

Alberto Campos Barker (**)

RESUMEN

En el estudio se emplearon cien piezas de madera de 2" x 4", perteneciente al grupo de especies madereras canadienses : Spruce - Pine - Fir, de 2,44 m de longitud, en estado verde y adquiridas en los aserraderos ubicados al sur de New Brunswick, Canadá.

La madera fue separada en dos grupos con contenidos de humedad diferentes y cada uno de estos grupos en dos grados de calidad de aquellos definidos en las Normas de Clasificación : National Lumber Grades Authority.

Cada pieza fue ensayada para determinar : 1) el Módulo de elasticidad dinámico usando vibraciones transversales y longitudinales, y 2) la resistencia en la compresión paralela a las fibras. De las piezas así ensayadas se obtuvieron probetas pequeñas, normalizadas, libres de defectos, con la finalidad de obtener la resistencia a la compresión paralela a las fibras.

El estudio permitió establecer que las mediciones del Módulo de Elasticidad obtenidas con el método de vibraciones transversales y longitudinales está altamente correlacionado con el determinado en las probetas normalizadas. Los valores del coeficiente de correlación, r, resultaron de 0,937 y 0,927 para cada uno de los grados en estado seco. Sin embargo, el valor de r fue sólo 0,780 y 0,475 para el estado verde.

Las fallas del 85% de las piezas en estado seco y del 71% del estado verde, ensayadas en compresión paralela a las fibras estuvieron relacionadas con un nudo. Esto sugiere que los nudos y las pronunciadas desviaciones de fibras son los defectos más importantes que se deben considerar cuando las piezas de madera son solicitadas en compresión paralela a las fibras.

ABSTRACT

One hundred pieces of 2"x4" green Spruce-Pine-Fir lumber of length 2.44 meter were purchased from a southern New Brunswick sawmill.

The lumber was sorted into two moisture condition groups and, within each group, into two grade-groupings according to Standard Grading Rules, National Lumber Grades Authority.

Each piece was tested to determine dynamic modulus of elasticity using transverse and longitudinal vibrations, and compressive strength parallel to grain. Small clear specimens were cut out from failed specimens and tested to determine their compressive strength parallel to grain.

It was found that MOE measurements obtained from transverse and longitudinal vibrations are highly correlated, r values of 0.937 and 0.927 were obtained for each grade grouping in dry condition. However, r values of only 0.780 and 0.475 were obtained for green condition.

The failures of 85% of the dry pieces and 71% of the green pieces tested in compression parallel to grain, were related to a knot, which suggests that knots or severe cross-grain are the most important defects to be considered when lumber is loaded in compression parallel to grain.

(*) Trabajo presentado a la reunión del grupo 5.02 : Timber Engineering Group de la International Union of Forestry Research Organizations, IUFRO, Saint John, New Brunswick, Canada, Julio 1990.

(**) Ingeniero Civil, Instituto Forestal - Div. Industrial - Candidato a Master Of Science Department of Forest Engineering University of New Brunswick P.O. Box 4400 Fredericton, New Brunswick Canada E3B 5A3

INTRODUCCIÓN

Durante años diversas técnicas han sido usadas para medir propiedades mecánicas de la madera. Inicialmente sólo se usaron métodos estáticos para medir propiedades mecánicas en probetas pequeñas y de tamaño estructural. Las propiedades más frecuentemente medidas estáticamente han sido flexión, compresión y tracción paralela a la fibra. En los años cincuenta, se iniciaron a mayor escala las mediciones de propiedades dinámicas, Jayne (1959) desarrolló una técnica de ensayo dinámico no destructivo para ensayar madera libre de defectos. Miller y Tardif (1967) desarrollaron un clasificador vibracional que se basó en la medición del módulo de elasticidad dinámico de las piezas sometidas a flexión. Diversas otras investigaciones se han llevado a cabo usando vibración como instrumento de medición de las propiedades dinámicas de la madera (ej. Pellerin 1965; Orosz 1977; Chui 1989; Chui y Smith 1989a).

Uno de los aspectos más trascendentes al ensayar madera usando técnicas de vibración, es la calidad de los equipos. Metriguard Inc. desarrolló un aparato portátil para medir la velocidad de propagación de las ondas (stress waves) en la madera. Este aparato usa una técnica basada en la vibración longitudinal de ondas, a diferencia de los equipos tradicionales que usan vibración transversal, donde la flexión se produce perpendicular al largo de la pieza de madera.

