/Wel	INT = 2.9479	5.08797	0.579ns	F-Test = 16.186 R <sup>2</sup> = 0.5873 R = 0.7664 MSE = 3.2784 C.V. = 16.8392 Obs = 100
		TI = 0.0786	0.07754	1.014ns	
		(TI) <sup>2</sup> = -0.0015	0.00125	-1.234ns	
		TE = -0.2003	0.08908	-2.248*	
		(TE) <sup>2</sup> = 0.0027	0.00077	3.567**	
		DE = 0.1861	0.28361	0.656ns	
		(DE) <sup>2</sup> = -0.0147	0.02506	-0.588ns	
		MOE = 0.1619	0.11598	1.397ns	
(MOE) <sup>2</sup> = -7.61x10 <sup>-4</sup>	6.33x10 <sup>-4</sup>	-1.200ns			
INTERIOR	Log (Wel)	INT = -0.9367	0.20119	-4.656**	F-Test = 32.023 R <sup>2</sup> = 0.7379 R = 0.8590 MSE = 0.00303 C.V. = -5.1161 Obs = 100
		TI = -0.0077	0.00244	-3.154**	
		(TI) <sup>2</sup> = 1.27x10 <sup>-4</sup>	3.95x10 <sup>-5</sup>	3.210**	
		TE = -6.51x10 <sup>-4</sup>	0.00275	-0.237ns	
		(TE) <sup>2</sup> = -3.21x10 <sup>-5</sup>	2.38x10 <sup>-5</sup>	-1.349ns	
		DE = 0.0031	0.00859	0.370ns	
		(DE) <sup>2</sup> = -4.15x10 <sup>-4</sup>	7.62x10 <sup>-4</sup>	-0.545ns	
		MOE = 0.0051	0.00526	0.975ns	
(MOE) <sup>2</sup> = -5.04x10 <sup>-5</sup>	3.26x10 <sup>-5</sup>	-1.544ns			
GENERAL	1/Wel	INT = 5.9302	3.65104	1.624ns	F-Test = 29.442 R <sup>2</sup> = 0.5522 R = 0.7431 MSE = 3.73201 C.V. = 16.80501 Obs = 200
		TI = 0.0850	0.05858	1.452ns	
		(TI) <sup>2</sup> = -0.0015	9.46x10 <sup>-4</sup>	-1.657ns	
		TE = -0.0921	0.06682	-1.379ns	
		(TE) <sup>2</sup> = 0.0017	5.78x10 <sup>-4</sup>	3.072**	
		DE = 0.0617	0.21249	0.291ns	
		(DE) <sup>2</sup> = -0.0024	0.01881	-0.132ns	
		MOE = 0.0739	0.08742	0.845ns	
(MOE) <sup>2</sup> = -3.72x10 <sup>-4</sup>	5.03x10 <sup>-4</sup>	-0.739ns			

INT=intercepto de la ecuación; TI=tiempo; TE=temperatura; DE=densidad; MOE=módulo de elasticidad; R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación; R=coeficiente de correlación múltiple; MSE=cuadrado medio del error; C.V.=coeficiente de variación en %; Obs=número de observaciones contempladas en el análisis; significancia al 5%(\*); significancia al 1% (\*\*); no significativa ni al 5 ni 1 % (ns).

En la TABLA 2 se puede observar que la temperatura participó significativamente en la estimación del Wel para la zona exterior y para el ajuste de regresión lineal múltiple de los datos en conjunto, mientras que para la zona interior el tiempo fue el factor significante.

El Wel en la zona interior presenta un mayor coeficiente de correlación llegando a un 85 %, mientras que en la zona exterior se alcanzó un 76 %, valor levemente superior al ajuste de los datos como un todo que llegó a una correlación de un 74 %.

#### 4.2 TRABAJO PLASTICO ( Wpl )

La importante interrelación de temperatura de calentamiento y tiempo de exposición, y su efecto sobre el Wpl, es ilustrado en la Figura 3.

Definido como la deformación plástica de una viga bajo esfuerzos en flexión sobre el límite elástico hasta que se produce la falla ( Valenzuela y Nakayama, 1991 ), Wpl manifestó un aumento con el calentamiento en agua, tanto para las probetas interiores como para las probetas exteriores, esto debido a que la plasticidad de la madera , especialmente de su componente lignina, incrementa con el aumento de temperatura y contenido de humedad ( Panshin y Forsaith, 1952 ).

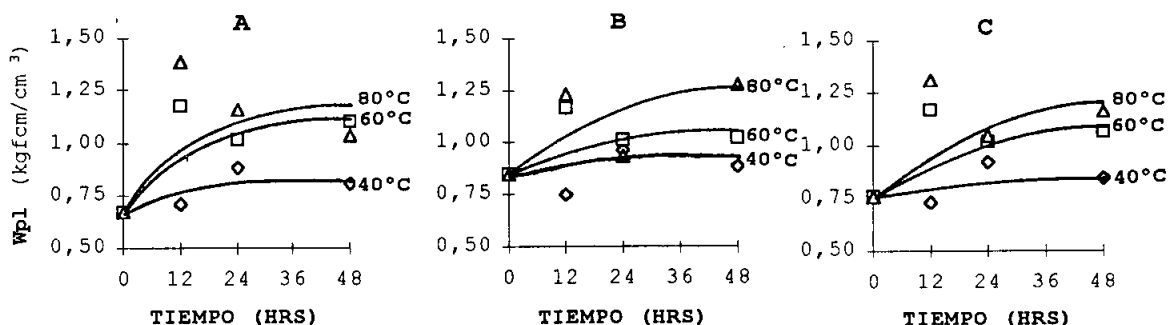


Figura 3. Relación entre el trabajo plástico (  $W_{pl}$  ) y el tiempo de calentamiento para la zona exterior ( A ), interior ( B ) y en general ( C ).  
 40°C  $\diamond$ ; 60°C  $\square$ ; 80°C  $\triangle$ .

En la Figura 3 se observa que el aumento del  $W_{pl}$  es significativo sólo en altas temperaturas, llegando a 1.278 Kgfcm/cm<sup>3</sup> para los 80° C, esto es, un 50 % sobre el valor control en la zona interior y para el mismo nivel de temperatura, en la zona exterior, se registraron valores de 1.385 Kgfcm/cm<sup>3</sup> representando un incremento superior al 60 % del valor obtenido en las probetas a 20° C.

Aunque para la mayoría de los tratamientos la zona interior presentó mayores valores, la posición de la troza no mostró ser significativamente diferente, significancia que si fue apreciada con respecto al factor temperatura de calentamiento ( con un valor F de 26.97 y con 2, 180 grados de libertad ).

El ajuste lineal múltiple para el  $W_{pl}$  se presenta en la TABLA 3, aquí se pueden apreciar los altos valores alcanzados por el coeficiente de variación poniendo de

manifiesto la alta dispersión que presentó el Wpl, tanto para ambas zonas del fuste como para el ajuste de los datos en general.

TABLA 3. RESULTADO DEL ANALISIS DE REGRESION LINEAL MULTIPLE PARA EL TRABAJO PLASTICO ( Wpl ) SEPARADO POR ZONA DEL FUSTE Y COMO UN TODO.

Zona del Fuste	Variable Dependiente	Parámetro Estimado	Error Estándar	Valor T Para HO: Parámetro =0	Medidas de Asociación y Precisión
EXTERIOR	Wpl	INT = -1.8182	0.81897	-2.220*	F-Test = 6.837 R <sup>2</sup> = 0.3754 R = 0.6127 MSE = 0.08494 C.V. = 29.29901 Obs = 100
		TI = -0.0071	0.01248	-0.569ns	
		(TI) <sup>2</sup> = 1.14x10 <sup>-4</sup>	2.01x10 <sup>-4</sup>	0.565ns	
		TE = 0.0168	0.01433	1.175ns	
		(TE) <sup>2</sup> = -3.54x10 <sup>-5</sup>	1.25x10 <sup>-4</sup>	-0.284ns	
		DE = -0.0452	0.04565	-0.991ns	
		(DE) <sup>2</sup> = 0.0047	0.00403	1.183ns	
		MOE = 0.0423	0.01866	2.270*	
		(MOE) <sup>2</sup> = -2.01x10 <sup>-4</sup>	1.02x10 <sup>-4</sup>	-1.973ns	
INTERIOR	Wpl	INT = 0.4209	0.88187	0.477ns	F-Test = 3.739 R <sup>2</sup> = 0.2474 R = 0.4974 MSE = 0.05823 C.V. = 23.95157 Obs = 100
		TI = -0.0175	0.01072	-1.640ns	
		(TI) <sup>2</sup> = 2.96x10 <sup>-4</sup>	1.73x10 <sup>-4</sup>	1.708ns	
		TE = 0.0175	0.01205	1.459ns	
		(TE) <sup>2</sup> = -8.69x10 <sup>-5</sup>	1.04x10 <sup>-4</sup>	-0.832ns	
		DE = 0.0212	0.03766	0.564ns	
		(DE) <sup>2</sup> = -0.0024	0.00334	-0.720ns	
		MOE = 6.26x10 <sup>-5</sup>	0.02307	0.003ns	
		(MOE) <sup>2</sup> = 8.62x10 <sup>-6</sup>	1.43x10 <sup>-4</sup>	0.060ns	
GENERAL	Wpl	INT = -0.6060	0.51157	-1.185ns	F-Test = 9.264 R <sup>2</sup> = 0.2795 R = 0.5286 MSE = 0.07327 C.V. = 27.03839 Obs = 200
		TI = -0.0134	0.00820	-1.633ns	
		(TI) <sup>2</sup> = 2.13x10 <sup>-4</sup>	1.32x10 <sup>-4</sup>	1.608ns	
		TE = 0.0181	0.00936	1.938ns	
		(TE) <sup>2</sup> = -7.48x10 <sup>-5</sup>	8.11x10 <sup>-5</sup>	-0.922ns	
		DE = -0.0046	0.02977	-0.156ns	
		(DE) <sup>2</sup> = 5.51x10 <sup>-4</sup>	0.00263	0.209ns	
		MOE = 0.0216	0.01225	1.768ns	
		(MOE) <sup>2</sup> = -1.12x10 <sup>-4</sup>	7.06x10 <sup>-5</sup>	-1.590ns	

INT=intercepto de la ecuación; TI=tiempo; TE=temperatura; DE=densidad; MOE=módulo de elasticidad; R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación; R=coeficiente de correlación múltiple; MSE=cuadrado medio del error; C.V.=coeficiente de variación en %; Obs=número de observaciones consideradas en el análisis; significancia al 5%(\*); significancia al 1%(\*\*); no significativa ni al 5 ni 1 % (ns).

