

MONITOREO DEL PROCESO DE MAQUINADO DE AROMO AUSTRALIANO (ACACIA MELANOXYLON) CON EMISIÓN ACÚSTICA Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD SUPERFICIAL RESULTANTE

WOOD MACHINING PROCESS MONITORING OF BLACKWOOD (ACACIA MELANOXYLON) WITH ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE AND HIS RELATIONSHIP WITH RESULTING SURFACE ROUGHNESS

Alfredo Aguilera¹, René Zamora²

RESUMEN

Se estudia el maquinado paralelo a la fibra (dirección 90-0) de aromo australiano, utilizando transductor piezo-eléctrico para monitorear los niveles de emisión acústica (EA) generados durante el corte, considerando el tipo de madera (albura y duramen), y además la relación con la rugosidad superficial (Rz) obtenida.

Como resultados se encontró una adecuada relación entre la modificación de las condiciones de maquinado con la emisión acústica, en la cual un incremento de los espesores promedio de viruta se traducen en un mayor consumo energético durante el corte. Asimismo, se encontraron niveles superiores de emisión acústica al cambiar el tipo de madera de albura a duramen. Finalmente, entre rugosidad superficial y emisión acústica se encontró una correlación muy buena.

Palabras clave: Emisión acústica, maquinado, aromo, rugosidad superficial.

ABSTRACT

Wood machining parallel to the grain (90-0 direction) of Blackwood was performed using piezo-electrical transducer to record the acoustic emission (AE) signals generated during the cut process, considering the type of wood (heartwood and sapwood), and the relationship with surface roughness (Rz).

A good relationship it was found between cutting conditions and acoustic emission signals, where an increase of the chip thickness results in a major consumption of cutting energy. Also, it was detected an increase of AE signals with the change of wood type, passing from sapwood to heartwood (increase of density). Finally, a good relationship it was found between surface roughness (Rz) and acoustic emission (AE).

Keywords: Acoustic emission, wood machining, blackwood, surface roughness.

¹Instituto de Tecnología de Productos Forestales, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia. Chile. aguilera@uach.cl

²Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala. renezam@gmail.com

Autor para correspondencia: aguilera@uach.cl

Recibido: 26.04. 2007. Aceptado: 29.10.2007

INTRODUCCIÓN

El aroma australiano (*Acacia melanoxylon* R. Br.) es una especie originaria del noreste de Australia y de Tasmania. Su madera tiene una gran demanda por su color y veta, por su dureza y por la nobleza de los usos finales a la cual se destina, como por ejemplo a la industria de partes y piezas de muebles, siendo por tanto una de las especies consideradas como productoras de madera de calidad.

Kivimaa (1950) y Koch (1964) indican que en la relación entre el espesor de viruta y los esfuerzos de corte para la dirección 90-0, se presentará un incremento gradual de los esfuerzos cuando el espesor de viruta crece, comportándose el trabajo específico de corte de manera inversa.

Aguilera et al. (1999, 2000a, 2000b) analizan la relación existente entre el espesor de viruta y la calidad superficial resultante del proceso de maquinado, encontrándose en esos estudios una buena correlación entre el espesor medio de viruta y la rugosidad superficial generada por el corte. Sin embargo, se encontró una calidad superficial muy buena con un espesor de viruta muy pequeño, lo que implicó un gasto energético elevado, y por otra parte, con un espesor de viruta muy pequeño se tiende a una disminución rápida de la vida útil del elemento de corte.

Murase et al. (1993) realizó mediciones de emisión acústica en el corte de madera viendo el efecto de la velocidad de corte y el ángulo de las fibras para cortes paralelos y perpendiculares a la fibra. Este autor encontró que los niveles de emisión acústica (EA) aumentaban cuando la velocidad de corte era más importante y fundamentalmente que la variación del nivel de EA en el corte perpendicular se relaciona muy bien con la formación de viruta y con la rugosidad superficial de las piezas.

