

EL MAQUINADO DE NOGAL (*Cordia alliodora*) CRECIDO EN COLOMBIA

THE MACHINABILITY OF NOGAL (*Cordia alliodora*) GROWN IN COLOMBIA

JULIO C. BERMUDEZ¹, CHIAKI TANAKA², TADASHI OHTANI³, REYNOLDS OKAI⁴, HIROSHI USUKI⁵

PALABRAS CLAVE:

Nogal (*Cordia alliodora*), condición cortante, desgaste de herramienta, fuerzas cortantes, aspereza de superficie.

KEYWORDS:

Nogal (*Cordia alliodora*), cutting condition, tool wear, cutting forces, surface roughness.

RESUMEN

Nogal (Cordia alliodora) es una de las mayores especies plantadas en áreas de reforestación en Colombia. El propósito de este estudio es identificar la herramienta de corte más conveniente y las condiciones de corte óptimas para esta especie. Los problemas de procesos considerados aquí fueron: (1) Desgaste de la herramienta, la cual fue medida cada 280 m para una longitud máxima de corte de la pieza de trabajo en madera de 1680 m con cinco diferentes herramientas (Stellite, SKH 51, SKH 51 cubierta de W.C., SKH 51 cubierta de TiN (Titanio) y W.C. (Carbono de tungsteno)), usando el proceso de fresado periférico; (2) Fuerzas cortantes, las cuales fueron medidas para determinar la mejor condición cortante en la variación de la profundidad de corte, velocidad de alimento y velocidad de corte; y (3) Aspereza de la superficie, la cual fue medida cada 250 m sobre una longitud de corte de madera máxima de 2 km. Estos experimentos fueron llevados a cabo en ambas condiciones seca al aire y húmeda. Las herramientas más convenientes fueron SKH 51 cubierta de Titanio (TiN) en condición seca al aire, y W.C. (Carbono de tungsteno) en condición húmeda. Las condiciones cortantes óptimas en ambas condiciones seca al aire y húmeda fueron profundidad de corte (0.5 mm), velocidad de alimento (0.5 m/min) y velocidad de corte (40 m/seg). La aspereza de la superficie de 2.8 μm y 3.9 μm fueron obtenidas en condiciones seca al aire y húmeda respectivamente.

Recibido para evaluación: Noviembre 16 de 2005. Aprobado para publicación: febrero 27 de 2006

- 1 M. Sc., Universidad del Cauca
- 2 Dr., Kagoshima University, Kagoshima – Japón
- 3 Dr., Shimane University, Matsue – Japón
- 4 Ph.D., Forestry Research Institute, Kumashi – Gahna
- 5 Dr., Shimane University, Matsue – Japón

Correspondencia: Julio Cesar Bermudez, e-mail: jcbermudez@unicauca.edu.co

ABSTRACT

Nogal (Cordia alliodora) is a major species planted in reforestation areas in Colombia. The purpose of this study is to identify the most suitable cutting tools and optimum cutting conditions for this species. The processing problems considered here were: (1) tool wear, which was measured every 280 m for a maximum workpiece cutting board length of 1680 m from five different tools (Stellite, SKH 51, SKH 51 W.C. coated, SKH 51 TiN coated and W.C. (Tungsten Carbide)), using the peripheral milling process; (2) cutting forces, which were measured to determine the best cutting condition at varying depth of cut, feed speed and cutting speed; and (3) surface roughness, which was measured every 250 m over a maximum cutting board length of 2 km. These experiments were carried out in both air-dry and wet conditions. The most suitable cutting tools were SKH 51 TiN coated in air-dry condition, and W.C. in wet condition. The optimum cutting conditions in both air-dry and wet conditions were depth of cut (0.5 mm), feed speed (0.5 m/min) and cutting speed (40 m/sec). Surface roughness of 2.8 μm and 3.9 μm was obtained in air-dry and wet conditions respectively.

INTRODUCCIÓN

El Nogal (*Cordia alliodora*) crece desde el norte de México, hasta Paraguay, sur de Brasil y el norte de Argentina. Este esta ampliamente distribuido en las islas del caribe.

