

## ESFUERZOS DE CORTE Y RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN EL FRESADO DE PINO RADIATA Y SU RELACION CON EMISION ACUSTICA

### CUTTING FORCES AND SURFACE ROUGHNESS IN RADIATA PINE ROUTING AND ITS RELATIONSHIP WITH ACOUSTIC EMISSION

*M. Vega<sup>1</sup>, A. Aguilera<sup>2</sup>, P.J. Méausoone<sup>3</sup>.*

#### RESUMEN

Chile produce más de 400 productos secundarios de pino radiata que en casi su totalidad se exportan. Estas exportaciones han ido aumentando continua y significativamente en los últimos años, demostrando lo idóneo de esta especie para producir productos secundarios de madera. Sin embargo muy pocos estudios se han realizado en procesos secundarios, como es el caso del moldurado, destinados a determinar las relaciones entre la energía de corte y la calidad superficial resultante.

El propósito de este estudio es investigar para determinadas condiciones de corte (corte periférico 90-0) en pino radiata, las relaciones entre esfuerzos de corte, emisión acústica y la rugosidad superficial resultante del proceso de maquinado.

Los resultados arrojaron que la medición de emisión acústica en el maquinado de pino radiata, está bien correlacionada con los cambios en las condiciones de corte y su rugosidad superficial, obteniéndose mayores niveles de emisión acústica y rugosidad superficial a medida que aumenta el espesor de viruta. Asimismo, los resultados de los esfuerzos de corte son más precisos respecto a la emisión acústica, especialmente en los espesores de viruta pequeños. Ambas mediciones muestran interesantes relaciones entre sí, que permiten concluir que es necesario profundizar más el trabajo en esta línea de investigación para aproximarse a los esfuerzos mediante la medición de emisión acústica.

**Palabras claves:** Pino radiata, esfuerzo de corte, emisión acústica, rugosidad superficial.

#### ABSTRACT

Chile produces more than 400 secondary products of radiata pine that are exported almost entirely. These exports have been increasing continuously and significantly in the last years, pointing at the potential of this species producing secondary products. Nevertheless, very few studies have been realized in secondary processes in order to determine appropriate relationships between cutting energy and surface roughness.

<sup>1</sup>Ingeniero Forestal, Valdivia, Chile. mario.vega.r@gmail.com

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile. aguilera@uach.cl

<sup>3</sup> Université Henri Poincaré – Nancy I, Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois. 27, rue du Merle Blanc – B.P. 1041, 88051 Epinal Cedex 9, France. pierre-jean.meausoone@enstib.uhp-nancy.fr

Autor para correspondencia: aguilera@uach.cl

Recibido : 06 de marzo 2006. Aceptado : 28 de junio 2007

The purpose of this study was to investigate for determined cutting conditions (peripheral cut 90-0) in radiata pine, the relationships between cutting forces, acoustic emission and surface quality.

The experimental results shows that the acoustic emission signals are well correlated with the change of the cutting conditions and with the surface roughness, with increased roughness and acoustic emission signals with higher chip thickness. As regards to the cutting forces, the results are more accurate than acoustic emission, especially in the low levels of chip thickness. Both measurements show interesting relationships among each other that permits to conclude that more intense research on this topic is necessary linking the cuttings forces with measurement of acoustic emission.

**Keywords:** Radiata pine, cutting forces, acoustic emission, surface roughness.

## INTRODUCCION

El pino radiata es la especie más importante que utiliza la industria maderera chilena, con una superficie plantada superior a 1.4 millones de hectáreas, que corresponde al 67.8% del total de superficie de plantaciones en el país. El consumo anual de trozos de pino radiata solo de la industria de aserrío es de unos 15 millones de metros cúbicos, siendo la producción de madera aserrada en Chile de alrededor de 8 millones de m<sup>3</sup> por año, representado en más de 400 productos exportados a 83 países, principalmente EE.UU. Japón, China, México e Italia (INFOR, 2005).

