

TECNOLOGÍA

Caracterización de la rugosidad superficial y de la energía de corte durante el maquinado de *Pinus radiata**

Surface roughness and cutting power description for machining radiata pine

MARIO VEGA R., ALFREDO AGUILERA L.

Instituto de Tecnología de Productos Forestales, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile.
E-mail: mhvega@uach.cl, aguilera@uach.cl

SUMMARY

A study was made of wood fiber directions and the resulting surface roughness of radiata pine during a planing process employing acoustic emission control. There have been some studies of the planing process for radiata pine in situations where surface quality problems arise when machining conditions are not well controlled. It is known from previous studies that acoustic emission signals (RMS) are a good monitoring element of the surface roughness under different cutting conditions. The variations in acoustic signals are related to the roughness and to chip formation. The purpose of this study was to establish the most suitable machining conditions for planing radiata pine to achieve the required surface roughness and to determine its relationship to the acoustic emission signals so that surface quality can be easily controlled.

Keywords: machining, radiata, roughness, acoustic emission, cutting control.

RESUMEN

Se estudia la rugosidad superficial resultante del proceso de cepillado de *Pinus radiata* D. Don. con diferentes ángulos de fibra y su monitoreo con emisión acústica. Algunos estudios se han realizado sobre el proceso de cepillado en pino radiata, donde los problemas de calidad superficial durante el corte no han sido bien controlados. Es conocido que las señales de emisión acústica (RMS) son una buena herramienta en el monitoreo de la rugosidad superficial con diferentes condiciones de corte. Estudios previos permiten afirmar que cambios en las condiciones de corte afectan las señales de emisión acústica, estas variaciones están relacionadas con la rugosidad superficial y la formación de viruta. El propósito de este estudio es investigar cuáles son las condiciones de cepillado de madera de pino radiata que permitan lograr una rugosidad superficial correcta y al mismo tiempo determinar su relación con la emisión acústica (EA) en términos que la calidad de la superficie pueda ser fácilmente controlada.

Palabras clave: maquinado, radiata, rugosidad, emisión acústica, potencia de corte.

* El presente estudio fue realizado gracias al apoyo financiero proporcionado por la Dirección de Investigación y Desarrollo (D.I.D.) de la Universidad Austral de Chile, por intermedio del Proyecto DID S-2002-04 "Contribución al maquinado de especies madereras de interés económico para la industria del mueble. Estudio de los procesos de corte y la calidad en diferentes condiciones de maquinado".

INTRODUCCION

Considerables son los actuales avances en la tecnología del monitoreo no destructivo en línea que permiten un control de numerosos aspectos de la producción en la industria de la madera. En el caso de los problemas asociados al trabajo de ésta, el monitoreo mediante sensores piezoeléctricos puede ayudar a solucionar o diagnosticar las condiciones de maquinado correctas.

El problema fundamental en la industria de madera es el desconocimiento de los rangos adecuados para las condiciones del corte con el objeto de lograr un correcto maquinado. Este problema está dado principalmente por la heterogeneidad de la materia prima, y la característica de mayor incidencia es; la anisotropía de la madera, las grandes variaciones de la densidad, anchos de los anillos anuales y ángulos de las fibras dentro de una misma pieza de madera y entre piezas del mismo árbol. Todas estas variables afectan fuertemente los resultados en términos de la potencia de corte, esfuerzos de corte y la calidad superficial.

La incorporación de sensores piezoeléctricos en los controles en línea ha mostrado promisorios resultados para la supervisión de las condiciones del corte en la madera; el análisis de estas señales también ha permitido establecer las relaciones con la formación de la viruta y la rugosidad superficial resultante del proceso. En este sentido, es necesario preguntarse si los problemas de la calidad de los productos son problemas inherentes a la materia prima o a procesos deficientemente planeados y ejecutados.

El principal propósito de este estudio es evaluar y cuantificar la calidad superficial y el consumo de la energía resultante del cepillado de pino radiata bajo condiciones variables de los ángulos de fibras. Los objetivos específicos son (a) establecer una correlación entre la rugosidad superficial y la emisión acústica para las diferentes condiciones de corte, y (b) estudiar el efecto de los ángulos de fibras en la rugosidad superficial y el consumo de energía.