Nogal (*Cordia alliodora*) según informes recibidos crece mejor en las zonas de vida bosque Húmedo Tropical y bosque Muy húmedo Tropical donde el rango de la precipitación media anual es desde 1000 a 4000 mm y la temperatura media anual es 25 °C. El rango altitudinal de Nogal (*Cordia alliodora*) se extiende, desde casi el nivel del mar en varios países hasta una elevación de 1900 metros en las tierras altas de Colombia. El Nogal maduro es un árbol de mediano a grande que bajo condiciones de crecimiento óptimas puede alcanzar 30 m en altura y cerca de 100 cm en d.a.p. Comúnmente, se encuentra de 20 m de altura y 46 cm en d.a.p. El fuste es cilíndrico y recto, con ramas en verticilos apareciendo en capas horizontales. Las propiedades de fortaleza general son buenas y similares a aquellas de la Gaoba. Los rangos de gravedad específica son de 0.44 a 0.52 gr/cm³ (1, 7).

El Nogal (*Cordia alliodora*) es una de las mejores especies plantadas en áreas de reforestación en Colombia, junto con el árbol de café (Arabica-coffee). Su superficie también tiene un buen brillo después del lijado y por esa razón es usada comercialmente en la producción de muebles finos decorativos, ebanistería (sillas, marcos y ventanas), instrumentos musicales, chapas ornamentales, botes, terminado de interiores, y construcciones en general (2). Sin embargo, ningún estudio de maquinado de muestras de madera de Nogal ha si re-

portado todavía desde Colombia. En cada estudio es necesario examinar los problemas en procesos los cuales quizás se encontraran cuando la madera de Nogal (*Cordia alliodora*) es maquinada. Los problemas considerados aquí fueron: 1. desgaste de Herramienta, 2. fuerzas de corte y 3. aspereza de la superficie. Estos procesos son considerados para proveer datos técnicos necesarios a la industria maderera en Colombia.