Los productos de mayor importancia después de la pulpa química son la madera aserrada, productos remanufacturados y paneles a base de madera. Dentro de los productos secundarios los más importantes son la madera aserrada seca, molduras, productos laminados; puertas, ventanas, marcos y muebles de madera. Este interesante desarrollo de los productos secundarios de madera de pino radiata chileno; debe acompañarse necesariamente de estudios que permitan determinar las condiciones de corte y consumo de energía adecuadas para lograr altos niveles de producción y de calidad, de acuerdo con el uso final del producto.

Para evaluar diversas condiciones de corte se han empleado diversas técnicas de monitoreo, destacándose según Lemaster *et al.* (2000) los esfuerzos de corte ( $F_c$ ) y emisión acústica (EA).

El esfuerzo de corte es definido por Kivimaa (1950), como la fuerza aplicada sobre el diente que realizará la separación de la viruta de una pieza de madera. Este esfuerzo de corte ( $F_c$ ), se descompone vectorialmente en una fuerza normal ( $F_n$ ) que es perpendicular a la trayectoria de la herramienta y una paralela (tangencial) a la trayectoria principal de la herramienta ( $F_p$ ).

Respecto a la emisión acústica (EA), ASTM (2002) la define como una tipo de fenómeno que genera ondas elásticas transitorias debido a la liberación rápida de energía a partir de fuentes localizadas en el interior del material. Las ondas elásticas se mueven a través del sólido hacia la superficie, donde son detectadas por sensores. Estos sensores son transductores que convierten las ondas mecánicas en ondas eléctricas.

Lemaster *et al.* (1982), indica que estas ondas son posteriormente amplificadas y transmitidas a un osciloscopio, contador, voltímetro, grabador o un analizador de espectros, dependiendo del tipo de señales. El tipo más común de traductor es el de cerámica piezoeléctrica que entrega las señales en volts.

Diversos autores, entre los que destacan, Lemaster *et al.* (1982), Murase (1994), Beggan *et al.* (1999) Cyra y Tanaka (2000) y Lemaster *et al.* (2000), aplican RMS, con el fin de promediar los volts producidos durante los eventos de EA.

En relación a la calidad de productos secundarios de madera, se asocia entre otras características, a la rugosidad superficial del producto. Producir una mayor o menor irregularidad (rugosidad superficial) en la pieza de madera dependerá del uso final que se le dé, sin embargo en términos generales un control efectivo de la rugosidad superficial permite asegurar un ensamblaje correcto de las piezas y determina la aplicación correcta de adhesivos y recubrimientos superficiales (Ratnasingam y Scholz, 2004).

Las superficies resultantes del proceso de maquinado siempre presentan irregularidades. La magnitud de estas irregularidades y formas dependen de variados factores interrelacionados entre sí, sin embargo, éstas se pueden agrupar en tres, según Marian *et al.* (1958) citado por Ritcher *et al.* (1995), son la estructura anatómica, el método de maquinado y las variaciones producidas dentro del proceso de maquinado.

En el caso específico de pino radiata y el estudio de las condiciones de corte, autores como Turner (1999), investigó la relación entre los ángulos de corte y velocidad de avance para el cepillado y moldurado, encontrando que velocidades de avance bajas producían mejores calidades superficiales y que los ángulos de corte y tipo de grano son también importantes factores a considerar en el maquinado de esta madera.

Estudios desarrollados en Chile determinaron que la rugosidad superficial es un parámetro de respuesta en el cepillado del pino radiata (Vega y Aguilera 2004a). Considerando diferentes espesores de viruta y ángulos de inclinación de las fibras se determinó la rugosidad superficial con un método cuantitativo, siendo los resultados coherentes con los de Turner (1999). En ambos estudios se determinó que bajas velocidades de avance producen mejores calidades superficiales, y que esta tenía muy buena relación entre el espesor de viruta y la rugosidad superficial.

