

# RUGOSIDAD SUPERFICIAL Y POTENCIA DE CORTE EN EL CEPILLADO DE ACACIA MELANOXYLON Y SEQUOIA SEMPERVIRENS

## SURFACE ROUGHNESS AND CUTTING POWER ON BLACKWOOD AND REDWOOD PLANING

Alfredo Aguilera<sup>1</sup>, Hernán Muñoz<sup>2</sup>

### RESUMEN

En el maquinado de madera, el cambio de las condiciones cinemáticas en el proceso de formación de viruta trae por consecuencia un cambio tanto en los esfuerzos de corte, como en el trabajo específico de corte, es decir, finalmente sobre la potencia de corte. Siendo en la práctica difícil hacer mediciones de esfuerzos de corte o de la energía específica en la línea de producción, el control de la potencia eléctrica de los motores es una realidad. El objetivo de esta investigación es evaluar el efecto del espesor medio de viruta sobre la potencia total de corte y la rugosidad resultante, y estimar el trabajo específico de corte en el proceso de cepillado para madera de *Acacia melanoxylon* (aromo) y *Sequoia sempervirens* (sequoia).

Los resultados indicaron una buena correlación entre la potencia de corte y el espesor de viruta, requiriéndose mayor potencia de corte al incrementar la velocidad de avance del material. En cuanto a los resultados de rugosidad superficial, estos reflejaron los cambios del espesor de viruta. Además se obtuvo una mejor calidad superficial con la especie de mayor densidad.

**Palabras clave:** Rugosidad superficial, potencia de corte, acacia, sequoia

### ABSTRACT

In wood machining, the chip formation process consequently brings a change in cutting forces, as well in the specific cutting energy, i.e., finally on the cutting power. Being in practice difficult the measure of cutting forces or the specific energy at the production line, monitoring the electrical output of the power unit is a reality. The aim of this research is to evaluate the change of the mean chip thickness over cutting power and the resulting surface roughness, estimating the specific cutting work on planing process for blackwood and redwood samples.

The findings lead to conclude a good correlation between cutting power and chip thickness, requiring the cutting process more power when more feed speed is applied. For the surface roughness, the results presented changes with the chip thickness, and a better surface quality was found with the dense blackwood lumber.

**Keywords:** Surface roughness, cutting power, blackwood, redwood

<sup>1</sup>Instituto de Tecnología de Productos Forestales,  
Facultad de Ciencias Forestales y de Recursos Naturales,  
Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile.

<sup>2</sup>Ingeniero en maderas, Jefe Administración Aserradero Catalina, Constitución, Chile.

Autor para correspondencia: aguilera@uach.cl

Recibido: 23.06.2010 Aceptado: 29.10.2010

## INTRODUCCIÓN

En el procesamiento de madera seca, la calidad superficial resultante del proceso de cepillado depende de varios factores, entre los cuales uno de los más relevantes involucra el mecanismo de formación de viruta a través de la cinemática de maquinado. El estado, geometría y material de la arista de corte es parte fundamental de la calidad resultante, así como lo es también la materia prima en cuanto a su contenido de humedad y densidad. En la determinación de los esfuerzos y potencia de corte, la investigación debe orientarse hacia el proceso de formación de viruta, la rugosidad superficial y la vida útil o desgaste de la arista de corte. La calidad superficial resultante del maquinado de los productos en base a madera afecta sensiblemente los procesos posteriores de aplicación de adhesivos o lacas y barnices, es decir, se ve afectada la calidad de la adherencia entre las superficies o bien la textura superficial del tratamiento superficial.

El comportamiento de la potencia de corte en relación con la velocidad de alimentación de la madera, indica Koch (1964) depende de la sección que está siendo procesada, y de la acción que esté realizando un cabezal específico, es decir, si se toma por ejemplo el caso del cabezal superior de cepillado, los requerimientos de potencia serán superiores respecto de aquel que trabaja los cantos de las piezas. En cuanto a la velocidad de alimentación, los requerimientos de potencia aumentarán en la medida que se incrementa la velocidad de alimentación, y para el ejemplo del cabezal superior (que está realizando mayor trabajo), más allá de una determinada velocidad, la potencia de corte toma una tendencia exponencial.