Estudios indicaron que para determinadas condiciones de corte se generaban espesores de viruta determinados. El consumo de energía se presenta como una curva donde para cierto rango del espesor de viruta esta es mínima. Sin embargo, si el espesor de viruta se encuentra fuera de esta zona, los consumos de energía y, por tanto, los

requerimientos de potencia de corte aumentarán de una manera exponencial (figura 1).

Otros estudios indican claramente que existe una relación entre el espesor de viruta y la rugosidad superficial obtenida, siendo esta relación de tipo proporcional (3, 4, 5). Una muy buena correlación es obtenida con espesores de viruta pequeño y rugosidad superficial baja, no obstante estas condiciones generan un alto consumo de energía y una disminución en la vida útil del elemento de corte. La rugosidad superficial está directamente relacionada con el uso de la pieza (6). Un efectivo control de la rugosidad superficial de la madera permite, por ejemplo, asegurar un correcto ensamblaje y encolado de las partes y piezas de muebles.

Al medir la emisión acústica en los procesos de corte de la madera en diferentes velocidades de rotación y ángulos de la fibra, para cortes paralelos y perpendiculares a la fibra, este autor encontró que los niveles de emisión acústica (EA) se aumentan cuando las velocidades de rotación se incrementan. En los cortes perpendiculares la variación de los niveles de EA estaba muy relacionada con la formación de los espesores de viruta y la rugosidad superficial de la pieza (7). No obstante, en cortes paralelos a la fibra las variaciones eran más tenues.

En otro estudio se encontró que los niveles de EA se incrementaban significativamente entre los 60° y 120° de ángulos de fibra, con un máximo y mínimo en los 75° y 45°, respectivamente. Los efectos debidos a los ángulos de fibra y cortes a través de la fibra, mostraban (en haya) posibilidades de identificar, con la ayuda de la AE, los

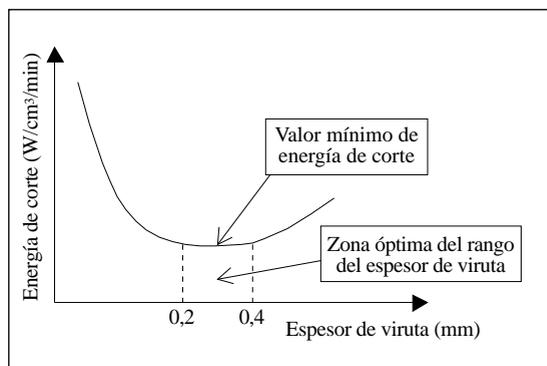


Figura 1. Relación espesor de viruta - Potencia de corte.
Relationship of chip thickness to cutting power.

puntos donde los niveles de consumo de energía son los correctos con el objeto de adaptar el corte de la madera (8).

Se investigaron las causas de los cambios en las señales de EA con respecto a cambios en la dirección de las fibras, encontrándose que la generación de las señales se relacionaba muy bien con las características del proceso de corte así como con la rugosidad superficial obtenida. Una superficie degradada generaba señales muy fuertes, mientras sucedía lo contrario con superficies muy poco degradadas. Otro aspecto importante encontrado por los autores fue que, para condiciones de corte dadas, la variación de los ángulos de fibra afecta de la misma forma a los esfuerzos de corte que las señales de EA, manteniendo la misma tendencia, siendo posible con la medición de EA determinar los niveles de esfuerzos de corte y asociarlos con una determinada rugosidad superficial (9).