El objetivo principal del presente trabajo es estudiar la relación existente entre el uso de técnicas de vibración transversal y longitudinal para la determinación del módulo de elasticidad dinámico del grupo que comprende spruce - pine - fir proveniente del Noreste Canadiense. La razón para estudiar estas tres especies como un sólo grupo, es debido a que en Canadá se comercializan juntas bajo un grupo llamado S-P-F, el cual comprende : *Picea rubens*, *Picea mariana*, *Picea glauca*, *Pinus banksiana* y *Abies balsamea*.

El segundo objetivo fue determinar en el grupo spruce - pine - fir, el esfuerzo de compresión paralela a la fibra en ensayos de probetas de tamaño estructural.

Finalmente se obtuvo dos probetas pequeñas libres de defectos de cada pieza ensayada a escala real en compresión, con estas probetas pequeñas se realizaron nuevamente ensayos de compresión paralela a la fibra, destinados a encontrar la relación entre la resistencia a la compresión paralela de las probetas pequeñas libres de defectos y las de tamaño estructural.

PROCEDIMIENTOS Y RESULTADOS

Cien piezas de spruce - pine - fir de 50x100x2440 mm fueron obtenidas en estado verde de un aserradero de la provincia de New Brunswick, Canadá. La madera fue clasificada en dos grupos, de acuerdo a la National Lumber Grades Authority, Standard Grading Rules (1987). Grupo 1 : Selecto Estructural (SS) y Estructural Nº1, grupo 2 : Estructural Nº 2 y Nº 3. Cada grupo fue separado en estado verde (contenido de humedad superior al 30%) y estado seco (contenido de humedad de 8%), ver tabla 1. El secado de las piezas fue realizado en un secador convencional.

Dos de las piezas del estado seco fueron usadas como control durante el secado, y una pieza verde fue eliminada debido a problemas de calidad.

Tabla 1. Distribución del muestreo

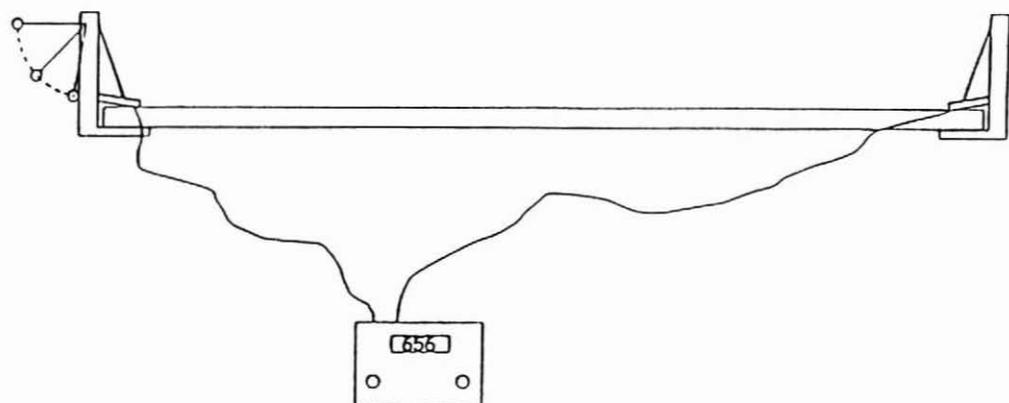
Condición	Piezas en grupo 1	Piezas en grupo 2
Verde	20	29
Seco	22	26

Módulo de Elasticidad (MOE) Medido en vibración longitudinal

La primera medición fue la velocidad de transmisión de ondas longitudinales. Para este propósito se utilizó el "stress wave timer" modelo 239 A de Metriguard Inc.. El sistema se basa en obtener la velocidad de transmisión de ondas longitudinales que viajan a través de la pieza; conocido este valor se calcula el módulo de elasticidad dinámico longitudinal (MOE_{sw}) de acuerdo a lo indicado en la figura 1.

Debido a que las ondas longitudinales pueden ser distorsionadas por nudos y otros defectos de la madera, para cada pieza se tomaron diversas mediciones de la velocidad de onda, hasta obtener cinco veces la misma lectura.