En directa relación con la potencia de corte se encuentran los esfuerzos de corte, la cual en una fórmula empleada en maquinado 90-0 (cepillado), Aguilera *et al.* (2000) realiza la estimación de la potencia de corte en el procesamiento de tableros de densidad media (MDF), considerando la ecuación siguiente:

$$Pc = Z * N * Fc * \sqrt{ap * D} \quad (1)$$

Donde:

Pc = potencia de corte (kW)

Z = número de cuchillos

N = revoluciones por minuto

Fc = esfuerzo de corte (Newton)

ap = profundidad de corte (mm) D = diámetro de corte (mm)

El problema en este caso es la medición de los esfuerzos de corte, que con métodos empleados en laboratorio son fácilmente cuantificables, sin embargo, muy complicados a medir en la línea de producción.

Kivimaa (1950) analizó en los diferentes planos de corte el comportamiento tanto de los principales componentes de los esfuerzos de corte como también el trabajo específico de corte ( $W_{sp}$ ) en función del espesor de viruta, encontrando que el componente del esfuerzo que actúa paralelo a la dirección del movimiento del cuchillo crece gradualmente con el incremento del espesor de viruta, ocurriendo una situación inversa con el trabajo específico de corte, el cual presenta un crecimiento exponencial cuando el espesor de viruta alcanza valores muy pequeños, es decir, incrementando la calidad de la superficie procesada. La determinación del trabajo específico de corte y del espesor medio de viruta está dada según las ecuaciones siguientes:

$$W_{sp} = \frac{P_c}{b * a_p * V_f} \quad (2)$$

$$e_m = \frac{V_f}{Z * N} \sqrt{\frac{a_p}{D}} \quad (3)$$

Donde:

$W_{sp}$  = trabajo específico de corte (N/mm)

$b$  = ancho de corte (mm)

$V_f$  = velocidad de alimentación (m/min)

En relación con la densidad de la madera y los esfuerzos de corte, Kivimaa (1950) encontró un incremento sostenido de estos frente al aumento de la densidad de la madera, considerando todos los otros parámetros de maquinado constantes. Aguilera y Martín (2001) estudiaron el comportamiento de la potencia de corte y de la profundidad de corte con la densidad de la madera, para finalmente analizar la calidad superficial resultante del proceso de corte. En sus resultados, el efecto incremento de densidad de la madera y profundidad de corte presentó un alza continua de los requerimientos de potencia de corte, no encontrando diferencias significativas a diferentes profundidades de corte, pero siendo claro el deterioro de las superficies cuando se incrementó la velocidad de alimentación. Los autores concluyen que para un nivel constante del avance por diente, la potencia de corte se comporta en forma directamente proporcional con la velocidad de rotación de la herramienta de corte. Se detectó un incremento de los requerimientos de potencia al procesar madera de mayor densidad. Finalmente, la calidad superficial se ve influenciada fuertemente por el espesor medio de viruta.

Kilic *et al.* (2006) estudiaron el efecto del maquinado sobre la rugosidad superficial de Haya (*Fagus sp.*) y álamo (*Populus sp.*), es decir sensibles diferencias de densidad entre ambas especies, estudiando la rugosidad en cortes tangenciales y radiales. En sus resultados no encuentran diferencias significativas en rugosidad para ambos tipos de cortes, sin embargo, el corte radial proporcionó una rugosidad superior que el corte tangencial. De igual manera, la madera más dura mostró valores similares a levemente superiores en rugosidad respecto de la especie de inferior densidad, no siendo los resultados estadísticamente significativos.

Por otra parte, en el caso de materiales como los tableros de densidad media (MDF), tanto McKenzie *et al.* (2001) como Aguilera (2010) encontraron una buena relación entre densidad del tablero y rugosidad superficial, donde en las capas internas de menor densidad es donde después del maquinado se presenta una terminación más rugosa.

El objetivo de esta investigación es evaluar el efecto del cambio del espesor medio de viruta sobre la magnitud de la potencia total de corte y la rugosidad superficial resultante, y con los datos de potencia estimar el trabajo específico de corte para madera de *Acacia melanoxylon* (aromo) y *Sequoia sempervirens* (sequoia).