Bajos coeficientes de determinación se obtuvieron para el Wpl, el modelo escogido explicó solamente en un 37 % el



comportamiento del  $W_{pl}$  en la zona exterior, un 24 % en la zona interior y un 27 % en el ajuste general.

En la TABLA 3 se puede ver que sólo el módulo de elasticidad ( MOE ) en la zona exterior presentó una contribución significativa en la descripción del  $W_{pl}$ , mientras que para la zona interior y en forma general no existió significancia alguna dentro de las variables independientes escogidas.

#### 4.3 TRABAJO HASTA LA CARGA MAXIMA ( $W_{ml}$ )

El efecto del calentamiento en agua sobre el  $W_{ml}$  para la zona interior, exterior y en forma general se presenta en la Figura 4.

Utilizado como una medida de la resistencia y la tenacidad de la madera bajo fuerzas de flexión ( Valenzuela y Nakayama, 1991 ), el  $W_{ml}$  presenta un aumento con la temperatura y el tiempo de calentamiento en agua.

Tanto para las probetas exteriores como para las interiores, se distingue un bajo efecto del tratamiento a 40° C, siendo significativo en ambos casos el efecto de los tratamientos a 60° C y 80° C, fenómeno apreciable también al considerara los resultados en forma general.

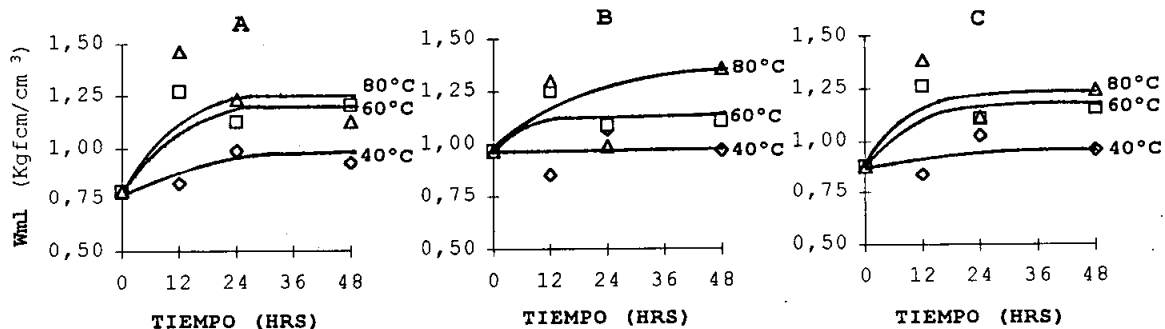


Figura 4. Relación entre el trabajo hasta la carga máxima ( $W_{ml}$ ) y el tiempo de calentamiento para la zona exterior (A), interior (B) y en general (C).  
40°C  $\diamond$ ; 60°C  $\square$ ; 80°C  $\triangle$ .

Valores de  $1.35 \text{ Kgfc}/\text{cm}^3$  se obtuvieron para el  $W_{ml}$  a los  $80^\circ \text{C}$  y 48 horas de exposición en la zona interior del fuste, siendo un 39 % superior al valor control, mientras que para el mismo tratamiento en la zona exterior se registró  $1.12 \text{ Kgfc}/\text{cm}^3$  un aumento del 42 % con respecto al valor registrado por el control.

Aunque no existió diferencia significativa entre las dos posiciones, el exterior presentó un valor control inferior al interior, pero a su vez logró un aumento, debido al calentamiento, superior al registrado en el interior.

A través del análisis de varianza se pudo establecer que la temperatura de calentamiento (con un F de 22.68 y 2, 180 grados de libertad) fue el factor que afectó significativamente el comportamiento del  $W_{ml}$ .

En la TABLA 4 se presentan los resultados del análisis de regresión lineal múltiple para el Wml.

TABLA 4. RESULTADO DEL ANALISIS DE REGRESION LINEAL MULTIPLE PARA EL TRABAJO HASTA LA CARGA MAXIMA ( Wml ) SEPARADO POR ZONA DEL FUSTE Y COMO UN TODO.

Zona del Fuste	Variable Dependiente	Parámetro Estimado	Error Estándar	Valor T Para HO: Parámetro =0	Medidas de Asociación y Precisión
EXTERIOR	Wml	INT = -1.6700	0.80769	-2.068*	F-Test = 6.203 R <sup>2</sup> = 0.3529 R = 0.5941 MSE = 0.08262 C.V. = 26.29171 Obs = 100
		TI = -0.0074	0.01231	-0.608ns	
		(TI) <sup>2</sup> = 1.22x10 <sup>-4</sup>	1.98x10 <sup>-4</sup>	0.613ns	
		TE = 0.0176	0.01414	1.251ns	
		(TE) <sup>2</sup> = -5.03x10 <sup>-5</sup>	1.23x10 <sup>-4</sup>	-0.408ns	
		DE = -0.0475	0.04502	-1.055ns	
		(DE) <sup>2</sup> = 0.0049	0.00397	1.241ns	
		MOE = 0.0416	0.01841	2.261*	
		(MOE) <sup>2</sup> = -1.97x10 <sup>-4</sup>	1.00x10 <sup>-4</sup>	-1.962ns	
INTERIOR	Wml	INT = 0.5273	0.88055	0.599ns	F-Test = 2.982 R <sup>2</sup> = 0.2077 R = 0.4557 MSE = 0.05806 C.V. = 22.02706 Obs = 100
		TI = -0.0192	0.01071	-1.801ns	
		(TI) <sup>2</sup> = 3.24x10 <sup>-4</sup>	1.73x10 <sup>-4</sup>	1.873ns	
		TE = 0.0169	0.01203	1.407ns	
		(TE) <sup>2</sup> = -8.86x10 <sup>-5</sup>	1.04x10 <sup>-4</sup>	-0.850ns	
		DE = 0.0222	0.03760	0.592ns	
		(DE) <sup>2</sup> = -0.0025	0.00333	-0.753ns	
		MOE = 0.0017	0.02303	0.073ns	
		(MOE) <sup>2</sup> = -5.64x10 <sup>-6</sup>	1.42x10 <sup>-4</sup>	-0.040ns	
GENERAL	Wml	INT = -0.4638	0.50737	-0.914ns	F-Test = 7.840 R <sup>2</sup> = 0.2472 R = 0.4972 MSE = 0.07207 C.V. = 24.54964 Obs = 200
		TI = -0.0139	0.00814	-1.718ns	
		(TI) <sup>2</sup> = 2.24x10 <sup>-4</sup>	1.31x10 <sup>-4</sup>	1.703ns	
		TE = 0.0180	0.00928	1.938ns	
		(TE) <sup>2</sup> = -8.05x10 <sup>-5</sup>	8.04x10 <sup>-5</sup>	-1.002ns	
		DE = -0.0051	0.02952	-0.172ns	
		(DE) <sup>2</sup> = 5.68x10 <sup>-4</sup>	0.00261	0.217ns	
		MOE = 0.0213	0.01215	1.758ns	
		(MOE) <sup>2</sup> = -1.11x10 <sup>-4</sup>	6.99x10 <sup>-5</sup>	-1.582ns	

INT=intercepto de la ecuación; TI=tiempo; TE=temperatura; DE=densidad; MOE=módulo de elasticidad; R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación; R=coeficiente de correlación múltiple; MSE=cuadrado medio del error; C.V.=coeficiente de variación en %; Obs=número de observaciones consideradas en el análisis; significancia al 5%(\*); significancia al 1% (\*\*); no significante ni al 5 ni 1 % (ns).

Una correlación más alta se logró en la zona exterior, llegando a un 59 %, en tanto que para la zona interior fue

de un 45 %, siendo de un 49 % en el ajuste de regresión general.

La alta irregularidad presentada por el  $W_{ml}$  se aprecia en los altos valores registrados por el coeficiente de variación ( TABLA 4 ).

En cuanto a las variables explicativas, sólo el módulo de elasticidad ( MOE ) en la zona exterior, fue significativa a un nivel del 5 % en las estimación del  $W_{ml}$ .

