

NOTA TÉCNICA

EFECTO DE LOS NUDOS SOBRE LA RESISTENCIA Y RIGIDEZ EN FLEXIÓN DE LA MADERA DE PINO

Raymundo Dávalos Sotelo¹ y Roberto Limón Godina¹

RESUMEN

En este trabajo se evalúa la capacidad de varios parámetros como la razón de área de nudos (RAN), la densidad básica (D_b) y el módulo de elasticidad (MOE) para predecir la resistencia en flexión de la madera del género *Pinus* de Durango, México. El estudio se efectuó sobre una muestra de 17 piezas de 50 × 50 × 760 mm, proporcionadas por una empresa local. Los resultados de los ensayos de flexión estática se ajustaron a un contenido de humedad (CH) de 12%. Se determinó que la densidad básica y la razón de área nudosa son semejantes en cuanto a su capacidad para estimar el módulo de ruptura (MOR). La correlación estadística mejora, sensiblemente, si se mide el esfuerzo en la zona donde se ubica el mayor defecto. La opción sobresaliente para el caso de la resistencia en flexión es una ecuación derivada de un análisis de regresión lineal múltiple que involucra al MOR como variable dependiente y a la densidad básica, a la RAN y al MOE como variables independientes. Puesto que al incluir el módulo elástico se incrementa la correlación, se puede inferir que para objeto de clasificación estructural de la madera de pinos mexicanos, un sistema combinado visual-mecánico parece ser el mejor método.

Palabras clave: Contenido de humedad, densidad, módulo de elasticidad, pinos mexicanos, razón de área nudosa, resistencia en flexión.

Fecha de recepción: 09 de octubre de 2008.

Fecha de aceptación: 16 de octubre de 2009.

ABSTRACT

This study was conducted to establish the influence of several parameters such as the knot area ratio (KAR), the basic density or specific gravity (SG) and the modulus of elasticity (MOE) on the bending properties of a sample of 17 pieces

¹ Instituto de Ecología, A. C. Correo-e: raymundo.davalos@inecol.edu.mx

of Durango pine wood supplied by a local company. Bending strength (MOR) and modulus of elasticity test results on 50 × 50 × 760 mm specimens are presented in this paper. Test results were adjusted to (MC) of 12%. The test results indicate that both the basic density and the knot area ratio have similar ability to predict bending strength and thus, both have similar potential to develop grading rules that could be reasonably applied to structural pine wood. The statistical correlation improves if the stress is measured in the section where the largest knot is present. The prediction model improves substantially if in addition to KAR, the specific gravity is included in the regression equation and, even better results are obtained if modulus of elasticity is also included in a multiple regression equation. This suggests that a combination visual-mechanical grading method might be the best option for grading Mexican pine wood.

Key words: Moisture content, specific gravity, modulus of elasticity, Mexican pine, knot area ratio, bending strength.

Es bien sabido que los nudos tienen un efecto significativo sobre la resistencia de la madera, el cual es más notorio en las coníferas debido a su forma de crecimiento pues, en condiciones naturales, su tronco presenta gran cantidad de ramas que al convertirse en madera se manifiestan como nudos.

El tema lo han abordado muchos autores en diferentes países, entre ellos: Cown *et al.* (2004), Gaunt (2004), Karsulovic y Cisternas (1991), Lam *et al.* (2004), Lam *et al.* (2005) y Mackenzie *et al.* (2005). En México, no existe información publicada sobre la repercusión de los nudos en la resistencia y rigidez de la madera de pino. Echenique-Manrique *et al.* (1987) hicieron una amplia investigación que en su primera etapa condujo a la elaboración de una norma de clasificación visual para madera de pino de usos estructurales (DGN, 1985; Ordóñez y Dávalos, 1985) y posteriormente a la generación de un reglamento de construcciones para estructuras de madera (GDF, 2004).

Dada la influencia que los nudos ejercen en la resistencia, las reglas de clasificación de varios países se basan en el principio de la razón de área nudosa (RAN), que se define como la razón del área de un nudo o grupo de nudos proyectada sobre la sección transversal de una pieza. Las limitaciones a los tamaños de los nudos se fundamentan en este concepto. La filosofía de dichas reglas es que las clases estructurales de la madera se establecen a partir de las características que reducen la resistencia, tales como los nudos. En la Figura 1 se muestra un esquema de cómo se desarrollan los nudos en la sección transversal de un tronco.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad de la razón de área de nudos, la densidad y el módulo de elasticidad para predecir la resistencia en flexión de la madera de pino.