Los mismos autores (Vega y Aguilera 2004b) analizaron la relación entre la rugosidad superficial y la energía de corte en el maquinado de pino radiata. Ellos encontraron que la emisión acústica esta bien correlacionada con el espesor de viruta y los ángulos de inclinación de las fibras y la rugosidad superficial resultante. Estos resultados concuerdan con Murasse (1994), donde los cambios en los ángulos de inclinación de la fibra afectan las señales de emisión acústica.

Lemaster *et al.* (1982), asevera que el proceso de maquinado puede ser monitoreado por la medición de los esfuerzos de corte y las señales de emisión acústica. Estas mediciones son útiles en el monitoreo de los efectos causados por el cambio en las condiciones de maquinado. Por otro lado, el autor concluye que la relación entre la emisión acústica y el esfuerzo de corte, posee una correlación baja.

El propósito de este estudio es investigar para determinadas condiciones de corte (corte periférico 90-0) en pino radiata, las relaciones entre esfuerzos de corte, las señales de emisión acústica y la rugosidad superficial resultante del proceso de maquinado.

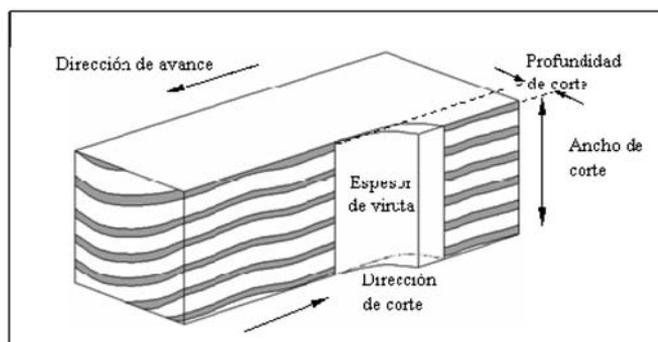
## MATERIAL Y MÉTODOS

Este estudio se llevó a cabo en dos etapas. La primera de ellas se realizó en Chile (Instituto de Tecnología de Productos Forestales, Universidad Austral de Chile) donde en el proceso se midió la emisión acústica (EA) y la rugosidad superficial. La segunda etapa se llevó a cabo en Francia (ENSTIB, Université Henri Poincaré – Nancy I), donde se procesó la misma especie con condiciones similares de corte, pero se monitorearon los esfuerzos de corte ( $F_c$ ).

Para la experiencia en Chile con emisión acústica se empleó una máquina tupí con velocidad de rotación y de alimentación variables. En la medición de EA se empleó un sensor piezo-eléctrico de 1 MHz y una tarjeta de adquisición de datos SEK 3243, para medir la rugosidad superficial se empleó un rugosímetro de contacto tipo stylus modelo Mitutoyo SJ-210, considerándose el parámetro  $R_z$  en el análisis de los datos.

En la experiencia en Francia se utilizó una máquina tupí “Chambon T 232”, con un control de la velocidad de rotación del cabezal portacuchillo vía variador de frecuencia. Además se empleó un portaprobetas con velocidad de avance programable mediante un eje magnético, finalmente para medir los esfuerzos de corte se usó un dinamómetro Kistler.

Para ambas etapas se empleó madera de *Pinus radiata* originaria de la Provincia de Valdivia (Chile), con una densidad básica promedio de  $0.46 \text{ gr/cm}^3$ , y con un contenido de humedad de 11.5%. Las probetas estaban libres de defectos como; pudrición, resina, nudos, etc., y sus dimensiones fueron 150 mm de largo, 50 mm de ancho y 35 mm de espesor (ancho de corte). En su cara de corte poseían 5 - 6 anillos de crecimiento (figura 1).