En la zona interior y en general ninguna de las variables independientes seleccionadas representó significancia alguna para la explicación de la conducta presentada por el  $W_{ml}$ .

El  $W_{pl}$  representó alrededor de un 85 % del  $W_{ml}$  para el valor control en ambas zonas del fuste, esto hace que los resultados tanto del análisis de varianza como del ajuste de regresión múltiple para el  $W_{ml}$  sean muy similares al  $W_{pl}$  ( ver apéndice ).

#### 4.4 Coeficiente de Tetmajer ( $\eta$ )

El comportamiento que presentó  $\eta$  ante el calentamiento se puede apreciar en la Figura 5.

Tanto para la zona exterior e interior como para los datos en conjunto ( general ) se observa un aumento de  $\eta$  con el tiempo y la temperatura de calentamiento.

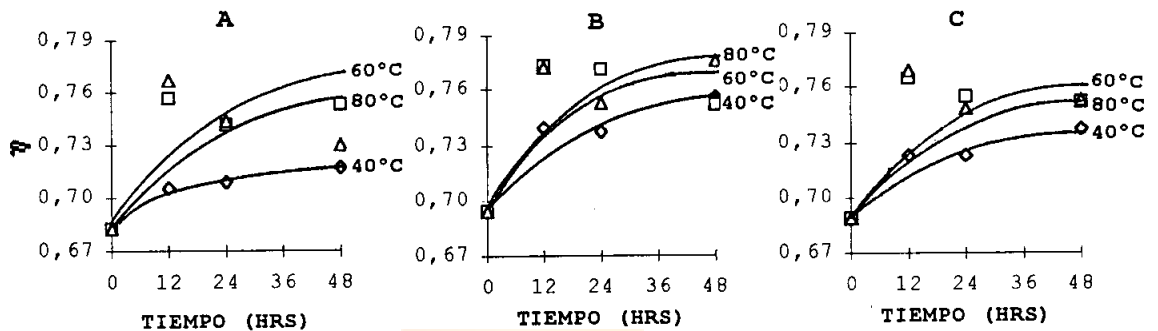


Figura 5. Relación entre el coeficiente de Tetmajer ( $\eta$ ) en flexión paralela y el tiempo de calentamiento para la zona exterior ( A ), interior ( B ) y en forma general ( C ).  
40°C  $\diamond$ ; 60°C  $\square$ ; 80°C  $\Delta$ .

Conocido también como detector de defectos en la madera,  $\eta$  alcanzó para 20° C y cero horas de exposición, valores cercanos a 0.7 en ambas zonas del fuste, coincidente con lo que establece apto Kollmann y Côté ( 1968 ) para madera estructural a un 12 % de contenido de humedad.

En la Figura 5 se observa que  $\eta$  presenta valores mayores en la zona interior para todos los tiempos y temperaturas de calentamiento, llegando a 0.776 para los 80° C y 48 horas de calentamiento, representando un aumento cercano al 12 % con respecto al valor control.

El análisis de varianza vislumbró una influencia significativa de los factores temperatura de calentamiento ( valor F de 4.37 y 2, 180 grados de libertad ) y posición dentro de la troza ( con F de 4.58 y 1, 180 grados de libertad ) sobre  $\eta$ .

#### 4.5 MODULO PLASTICO DE JANKA ( Z )

En la Figura 6 se presenta la incidencia del calentamiento en agua sobre la conducta de Z.

En ambas zonas del fuste se puede observar que el calentamiento en agua provocó un aumento de Z, siendo más prominente de 0 a 12 horas en la zona exterior y de 0 a 24 horas en la zona interior.

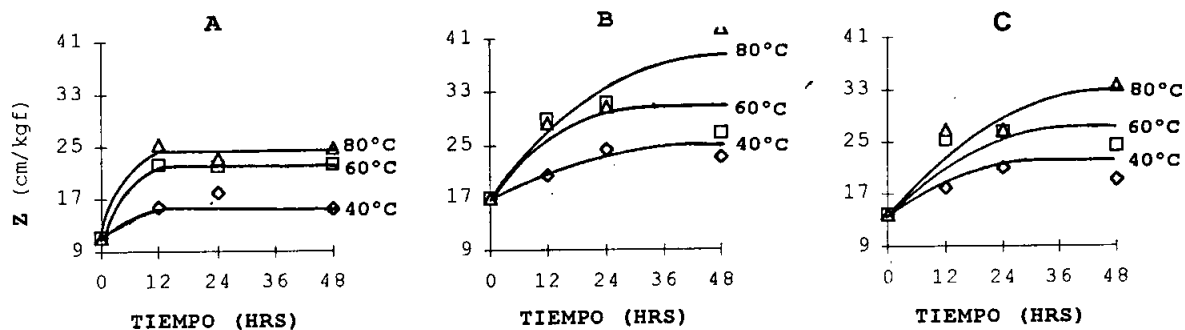


Figura 6. Relación entre el módulo plástico de Janka ( Z ) y el tiempo de calentamiento para la zona exterior ( A ), interior ( B ) y en general ( C ).  
40°C  $\diamond$ ; 60°C  $\square$ ; 80°C  $\triangle$ .

Para todos los tiempos y temperaturas de calentamiento valores más altos de Z se observaron en la zona interior llegando a superar al control en un 100 % para los tratamientos a 60° C y 80° C, esquema que se presenta también en la zona exterior.

Debido a que Z es un indicador de la plasticidad de la madera, se puede afirmar que la zona interior es más plástica que la exterior. Estudios realizados por Valenzuela y Nakayama ( 1991 ) confirman lo antes mencionado, puesto que al ensayar en flexión madera de pino insigne al 12 % de contenido de humedad, establecieron que la madera juvenil de este era un 27 % más plástica que la madera adulta.

El análisis de varianza reveló la existencia de una interacción entre la posición de las probetas, el tiempo y la temperatura de calentamiento, haciendo que la significancia de estos factores sobre la conducta exhibida por Z no sea tan precisa.

Z presentó la mas alta correlación observada entre los parámetros de energía en flexión ( TABLA 5 ), con un 87 % para la zona interior, valor que supera a la zona exterior que alcanzó una correlación de 82 %, mientras que el ajuste general alcanzó un valor de 86 %.

En la TABLA 5 se puede apreciar que para la zona exterior la temperatura presentó una significativa contribución a la

estimación de Z, en tanto que el tiempo y la temperatura, lo fueron en la zona interior.

Al igual que para la zona interior el tiempo y la temperatura fueron los factores significantes en la predicción de Z, agregándose a estos la densidad como factor estimativo.

TABLA 5. RESULTADO DEL ANALISIS DE REGRESION LINEAL MULTIPLE PARA EL MODULO PLASTICO DE JANKA ( Z ) SEPARADO POR ZONA DEL FUSTE Y COMO UN TODO.

Zona del Fuste	Variable Dependiente	Parámetro Estimado	Error Estándar	Valor T Para HO: Parámetro =0	Medidas de Asociación y Precisión
EXTERIOR	Log (Z)	INT = 2.4746	2.62880	0.941ns	F-Test = 24.564 R <sup>2</sup> = 0.6835 R = 0.8267 MSE = 0.00655 C.V. = 6.31710 Obs = 100
		TI = -0.0023	0.00347	-0.662ns	
		(TI) <sup>2</sup> = 3.45x10 <sup>-5</sup>	5.58x10 <sup>-5</sup>	0.619ns	
		TE = 0.0131	0.00411	3.194**	
		(TE) <sup>2</sup> = -7.53x10 <sup>-5</sup>	3.62x10 <sup>-5</sup>	-2.081*	
		DE = -4.7412	9.71741	-0.488ns	
		(DE) <sup>2</sup> = 3.3583	8.82341	0.381ns	
		MOE = -1.39x10 <sup>-4</sup>	0.00527	-0.026ns	
(MOE) <sup>2</sup> = -5.42x10 <sup>-6</sup>	2.87x10 <sup>-5</sup>	-0.189ns			
INTERIOR	Log (Z)	INT = 4.3758	1.51428	2.890**	F-Test = 37.683 R <sup>2</sup> = 0.7681 R = 0.8764 MSE = 0.00412 C.V. = 4.52690 Obs = 100
		TI = -0.0048	0.00286	-1.695ns	
		(TI) <sup>2</sup> = 9.98x10 <sup>-5</sup>	4.64x10 <sup>-5</sup>	2.151*	
		TE = 0.0076	0.00340	2.245*	
		(TE) <sup>2</sup> = -3.16x10 <sup>-5</sup>	2.97x10 <sup>-5</sup>	-1.061ns	
		DE = -9.0287	6.18373	-1.460ns	
		(DE) <sup>2</sup> = 7.2432	6.18337	1.171ns	
		MOE = -0.0128	0.00649	-1.975ns	
(MOE) <sup>2</sup> = 7.04x10 <sup>-5</sup>	3.94x10 <sup>-5</sup>	1.785ns			
GENERAL	Log (Z)	INT = 3.9140	0.87023	4.498**	F-Test = 73.349 R <sup>2</sup> = 0.7544 R = 0.8685 MSE = 0.00571 C.V. = 5.59700 Obs = 200
		TI = -0.0040	0.00229	-1.761ns	
		(TI) <sup>2</sup> = 7.84x10 <sup>-5</sup>	3.70x10 <sup>-5</sup>	2.119*	
		TE = 0.0086	0.00271	3.155**	
		(TE) <sup>2</sup> = -3.73x10 <sup>-5</sup>	2.38x10 <sup>-5</sup>	-1.568ns	
		DE = -8.9493	3.52730	-2.537*	
		(DE) <sup>2</sup> = 6.7255	3.36880	1.996*	
		MOE = -2.02x10 <sup>-4</sup>	0.00375	-0.054ns	
(MOE) <sup>2</sup> = -6.59x10 <sup>-6</sup>	2.11x10 <sup>-5</sup>	-0.311ns			

INT=intercepto de la ecuación; TI=tiempo; TE=temperatura; DE=densidad; MOE=módulo de elasticidad; R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación; R=coeficiente de correlación múltiple; MSE=cuadrado medio del error; C.V.=coeficiente de variación en %; Obs=número de observaciones contempladas en el análisis; significancia al 5%(\*); significancia al 1% (\*\*); no significativa ni al 5 ni 1 % (ns).