Cyra y Tanaka (2000) investigaron las causas de los cambios en las señales de emisión acústica correspondientes con cambios en la orientación de la fibra. Los autores encontraron que las señales generadas se relacionan muy bien con las características del proceso de corte así como también con la calidad superficial obtenida. Una superficie de terminación degradada genera señales más fuertes y a la inversa con superficies poco degradadas. Así además los autores encontraron que para condiciones de corte dadas, la variación del ángulo de las fibras incide sobre los esfuerzos de corte siguiendo estos la misma tendencia que las señales de EA, siendo posible con la medición de EA determinar el nivel del esfuerzo de corte y asociarlo con la calidad superficial.

El objetivo de este estudio fue el de monitorear el maquinado paralelo a la fibra (dirección 90-0) de aroma australiano, utilizando como parámetro de respuesta a las señales de emisión acústica (EA) generadas durante el corte. Se consideraron como variables el espesor medio de viruta y el tipo de madera. Además se analizó la relación de la emisión acústica con la rugosidad superficial (Rz) obtenida.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se confeccionaron probetas de dimensiones 200 mm de largo, 30 mm de ancho y 50 mm de alto con madera de aroma australiano proveniente de la zona de Valdivia, Región de los Ríos. Todo el material se acondicionó a un contenido de humedad final de 10 %. Asimismo, se seleccionaron probetas provenientes de la zona duraminizada del trozo y de la zona periférica, correspondiente a la albura. Como herramienta se utilizó un cabezal hidrocentrado de diámetro de corte de 162 mm, con 6 cuchillos de acero rápido (HSS) y con un ángulo de ataque de 25°. La máquina fue una tupí de 4 KW de potencia, con velocidades variables de rotación y alimentación (Tabla 1).

Para la medición de la emisión acústica se utilizó un transductor piezo eléctrico conectado a tarjeta SEK 3243 que permite analizar señales de emisión continuas de un canal con una frecuencia de respuesta

superior a 1 MHz. La rugosidad superficial se midió con un rugosímetro de contacto Mitutoyo Sj-201.

De esta manera, el contenido de humedad y la densidad básica de la madera fue controlada en una sub-muestra al momento de confeccionar las probetas, durante el proceso de corte se registró la emisión acústica y la densidad de la madera cortada y posterior al maquinado se midió la rugosidad superficial resultante.

Para las determinaciones del contenido de humedad y de la densidad básica se realizaron los procedimientos indicados en la Norma Chilena NCh176/1 y NCh176/2 respectivamente.

El diseño experimental se basó en la variación de las velocidades de rotación y alimentación, manteniéndose constante la profundidad de corte a 2 mm, con lo cual se determina como principal variable el espesor de viruta y en segundo término, la densidad de la madera. Las variables de respuesta a analizar serán la emisión acústica generada en cada situación de maquinado y la rugosidad superficial.

Por tanto el espesor de viruta en corte ortogonal y paralelo a la fibra para la herramienta que genera una trayectoria de corte de tipo trocoide está definido según Kivimaa (1950) de la siguiente manera:

$$e_m = fz \sqrt{\frac{ap}{D}} \text{ (mm)}$$

Donde: e_m es el espesor medio de viruta (mm); fz es el avance por cuchillo o *bite* (mm); ap es la profundidad de corte (mm) y D es el círculo de corte (mm). El avance por cuchillo es calculado de la siguiente forma:

$$fz = \frac{Vf}{Z * N} \text{ (mm)}$$

Donde: Vf es la velocidad de alimentación (mm/min), Z es el número de cuchillos y N es la velocidad de rotación de la herramienta (1/min).

La Tabla 1 indica las combinaciones de las velocidades de alimentación y de rotación que generan los espesores de viruta a ensayar tanto para albura como duramen, considerando la profundidad de corte, número de cuchillos y diámetro de corte constantes. Para cada una de las condiciones de maquinado indicadas se realizaron cuatro repeticiones.

Tabla 1. Condiciones de maquinado para albura y duramen de aramo australiano.