MATERIAL Y METODOS

Para realizar los ensayos se consideraron los siguientes materiales: (a) La madera: *Pinus radiata* D. Don, con un contenido de humedad homogéneo y un número de anillos de crecimiento constante en el área de corte. (b) Las probetas: Se emplearon dos tipos, la primera para medir emisión acústica y rugosidad superficial, de 120 mm de largo y 35 mm de ancho (figura 2). Y otro tipo de probetas empleadas para la medición de potencia de corte de 1.000 mm de largo y 35 mm de ancho. (c) Una máquina tupí con motor de 4 kW de potencia máxima, velocidad de rotación del eje entre 3.200 y 8.000 r/min y un carro de avance automático con 4 velocidades de alimentación. (d) Un rugosímetro de contacto tipo stylus modelo Mitutoyo SJ-210. (e) Un wattímetro numérico conectado a computador para medir y registrar la potencia de corte. (f) Herramientas de corte: 2 en el cabezal. El cabezal posee las siguientes dimensiones D: 122, B: 60, d: 40 mm, los cuchillos son de carburo de tungsteno de 60*30*3 mm con perfil recto cuya geometría es $\alpha = 17^\circ$, $\beta = 45,5^\circ$ y $\gamma = 27,5^\circ$, siendo α el ángulo de incidencia, β el ángulo de perfil y γ el ángulo de ataque.

Los ensayos fueron realizados en una máquina tupí, el tipo de corte es fresado sobre toda la cara de la probeta y de tipo perimetral. La geome-

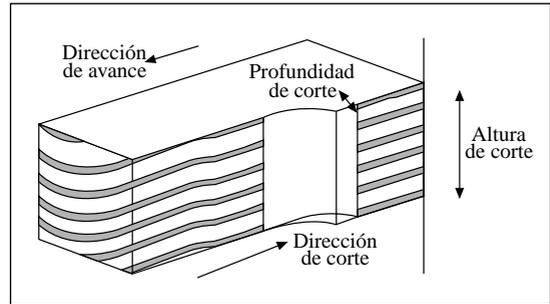


Figura 2. Parámetros de corte.
Cutting parameters.

tría de los elementos de corte fueron constantes durante todo el ensayo. Las variables involucradas en las condiciones de corte son: velocidad de rotación y la velocidad de avance. Las variables asociadas con la madera son ángulo fibrilar en tres niveles 0° , 30° y 60° .

Las series de ensayos fueron definidas de acuerdo con las características operacionales de la máquina tupí. Los parámetros de acción y sus unidades, así como los parámetros de medición y sus unidades, se ilustran en el cuadro 1.

RESULTADOS Y DISCUSION

En los análisis de los resultados se toma siempre como punto de referencia el espesor de viruta, la variación de las condiciones de corte y los tres niveles de ángulos de inserción de la fibra.

Los resultados obtenidos en el análisis de pino radiata para los tres niveles de ángulos de fibra, considerada como variable de respuesta, la emisión acústica es mostrada en la figura 3.

La variación observada en la emisión acústica RMS es influenciada por los ángulos de fibra de la madera en forma linealmente positiva, lo cual indica que con grandes ángulos de inserción se requeriría mayor energía para producir el corte, coincidiendo con los antecedentes bibliográficos, e indican la consistencia del uso de los sensores piezoeléctricos de emisión acústica en los procesos de corte de la madera como elementos no destructivos en el control de los procesos.

En segundo término, se observa que los espesores de viruta están correlacionados con la energía de corte RMS, para los tres niveles de ángulos de fibra, donde un incremento de los espesores de

CUADRO 1

Descripción de los parámetros de corte.
Description of cutting parameters.

| Parámetros de acción | Nivel | Unidad | Parámetros de medición | Unidad | Constantes | Nivel |
|-----------------------------------|---------------------|--------|------------------------|-------------|----------------------|-------------------------|
| Velocidad de rotación | 3.200, 4.200, 6.000 | r/min | Rugosidad superficial | Ra (mμ) | Ancho de corte | 35 mm |
| Velocidad de avance | 4, 8, 11, 22 | m/min | Emisión acústica | RMS (Volts) | Profundidad de corte | 2 mm |
| Angulo de las fibras | 0, 30, 60 | grados | Potencia de corte | kW | Modo de corte | Oposición |
| | | | | | Densidad | 0,465 g/cm ³ |
| | | | | | Contenido de humedad | 11,48 % |
| Parámetros de la emisión acústica | Umbral 55 mV | | Preamplificador 0 dB | | Nº de dientes | 2 |
| | | | | | | Nº de anillos |