#### 4.6 Módulo de tenacidad ( $\alpha$ )

Considerado como un indicador de la tenacidad en la madera, puesto que representa el trabajo realizado ante la aplicación de una carga hasta la ruptura ( Valenzuela y Nakayama, 1991 ),  $\alpha$  presenta una disminución por el calentamiento en agua ( Figura 7 ).

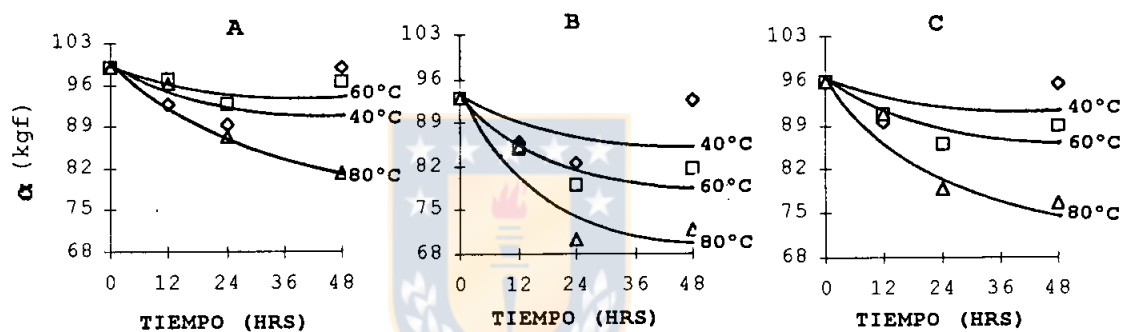


Figura 7. Relación entre el módulo de tenacidad (  $\alpha$  ) y el tiempo de calentamiento para la zona exterior ( A ), interior ( B ) y en forma general ( C ).

40°C  $\diamond$ ; 60°C  $\square$ ; 80°C  $\Delta$ .

Disminución que fue significativamente mayor en la zona interior, en donde también se registran menores valores de densidad, factor que incide directamente sobre las propiedades mecánicas de la madera ( Kollmann y Côté, 1968 ). Valenzuela y Nakayama ( 1991 ) al ensayar madera de *Pinus radiata* en flexión, con un 12% de contenido de humedad, encontraron que en promedio  $\alpha$  fue alrededor de 1.8 veces mayor en la madera madura, que en la maderajuvenil.

Por otra parte para la zona exterior sólo a los 80° C se aprecia una disminución considerable de  $\alpha$ , aspecto que también se aprecia en el gráfico general.

Los tres factores en estudio, posición dentro de la troza ( F de 39.79 y 1, 180 grados de libertad ) el tiempo y la temperatura de calentamiento ( con valores F de 6.22 y 10.34 y ambos con 2, 180 grados de libertad ) influyeron significativamente sobre  $\alpha$  según el análisis de varianza.

En la TABLA 6 se presenta el análisis de regresión lineal múltiple para  $\alpha$ , aquí se aprecia que sólo el MOE logró ser significativo para su estimación, excepto en la zona interior, donde las variables independientes seleccionadas no mostraron significancia alguna.

El grado de asociación entre la variable dependiente  $\alpha$ , y las variables independientes ( tiempo, temperatura, densidad y MOE ), fue muy similar para los tres ajustes, observándose, para la zona exterior una correlación del 68 %, un 67 % para el ajuste general y un 62 % para la zona interior.

TABLA 6. RESULTADOS DEL ANALISIS DE REGRESION LINEAL MULTIPLE PARA EL MODULO DE TENACIDAD ( $\alpha$ ) SEPARADO POR ZONA DEL FUSTE Y COMO UN TODO.

Zona del Fuste	Variable Dependiente	Parámetro Estimado	Error Estándar	Valor T para HO: Parámetro =0	Medidas de Asociación y Precisión
EXTERIOR	$\alpha$	INT = -7.5311	21.08350	-0.357ns	F-Test = 10.155 R <sup>2</sup> = 0.4717 R = 0.6868 MSE = 56.29437 C.V. = 8.05900 Obs = 100
		TI = -0.4036	0.32133	-1.256ns	
		(TI) <sup>2</sup> = 0.0077	0.00517	1.485ns	
		TE = 0.3940	0.36915	1.068ns	
		(TE) <sup>2</sup> = -0.0027	0.00321	-0.855ns	
		DE = -0.8893	1.17522	-0.757ns	
		(DE) <sup>2</sup> = 0.0963	0.10387	0.928ns	
		MOE = 1.6162	0.48060	3.363**	
		(MOE) <sup>2</sup> = -0.0063	0.00262	-2.389*	
INTERIOR	1/ $\alpha$	INT = 0.0218	0.00510	4.268**	F-Test = 7.396 R <sup>2</sup> = 0.3940 R = 0.6277 MSE = 1.95X10-6 C.V. = 11.3105 Obs = 100
		TI = 5.37x10-5	6.21x10-5	0.865ns	
		(TI) <sup>2</sup> = -9.36x10-7	1.00x10-6	-0.932ns	
		TE = -5.18x10-6	6.98x10-5	-0.074ns	
		(TE) <sup>2</sup> = 2.02x10-7	6.10x10-7	0.335ns	
		DE = -2.37x10-4	2.18x10-4	-1.087ns	
		(DE) <sup>2</sup> = 1.68x10-5	1.93x10-5	0.870ns	
		MOE = -1.85x10-4	1.33x10-4	-1.381ns	
		(MOE) <sup>2</sup> = 7.48x10-7	8.30x10-7	0.902ns	
GENERAL	1/ $\alpha$	INT = 0.0251	0.00242	10.390**	F-Test = 19.865 R <sup>2</sup> = 0.4542 R = 0.6739 MSE = 1.64X10-6 C.V. = 11.0423 Obs = 200
		TI = 3.29x10-5	3.89x10-5	0.846ns	
		(TI) <sup>2</sup> = -6.50x10-7	6.30x10-7	-1.034ns	
		TE = -1.54x10-5	4.43x10-5	-0.348ns	
		(TE) <sup>2</sup> = 1.61x10-7	3.80x10-7	0.418ns	
		DE = -5.51x10-5	1.41x10-4	-0.390ns	
		(DE) <sup>2</sup> = 1.97x10-6	1.25x10-5	0.158ns	
		MOE = -2.45x10-4	5.81x10-5	-4.222**	
		(MOE) <sup>2</sup> = 9.97x10-7	3.30x10-7	2.980**	

INT=intercepto de la ecuación; TI=tiempo; TE=temperatura; DE=densidad; MOE=módulo de elasticidad; R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación; R=coeficiente de correlación múltiple; MSE=cuadrado medio del error; C.V.=coeficiente de variación en %; Obs =número de observaciones contempladas en el análisis; significancia al 5%(\*); significancia al 1% (\*\*); no significativa ni al 5 ni 1 % (ns).

## V. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos se establecen las siguientes conclusiones para los ensayos de flexión paralela a la fibra en madera verde de Eucalyptus globulus sometido a calentamiento en agua.

- Los parámetros de energía en flexión: coeficiente de Tetmajer (  $\eta$  ), módulo de tenacidad (  $\alpha$  ), trabajo elástico (  $W_{el}$  ), trabajo plástico (  $W_{pl}$  ), trabajo hasta la carga máxima (  $W_{ml}$  ) y módulo plástico de Janka (  $Z$  ) en flexión paralela a la fibra en corte radial, de la madera verde de Eucalyptus globulus, se ven afectados por la temperatura y el tiempo de calentamiento en agua.
  
- Entre los factores de estudio: tiempo, temperatura de calentamiento, y posición en la troza, el que más incidió en el comportamiento de los parámetros medidos en flexión paralela a la fibra, fue la temperatura de calentamiento.
  
- El aumento de la temperatura y del periodo de calentamiento en agua, provocan una disminución del trabajo elástico (  $W_{el}$  ) y del módulo de tenacidad (  $\alpha$  ), y un aumento del coeficiente de Tetmajer

(  $\eta$  ), trabajo plástico (  $W_{pl}$  ), trabajo hasta la carga máxima (  $W_{ml}$  ) y módulo plástico de Janka (  $Z$  ).