Velocidad avance Vf (m/min)	Velocidad rotación N (1/min)	Espesor viruta e _m (mm)
4	3,200	0.02
8	3,200	0.05
11	3,200	0.07
4	4,200	0.02
8	4,200	0.04
11	4,200	0.05
4	6,000	0.01
8	6,000	0.03
11	6,000	0.04

De esta manera, el número de probetas ensayadas fueron 9 para albura y 9 para duramen, realizándose 4 repeticiones en cada probeta, generándose un total de 72 adquisiciones de emisión acústica (EA) y de rugosidad superficial (Rz).

El diseño experimental es de tipo 3 x 3 con 4 repeticiones y dos tipos de madera. Se realiza primero test de homogeneidad de varianza y luego análisis de varianza y se determina por medio de prueba F la significancia de las variables sobre los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan los valores de densidad de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*.

Tabla 2. Densidad de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*.

Densidad	Albura (kg/m ³)	Duramen (kg/m ³)	Promedio (kg/m ³)
Básica	538	648	593
Anhidra	676	750	713
Verde	992	1,061	1,026

Los resultados obtenidos de densidad se asemejaron con lo establecido por Haslett (1983) que encontró una densidad básica de 593 kg/m^3 y una verde de $1,040 \text{ kg/m}^3$. No se encontraron valores comparativos para duramen y albura específicamente.

Respecto de la relación entre emisión acústica y espesor de viruta, la figura 1 muestra los resultados de las mediciones para el caso de la madera de albura y duramen en los tres niveles de velocidad de rotación de la herramienta de corte.

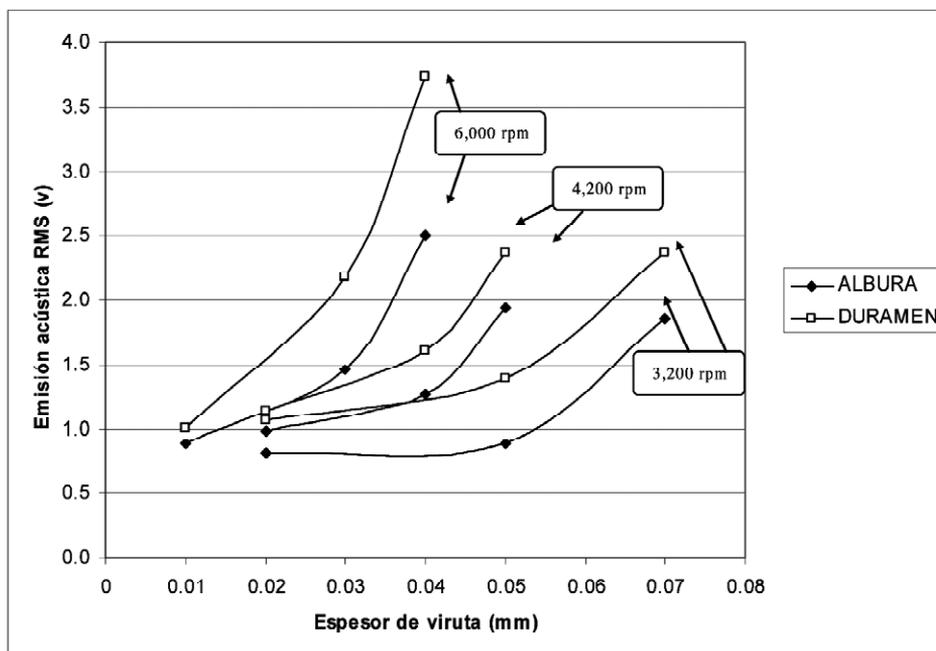


Figura 1. Efecto del espesor de viruta (mm) sobre la emisión acústica RMS (v) para albura y duramen de *Acacia melanoxylon*. Valores promedio agrupados por velocidad de rotación.

Es interesante constatar en esta figura que frente al incremento del espesor de viruta, la energía de corte obtenida como emisión acústica (EA) reacciona de manera positiva, generándose mayores niveles de EA con virutas más gruesas.