Figura 1. MOE medido en vibración longitudinal



donde :

$$MOE_{sw} = \frac{v^2 \times p \times k}{g}$$

MOE_{sw} = Módulo de elasticidad dinámico longitudinal (MPa)

v = velocidad de ondas (m/seg)

p = densidad de la pieza al ser ensayada (kg/m^3)

g = constante gravitacional ($9,81 \text{ m/seg}^2$)

k = constante = $9,81 \times 10^{-6}$ (adimensional)

La tabla 2 muestra el promedio, desviación standard y el coeficiente de variación para las mediciones del módulo de elasticidad dinámico usando ondas longitudinales.

Tabla 2. Resultados de MOE_{sw} (MPa)

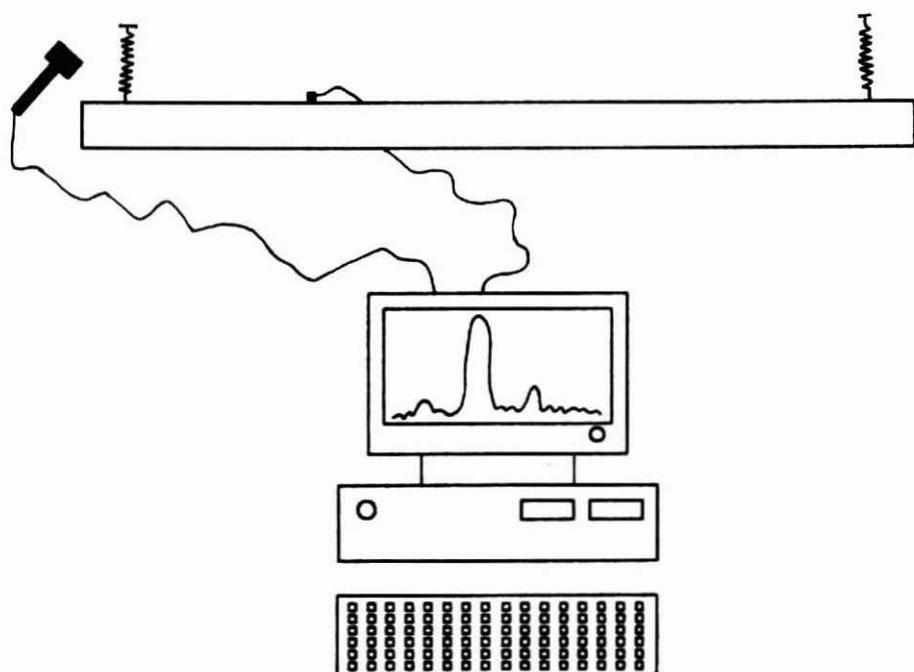
Condición		MOE_{sw} grupo 1	MOE_{sw} grupo 2
seco	promedio	13696	11284
	desv. st.	1663	2150
	c.v. (%)	12,1	19,0
verde	promedio	11354	10534
	desv. st.	1364	2104
	c.v. (%)	12,0	20,7

MOE medido en vibración transversal.

En este ensayo la pieza de tamaño estructural fue suspendida de dos resortes para permitirle vibrar libremente. Ensayos realizados por Chui (1989) muestran que las primeras dos a tres frecuencias naturales de vibración no son afectadas por la posición de los puntos de suspensión.

Para medir la respuesta vibracional causada al impactar la pieza suspendida de los resortes con un martillo instrumental, se colocó un acelerómetro en el canto de la pieza, tal como se muestra en la figura N° 2. La respuesta vibracional de la pieza fue analizada por un analizador de espectros. La primera, segunda y tercera frecuencias naturales fueron identificadas y registradas. La primera y segunda frecuencia natural se usaron para calcular el módulo de elasticidad en vibración transversal (MOE_{TV}) y el módulo dinámico de corte (G), de acuerdo a lo indicado por Chui y Smith (1989b). La tercera frecuencia natural se registró como información adicional.

Figura 2. MOE medido en vibración transversal



La tabla 3 muestra los datos obtenidos en la medición del módulo de elasticidad dinámico transversal y libre del efecto de corte, usando técnicas de vibración transversal.