- Observando la variación de los parámetros de energía el flexión se aprecia que a mayor temperatura, se requiere de un menor tiempo de calentamiento para lograr un efecto sobre alguno de éstos.
- Dentro del análisis de regresión lineal múltiple, el módulo plástico de Janka (  $Z$  ) presentó la más alta correlación con respecto a las variables independientes tiempo, temperatura, densidad y módulo de elasticidad (  $MOE$  ), y el trabajo plástico (  $W_{pl}$  ) y hasta la carga máxima (  $W_{ml}$  ) las menores.
- El módulo plástico de Janka (  $Z$  ) en la zona interior, fue el parámetro más afectado, por lo que podemos afirmar que la madera verde de *Eucalyptus globulus* aumenta su plasticidad con el calentamiento en agua.

## VI. RESUMEN

Se estudió el efecto inmediato de la temperatura, el tiempo de calentamiento y la posición radial de la probeta en la troza sobre los parámetros de energía en flexión (coeficiente de Tetmajer ( $\eta$ ), módulo de tenacidad ( $\alpha$ ), trabajo elástico ( $W_{el}$ ), trabajo plástico ( $W_{pl}$ ), trabajo hasta la carga máxima ( $W_{ml}$ ) y módulo plástico de Janka ( $Z$ )) para madera verde de *Eucalyptus globulus*. Se compararon las propiedades medidas en la zona interna y externa de la troza y entre los diversos tratamientos y el control. Para cada propiedad (excepto para  $\eta$ ) se ajustó una regresión lineal múltiple en la zona interior, exterior y para ambas zonas como un todo utilizando las variables independientes tiempo, temperatura de calentamiento, densidad básica y módulo de elasticidad.

Los resultados indican que  $\alpha$  y  $W_{el}$  experimentan una disminución con el calentamiento en agua, mientras que  $\eta$ ,  $W_{pl}$ ,  $W_{ml}$  y  $Z$ , incrementan con el tiempo y la temperatura de calentamiento.

## VI. SUMMARY

The immediate effect of temperature, heating time and sample radial position in the log over the bending energy parameters (Tejmajer's coefficient ( $\eta$ ), toughness modulus ( $\alpha$ ), elastic work ( $W_{el}$ ), plastic work ( $W_{pl}$ ), maximum load work ( $W_{ml}$ ) and Janka's plastic modulus ( $Z$ ) in *Eucalyptus globulus* greenwood was studied. It was compared the measured properties inside versus outside zone of the log and treatment versus control. To each property (with the exception of  $\eta$ ) a multiple linear regression was adjusted inside, outside zone and both of stem by means of independent variables: time, heating temperature, basic density and elasticity modulus.

The results showed  $\alpha$  and  $W_{el}$  decrease with water heating, while  $\eta$ ,  $W_{pl}$ ,  $W_{ml}$  and  $Z$  increased with time and heating temperature.

## VII. BIBLIOGRAFIA

1. Bodig y Jaine, B. A. 1982. Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company. 568-580.
2. Contesse, D. 1987. Apuntes y consideraciones para la Historia del *Pino radiata* en Chile.
3. Gutiérrez, M. 1989. Técnicas de Debobinado y Secado de Chapas. Chile Forestal, documento técnico n° 24 y 25.
4. Hillis, W. y A., Rozsa. 1978. The Softening Temperatures of Wood. *Holzforschung* 32(2): 68-73.
5. Hillis, W. 1984. High temperature and Chemical effects on Wood Stability I. *Wood Science and Technology* 18(4): 281-293.
6. Hillis, W. y A., Rozsa. 1985. High temperature and Chemical effects on Wood Stability II. *Wood Science and Technology* 19(2): 93-102.
7. Kollmann, F. y W., Côté. 1968. Principles of Wood Science and Technology. Springer - Verlag New York Inc. 310-379.
8. Kubler, H. 1977. Formation of Cheks in tree stems During Heating. *Forest Products Journal* 27(1): 41-46.
9. Kürschner, K. y A., Melcerová. 1965. Chemical changes of beechwood during thermal treatment. *Holzforschung* 19(6): 171-178.
10. Mujica, C. y A., Nova. 1995. Efecto del calentamiento en agua sobre algunas propiedades mecánicas de la madera verde de *Eucalyptus globulus*. Tesis Ingeniería Civil en Industrias Forestales. Universidad del Bio-Bío. Concepción.



11. Nicholas, D. y R., Thomas. 1968. Influence of Steaming on Ultrastructure of Bordered Pit Membrane in Loblolly Pine. Forest Product Journal 18(1) : 103-116.
12. Noack, Von D. 1969. Über die hiebwasserbehandlung von Rotbuchenholz im Temperaturbereich von 100 bis 180 ° C. Holzforschung und Holzverwertung 21(1): 118-124.
13. Östman, B. 1985. Wood Tensile Strength at temperatures and moisture contents Simulating fire Conditions. Wood Science and Technology 19(2): 103-116.
14. Panshin, A. y C., Forsaith. 1952. Texbook of Wood Technology. Mc Graw-Hill Book Company Inc. 234-236.
15. Panshin, A. y C., De Zeeuw. 1980. Texbook of Wood Technology. Mc Graw-Hill Book Company New York, N. Y.
16. Philip, H. 1988. Irreversible property changes of small Loblolly Pine specimens heated in air, nitrogen, or oxigen. Wood and Fiber Science 20(3): 320-335.
17. Prado, J. y S., Barros. 1989. Eucalyptus, Principios de Silvicultura y Manejo. INFOR-CORFO. Santiago-Chile.
18. Sato, Y.; M., Fushitani; T., Kubo. 1990. Relationship between structural factors and rates of change in bending deformation properties of woods due to heat under water-saturated conditions. Mokuzai Gakkaishi 36(12): 1027-1034.
19. Skolmen, R. 1967. Heating logs...to relieve growth stresses. Forest Products Journal 17(7): 41-42.
20. Valenzuela, L. y Y., Nakayama. 1991. The Bending Work of Radiata Pine Grown in Chile. Mokuzai Gakkaishi 37(5): 396-404.
21. Wangaard, F. 1950. The mecanical properties of wood. Copyright by John Wiley & Sons Inc. 188-191.

22. Wood Handbook. 1955. U.S. Dep. Agr. For. Serv., For. Prod. Lab. 72: 89-93.
23. Yokota, T. y H. Tarkow. 1962. Changes in Dimension on Heating Green Wood. Forest Products Journal 12(1): 43-45.



VIII. APENDICE



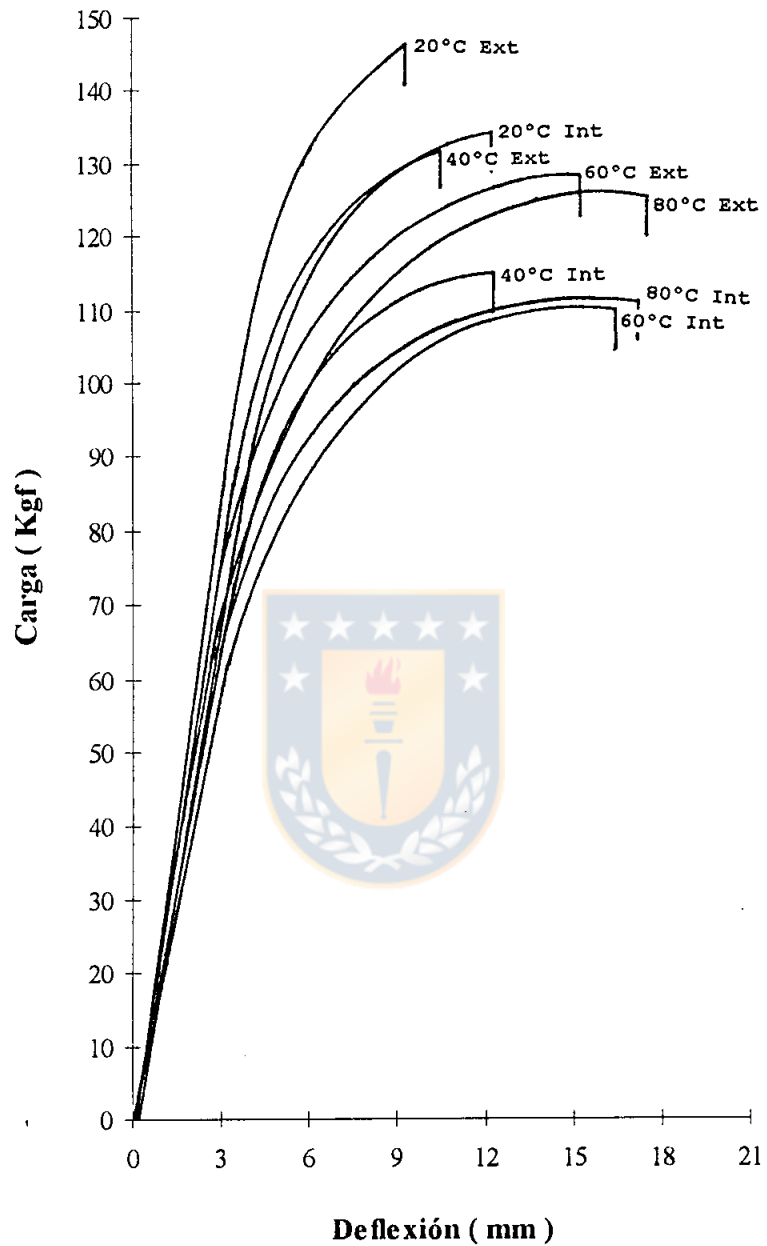


Figura 1. Representación gráfica de carga deflexión promedio para las diversas temperaturas en la zona interior y exterior, para 12 horas de calentamiento.