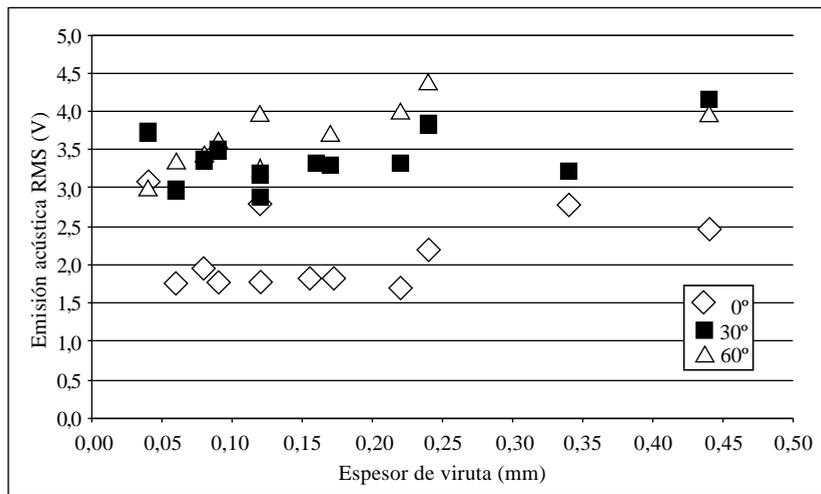


Figura 3. Relación espesor de viruta - emisión acústica RMS, de acuerdo con los ángulos de fibras.

Relationship of chip thickness to acoustic emission, according to fiber angles.

viruta produce un aumento constante de la energía. Para un valor constante del espesor de viruta, el aumento de energía de corte se explica por el incremento del ángulo de la fibra (cuadro 2).

Para el caso de la potencia de corte, sólo el 0° de ángulo de fibra fue evaluado, ya que se requiere un largo mínimo de la probeta para poder realizar el ensayo, siendo imposible de esta forma poder evaluar los otros ángulos.

En la figura 4 es posible identificar los efectos debido al incremento de la potencia de corte (kW) sobre la energía dada por la emisión acústica RMS. Para condiciones de corte (cuadro 1), y los resultados mostrados en el cuadro 2, fue obtenido un adecuado nivel de correlación entre la potencia de corte y la emisión acústica.

Estos resultados son consistentes con la figura 5, donde los bajos niveles de espesores de

CUADRO 2

Emisión Acústica RMS (V), rugosidad superficial Ra (mm) y potencia de corte (kW), para 0°, de acuerdo con los ángulos de fibra y el espesor de viruta (mm).

Acoustic emission, surface roughness, and cutting power for 0°, according to the fiber angles, and chip thickness.

| Z = 2 Espesor de viruta (mm) | Emisión acústica RMS (V) | | | Rugosidad superficial Ra (mμ) | | | Potencia de corte (kW) |
|---------------------------------|--------------------------|------|------|-------------------------------|------|------|------------------------|
| | 0° | 30° | 60° | 0° | 30° | 60° | |
| 0,04 | 3,12 | 3,72 | 3,01 | 3,52 | 3,58 | 4,22 | 0,16 |
| 0,06 | 1,75 | 2,98 | 3,36 | 3,60 | 3,82 | 3,94 | 0,13 |
| 0,08 | 1,97 | 3,36 | 3,43 | 3,33 | 3,93 | 4,29 | 0,13 |
| 0,09 | 1,78 | 3,49 | 3,65 | 3,90 | 4,35 | 5,18 | 0,20 |
| 0,12 | 1,78 | 2,88 | 3,26 | 4,10 | 4,63 | 5,51 | 0,17 |
| 0,16 | 1,82 | 3,32 | 3,95 | 4,82 | 5,47 | 6,81 | 0,17 |
| 0,17 | 1,83 | 3,30 | 3,72 | 4,45 | 5,48 | 6,25 | 0,18 |
| 0,22 | 1,70 | 3,31 | 4,00 | 4,85 | 6,07 | 8,83 | 0,18 |
| 0,24 | 2,19 | 3,83 | 4,39 | 5,20 | 5,67 | 5,82 | 0,26 |
| 0,34 | 2,78 | 3,22 | 4,21 | 5,80 | 6,81 | 8,63 | 0,23 |
| 0,44 | 2,48 | 4,15 | 3,97 | 6,39 | 8,47 | 7,80 | 0,23 |