Tabla 3 Resultados del MOE_{TV} (MPa)

Condición		MOE _{TV} grupo 1	MOE _{TV} grupo 2
Seco	promedio	13831	10801
	desv. st.	1840	2423
	c.v. (%)	13,3	22,4
Verde	promedio	10413	9454
	desv. st.	1574	2413
	c.v. (%)	15,1	25,5

El porcentaje de atenuación de las piezas también fue medido usando vibración transversal. Los valores obtenidos concuerdan con aquellos reportados por Chui y Smith (1989a). La tabla 4 muestra los valores de atenuación obtenidos para los grupos 1 y 2 en estado seco y verde.

Tabla 4. Valores de Atenuación (%)

Condición		grupo 1	grupo 2
Seco	promedio	0,90	1,07
	desv. st.	0,06	0,15
	c.v. (%)	6,62	13,80
Verde	promedio	1,65	1,67
	desv. st.	0,49	0,43
	c.v. (%)	29,80	25,80

Esfuerzo de compresión en piezas estructurales

Para determinar el esfuerzo de compresión en piezas de tamaño estructural (F_c), es decir 38 x 89 x 2438 mm, se utilizó una máquina de ensayo que provee apoyo lateral para prevenir el pandeo lateral, de acuerdo a lo indicado por la norma ASTM D198-84 (1989).

La carga se aplicó usando una bomba manual hidráulica, que permite un adecuado grado de control sobre la velocidad de aplicación de carga. La carga aplicada fue medida por dos celdas de carga; una incorporada al plato de carga y la otra al plato de reacción en el otro extremo de la pieza. El uso de dos celdas de carga proporciona un buen elemento de control para el caso en que se produzca pandeo, si las fuerzas medidas por ambas celdas de cargas son significativamente diferentes, esto significa que la carga aplicada en un extremo no es la misma que la recibida en el otro, por lo tanto existe la posibilidad de pandeo debido a que las cargas no están alineadas. Los resultados de ensayos en los cuales ocurra pandeo, tenderán a ser conservativos si es que el esfuerzo máximo de compresión es calculado usando la máxima fuerza recibida en la celda de carga de reacción.

La carga fue aplicada a una velocidad constante de acuerdo a la cláusula 25.3 de la norma ASTM D198-84, para alcanzar la carga de falla en aproximadamente 10 minutos, pero no menos de 5 ni más de 20 minutos.

El esfuerzo máximo de compresión para piezas de tamaño estructural fue calculada de acuerdo a la siguiente fórmula :

$$F_c = \frac{P}{A}$$

donde :

- F_c = esfuerzo máximo de compresión (MPa)
- P = carga máxima (N)
- A = sección transversal de la pieza de madera (mm²)

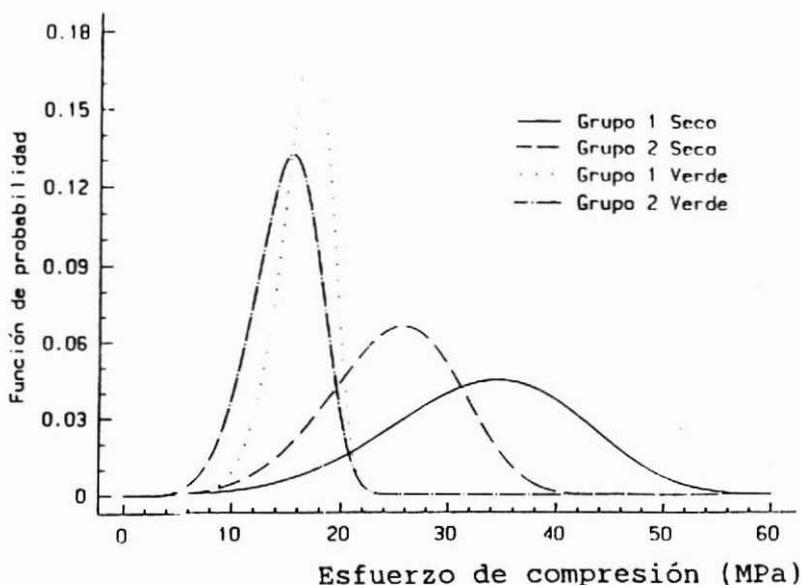
La tabla 5 muestra el esfuerzo máximo de compresión, el promedio, desviación standard, coeficiente de variación y percentil del 5%, para cada combinación de grupo y contenido de humedad.