**Figura 1:** Esquema de la probeta y principales parámetros de corte.

En ambos casos, las probetas fueron maquinadas en oposición con cortes perimetrales y paralelos a la dirección de la fibra, denominados cortes  $90^\circ$ - $0^\circ$ . Los cortes fueron realizados en cabezales de dos cuchillos, con elementos de corte en carburo tungsteno, ángulo de ataque de  $27.5^\circ$  y con una profundidad de corte de 2 mm. Las condiciones de corte para ambos experimentos se exponen en la Tabla 1.

### Determinación del espesor de viruta promedio

En los cortes periféricos el espesor de viruta varía constantemente, por lo que en estos casos es propio hablar de espesor de viruta promedio (Kivimaa, 1950). Para el cálculo de los espesores de viruta promedio ( $e_m$ ), se empleará la metodología empleada por Kivimaa (1950), Koch (1964) y Boucher y Méausoone (2003). Esta metodología consiste en calcular el  $e_m$  considerando la fórmula:

$$e_m = \left( \frac{Vf}{Z * N} \right) * \sqrt{\frac{ap}{D}} \text{ (mm)} \quad (1)$$

Donde:

$e_m$  : espesor de viruta promedio (mm)      N : velocidad de rotación ( $\text{min}^{-1}$ )  
 Vf : velocidad de avance (m/min)      ap : profundidad de corte (mm)  
 Z : número de cuchillos      D : diámetro del cabezal (mm)

De acuerdo con las restricciones de la maquinaria utilizada en Chile se seleccionaron los espesores de viruta descritos en la tabla 1. Los distintos espesores de viruta seleccionados fueron obtenidos al variar las velocidades de rotación y de alimentación pero manteniendo constantes el resto de las variables descritas anteriormente en la fórmula de  $e_m$ .

Para la realización de los experimentos se seleccionaron 24 probetas (de un total de 80 probetas confeccionadas), que poseían simultáneamente los atributos de número de anillos y densidad básica descritas anteriormente. Doce probetas fueron utilizadas para el experimento de EA y rugosidad superficial y doce para el experimento de Fc, considerándose 4 repeticiones para cada experimento.

**Tabla 1:** Condiciones de maquinado

Veloc. alimentación (m/min)	Veloc. rotación (1/min)	Espesor promedio viruta (mm)
4.21	5,640	0.04
4.32	3,779	0.07
4.27	2,955	0.08
8.13	5,635	0.08
8.14	3,777	0.13
8.16	2,965	0.16
10.85	5,640	0.11
10.89	3,779	0.17
10.86	2,975	0.21
21.63	5,633	0.22
21.49	3,779	0.33
21.52	2,963	0.42

### Medición de la Emisión Acústica (EA)

El voltaje obtenido del sensor piezoeléctrico se trabaja según la raíz cuadrática media (RMS), que según ASTM E1316 (2002), rectifica el promedio del tiempo de la señal de EA, medida sobre una escala lineal y expresada en volts, expresándose la EA como Volts RMS.

### Esfuerzos de corte

Los esfuerzos de corte fueron medidos por un dinamómetro piezoeléctrico en los ejes X e Y, el eje X ( $F_n$ ) es paralelo a la dirección de avance y el eje Y ( $F_p$ ) es paralelo al movimiento de los cuchillos. Las señales emitidas por el dinamómetro son enviadas a los amplificadores del tipo Kistler 5001. Estos amplificadores tienen como función transformar las cargas eléctricas recibidas del dinamómetro en voltaje eléctrico. Este voltaje es transformado por la tarjeta H-DAS en esfuerzos para cada eje. Por último, los esfuerzos son filtrados y visualizados mediante el software DADISP, quien entrega los esfuerzos en el eje X e Y.