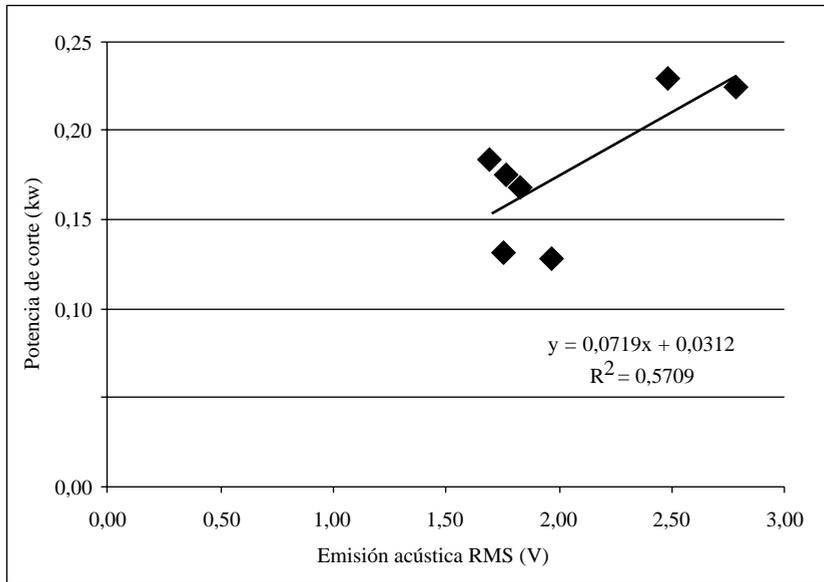


Figura 4. Correlación entre la emisión acústica RMS y potencia de corte para 0° de ángulo de fibra.

Relationship of acoustic emission to cutting power at 0° fiber angle.

viruta también poseen bajos niveles de energía específica de corte y por lo tanto requerimientos menores de energía.

El análisis de la rugosidad superficial indica que existe una relación proporcional entre el aumento del espesor de viruta y el aumento de la

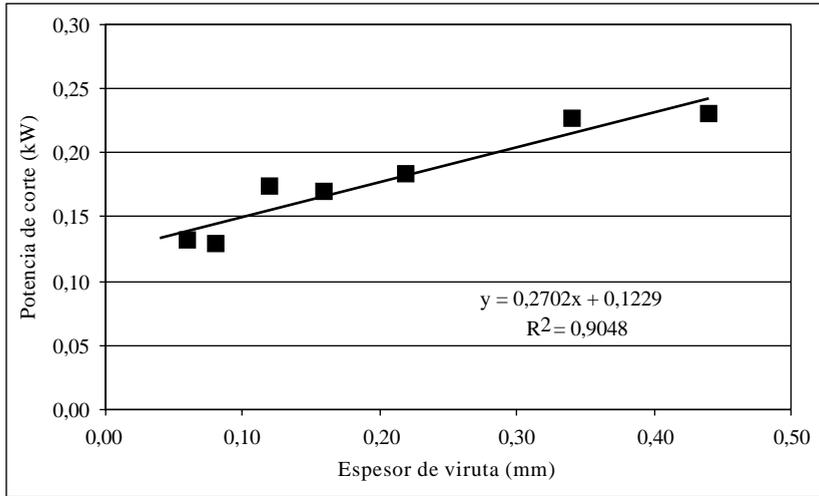


Figura 5. Correlación entre la potencia de corte y el espesor de viruta para 0° de ángulo de fibra.

Relationship of cutting power to chip thickness for 0° fiber angle.

rugosidad superficial, siendo estos resultados consistentes con los obtenidos en estudios anteriores. La influencia de los ángulos de la fibra es determinante sobre la calidad superficial, tal como lo muestra la figura 6. Aquí es posible identificar claramente un significativo deterioro de la calidad superficial cuando los ángulos de fibra se incrementan. Además de lo anterior, es posible observar una buena correlación entre el espesor de viruta y la rugosidad superficial para 0° y 30° de fibra, no obstante para el caso de 60° los valores de r^2 es bajo.