Tabla 5. Resultados de ensayos de compresión

Condición		Fc grupo 1	Fc grupo 2
Seco	promedio	33,38	24,74
	desv. st.	8,86	5,75
	c.v. (%)	26,50	23,20
	5th	18,81	15,27
Verde	promedio	16,44	14,72
	desv. st.	2,12	3,02
	c.v. (%)	12,90	20,50
	5th	12,95	9,76

Los resultados de los ensayos de compresión en piezas estructurales fueron ajustados usando la distribución biparamétrica de Weibull, obteniéndose la curva de distribución de la figura 3.

Figura 3. Esfuerzo de compresión en piezas de tamaño estructural.



Esfuerzo de compresión en probetas pequeñas libres de defectos.

Dos probetas libres de defectos de 25 x 25 x 100 mm fueron extraídas de la zona cercana a la cual se produjo la ruptura, estas probetas pequeñas fueron posteriormente ensayadas en compresión paralela a la fibra en una máquina universal de ensayo de acuerdo a las cláusulas 255 a 257 de la norma ASTM D 143-83 (1989).

El esfuerzo de compresión de las probetas libres de defectos (f_c) se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula :

$$f_c = \frac{p}{a}$$

donde :

- f_c = esfuerzo máximo de compresión de la probeta (MPa)
- p = carga máxima (N)
- a = sección transversal de la probeta (mm²)

La tabla 6 indica para las probetas libres de defectos, el esfuerzo máximo de compresión, promedio, desviación standard, coeficiente de variación y percentil del 5% correspondiente a cada combinación contenido de humedad y grupo.

Tabla 6. Resultados de ensayos de compresión en probetas libres de defectos (MPa)

Condición		fc grupo 1	fc grupo 2
Seco	promedio	53,42	46,84
	desv. st.	6,70	9,08
	c.v. (%)	12,50	19,30
	5th	42,38	31,89
Verde	promedio	16,12	17,79
	desv. st.	2,31	2,80
	c.v. (%)	14,30	15,70
	5th	12,32	13,18

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Mediciones del MOE

De los resultados obtenidos en las mediciones del MOE_{sw} y del MOE_{TV} , se puede concluir que a pesar de que en ambos casos las ondas viajan de diferentes formas

a través de la pieza de madera, la máxima diferencia en los resultados considerando los valores promedio entre MOE_{sw} y MOE_{TV} es sólo 4% en piezas secas, y 11.6% en piezas verdes. Las figuras 4 y 5 muestran para los grupos 1 y 2, respectivamente, comparaciones entre los valores en estado seco del MOE usando vibración transversal y longitudinal. Estas curvas han sido ajustadas a la distribución biparamétrica de Weibull.

Figura 4. Frecuencia Acumulada MOE_{sw} vs MOE_{tv} para grupo 1, seco.

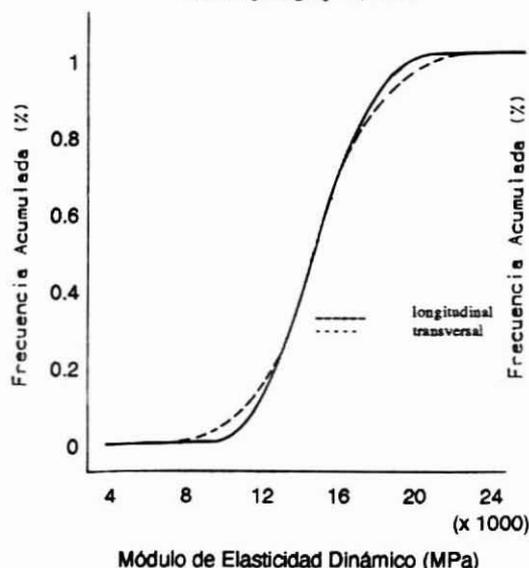
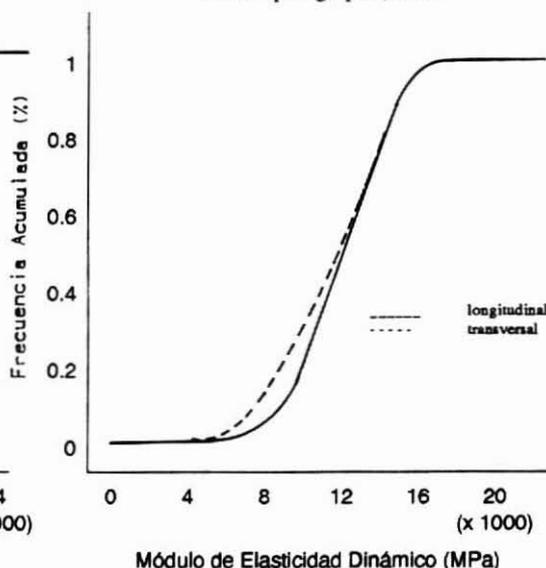


Figura 5. Frecuencia Acumulada MOE_{sw} vs MOE_{tv} para grupo 2, seco.