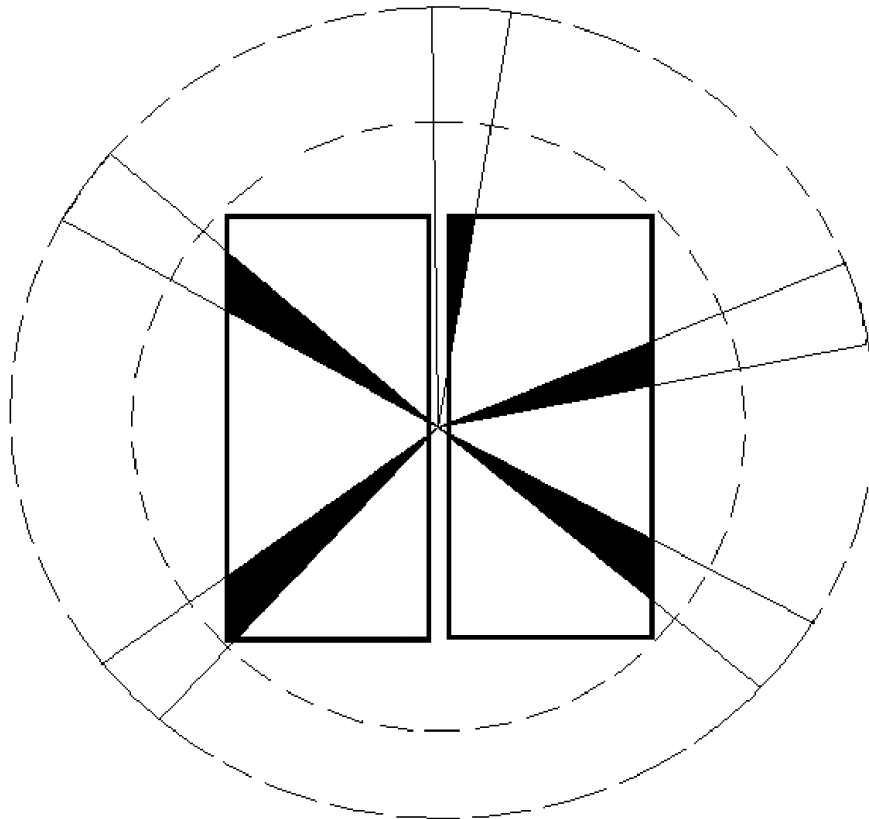


Figura 1. Representación esquemática de los nudos en la sección transversal del fuste de un árbol.

El estudio se llevó a cabo con una muestra de 17 piezas de madera de pino de sección transversal cuadrada de $50 \times 50 \times 760$ mm cortada longitudinal, radial y tangencialmente. Las muestras fueron probadas en una máquina universal Instron de 300 kN de capacidad. Las probetas se trabajaron en flexión estática bajo condiciones secas al aire libre con un contenido de humedad cercano al 12%, con el procedimiento descrito en las normas ASTM D 143 (2000) y los valores obtenidos se ajustaron a un contenido de humedad uniforme de 12%, de acuerdo con el método de la norma ASTM D 29-15 (2003). En cada ensayo se determinó el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE). Para predecir la resistencia de las piezas se verificó la correlación entre el MOR y los parámetros densidad básica, RAN y MOE.

La razón de área nudosa (RAN) se obtuvo a partir de un formato de registro para cada pieza, en el que se dibujó a escala su sección transversal; además de, las proyecciones de las nudosidades comprendidas en un tramo de longitud menor o igual al ancho de la pieza. La RAN se calculó como el porcentaje de área nudosa proyectada en la superficie de la sección transversal de la tabla, con respecto al área de la sección transversal mediante la ecuación 1.

$$RAN = \frac{\text{Superficie nudosa}}{\text{Superficie total}} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

El procedimiento para Evaluar la RAN incluye los tres pasos que a continuación se describen.

1. Se selecciona la sección de la pieza que presenta el mayor defecto que reduzca la resistencia de la madera, si se ensayara en flexión. Para precisar el mayor defecto, se debe considerar que en tal sección se sumará el área de los nudos que no disten unos de otros en el largo de la pieza una distancia superior al ancho de la misma. Este concepto es el que se utiliza para las agrupaciones nudosas en algunas normas extranjeras, como la norma japonesa (MAFF, 1994), la de Canadá y los Estados Unidos de América (NLGA, 2005).