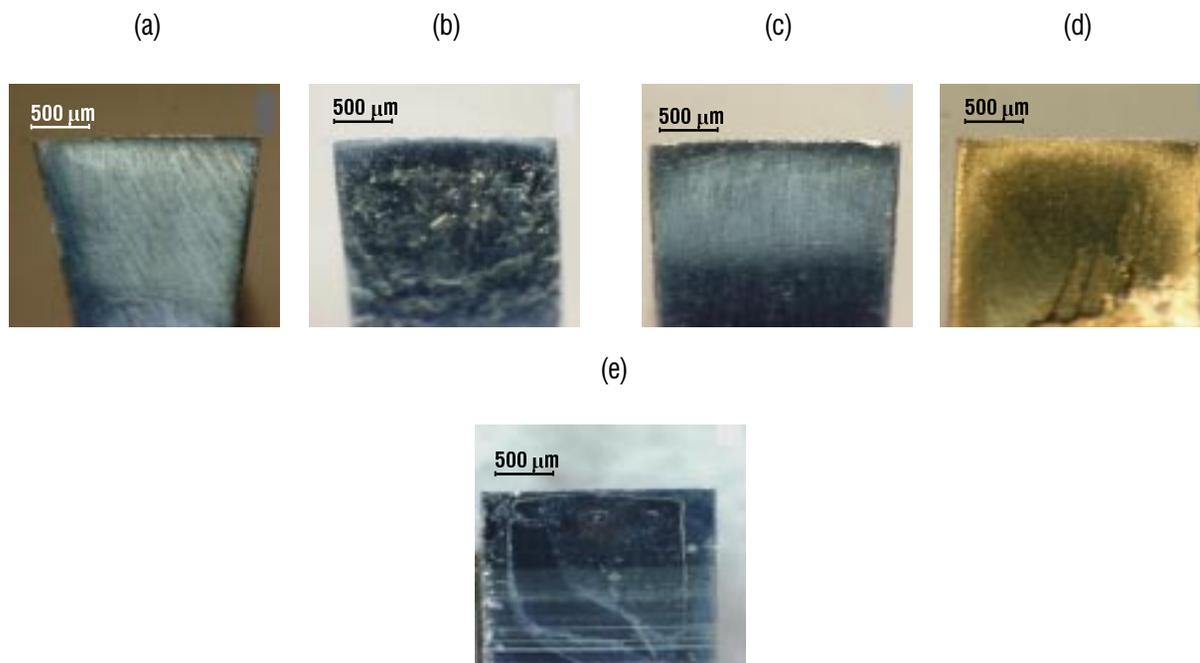
EXPERIMENTO

Medición de Desgaste de la Herramienta

El desgaste de la herramienta fue medido sobre el ángulo de ataque desde cinco herramientas diferentes, llamadas Stellite (Figura 1,(a)), SKH 51 (Figura 1,(b)), SKH 51 cubierta de W.C. (Figura 1,(c)), SKH 51 cubierta de Titanio (TiN) (Figura 1,(d)) y W.C. (Carburo de Tungsteno, con cobalto como cemento) (Figura 1,(e)), con el contenido de humedad seca al aire y húmeda para determinar la menor disminución de la herramienta para la especie.

La muestra de madera seca al aire fue condicionada en un cuarto al 60% de humedad relativa y 20 °C por 2 meses, resultando un contenido de humedad del 9%, mientras la pieza de trabajo húmeda fue sumergida en agua por 2 semanas, dando un contenido de humedad del 100%. Las condiciones de corte fueron profundidad de corte (2 mm), velocidad de alimento (2 m/min) y velocidad de rotación (3000 rpm) para una distancia de corte de madera máxima de 1680 m. La

Figura 1. Cara cortante de las herramientas usadas para medir el desgaste: (a) Stellite; (b) SKH 51; (c) SKH 51 cubierta de W.C.; (d) SKH 51 cubierta de Titanio (TiN); (e) W.C. (Carburo de Tungsteno).



medida del desgaste de la herramienta fue hecha cada 280 m de distancia de corte de madera cubierta.

Las herramientas de corte tenían dimensiones de 25°, 45° y 20° para el ángulo de corte, ángulo de cuchilla y ángulo libre respectivamente. El ancho total de la punta fue 2 mm. El corte fue llevado a cabo sobre la mitad del total del ancho (Figura 2). Las cubiertas usadas en este experimento tienen un espesor de 10 µm. El tratamiento calorífico usado para la fabricación de la cubierta de Titanio es deposición de vapor físico (PVD) de tipo HCD. La cubierta de W.C. (Carburo de Tungsteno) es fabricada por alta presión y combustible de oxígeno de alta velocidad.

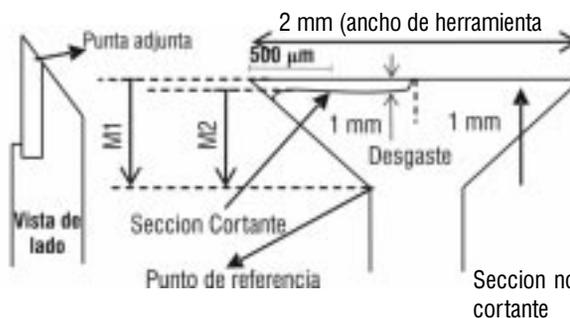
La medición del desgaste de la herramienta fue llevada a cabo con un microscopio electrónico óptico (MEO). El método comprende:

1. La distancia entre el borde y el punto de referencia fue medida antes del corte (Figura 2: M1). Esta distancia fue medida tres veces para obtener un valor fidedigno.
2. La distancia fue medida nuevamente cada 280 m de distancia de madera cortada para determinar el

desgaste de herramienta sucesivo (Figura 2: M2). La medida fue hecha tres veces en cada distancia para obtener un dato confiable.

- M1: Medida (antes de corte)
M2: Medida (cada 280 m)

Figura 2. Vista del lado, sección de corte y método usado para medir el desgaste de la herramienta.



La pieza de trabajo usada para la medición del desgaste de herramienta tuvo dimensiones de 350 mm de largo, 100 mm de ancho y 40 mm de espesor con una gravedad específica básica de 0.47 gr/cm³.

El fresado puede ser clasificado como fresado periférico y de superficie. El fresado periférico fue evaluado con fresado contra avance con un diámetro del disco de corte de 160 mm, una profundidad de corte de 2 mm, y un ancho de corte de 1 mm (Figura 3). Este experimento fue llevado a cabo usando una Máquina Computadora de Control Numérico (CNC).