## MATERIAL Y MÉTODOS

Los experimentos de cepillado fueron realizados en madera preferentemente lateral, libre de defectos de las especies *Acacia melanoxylon* R. Br. (aromo australiano) y *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl., a un contenido de humedad de 14 % y 17 % respectivamente. La densidad de ensayo varió entre 0.59 y 0.67 g/cm<sup>3</sup> con 0.02 g/cm<sup>3</sup> de desviación estándar en aromo y entre 0.25 y 0.31 g/cm<sup>3</sup> para sequoia con 0.05 g/cm<sup>3</sup> de desviación estándar. El contenido de humedad y de la densidad básica se controló según los procedimientos indicados en la Norma Chilena NCh176/1 y NCh176/2 respectivamente. Las muestras tenían por dimensiones 40 \* 150 \* 1200 mm<sup>3</sup>, fueron maquinadas en una máquina tupí a una velocidad de rotación de 4200 rpm y velocidad variable de alimentación por un carro de avance automático entre 4 y 11 m/min. El motor tiene por características: 4 kW de potencia, 8.74 Amperes, 50 Hz y 380 Volts. Se determinó con la ecuación (3) el espesor medio de viruta en nueve niveles, los que se indican en la tabla 1:

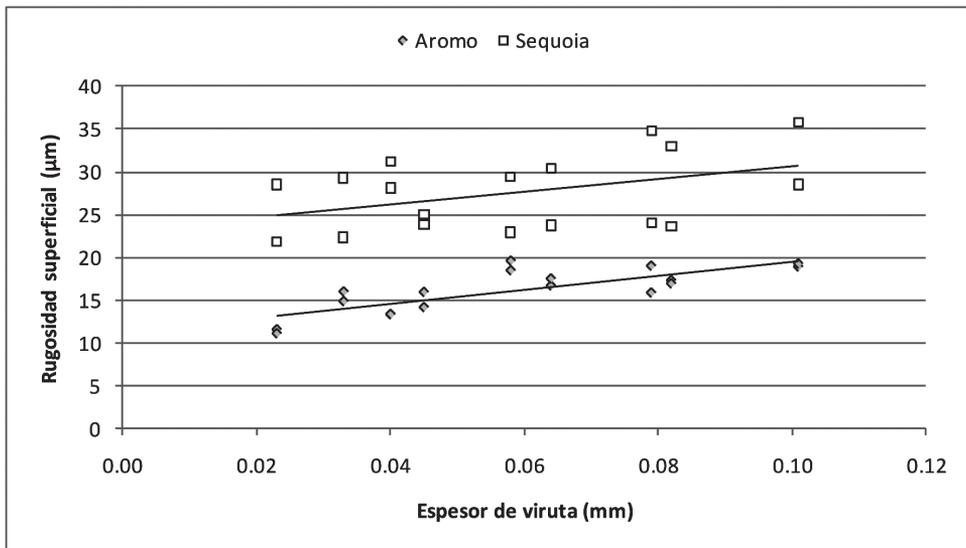
**Tabla 1.** Niveles del espesor medio de viruta a evaluar.

<b>Espesor medio de viruta <math>e_m</math> (mm)</b>
0.023
0.033
0.040
0.045
0.064
0.079
0.058
0.082
0.101

Se utilizó un cabezal de montaje convencional de 124 mm de diámetro de corte, 4 cuchillos de acero rápido (HSS), y una geometría de corte de 25° de ángulo de ataque, 48° en perfil y 17° en incidencia. La medición de la rugosidad superficial se llevó a cabo con un rugosímetro de contacto Mitutoyo SJ-201 caracterizado por un radio de la punta de 5 µm, una longitud de corte de 2.5 mm y 5 largos muestreados. Para evaluar las características de las muestras se utilizó el parámetro de rugosidad promedio de las alturas (Rz) (ISO 4287, 1997). La madera presentó una superficie de corte tangencial, sobre la cual y en la parte media de la probeta se midió la rugosidad superficial en tres puntos y sólo para madera temprana. La potencia total de corte fue registrada mediante un medidor – registrador para tensión AC/DC de tipo pinza marca ExTech modelo 382065, con una frecuencia de muestreo de 1 segundo, el cual fue conectado a los cables de alimentación del motor eléctrico de la máquina y los datos obtenidos enviados al computador vía interfase RS-232 para con ayuda del software “Clampmeter” incluido en el equipo registrarlos y analizarlos. Tanto para las mediciones de potencia como rugosidad se procesaron 54 muestras por cada especie. El análisis estadístico consideró un análisis de varianza y de regresión entre las variables espesor de viruta, rugosidad superficial y potencia de corte.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados promedio de rugosidad superficial  $R_z$  ( $\mu\text{m}$ ) respecto del espesor medio de viruta (mm), se presentan en la figura 1 para ambas especies. La tendencia general expresada en esas figuras es a un incremento gradual de la rugosidad superficial cuando aumenta el valor del espesor medio de viruta, resultado que está de acuerdo con lo encontrado por otros autores (Aguilera 2010; Aguilera y Martín 2001; Aguilera *et al.* 2000; Aguilera y Zamora 2009), quienes en diversos materiales maquinados, con herramientas de corte y condiciones de trabajo diversas, encontraron las mismas tendencias del incremento de la rugosidad superficial con mayores valores del espesor medio de viruta. Es en el caso de aromo donde los valores de rugosidad encontrados fueron inferiores respecto de sequoia, resultados que presentan diferencias significativas en análisis de varianza. Es por tanto en maderas de menor densidad, independiente del espesor de viruta donde la calidad de la superficie es inferior.