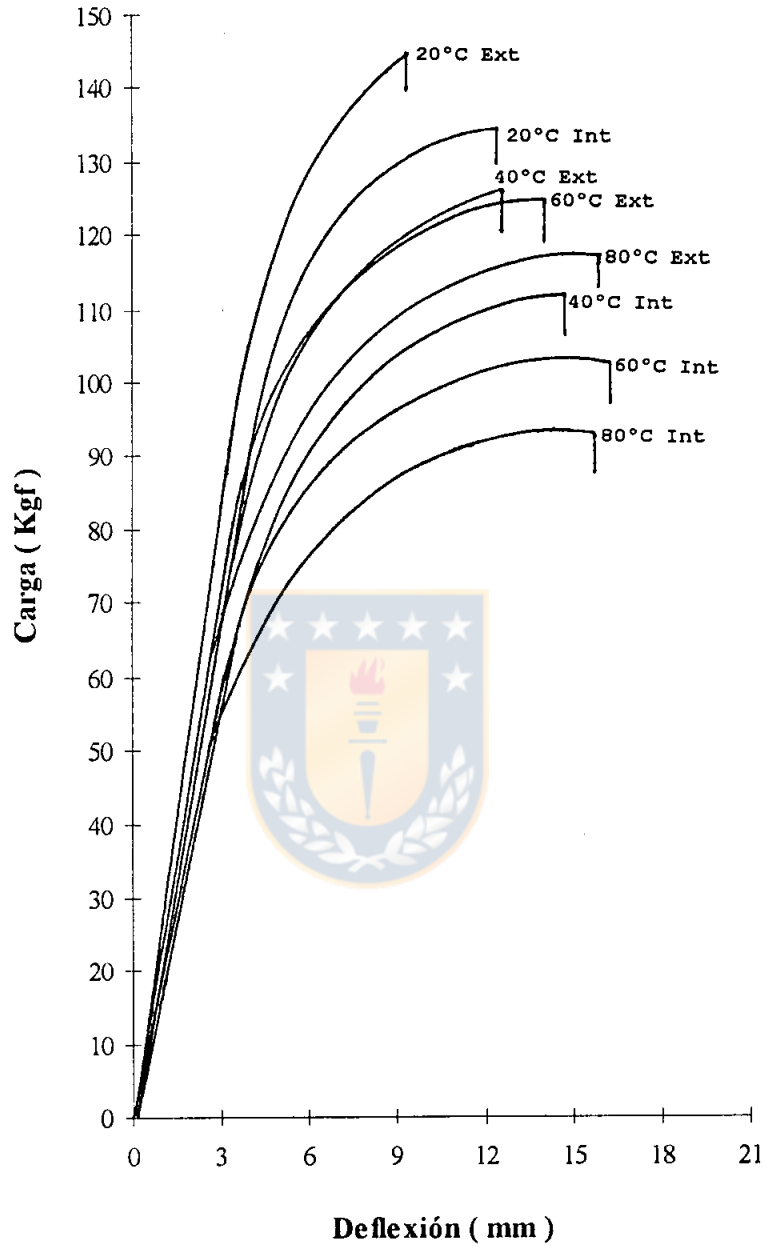


Figura 2. Representación gráfica de carga deflexión promedio para las diversas temperaturas en la zona interior y exterior, para 24 horas de calentamiento.

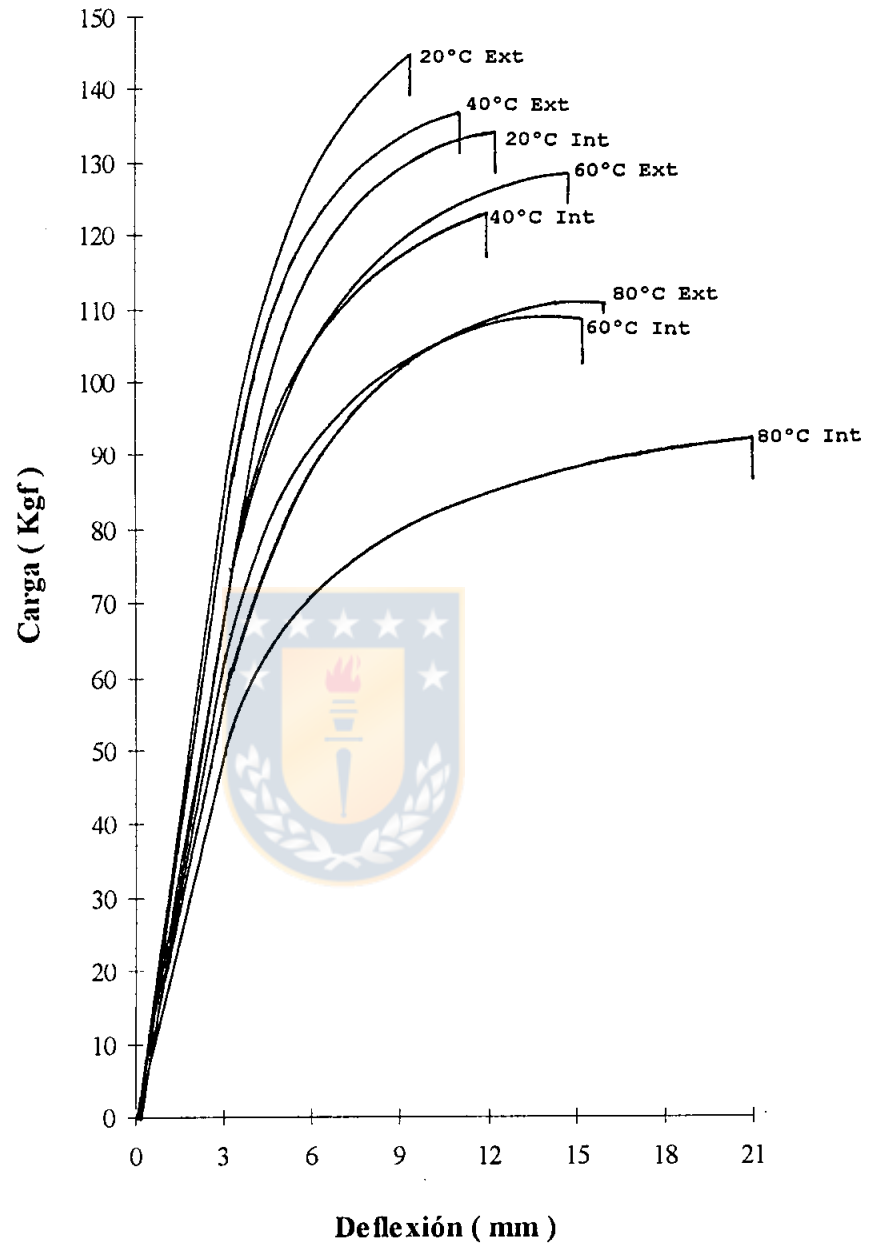


Figura 3. Representación gráfica de carga deflexión promedio para las diversas temperaturas en la zona interior y exterior, para 48 horas de calentamiento.

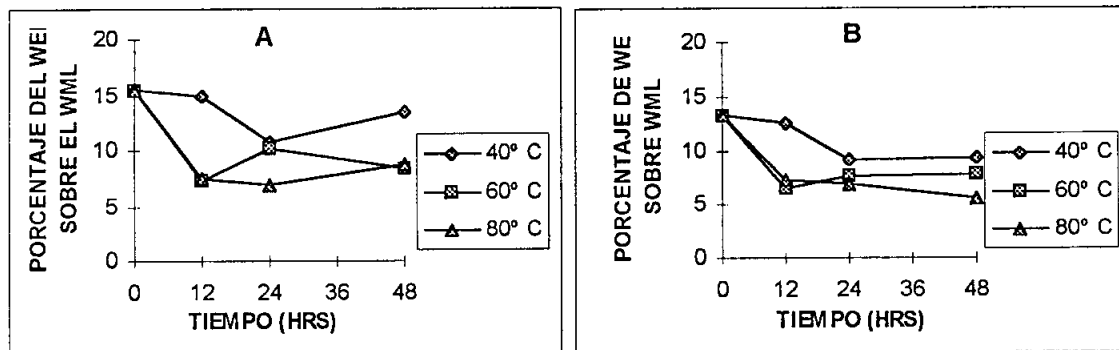


Figura 4. Representación gráfica del porcentaje que representa el Trabajo Elástico (  $W_{el}$  ) sobre el Trabajo hasta la carga Máxima (  $W_{ml}$  ), para la zona exterior ( A ) y la zona interior ( B ).