Determinación de las Fuerzas Cortantes

Las fuerzas cortantes fueron determinadas usando las siguientes condiciones de corte: profundidad de corte (0.5, 1, 2, 3 mm), velocidad de alimento (0.5, 1, 1.5, 2 m/min) y velocidad de corte (10, 20, 30, 40 m/seg). Las pruebas de corte fueron repetidas cinco veces en condiciones seca al aire y húmeda. Las fuerzas cortantes medidas son fuerzas cortantes totales; ellas son medidas con un dinamómetro piezoeléctrico fijado a la mesa de alimentación. El dinamómetro fue calibrado por cargas conocidas aplicadas a direcciones normales y paralelas (3, 9).

Medición Aspereza de la Superficie

La aspereza de la superficie y el desgaste de la herramienta fueron medidas cada 250 m sobre un máximo de distancia de madera cortada de 2000 m para observar el efecto del desgaste de la herramienta sobre la aspereza, en ambos contenidos de humedad seca al aire y húmeda. Esta medida fue llevada a cabo con un Taylor Hobson de Precisión. Ra fue seleccionado en este estudio para cuantificar la aspereza de la superficie, esta variable es reconocida universalmente como la representación aritmética principal de valores absolutos del perfil de desviación (4, 8, 10).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desgaste de la Herramienta

La herramienta con mejor rendimiento en condición seca al aire fue SKH 51 con cubierta de Titanio (TiN), con un desgaste de herramienta sobre la cara cortante de $26 \mu\text{m}$ en la distancia de corte de madera final de 1680 m (Figura 4 y Figura 5).

Figura 4, muestra el desgaste de herramienta sobre la sección cortante con respecto a la sección no cortante. En la foto (d), un severo cambio de tonalidad en la cubierta de titanio (espesor 10 μm) por altas temperaturas es observado sobre la sección cortante, por el color oro de el material. Esta situación no es generada por la delaminación de la herramienta cubierta de titanio (TiN).

La Figura 5, muestra desgaste de herramienta incrementada con la distancia de madera cortada.

La punta adherida de SKH 51 desapareció sobre los 1400 m de distancia de madera cortada. La herramienta Stellite obtuvo un mejor rendimiento que SKH 51 y SKH 51 con cubierta de W.C. teniendo mayor dureza y resistencia a altas temperaturas (5). La herramienta con menor desgaste en la condición húmeda fue W.C. (Carburo de Tungsteno), con desgaste de la herramienta de $24 \mu\text{m}$ sobre la cara de ataque en la distancia final de madera cortada de 1680 m (Figura 6 y Figura 7).

Figura 6 (d) muestra la misma situación descrita previamente en la condición seca al aire de la herramienta SKH 51 con cubierta de Titanio.

Figura 3. Mecanismo de fresado periférico contra avance en la maquina CNC.

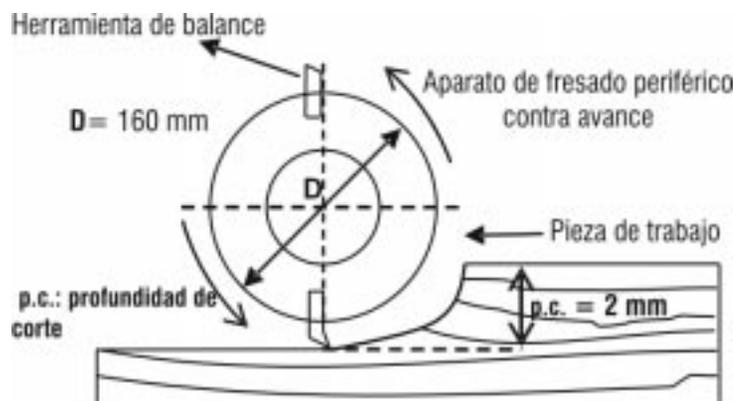
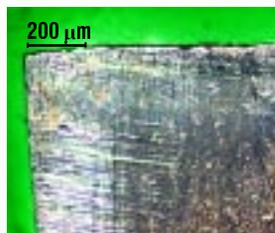


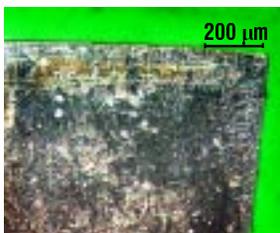
Figura 4. Fotografías de las secciones cortantes y no cortantes sobre la cara de ataque para las herramientas en condición seca al aire: (a) Stellite; (b) SKH 51; (c) SKH 51 cubierta W.C.; (d) SKH 51 cubierta Titanio (TiN); (e) W.C. (Carburo de Tungsteno) en la distancia final de corte de madera de 1680 m..