2. Se delimita la proyección del área de los nudos en una sección transversal de la pieza de madera aserrada y se estima el área que ocupan; ver ejemplo en la Figura 2. Para definir la razón del área proyectada de un nudo con respecto al área total de una sección transversal específica, se infiere la dirección y forma del nudo en el interior de la pieza; esto es, se debe ubicar la posición del centro del árbol, sitio donde se originan los nudos.

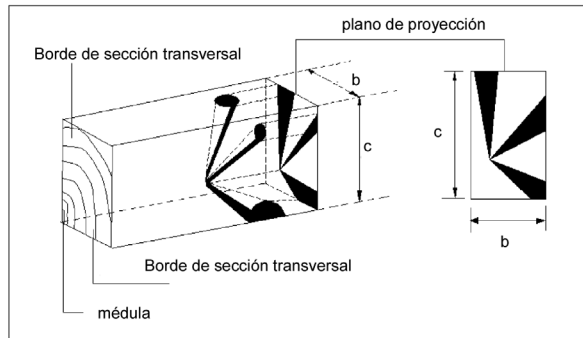


Figura 2. Proyección de nudos en la sección transversal de una pieza de madera aserrada.

3. Una vez que se tienen todos los nudos identificados y ubicados en la sección transversal, se realizan las proyecciones. Es muy importante tener claro cómo se desarrollan dichas estructuras. La Figura 3 ejemplifica la medición de la RAN.

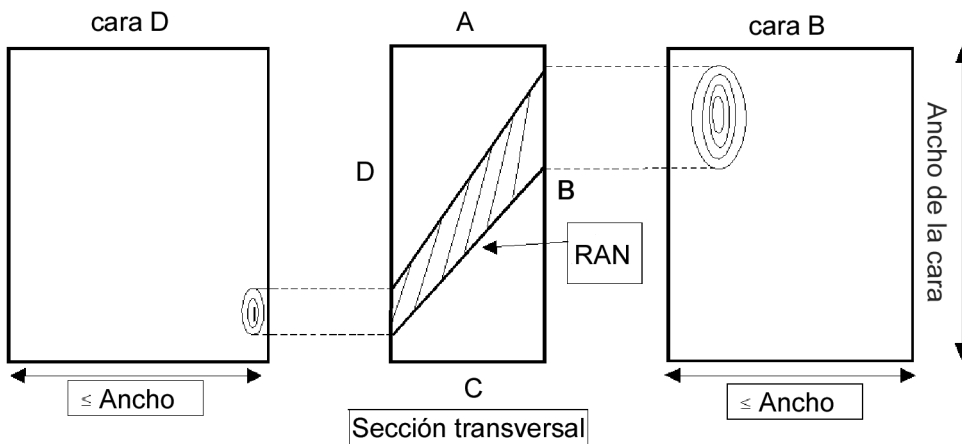


Figura 3. Principio de medición de la razón de área de nudos RAN.

La relación estadística entre las variables de interés se estableció con un análisis de regresión simple. Las ecuaciones generadas se presentan en el Cuadro 1, conjuntamente con los valores del coeficiente de determinación R^2 para cada expresión, las cuales corresponden a un ajuste de una línea recta por la técnica de mínimos cuadrados.

Es pertinente señalar que la resistencia y rigidez en flexión de la madera de pino está inversamente correlacionada con el área proporcional de nudos (RAN), como se describe en este trabajo. La resistencia es directamente proporcional a la densidad básica D_b y a la rigidez, representada por el MOE. La densidad básica D_b y la RAN son semejantes en cuanto a su capacidad de predecir el módulo de ruptura, como se deduce del valor de R^2 . La correlación mejora si el esfuerzo se mide en la zona del máximo esfuerzo (EsfRAN). Los resultados anteriores se comparan de manera favorable con los registrados por Gaunt (2004), quien calculó un coeficiente de determinación R^2 de 0.36 para la relación RAN-MOR.

La predicción de la rigidez con la RAN no es tan buena como se indica en el Cuadro 1, con un menor valor de R^2 para la ecuación de regresión entre MOE y RAN; aunque, también es superior al estimado por Gaunt (2004) (0.15).

Cuadro 1. Resultados de los análisis de regresión.