La figura 6 permite concluir que el efecto de la variación de los ángulos de fibra es el factor más importante en la calidad superficial del producto. No obstante, para condiciones constantes de ángulos de fibra, una variación de condiciones de corte también afectan los resultados. Principalmente se verá afectada la rugosidad superficial por el cambio en los espesores de viruta, es decir, para una velocidad de rotación constante (r/min), el incremento de la velocidad de alimentación generará una degradación de la rugosidad superficial.

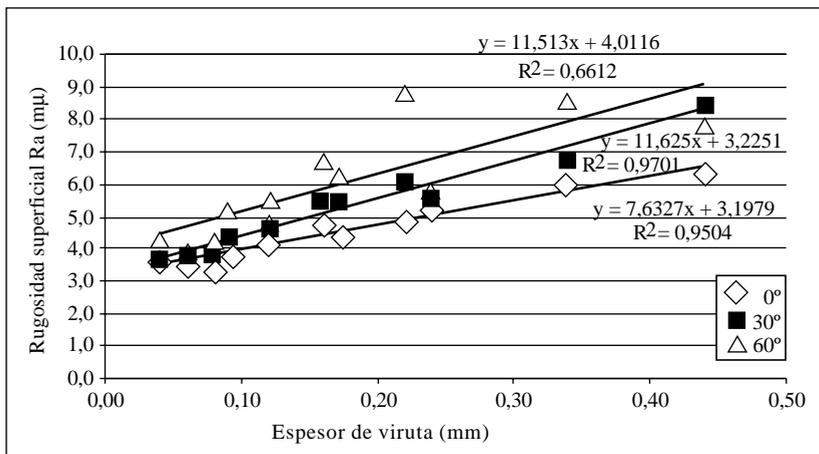


Figura 6. Rugosidad superficial Ra de acuerdo con los ángulos de las fibras.

Surface roughness according to fiber angles.

La relación existente entre la emisión acústica y la rugosidad superficial para los distintos ángulos de fibra, es indicada en la figura 7. Esta es una relación polinomial, con un coeficiente de 59,98% de correlación. Para el caso de 0° en el ángulo de la fibra, un bajo nivel de emisión acústica fue determinado, que al mismo tiempo proveía de la mejor rugosidad superficial de la madera. Para 30°, los valores encontrados se encuentran en una zona intermedia, con niveles levemente superiores de emisión acústica y rugosidad superficial en relación a los 0°. Finalmente, es en los 60°, donde la emisión acústica es mayor, con un marcado deterioro de la superficie.

Se observa, entonces, que el monitoreo con emisión acústica en maquinado de madera de pino radiata permite identificar el deterioro de la superficie y correlacionarlos con los niveles de energía.

Finalmente, es posible indicar que los resultados obtenidos a través del monitoreo del proceso de maquinado por medio del uso de sensores piezo-eléctricos de emisión acústica, son satisfactorios para los autores; además, estos resultados están de acuerdo con la bibliografía consultada y ellos permiten ser una contribución en el estudio de la optimización de los procesos de corte, para obtener productos con convenientes niveles de calidad superficial y pequeños consumos energéticos en especies madereras.

CONCLUSIONES

- El uso de la emisión acústica para el control de procesos de maquinado de madera, demues-

tra ser una herramienta útil, ya que es posible identificar cambios en las condiciones de corte con la ayuda de ésta.