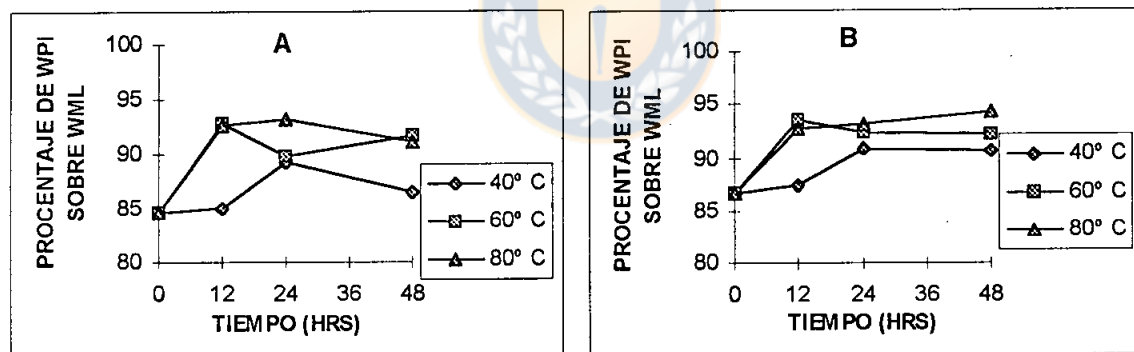


Figura 5. Representación gráfica del porcentaje que representa el Trabajo Plástico (  $W_{pl}$  ) sobre el Trabajo hasta la carga Máxima (  $W_{ml}$  ), para la zona exterior ( A ) y la zona interior ( B ).

TABLA 1. RESUMEN DE PARAMETROS DE ENERGIA EN FLEXION Y OTRAS VARIABLES UTILIZADAS, SEPARADOS POR ZONA DEL FUSTE ( EXTERIOR E INTERIOR ).

PROPIEDAD	PARAMETRO ESTADISTICO	UNIDAD	ZONA	
			INTERIOR	EXTERIOR
W <sub>e1</sub> (TRABAJO ELASTICO)	PROMEDIO	( kgf/cm <sup>3</sup> )	0.0863	0.0984
	DESV. ESTANDAR	( kgf/cm <sup>3</sup> )	0.0185	0.0176
	COEF. VARIACION	( % )	21.5171	17.9371
W <sub>p1</sub> (TRABAJO PLASTICO)	PROMEDIO	( kgf )	1.0076	0.9946
	DESV. ESTANDAR	( kgf )	0.1711	0.2255
	COEF. VARIACION	( % )	16.9838	22.6772
W <sub>m1</sub> (TRABAJO HASTA MAXIMA CARGA)	PROMEDIO	( kgf/cm <sup>3</sup> )	1.0941	1.0931
	DESV. ESTANDAR	( kgf/cm <sup>3</sup> )	0.1596	0.2107
	COEF. VARIACION	( % )	14.5892	19.2753
η (COEFICIENTE TETMAJER)	PROMEDIO	-	0.7523	0.7307
	DESV. ESTANDAR	-	0.0246	0.0263
	COEF. VARIACION	( % )	3.2767	3.6054
Z (MODULO PLASTICO DE JANKA)	PROMEDIO	( kgf/cm <sup>3</sup> )	27.2170	19.9900
	DESV. ESTANDAR	( kgf/cm <sup>3</sup> )	7.0312	4.6290
	COEF. VARIACION	( % )	25.8337	23.2261
α (MODULO DE TENACIDAD)	PROMEDIO	( kgf/cm <sup>3</sup> )	82.6666	93.1444
	DESV. ESTANDAR	( kgf/cm <sup>3</sup> )	7.5489	5.6683
	COEF. VARIACION	( % )	9.1318	6.0855
MOE (MODULO DE ELASTICIDAD)	PROMEDIO	( ton/cm <sup>2</sup> )	88.4050	77.528
	DESV. ESTANDAR	( ton/cm <sup>2</sup> )	15.8876	14.9564
	COEF. VARIACION	( % )	14.0454	11.5954
ρ <sub>ov</sub> (DENSIDAD BÁSICA)	PROMEDIO	( gr/cm <sup>3</sup> )	0.5420	0.4893
	DESV. ESTANDAR	( gr/cm <sup>3</sup> )	4.7808	4.9012
	COEF. VARIACION	( % )	0.0259	0.0239
P <sub>p</sub> (CARGA AL LIMITE PROPORCIONAL)	PROMEDIO	( kgf )	75.5485	63.5880
	DESV. ESTANDAR	( kgf )	50.6307	15.9624
	COEF. VARIACION	( % )	38.2508	10.1502
P <sub>m</sub> (CARGA HASTA LA FALLA)	PROMEDIO	( kgf )	127.4676	110.6335
	DESV. ESTANDAR	( kgf )	10.0964	50.4187
	COEF. VARIACION	( % )	12.8697	55.7800
Y <sub>p</sub> (DEFLEXION AL LIMITE PROPORCIONAL)	PROMEDIO	( mm )	3.1631	3.1690
	DESV. ESTANDAR	( mm )	11.5868	13.5955
	COEF. VARIACION	( % )	0.3665	0.4308
Y <sub>m</sub> (DEFLEXION HASTA LA FALLA)	PROMEDIO	( mm )	16.9020	15.3565
	DESV. ESTANDAR	( mm )	35.0167	23.1009
	COEF. VARIACION	( % )	5.9185	3.5475



8.1 Analisis de varianza.General Linear Models Procedure  
Class Level Information

Class	Levels	Values
POS	2	ext int
TI	4	0 12 24 48
TEM	4	20 40 60 80

Number of observations in data set = 200

Dependent Variable: TRABAJO ELÁSTICO ( WEL )

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	19	0.06644383	0.00349704	15.30	0.0001
Error	180	0.04114640	0.00022859		
Corrected Total	199	0.10759023			
	R-Square	C.V.	Root MSE		WEL Mean
	0.617564	16.35307	0.015119		0.092455

Dependent Variable: TRABAJO ELÁSTICO ( WEL )

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
POS	1	0.00734957	0.00734957	32.15	0.0001
TI	3	0.01758246	0.00586082	25.64	0.0001
POS*TI	3	0.00289276	0.00096425	4.22	0.0065
TEM	2	0.03344595	0.01672298	73.16	0.0001
POS*TEM	2	0.00057206	0.00028603	1.25	0.2886
TI*TEM	4	0.00294213	0.00073553	3.22	0.0140
POS*TI*TEM	4	0.00165890	0.00041473	1.81	0.1280

Dependent Variable: TRABAJO ELÁSTICO ( WEL )

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
POS	1	0.00402558	0.00402558	17.61	0.0001
TI	2	0.00067899	0.00033949	1.49	0.2292
POS*TI	2	0.00016117	0.00008058	0.35	0.7034
TEM	2	0.03344595	0.01672298	73.16	0.0001
POS*TEM	2	0.00057206	0.00028603	1.25	0.2886
TI*TEM	4	0.00294213	0.00073553	3.22	0.0140
POS*TI*TEM	4	0.00165890	0.00041473	1.81	0.1280

Dependent Variable: TRABAJO PLASTICO ( WPL )

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	19	7.21882815	0.37993832	5.60	0.0001
Error	180	12.20559518	0.06780886		
Corrected Total	199	19.42442333			
	R-Square	C.V.	Root MSE		WPL Mean
	0.371637	26.01134	0.260401		1.001107

Dependent Variable: TRABAJO PLASTICO ( WPL )

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
POS	1	0.00812812	0.00812812	0.12	0.7296
TI	3	1.47407831	0.49135944	7.25	0.0001
POS*TI	3	0.28285143	0.09428381	1.39	0.2472
TEM	2	3.65746081	1.82873040	26.97	0.0001
POS*TEM	2	0.12276324	0.06138162	0.91	0.4063
TI*TEM	4	1.16738555	0.29184639	4.30	0.0024
POS*TI*TEM	4	0.50616070	0.12654017	1.87	0.1183

Dependent Variable: TRABAJO PLASTICO ( WPL )

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
POS	1	0.04346525	0.04346525	0.64	0.4244
TI	2	0.18042074	0.09021037	1.33	0.2670
POS*TI	2	0.14523136	0.07261568	1.07	0.3449
TEM	2	3.65746081	1.82873040	26.97	0.0001
POS*TEM	2	0.12276324	0.06138162	0.91	0.4063
TI*TEM	4	1.16738555	0.29184639	4.30	0.0024
POS*TI*TEM	4	0.50616070	0.12654017	1.87	0.1183

Dependent Variable: TRABAJO HASTA LA CARGA MAXIMA ( WML )

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	19	6.28466728	0.33077196	4.96	0.0001
Error	180	12.00171371	0.06667619		
Corrected Total	199	18.28638099			
	R-Square	C.V.	Root MSE		WML Mean
	0.343680	23.61262	0.258217		1.093557

Dependent Variable: TRABAJO HASTA LA CARGA MAXIMA ( WML )

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
POS	1	0.00001867	0.00001867	0.00	0.9867
TI	3	1.20575089	0.40191696	6.03	0.0006
POS*TI	3	0.31491782	0.10497261	1.57	0.1972
TEM	2	3.02423738	1.51211869	22.68	0.0001
POS*TEM	2	0.11125866	0.05562933	0.83	0.4358
TI*TEM	4	1.11634591	0.27908648	4.19	0.0029
POS*TI*TEM	4	0.51213796	0.12803449	1.92	0.1090

Dependent Variable: TRABAJO HASTA LA CARGA MAXIMA ( WML )

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
POS	1	0.02100977	0.02100977	0.32	0.5753
TI	2	0.19089908	0.09544954	1.43	0.2416
POS*TI	2	0.13575883	0.06787942	1.02	0.3634
TEM	2	3.02423738	1.51211869	22.68	0.0001
POS*TEM	2	0.11125866	0.05562933	0.83	0.4358
TI*TEM	4	1.11634591	0.27908648	4.19	0.0029
POS*TI*TEM	4	0.51213796	0.12803449	1.92	0.1090