**Figura 1.** Rugosidad superficial espesor de viruta según especie

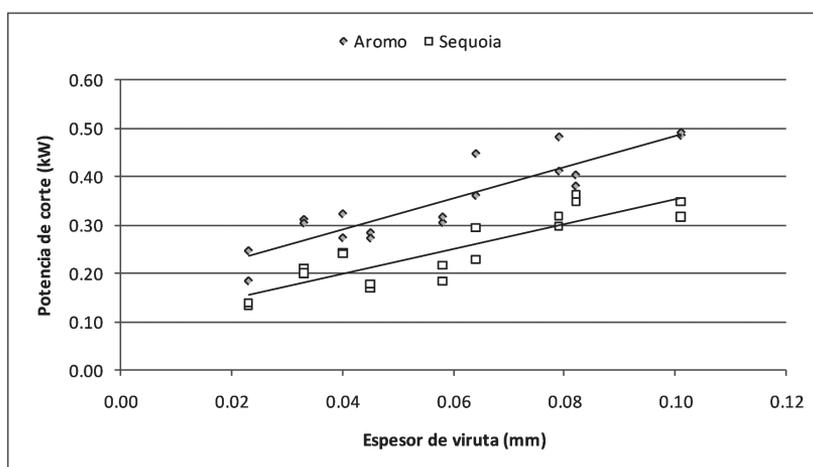
Las curvas de regresión son lineales y positivas. Las ecuaciones se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Ecuación y coeficiente de determinación según especie entre rugosidad superficial ( $R_z$ ) y espesor medio de viruta ( $e$ )

Especie	Ecuación	Coef determinación $R^2$
Aromo	$R_z = 82.324 e + 11.260$	0.63
Sequoia	$R_z = 72.909 e + 23.324$	0.17

Si bien los coeficientes no son muy altos, es el aroma la especie donde en este caso la variación del espesor de viruta explica mucho mejor la rugosidad superficial respecto de sequoia, debido probablemente por la menor densidad de ésta y su mayor desviación estándar.

De igual forma que en el caso de la rugosidad superficial, la potencia de corte promedio presentó un incremento cuando el espesor medio de viruta fue mayor. Estos resultados están de acuerdo con las investigaciones realizadas por Kivimaa (1950), Koch (1964) y Aguilera y Martin (2001), quienes lograron medir en sus resultados alzas en la potencia de corte asociadas a cambios en las condiciones de maquinado, siendo el espesor de viruta el elemento de mayor impacto en sus resultados. En la figura 2 se presentan los resultados para ambas especies, se puede observar un incremento lineal positivo de la potencia de corte frente al aumento del espesor de viruta, siendo para la madera más densa de aroma donde la potencia de corte fue mayor. El análisis de varianza indica diferencias significativas de potencia de corte entre ambas especies.