(a) Stellite

Sección cortante

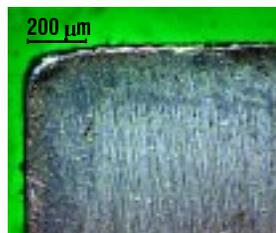


Sección no cortante

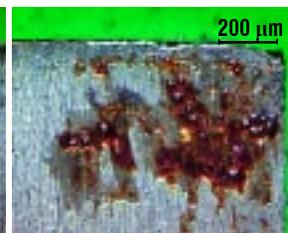


(b) SKH 51

Sección cortante

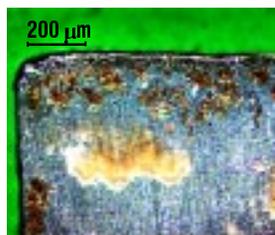


Sección no cortante

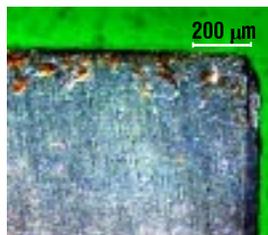


(c) SKH 51 W.C

Sección cortante

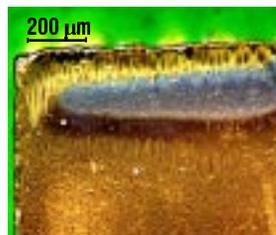


Sección no cortante

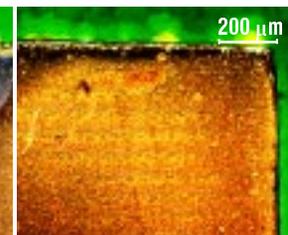


(d) SKH 51 TiN

Sección cortante

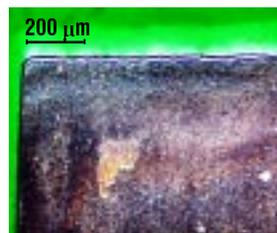


Sección no cortante



(e) W.C.

Sección cortante



Sección no cortante

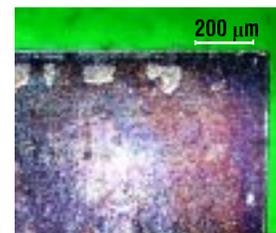


Figura 5. Desgaste de herramientas sobre la cara de ataque en el maquinado de la condición seca al aire.