Con la gráfica entregada por el software DADISP se identificaron los puntos de contacto entre el cuchillo y la madera, determinándose de esta manera los valores promedios de  $F_p$  y  $F_n$ , para cada repetición. Para obtener los esfuerzos de corte total ( $F_c$ ) se calcularon partir de la resultante vectorial de  $F_p$  y  $F_n$  con la fórmula siguiente:

$$F_c = \sqrt{(F_p)^2 + (F_n)^2} \quad (2)$$

## RESULTADOS Y DISCUSION

**Emisión acústica – rugosidad superficial:** El primer experimento con emisión acústica y rugosidad superficial mostró buenas correlaciones con el espesor de viruta (figura 2). A medida que se incrementa el espesor de viruta, la energía de corte expresada como EA muestra un comportamiento directo con un coeficiente de correlación  $r^2$  de 0.84, siendo estos resultados coherentes con la teoría de corte. Similar resultado se obtuvo con el espesor de viruta y su relación con la rugosidad superficial, pero en este caso con un mejor coeficiente de correlación de 0.93.

Estos resultados permiten afirmar que en el pino radiata es posible encontrar buenas relaciones espesor de viruta-condiciones de corte con un nivel de energía corte expresada como EA con un 84% de precisión. La heterogeneidad intrínseca de la madera de pino radiata afecta la dispersión de los niveles de energía de corte.

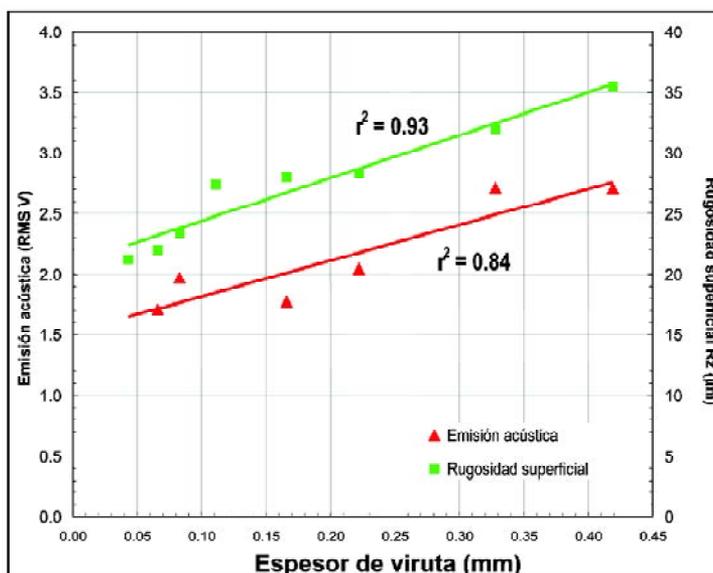
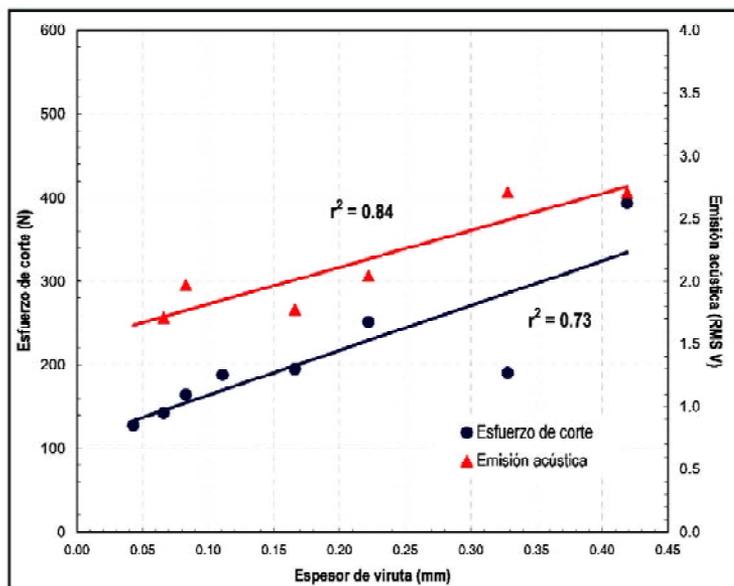


Figura 2: Relación espesor de viruta con emisión acústica y rugosidad superficial.