**Figura 2.** Potencia de corte espesor de viruta según especie

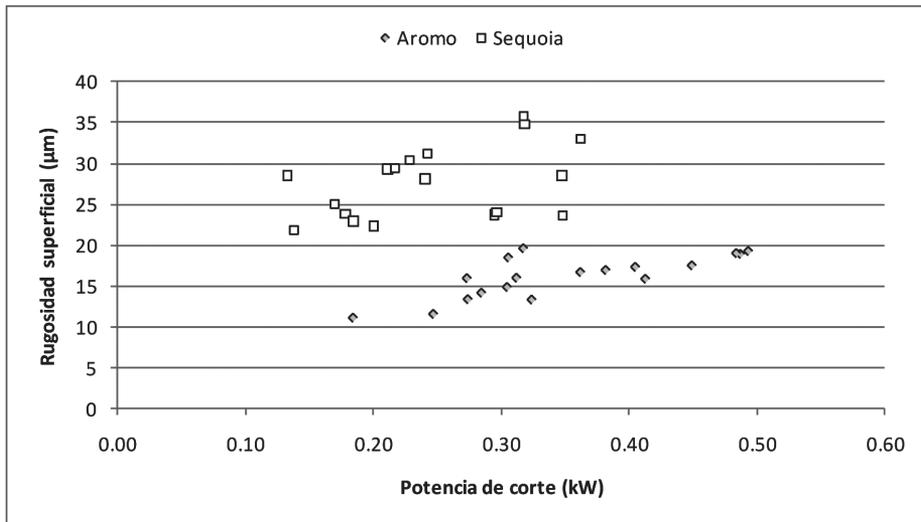
Las ecuaciones de regresión son de tipo lineal y positivo. Dichas ecuaciones se presentan en la tabla 3:

**Tabla 3.** Ecuación y coeficiente de determinación según especie entre potencia de corte ( $P_c$ ) y espesor medio de viruta ( $e$ )

Especie	Ecuación	Coef determinación $R^2$
Aromo	$P_c = 3.2479 e + 0.1606$	0.81
Sequoia	$P_c = 2.5980 e + 0.0944$	0.76

En este caso, los coeficientes de determinación son elevados, siendo para ambas especies la variación del espesor de viruta la que explica bien la potencia de corte.

La figura 3 presenta el resultado entre rugosidad superficial y potencia de corte. Se observa para aroma, la especie de mayor densidad, y como ya se indicó, un nivel inferior de rugosidad (mejor calidad), con un deterioro gradual en la medida que la potencia de corte va en aumento, con una clara tendencia lineal positiva.

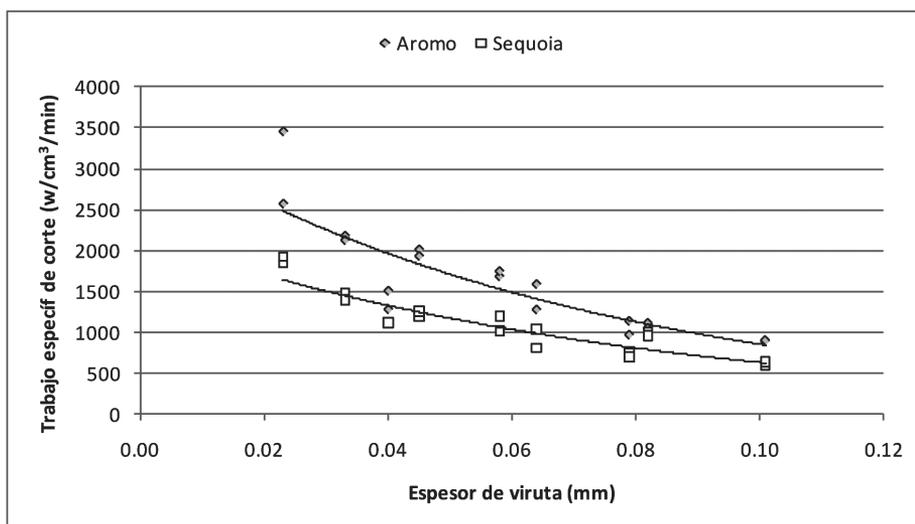


**Figura 3.** Rugosidad superficial (Rz) respecto de potencia de corte según especie.

En cambio, para sequoia, la calidad resultante es inferior incluso con niveles inferiores de potencia de corte, sin embargo, con una mayor dispersión de los datos, siendo por tanto más difícil establecer una determinación a priori de la calidad superficial a un nivel dado de potencia de corte. La tendencia observada es positiva, al aumento de potencia, mayor rugosidad. Estadísticamente las diferencias entre especies son significativas.

Se puede pensar entonces que las superficies que alcanzan un mayor deterioro (mayor rugosidad superficial) son generadas con un costo relativo mayor en términos de potencia de corte e inverso en términos de trabajo específico de corte. Por ello, se realizó una estimación del trabajo específico de corte con los datos obtenidos de la potencia de corte de manera tal de verificar teóricamente lo indicado en bibliografía. La figura 4 permite entonces apreciar la evolución del trabajo específico de corte según variación del espesor medio de viruta. Se observa en la figura 4 que frente a una reducción del espesor de viruta, el trabajo específico tiende a aumentar de manera exponencial, siendo pronunciado este aumento para el aromo.