Además un cambio de la velocidad de rotación afecta las señales de EA, debiéndose por tanto considerar el comportamiento de la energía dentro de la curva a una velocidad constante y no mezclar todos los puntos. Estos resultados corresponden con los encontrados en un estudio con otra especie (Aguilera et al 2007), donde el sensor piezo-eléctrico es sensible al cambio de frecuencia de rotación de la herramienta de corte.

Se encuentra además, en esta figura, una respuesta adecuada de la emisión acústica frente al cambio del tipo de madera (densidad) en todas las velocidades de rotación ensayadas, en la cual el aumento de densidad refleja un incremento de la energía de corte. Es decir, independientemente de la velocidad de rotación, para un nivel constante del espesor de viruta, es posible detectar el cambio del tipo de madera a través del incremento de la energía de corte (EA), siendo necesario para duramen un mayor nivel de energía para realizar el corte.

Las pruebas estadísticas indicaron para el test de homogeneidad de varianza que el error de la varianza de la variable dependiente es igual a través de los grupos analizados en albura y duramen. Se encontraron diferencias significativas en el análisis de varianza para la variable de respuesta EA en relación con los diferentes niveles de la velocidad de rotación.

La relación entre el espesor medio de viruta (e_m) y la rugosidad superficial (R_z) según tipo de madera, está indicada en la figura 2.

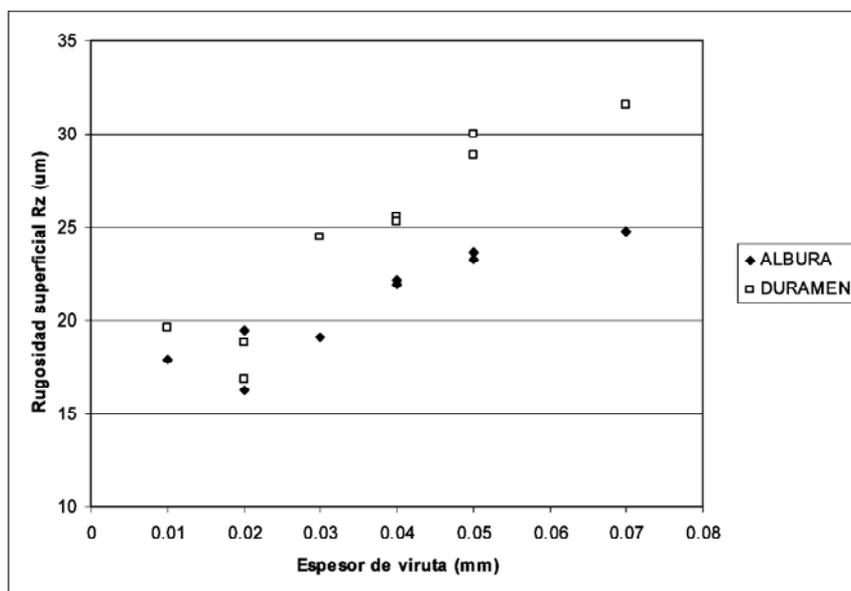


Figura 2. Rugosidad superficial R_z (μm) para albura y duramen de *Acacia melanoxylon*, en relación al cambio del espesor medio de viruta e_m (mm).

Es posible distinguir un incremento sostenido de la rugosidad superficial en la medida que la viruta se hace más espesa, lo cual es esperado y consistente con la teoría del proceso de corte, siendo la superficie resultante cada vez más rugosa cuando la viruta crece, o en otras palabras cuando se incrementa la velocidad de producción o velocidad de avance de la madera.

Asimismo, es interesante observar el efecto de la densidad de la madera sobre la rugosidad superficial, independientemente del espesor de viruta. Se aprecia que para similares condiciones de trabajo, se generará una superficie de mejor calidad en madera de albura. Esto se podría explicar por la menor sollicitación de esfuerzos para realizar el corte en madera de menor densidad (Juan 1992), permitiéndose producir un corte más limpio en este tipo de estructura maquinada. Cabe señalar que durante el proceso de corte, la viruta se presenta en el tipo II, produciendo fallas de compresión lo que asociado al ángulo de ataque genera una superficie de mejor calidad, requiriendo esta falla de compresión más energía para madera más dura, la cual al no estar disponible produciría una superficie más rugosa para el duramen.