La segunda serie de experimentos (análisis de los esfuerzos de corte) fue desarrollada en Francia (ENSTIB) con el mismo tipo de madera empleada en Chile. Por las deferencias entre las máquinas utilizadas para ambos experimentos, dio como resultado espesores de viruta muy similares pero no exactamente iguales.

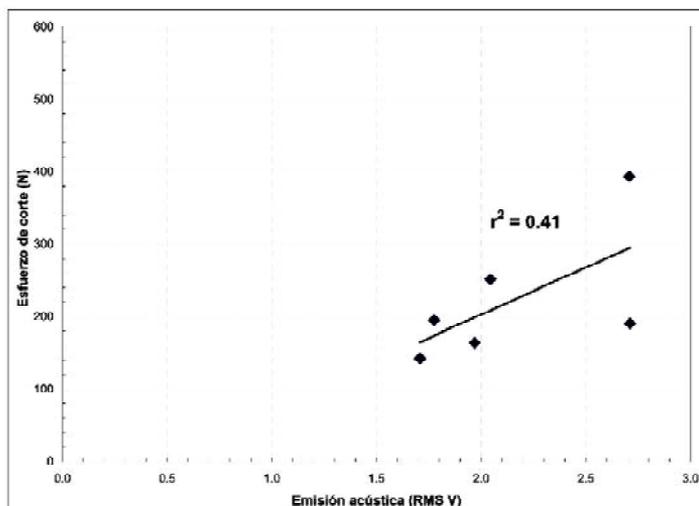
Los resultados de los esfuerzos de corte (y su comparación con la emisión acústica) son expuestos también en la figura 3, mostrando las mismas tendencias que las señales de EA, pero con un  $r^2 = 0.73$ . Esta relación entre el espesor de viruta y los esfuerzos de corte muestran interesantes resultados con una relación muy lineal especialmente en los espesores de viruta pequeños.



**Figura 3:** Relación espesor de viruta con esfuerzos de corte y emisión acústica.

La mayor heterogeneidad de los esfuerzos de corte en los espesores de viruta mayor, tuvo un comportamiento errático si se compara con la tendencia encontrada en los espesores de viruta menores. Esto podría deberse a la velocidad de avance (22 m/min) respecto a las velocidades de rotación y al número de cuchillos participantes en el corte, lo que podría haber afectado a la formación de la viruta. Además de lo anterior se suma la alta heterogeneidad propia del pino radiata, que afectaría la correcta formación de la viruta.

Por lo tanto, es posible concluir que en el pino radiata la evaluación del maquinado mediante la medición de los esfuerzos de corte presenta resultados satisfactorios. Estos resultados poseen mayor precisión en los espesores de viruta pequeños, ya que con espesores de viruta mayores los resultados son más erráticos, por lo cual es necesario continuar profundizando los estudios referidos al tema.



**Figura 4:** Relación emisión acústica y rugosidad superficial.

**Emisión acústica – Esfuerzos de corte:** Se realizó una comparación entre los esfuerzos de corte y la emisión acústica (figura 4), mediante correlación simple, donde es posible explicar en un 41% los esfuerzos de corte con la medición de EA en el maquinado de pino radiata.

Estos resultados concuerdan con Lemaster et al. (1982), donde la relación entre ambos métodos tiene una pobre correlación.

Cada método individualmente permite para un determinado espesor de viruta, muy buenos resultados para la energía de corte en pino radiata, tal como se muestra en la figura 3. Sin embargo tiene una alta dispersión cuando los espesores medios de viruta son grandes, especialmente cuando se mide los esfuerzos de corte producto del maquinado. Al momento de reunir ambos métodos de medición y correlacionarlos, la relación es positiva, sin embargo su  $r^2$  no es el esperado como para entregar una conclusión categórica en la predicción de los esfuerzos de corte en el fresado de pino radiata mediante la medición de la emisión acústica.