Los resultados encontrados concuerdan con los antecedentes aportados por la literatura, donde el trabajo específico de corte se relaciona muy bien con el espesor medio de viruta, requiriéndose un menor trabajo de corte con virutas más gruesas, situación inversa con los requerimientos de potencia de corte. Las dos especies estudiadas siguen muy bien las tendencias descritas, sin embargo, es con la sequoia, una especie notablemente más liviana respecto de el aromo, donde el trabajo y la potencia de corte requerida alcanzan niveles inferiores para efectuar un corte bajo las mismas condiciones pero con menor calidad.



**Figura 4.** Evolución del trabajo específico de corte respecto del espesor medio de viruta para cada especie

Finalmente, en la tabla 4 se presentan las ecuaciones y coeficientes de determinación resultantes, para comportamiento netamente exponencial. En ambos casos, los coeficientes de determinación son elevados, siendo para ambas especies la variación del espesor de viruta la que explica bien al trabajo específico de corte.

**Tabla 4.** Ecuación y coeficiente de determinación según especie entre trabajo específico de corte ( $W_{sp}$ ) y espesor medio de viruta ( $e$ )

Especie	Ecuación	Coef determinación $R^2$
Aromo	$W_{sp} = 3218.2 \exp -13.88e$	0.81
Sequoia	$W_{sp} = 2182.8 \exp -12.47e$	0.85

## CONCLUSIONES

Se estudiaron dos especies de gran interés para su uso como productos de apariencia, donde la calidad de las terminaciones superficiales es relevante ya sea cuando el producto es sometido a un tratamiento posterior de terminación o bien por el hecho de evitar su desclasificación.

El espesor de viruta es un parámetro relevante sobre la calidad lograda (rugosidad superficial) en el proceso de corte, independiente del tipo de madera o su densidad. Además, al comparar entre ambas especies estudiadas, es en aquella de menor densidad, sequoia, donde el factor densidad juega un rol importante al obtenerse calidades superficiales deficientes, donde esta madera es particularmente sensible al proceso de maquinado.

Los resultados de potencia de corte en ambas especies permiten concluir buenas respuestas de las mediciones frente a los cambios del espesor de viruta, con tendencias lineales y positivas, y con buenos coeficientes de determinación, donde el espesor de viruta explica muy bien a la potencia de corte. Por otra parte al analizar la relación entre potencia de corte y rugosidad superficial, la mayor potencia de corte está asociada muy bien al deterioro de las superficies para ambas especies, donde a similares valores de potencia, la menor densidad de la madera destaca por su inferior calidad de terminación.

Se realizó la estimación del trabajo específico de corte a través de las mediciones de potencia de corte, estimaciones que dejan ver claramente la relación inversa del trabajo específico con la potencia a través de la variación del espesor medio de viruta (similares tendencias para ambas especies estudiadas). La relación es exponencial con altos coeficientes de determinación, donde los menores espesores de viruta que están asociados a una mejor calidad superficial son los que demandan un mayor trabajo específico y por tanto una menor potencia.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Austral de Chile por el apoyo brindado en el desarrollo de esta investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

**Aguilera, A. 2010.** Cutting energy and surface roughness in medium density fiberboard rip sawing. *Eur. J. Wood Prod.*, DOI: 10.1007/s00107-009-0396-z (on-line first)

**Aguilera, A.; Martin, P. 2001.** Machining qualification of solid wood of *Fagus silvática* L. and *Picea excelsa* L.: cutting forces, power requirements and surface roughness. *Holz Roh-Werks* 59(6):483-488

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

**Aguilera, A.; Zamora, R. 2009.** Surface roughness in sapwood and heartwood of Blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.) machined in 90-0 direction. *Eur. J. Wood Prod.* 67(3):297-301. DOI: 10.1007/s00107-009-0308-2

**International Standard. 1997.** ISO 4287. Geometrical product specifications (GPS) – surface texture: profile method – terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

**Kilic, M.; Hizioglu, S.; Burdurlu, E. 2006.** Effect of machining on surface roughness of wood. *Building and Environment* 41: 1074-1078

**Kivimaa, E. 1950.** Cutting force in wood-working. The state institute for technical research, Julkaisu 18 Publication, Finland, p 102

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

**McKenzie, WM.; Ko, P.; Cvitkovic, R.; Ringler, M. 2001.** Towards a model predicting cutting forces and surface quality in routing layered boards. *Wood Sci Technol* 35: 563-569