Las pruebas estadísticas indicaron para el test de homogeneidad de varianza que el error de la varianza de la variable dependiente es igual a través de los grupos analizados en albura y duramen. Se encontraron diferencias significativas en el análisis de varianza para la variable de respuesta rugosidad superficial en relación con el tipo de madera albura y duramen.

Las figuras 3, 4 y 5 muestran la relación entre las señales de emisión acústica (RMS) y rugosidad superficial (Rz) tanto para albura como duramen, para el caso de 3,200; 4,200 y 6,000 rpm de velocidad de rotación respectivamente.

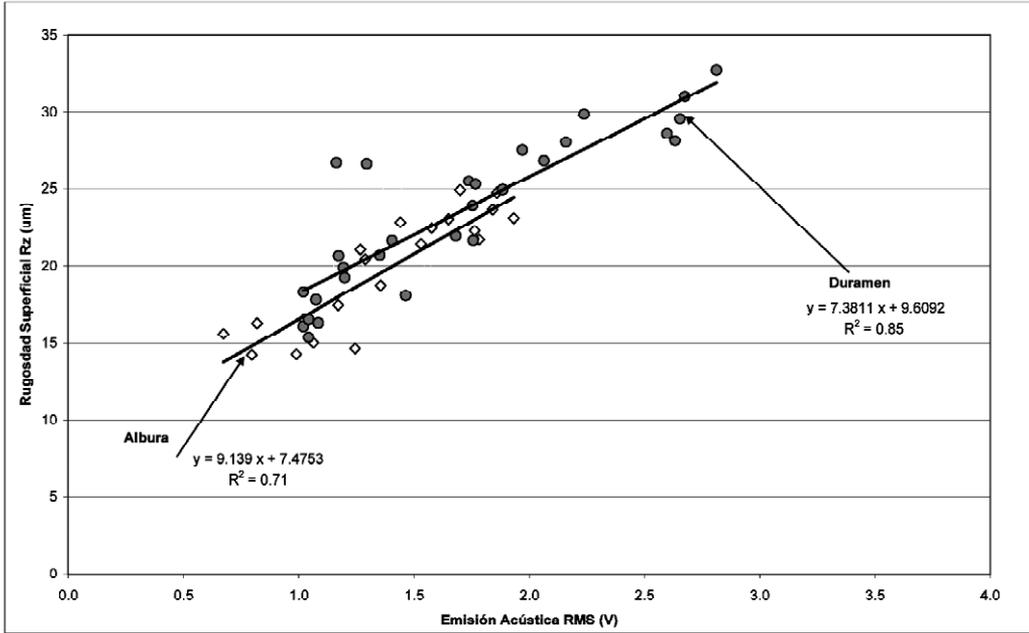


Figura 3. Relación entre emisión acústica y rugosidad superficial para madera de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*, medición a 3,200 rpm.