El análisis de regresión lineal entre MOE_{sw} y MOE_{TV} mostró que en piezas secas, estas propiedades están altamente correlacionadas, obteniéndose valores del coeficiente de correlación $r=0.937$ para el grupo 1 y $r=0.927$ para el grupo 2. Sin embargo, en piezas verdes los valores de r fueron 0.780 y 0.475 para los grupos 1 y 2, respectivamente, de lo que se postula que altos contenidos de humedad afectan de manera diferente a la transmisión de ondas transversales y longitudinales.

La relación entre la densidad al contenido de humedad de ensayo y el MOE (ambos tv y sw) se analizó también usando regresión lineal. Se encontró que para piezas secas, es posible predecir el MOE con una buena precisión usando dicha densidad como parámetro estimador. Sin embargo, esto no es aplicable a piezas en estado verde, donde se obtuvo bajas correlaciones entre MOE y densidad de ensayo.

La tabla 7 muestra los coeficientes de correlación (valores r) entre MOE_{sw} , MOE_{TV} y densidad.

Tabla 7. Correlaciones entre MOE y densidad de ensayo.

Condición	Ecuación	r
Seco	$MOE_{SW1} = 260,2 + 0,014 \times \text{Dens 1}$	0,66
	$MOE_{SW2} = 306,5 + 0,012 \times \text{Dens 2}$	0,69
	$MOE_{TV1} = 268,5 + 0,013 \times \text{Dens 1}$	0,72
	$MOE_{TV2} = 315,4 + 0,011 \times \text{Dens 2}$	0,72
Verde	$MOE_{SW1} = 365,4 + 0,017 \times \text{Dens 1}$	0,22
	$MOE_{SW2} = 281,5 + 0,023 \times \text{Dens 2}$	0,63
	$MOE_{TV1} = 619,6 - 4E-3 \times \text{Dens 1}$	-0,06
	$MOE_{TV1} = 405,2 + 0,011 \times \text{Dens 2}$	0,43
Nota : los subíndices numéricos denotan grupos 1 o 2.		

Esfuerzo máximo de compresión

Los resultados de los ensayos para determinar el esfuerzo máximo de compresión se entregan en la tabla 5. De acuerdo a estos resultados se pudo confirmar experimentalmente que mientras mejor es el grado de la madera, más alta es su tensión de compresión, y la madera seca presenta una mayor resistencia a la compresión paralela que la verde.

Durante el desarrollo de los ensayos se pudo confirmar que la mayoría de las piezas fallaron en un nudo o debido a la presencia de este. De hecho el 85.4% de las piezas secas y el 71.4% de las piezas verdes fallaron debido a lo anterior, sin embargo, las probetas pequeñas debido a que carecen de defectos fallaron en compresión pura. Esto significa, como fue establecido previamente por Madsen (1988), que las probetas pequeñas libres de defectos y las de tamaño estructural tienen modos de falla totalmente diferentes en compresión paralela a la fibra, por lo tanto deben ser consideradas dos materiales diferentes. Para apoyar (o rechazar) esta teoría se realizaron correlaciones estadísticas entre f_c y F_c , las que confirmaron que no se puede determinar confiablemente el esfuerzo máximo de compresión de piezas en tamaño estructural, basado en ensayos de probetas pequeñas libres de defectos (ver tabla 8).

También se realizaron análisis entre el esfuerzo máximo de compresión, en piezas de tamaño estructural, y la densidad de ensayo, el MOE_{sw} y el MOE_{TV} respectivamente, sin embargo, y según se postula, debido a la misma razón los coeficientes de correlación fueron muy bajos como para poder concluir confiablemente alguna relación entre estos parámetros.

Tabla 8. Relaciones entre Fc y fc.