Variables de interés*	Ecuación de regresión	Coefficiente de determinación R^2
Densidad básica (D_b) y MOR	$MOR = 182.41D_b - 22.82$	0.42
RAN y MOR	$MOR = - 0.91RAN + 63.97$	0.41
RAN y esfuerzo en la zona del nudo máximo (EsfRAN)	$EsfRAN = - 1.43RAN + 60.34$	0.61
RAN y MOE	$MOE = 0.12RAN + 8.77$	0.39
MOE y MOR	$MOR = 6.65MOE + 4.71$	0.84

*MOR, MOE y EsfRAN en MPa.

La mejor opción para estimar la resistencia en flexión es una expresión derivada de un análisis de regresión lineal múltiple que involucra al MOR como variable dependiente y a la densidad, la RAN y al MOE como variables independientes. El valor de R^2 en este caso es de 0.885:

$$MOR = 67.35D_b - 0.124RAN + 0.00537MOE \dots\dots\dots (2)$$

Conclusiones que coinciden con las presentadas por Karsulovic y Cisternas (1991).

Las reglas de clasificación basadas en el concepto de Razón de Área Nudosa (RAN) pueden usarse como fundamento para establecer clases de madera estructural de pino con un conjunto de valores de diseño razonable. Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Madera del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (GDF, 2004) parten de este concepto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la empresa La Reforma, S. A. de C. V. por haber permitido emplear los datos de las pruebas para la presente publicación. Al

Sr. Ricardo López Contreras quien colaboró con la manufactura de los especímenes de prueba; los pasantes de Ing. Forestal Salvador Iván Hernández Ruiz y Daniel Martínez Casas por haber auxiliado en la parte experimental y con el diseño de las figuras.

REFERENCIAS

- American Society for Testing Materials (ASTM). 2000. Standard test methods for testing small clear specimens of timber. ASTM D143 - 2000. Vol. 04-09. Philadelphia, PA, USA. 31 p.
- American Society for Testing Materials (ASTM). 2003. Standard practice for evaluating allowable properties for grades of structural lumber. ASTM D2915-90. Vol. 04-09. Philadelphia, PA, USA. 13 p.
- Cown, D. J., R. D. Ball and M. J. Riddell M. 2004. Wood density and microfibril angle in 10 *Pinus radiata* clones: distribution and influence on product performance. *New Zealand Journal of Forestry Science* 34(3): 293-315.
- Dirección General de Normas (DGN). 1985. Norma Mexicana NMX-C-239-1985. Calificación y clasificación de madera de pino para uso estructural. Secretaría de Gobernación. México, D. F. México. 20 p.
- Echenique-Manrique, R., R. Dávalos-Sotelo y F. Robles Fernández-V. 1987. Calificación y clasificación de la madera de pino para usos estructurales (Timber Grading Mexico), Fase III. International Development Research Center. Ottawa, Canadá. 60 p.
- Gaunt, D. 2004. Upcoming changes to structural timber. *New Zealand Timber Design Journal* 1(13): 19-25.
- Gobierno del Distrito Federal (GDF). 2004. Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Diseño y Construcción de Estructuras de Madera. México, D. F. México. 41 p.
- Karsulovic C., J. T. y A. G. Cisternas. 1991. Predicción del módulo de ruptura en madera estructural de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) mediante razones de resistencia y de área nudosa. *Revista de Ciencias Forestales* 7(1-2):47-57.
- Lam, F., J. D. Barrett and S. Nakajima. 2004. Influence of knot area ratio based grading rules on the engineering properties of Hem-fir used in Japanese post and beam housing. *Wood Science and Technology*. 38(2): 83-92.
- Lam, F., J. D. Barrett and S. Nakajima. 2005. Influence of knot area ratio on the bending strength of Canadian Douglas fir timber used in Japanese post and beam housing. *Journal of Wood Science* 51(1): 18-25.
- Mackenzie, R. K. T., R. S. Smith and C.A. Fairfield. 2005. New directions for NDT in forestry. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 47(7): 416-420.

- Ministry of Agriculture, Forest and Fisheries (MAFF). 1994. Japanese agricultural standard for structural softwood lumber. JAS 1083. Tokyo, Japan. 30 p.
- National Lumber Grades Authority (NLGA). 2005. Standard Grading Rules for Canadian Lumber. NLGA. New Westminster, BC. Canada. 210 p.
- Ordóñez C., V. R. y R. Dávalos S. 1985. Manual de clasificación visual para madera estructural de pino. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Nota Técnica 12. Xalapa, Ver. México. 24 p.