- El efecto de los cambios de los ángulos de fibra está reflejado por la variación en los niveles de emisión acústica.
- Para un espesor de viruta constante, los niveles de emisión acústica en el proceso se incrementan en la medida en que los ángulos de la fibra aumentan entre 0° y 60°.
- Es posible, por medio del control de la emisión acústica, determinar los niveles requeridos de potencia de corte, con un aceptable nivel de confianza. Por esta vía se pueden deducir los esfuerzos de corte.
- Se determinó que existe una relación entre el espesor de viruta y las potencias de corte, con lo cual se confirma la teoría de la formación de viruta. Es así como un incremento mantenido del espesor de viruta está relacionado con un incremento de los requerimientos de potencia de corte.
- En relación con la rugosidad superficial, se observa que los resultados están de acuerdo con la bibliografía consultada, en el sentido de que el incremento del espesor de viruta degrada la calidad de la superficie resultante. Si al mismo tiempo es considerado el efecto del cambio de los ángulos de la fibra en el análisis, se concluye que para un mismo espesor de viruta la degradación de rugosidad superficial es mayor a medida que aumenta el ángulo de las fibras.
- El control del proceso por medio del uso de la emisión acústica permite adicionalmente estimar la calidad superficial resultante.

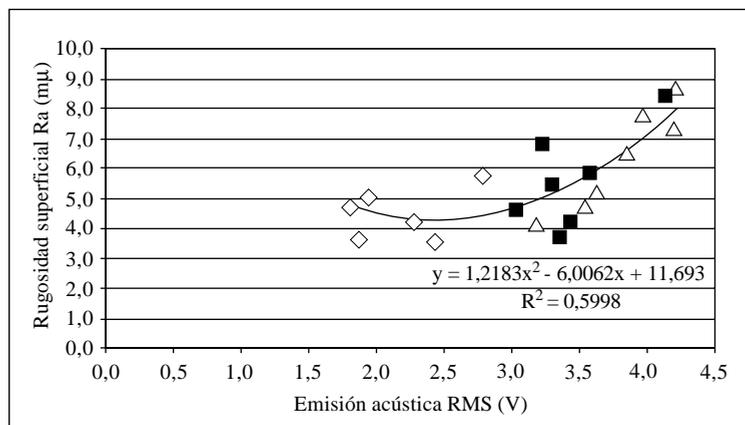


Figura 7. Relación emisión acústica RMS, rugosidad superficial Ra.

Relationship of acoustic emission to surface roughness.

- La medición de la emisión acústica muestra satisfactorios resultados en su relación con los cambios en las condiciones de maquinado. Permite, además, identificar los cambios en los ángulos de las fibras, los cuales muestran cambios en la rugosidad superficial y permite estimar la potencia de corte.
- La emisión acústica, al permitir visualizar los cambios en las condiciones de corte, demuestra ser una promisoriosa herramienta del control de los procesos.

BIBLIOGRAFIA

- (1) KIVIMAA E. *Cutting force in woodworking*. Finland: The State Institute for Technical Research. 1950. Publication 18. p. 102.
- (2) KOCH P. *Wood machining processes*. New York: The Ronald Press Company, 1964, 529 p.
- (3) AGUILERA A., P.J. MEAUSOONE, P. MARTIN. 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*. Paris: Epinal, Cluny. 12-19 September 1999, p. 19-29.
- (4) AGUILERA A., P.J. MEAUSOONE, P. MARTIN. Optimización de las condiciones de corte en el maquinado de madera. Estimación del desgaste del elemento de corte en fresado. *Bosque* (Chile), 2000, vol. 21, N° 2, p. 127-135.
- (5) AGUILERA A., P.J. MEAUSOONE, P. MARTIN. Wood material influence in routing operations: the MDF case. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2000, vol. 58, N° 4, p. 278-283.
- (6) LEMASTER R.L., D.A. DORNFELD. Measurement of surface quality of sawn and planed surfaces with a laser. *Proceedings of the 7th Wood Machining Seminar*. University of California. Richmond. October 18-20. 1982, pp. 54-61.
- (7) MURASE Y., S. HARADA, M. YOSHITSUGU. 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*, 1993, vol. 39, N° 6, p. 724-728.
- (8) MURASE Y., S. HARADA. Acoustic Emission Characteristics in Wood Cutting, I. Effects of the grain angles on the amplitudes of acoustic emissions. *Mokuzai Gakkaishi*, 1995, vol. 41, N° 4, p. 373-379.
- (9) CYRA G., C. TANAKA. The effects of wood-fiber directions on acoustic emission in routing. *Wood Science and Technology*, 2000, vol. 34, p. 237-252.

Recibido: 10.11.04.

Aceptado: 11.03.05.