## CONCLUSIONES

La medición de emisión acústica en el maquinado de pino radiata está bien correlacionada con los cambios en las condiciones de corte. Sin embargo, es necesario considerar la heterogeneidad propia de esta especie en la dispersión de los datos adquiridos.

Respecto a la rugosidad superficial obtenida después del maquinado, se pudo observar que concuerda con la teoría de corte, ya que aumenta la rugosidad superficial al aumentar el espesor de viruta. Además la rugosidad superficial y la emisión acústica tienen tendencias similares, por lo que se podría pensar en emplear como predictor de la rugosidad superficial a la emisión acústica.

Para el caso de la medición de los esfuerzos de corte, los resultados son más precisos respecto de la emisión acústica, especialmente en los espesores de viruta pequeños, pero con algunos problemas en los espesores mayores. Ambos métodos siguen tendencias similares que permiten concluir que es necesario más trabajo en esta línea de investigación para aproximarse a los esfuerzos mediante la medición de emisión acústica.

## BIBLIOGRAFIA

**American Society for Testing and Materials (ASTM). 2002.** *Standard terminology for nondestructive examinations. E 1316-02.* USA. Annual Book of ASTM Standards. Vol 03.03. pp 661-699.

**Beggan, C.; Woulfe, M.; Young, P.; Byrne, G. 1999.** *Using acoustic emission to predict surface quality. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 15:737-742.

**Boucher, J.; Méuasoone, P. 2003.** *Influence of the moisture content on chips formation in wood milling process (90-0/I).* EN: The 16th International Seminar Wood Machining Seminar. Matsue-Japan. Agosto 24-30. Department of Natural Resources Process Engineering. Shimane. pp 430-438.

**Cyra, G.; Tanaka, C. 2000.** The effects of wood-fiber directions on acoustic emission in routing. *Wood Science and Technology* 34(3):237-252

**INFOR. 2005.** *Estadísticas Forestales 2004, Boletín Estadístico 101.* Instituto Forestal-Ministerio de Agricultura. Chile.

**Koch, P. 1964.** *Wood machining processes.* New York-USA The Ronald Press Company, Yale University. 542 p.

**Kivimaa, E. 1950.** *Cutting force in wood working.* Helsinki-Finland. The State Institute for Technical Research, Finland. 102 p. (Julkaisu 18 Publication)

**Lemaster, R.; Klamecki, B.; Dornfeld, D. 1982.** Analysis of acoustic emission in slow speed wood cutting. *Wood Science* 15(2):150-160.

**Murase, Y. 1994.** *Acoustic emission monitoring in wood machining process.* The 5<sup>th</sup> International Joint Seminar on the Future of Agricultural Science in Japan and Korea. Faculty of Agriculture, Kyushu University, Japan, Oct.17-20. pp 73-84.

**Ratnasingam, J.; Scholz, F. 2004.** Wood sanding processes: An optimization perspective. Kuala Lumpur-Malaysia. Faculty of Forestry, Universiti Putra Malaysia, Fachbereich Holztechnik, Fachhochschule Rosenheim, Germany. 115 p.

**Ritcher, K.; William, C.; Mark, K. 1995.** The effect of surface roughness on the performance of finishes. Part 1. Roughness characterization and stain performance. *Forest Products Journal* 45 (7/8):91-97.

**Turner, J. 1999.** *Cutting angles and feed speed for planer-moulding radiata pine.* Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Wood machining Seminar. Paris, Epinal, Cluny – France. Sept. 12-19. pp 53-63.

**Vega, M.; Aguilera, A. 2004a.** *Determinación de la rugosidad superficial como parámetro de respuesta en el cepillado de madera.* Segundo Congreso Chileno de Ciencias Forestales - Valdivia, noviembre 2004.

**Vega, M.; Aguilera, A. 2004b.** *Caracterización de la rugosidad superficial y de la energía de corte durante el maquinado de Pinus radiata.* Segundo Congreso Chileno de Ciencias Forestales - Valdivia, noviembre 2004.