Dependent Variable: COEFICIENTE TETMAJER (  $\eta$  )

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	19	0.13994055	0.00736529	1.85	0.0209
Error	180	0.71798289	0.00398879		
Corrected Total	199	0.85792344			
	R-Square	C.V.	Root MSE		CTM Mean
	0.163115	8.517290	0.063157		0.741514

Dependent Variable: COEFICIENTE TETMAJER (  $\eta$  )

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
POS	1	0.02304375	0.02304375	5.78	0.0173
TI	3	0.06433629	0.02144543	5.38	0.0014
POS*TI	3	0.00132116	0.00044039	0.11	0.9539
TEM	2	0.03486280	0.01743140	4.37	0.0140
POS*TEM	2	0.00301941	0.00150971	0.38	0.6854
TI*TEM	4	0.00618186	0.00154547	0.39	0.8174
POS*TI*TEM	4	0.00717527	0.00179382	0.45	0.7725

Dependent Variable: COEFICIENTE TETMAJER (  $\eta$  )

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
POS	1	0.01826910	0.01826910	4.58	0.0337

TI	2	0.00280831	0.00140415	0.35	0.7037
POS*TI	2	0.00074565	0.00037283	0.09	0.9108
TEM	2	0.03486280	0.01743140	4.37	0.0140
POS*TEM	2	0.00301941	0.00150971	0.38	0.6854
TI*TEM	4	0.00618186	0.00154547	0.39	0.8174
POS*TI*TEM	4	0.00717527	0.00179382	0.45	0.7725

Dependent Variable: MODULO PLASTICO DE JANKA ( Z )

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	19	9031.034800	475.317621	27.26	0.0001
Error	180	3137.998000	17.433322		
Corrected Total	199	12169.032800			
	R-Square	C.V.	Root MSE		Z Mean
	0.742133	17.68755	4.175323		23.60600

Dependent Variable: : MODULO PLASTICO DE JANKA ( Z )

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
POS	1	2606.420000	2606.420000	149.51	0.0001
TI	3	2237.229800	745.743267	42.78	0.0001
POS*TI	3	218.423667	72.807889	4.18	0.0069
TEM	2	2828.593444	1414.296722	81.13	0.0001
POS*TEM	2	84.644778	42.322389	2.43	0.0911
TI*TEM	4	602.351556	150.587889	8.64	0.0001
POS*TI*TEM	4	453.371556	113.342889	6.50	0.0001

Dependent Variable: : MODULO PLASTICO DE JANKA ( Z )

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
POS	1	2210.956062	2210.956062	126.82	0.0001
TI	2	171.699111	85.849556	4.92	0.0083
POS*TI	2	207.063111	103.531556	5.94	0.0032
TEM	2	2828.593444	1414.296722	81.13	0.0001
POS*TEM	2	84.644778	42.322389	2.43	0.0911
TI*TEM	4	602.351556	150.587889	8.64	0.0001
POS*TI*TEM	4	453.371556	113.342889	6.50	0.0001

Dependent Variable: MODULO DE TENACIDAD (  $\alpha$  )

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	19	13418.19255	706.22066	6.41	0.0001
Error	180	19816.97889	110.09433		

Corrected Total	199	33235.17144		
	R-Square	C.V.	Root MSE	MT Mean
	0.403735	11.94017	10.49258	87.87635

Dependent Variable: MODULO DE TENACIDAD (  $\alpha$  )

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
POS	1	5458.139680	5458.139680	49.58	0.0001
TI	3	2837.299944	945.766648	8.59	0.0001
POS*TI	3	176.629615	58.876538	0.53	0.6590
TEM	2	2277.336154	1138.668077	10.34	0.0001
POS*TEM	2	435.321368	217.660684	1.98	0.1415
TI*TEM	4	2114.545152	528.636288	4.80	0.0011
POS*TI*TEM	4	118.920632	29.730158	0.27	0.8970

Dependent Variable: MODULO DE TENACIDAD (  $\alpha$  )

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
POS	1	4381.191348	4381.191348	39.79	0.0001
TI	2	1369.328954	684.664477	6.22	0.0024
POS*TI	2	67.499001	33.749501	0.31	0.7364
TEM	2	2277.336154	1138.668077	10.34	0.0001
POS*TEM	2	435.321368	217.660684	1.98	0.1415
TI*TEM	4	2114.545152	528.636288	4.80	0.0011
POS*TI*TEM	4	118.920632	29.730158	0.27	0.8970



A continuación se detallan aspectos referentes al ensayo efectuado por Nova y Mujica, 1995.

### 10.1 Materia prima

Se ensayó madera de *Eucalyptus globulus* de la zona de Arauco, VIII región, recepcionándose en estado verde en forma de trozas de 1.2 m de largo y de diámetros superiores a los 65 cm. El esquema de corte se presenta en la Figura 1.

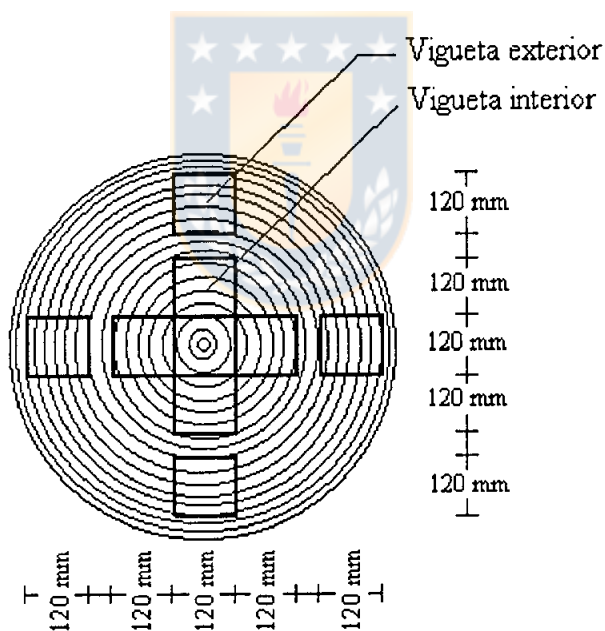


Figura 1. Diagrama de corte para las viguetas.

De cada trozo se obtienen 8 viguetas, 4 de la zona exterior del árbol y 4 de la interior. Las dimensiones son

de 120 x 120 x 1200 mm. De aquí se obtienen las probetas para los diversos ensayos.

La forma y dimensiones de las probetas utilizadas en los ensayos de flexión paralela a la fibra se aprecian en la figura 2.

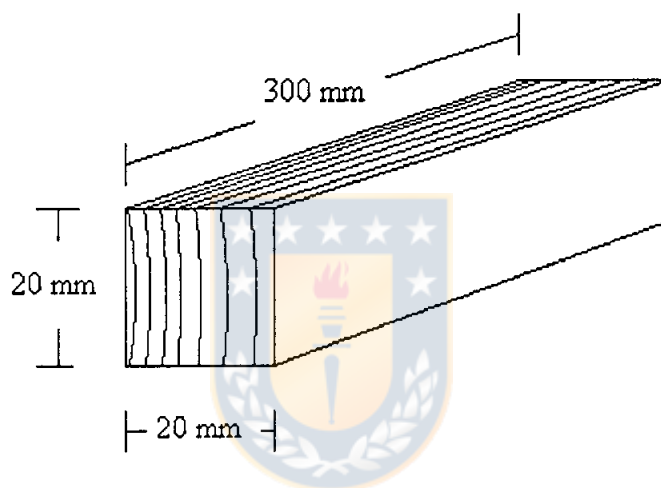


Figura 2. Forma y dimensiones de las probetas correspondientes a los ensayos de flexión.

Las probetas debidamente identificadas se aislaron para mantener su humedad. Luego se introdujeron en un baño termostático con la temperatura establecida para cada tratamiento, para ser luego ensayadas inmediatamente concluido el período de calentamiento.



## 10.2 Ensayo de flexión paralela a la fibra

Este ensayo se efectuó de acuerdo a la norma JIS Z 2113-63 obteniéndose probetas de corte 100 % radial y de dimensiones 20x20x300 mm ( Figura 2 ).

Se midió el ancho ( b ), altura ( h ) y su longitud ( l ), aplicándose la carga en el centro de la luz ( L = 28 cm ) a una velocidad constante de 5 mm/min, registrando la deflexión a intervalos de carga hasta producida la falla en la probeta.

Se utilizó la densidad básica de la madera (  $\rho_{ov}$  ) determinada según la Norma Chilena 176/2, usando el peso anhidro (  $P_o$  ) y el volumen verde (  $V_v$  ) de las probetas.

Para el caso de las probetas de flexión y compresión, el volumen verde se determinó por el método de medición directa de sus dimensiones momentos antes del ensayo.

A continuación se presentan las fórmulas de densidad básica de la madera y módulo de elasticidad, ambos utilizados como variables independientes en el análisis de regresión múltiple.

$$(1) \text{ Densidad Básica : } \rho_{ov} = \frac{P_o}{V_v} \quad (\text{gr/cm}^3)$$

$$(2) \text{ Módulo de Elasticidad : } MOE = \frac{P_p \times L^3}{4 \times Y_p \times b \times h^3} \quad (\text{ton/cm}^2)$$