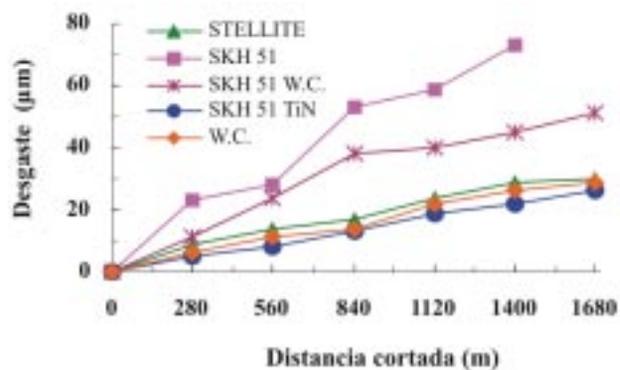
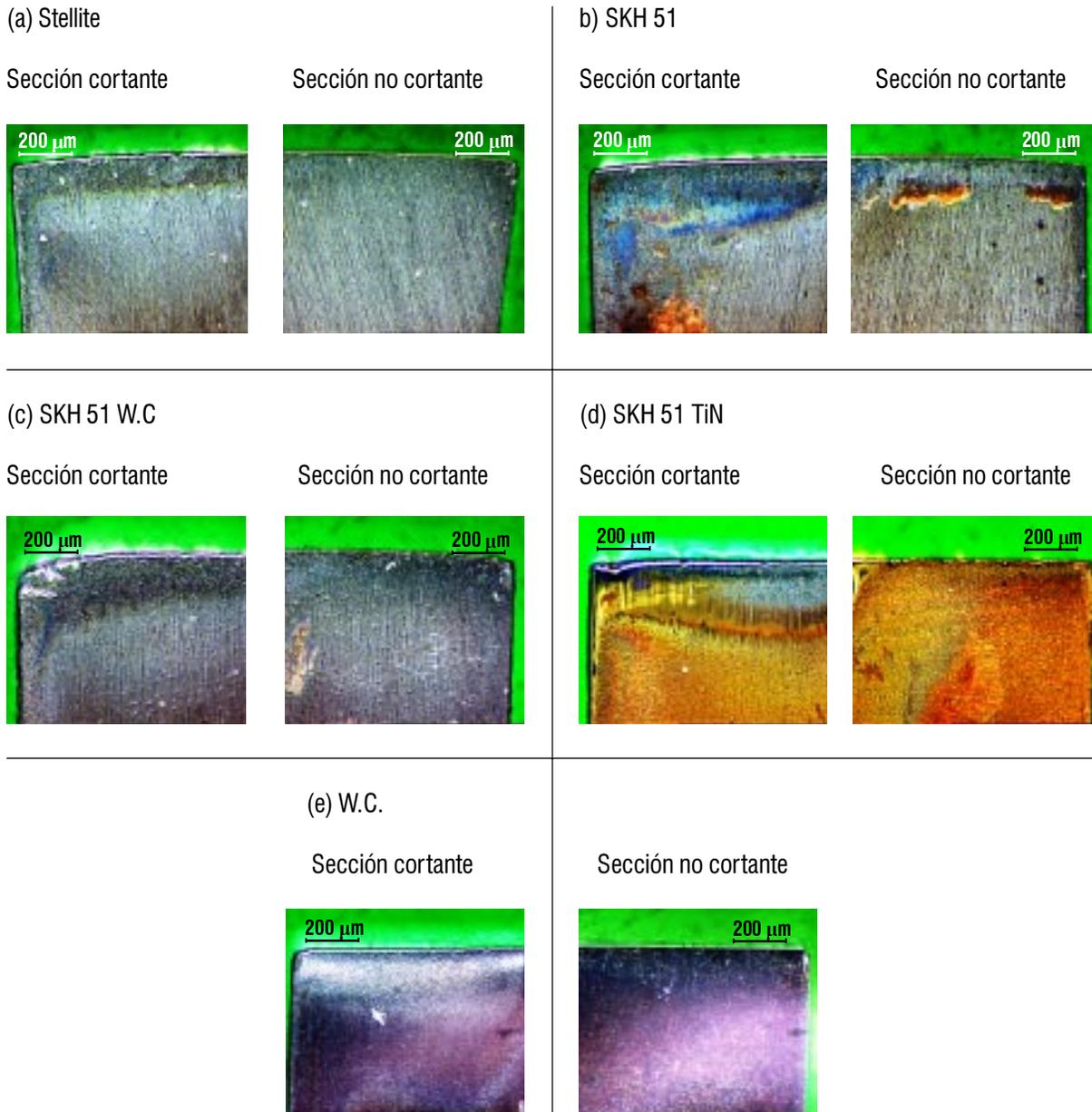


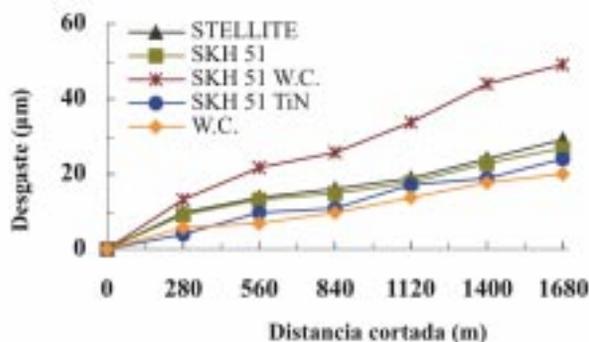
Figura 6. Fotografías de las secciones Cortantes y No cortantes sobre la cara de ataque para las herramientas en condición húmeda: (a) Stellite; (b) SKH 51; (c) SKH 51 con cubierta de W.C.; (d) SKH 51 con cubierta de titanio (TiN); (e) W.C. (Carburo de Tungsteno) en la distancia final de madera cortada de 1680 m.