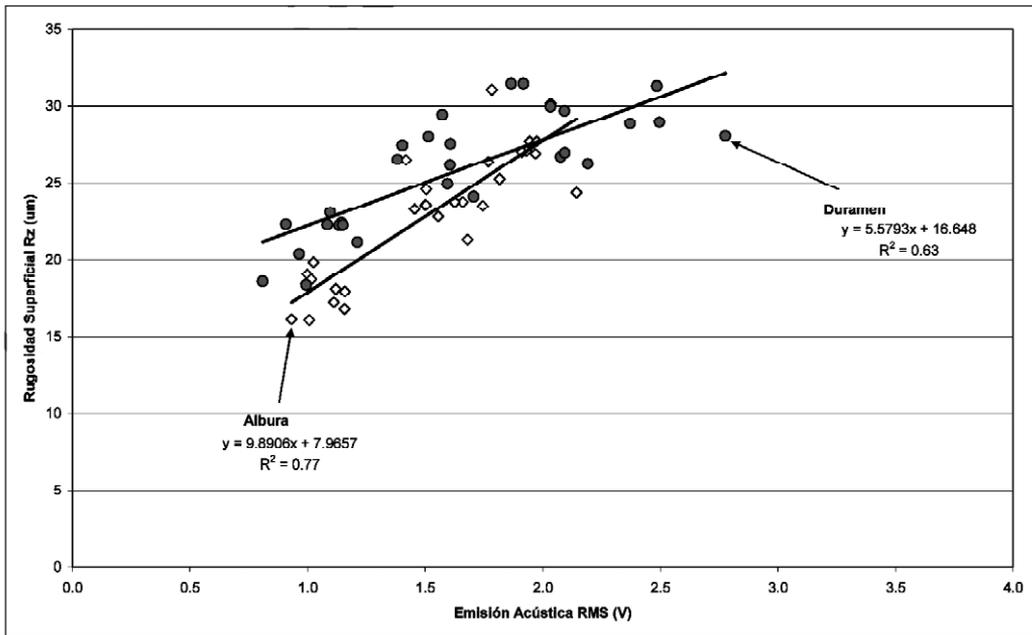


Figura 4. Relación entre emisión acústica y rugosidad superficial para madera de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*, medición a 4,200 rpm.

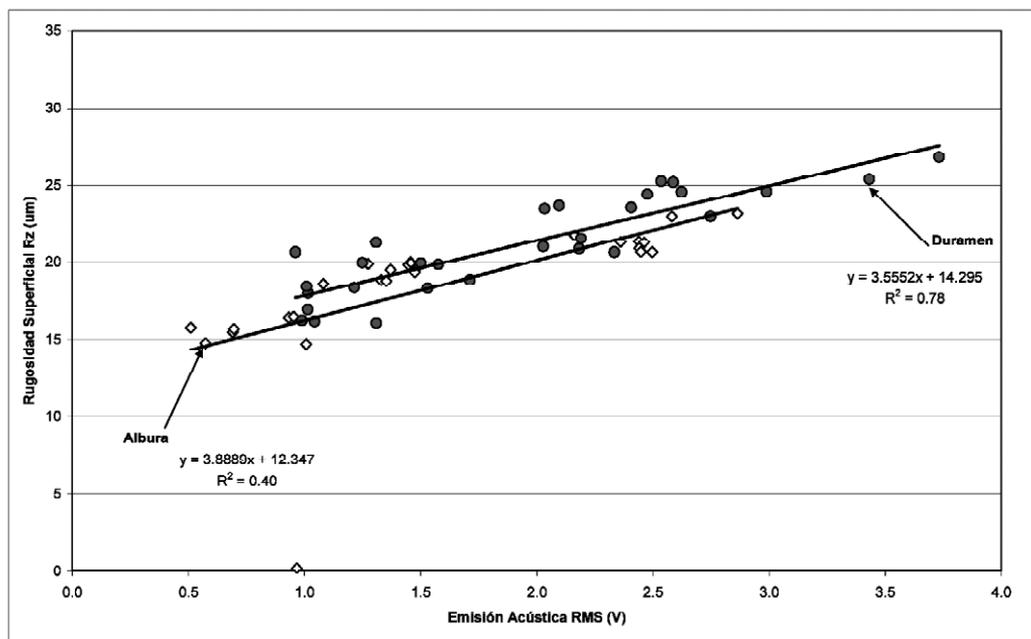


Figura 5. Relación entre emisión acústica y rugosidad superficial para madera de albura y duramen de *Acacia melanoxylon*, medición a 6,000 rpm.

Estas tres figuras muestran un incremento de la rugosidad superficial que está asociado a mayores niveles de emisión acústica. Es posible entonces, distinguir una buena correlación entre la rugosidad superficial y las señales de EA, con valores levemente superiores de rugosidad para la madera de duramen, lo que indica que mediante esta técnica sería posible estimar la calidad superficial resultante de los procesos de maquinado, teniendo previamente bien identificadas todas las variables del proceso.