Condición	Parámetros	Coef. de correl.
Seco	Fc1 vs fc1	$r = 0,192$
	Fc2 vs fc2	$r = 0,248$
Verde	Fc1 vs fc1	$r = 0,126$
	Fc2 vs fc2	$r = 0,377$

CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones se pueden deducir del ensayo de piezas de spruce - pine - fir de 38 x 89 mm proveniente del Noreste Canadiense.

1.- En ensayos de compresión el 85% de las piezas en estado seco y el 70% de aquellas en estado verde fallaron en un nudo o debido a la presencia de un nudo. Esto sugiere que el defecto más importante a considerar cuando una pieza va a trabajar sometida a esfuerzos de compresión paralela a la fibra son los nudos.

2.- El percentil del 5% en la resistencia de compresión para piezas estructurales en estado verde, está entre un 45% y un 56% del mismo parámetro para piezas ensayadas a un 8% de contenido de humedad.

3.- A la luz de los resultados obtenidos en este estudio, se sugiere que los valores de resistencia para spruce - pine - fir sean determinados en ensayos de piezas de tamaño estructural, y no basándose en los valores de probetas libres de defectos, a los que se les aplica posteriormente factores de corrección.

4.- Para disminuir la posibilidad de error en futuros ensayos de compresión, se sugiere se usen celdas de carga que midan la carga a ambos extremos de la pieza, tal

como fue hecho en este estudio. Esto permitirá detectar errores inmediatamente durante el proceso de ensayo y tomar las medidas correctivas pertinentes.

5.- Se estima necesario realizar estudios conducentes a determinar la influencia del largo de las piezas en la tensión de compresión paralela de spruce - pine - fir, a fin de verificar la existencia de este efecto reportado últimamente por algunos investigadores.

6.- Posteriores estudios debieran ser realizados a fin de verificar en un mayor rango de especies, la relación entre los valores de módulo de elasticidad obtenidos usando ondas longitudinales y transversales.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo financiero del **International Development Research Centre**, Ottawa, Canadá, apoyo que es gratamente reconocido. El autor desea expresar también sus agradecimientos a los **Drs. I. Smith y Y.H. Chui** de la Universidad de New Brunswick, Canadá por su valioso apoyo durante el desarrollo de este estudio.

BIBLIOGRAFIA

American Society for Testing and Material. ASTM D143-83 "Small Clear Specimens of Timber", 1989.

American Society for Testing and Material. ASTM D198-84 "Static Tests of Timbers in Structural Sizes", 1989.

American Society for Testing and Material. ASTM D245-81 "Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber", 1989.

Bodig J. and Jayne B. A. "Mechanics of Wood and Wood Composites". Van Nostrand Reinhold Co. Inc., New York, USA, 1982.

Chui Y. H. "Vibration Testing of Wood and Wooden Structures-Practical Difficulties and Possible sources of error". Proceedings of the 7th Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Washington State University, 1989.

Chui Y. H. and Smith I. "Quantifying Damping in Structural Timber Components". Proceedings of the Second Pacific Timber Engineering Conference 1989a : 57-60. Auckland, New Zealand.

Chui Y. H. and Smith I. "Influence of Rotatory Inertia, Shear Deformation and Support Condition on Natural Frequencies of Wooden Beams". Paper accepted for publication in Wood Science and Technology, 1989b.

Jayne B. A. "Vibrational Properties of Wood as Indices of Quality". Forest Products Journal Vol. 9 N° 11. Nov. 1959.

Iam F. "Summary Testing Procedures Report for Lumber Properties in Grade Testing Program". Report Prepared for Canadian Wood Council. Project 5443033. Forintek Canada Corporation, 1987.

Madsen B. "New Opportunities for Improved Timber Engineering" Department of Civil Engineering, University of British Columbia Vancouver, B. C. Canada, 1988.

Miller D. G. and Tardif Y. "Development of a Vibration Grader and Comparison of Vibration Grading With Visual and Mechanical Grading". Forestry Branch, Dept. of Forestry and Rural Development, Departmental Publication N° 1208, 1967.

National Lumber Grades Authority. "Standard Grading Rules for Canadian Lumber", 1987.

Orosz I. "Relationships Between Transverse Free Vibration E and Other Properties as effected by Knots". Forest Products journal Vol. 27 N° 1:23-27, 1977.

Pellerin R. F. "A Vibrational Approach to Nondestructive Testing of Structural Lumber". Forest Products Journal Vol. 15 N° 3:93-101, 1965.