Se observa en las tres condiciones de velocidad de rotación, que es la madera de duramen la que requiere más energía de corte, siendo para 6,000 rpm, donde se alcanzan los niveles más altos de EA. Asimismo, el incremento de la velocidad de rotación, permite obtener superficies con menor rugosidad, mejorándose el resultado con maderas más blandas.

Se requiere continuar estudiando las relaciones entre rugosidad y emisión acústica, el efecto del cambio de densidad de la madera y las condiciones de maquinado, ya que no hay suficientes antecedentes al respecto en esta especie. Los resultados presentados indican que el aumento del nivel de densidad dentro de un mismo tipo de madera, por ejemplo el paso de albura a duramen, refleja un aumento de la EA, siendo muy importante considerar en el incremento de las señales de EA el cambio de las condiciones de maquinado.

CONCLUSIONES

La técnica de emisión acústica aplicada al monitoreo del proceso de maquinado de madera arrojó buenos resultados en cuanto que el cambio de las condiciones de trabajo, expresado como espesor de viruta, refleja un comportamiento positivo, donde el aumento del espesor de viruta requiere mayor energía o esfuerzo para poder realizar el corte.

El cambio de la velocidad de rotación afecta los resultados de energía de corte (EA), donde para una condición de maquinado equivalente la modificación de la velocidad de rotación altera de manera directamente proporcional las señales de emisión acústica.

La variación en las señales de EA permite determinar el paso de una velocidad de alimentación a otra, dado el cambio del espesor medio de viruta, condiciones de maquinado que reflejan también cambios de la calidad superficial resultante.

La calidad superficial expresada como rugosidad proporciona una muy buena correlación con las señales de EA, encontrándose una mejor calidad en madera de albura.

El cambio de la densidad de la madera de menor a mayor nivel (albura– duramen), queda reflejado en un incremento de la energía de corte. Es decir, la medición de las señales de emisión acústica es sensible a los cambios de densidad de la madera, donde para todas las demás condiciones constantes, madera de duramen requeriría más energía o esfuerzos de corte que la madera de albura.

BIBLIOGRAFIA

Aguilera, A.; Meausoone, P.J.; Martin, P. 1999. Estimation de l'usure en défonçage par la mesure de l'évolution du rapport effort tangentiel / effort normal. Proceedings of the 14th International Wood Machining Seminar. 12 – 19 September. Paris, Epinal, Cluny – France. Pages 19-29.

Aguilera, A.; Meausoone, P.J.; Martin, P. 2000a. Optimización de las condiciones de corte en el maquinado de madera. Estimación del desgaste del elemento de corte en fresado. *Bosque* 21 (2):127-135.

Aguilera, A.; Meausoone, P.J.; Martin, P. 2000b. Wood material influence in routing operations : the MDF case. *Holz als Roh-und Werkstoff*. 58 (4): 278-283.

Aguilera, A.; Vega, M.; Meausoone, P.J. 2007. Effects of grain angle on the amplitudes of acoustic emission and surface roughness in wood machining. *Wood Science and Technology* 41:373-381.

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

Haslett A. 1983. Drying properties of New Zealand grown *Acacia melanoxylon*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 13 (2): 130-138.

Juan, J. 1992. Comment bien usiner le bois. CTBA, Paris. ISBN 2-85684-012-4. 140 pp.
Kivimaa E. 1950. Cutting force in woodworking. The State Institute for Technical Research, Finland. Publication 18:102.

Koch, P. 1964. Wood machining processes. A volume in the Wood Processing Series, The Ronald Press Company, New York, 529 p.

Murase, Y.; Harada, S.; Yoshitsugu, M. 1993. Measurements of acoustic emissions in wood cutting with a super surfacer II. Effects of cutting speed and bias angle on acoustic emission characteristics in cutting parallel and perpendicular to the grain. *Mokuzai Gakkaishi* 39(6):724-728.