La Figura 7, muestra desgaste de herramienta incrementada con la distancia de madera cortada. El desgaste de SKH 51 con cubierta de W.C., fue superior que aquellas otras cuatro herramientas. La herramienta SKH 51 con cubierta de Titanio con una mayor dureza y resistencia al esfuerzo y a la corrección (6), obtuvo menor rendimiento que W.C. (Carburo de Tungsteno).

El desgaste de las herramientas fue superior en condición seca al aire que en condición húmeda, esta diferencia no es significativa entre ambas condiciones, excepto en SKH 51. El desgaste de la herramienta SKH 51 con cubierta de W.C. fue muy alta en ambas condiciones seca al aire y húmeda. SKH 51 con cubierta de Titanio se desgastó menos que W.C. en condición seca

Figura 7. Desgaste de herramientas sobre la cara de ataque en el maquinado de la condición húmeda.



al aire, pero mostró mayor desgaste que W.C. en condición húmeda. Estas características serán discutidas en un próximo artículo.

Fuerzas Cortantes

Las fuerzas cortantes usando SKH 51 con cubierta de Titanio, la cual tuvo el mínimo desgaste dentro de las herramientas investigadas para la condición seca al aire con la variación de la velocidad de corte (10, 20, 30, 40 m/seg), profundidad de corte (0.5, 1, 2, 3 mm), y la velocidad de alimento (0.5, 1, 1.5, 2 m/min), esto puede ser observado en las Figuras 8, 9 y 10.

Figura 8. Fuerzas cortantes obtenidas con velocidad de corte constante (40 m/seg) en la variación de la profundidad de corte (p.c.) y velocidad de alimento, usando SKH 51 con cubierta de Titanio (TiN) en condición seca al aire.

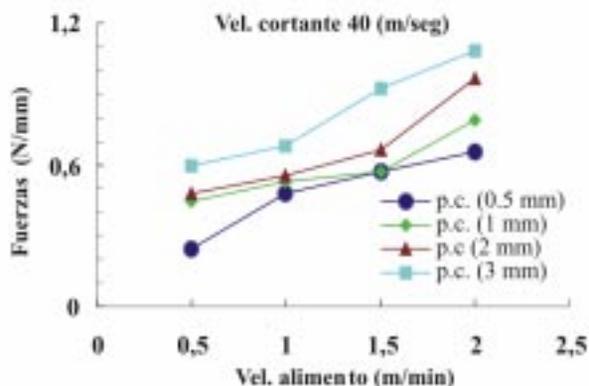


Figura 9. Fuerzas cortantes obtenidas con la profundidad de corte constante (0.5 mm) en la variación de la velocidad de alimento (v.a.) y la velocidad cortante, usando SKH 51 con cubierta de Titanio en condición seca al aire.

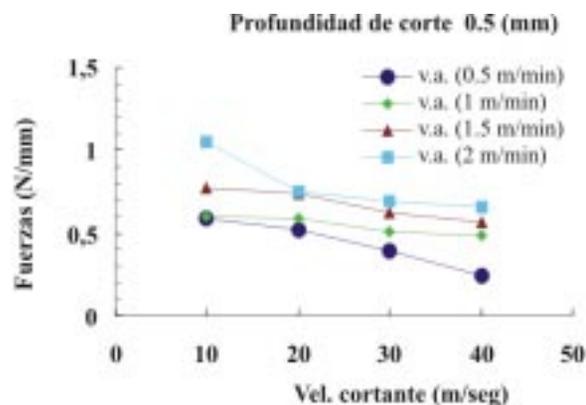


Figura 8, muestra que la fuerza cortante se incrementa con el aumento de la profundidad de corte y la velocidad de alimento, con la velocidad de corte (40 m/seg) constante en condición seca al aire.

Figura 9, muestra que las fuerzas cortantes se incrementan con el aumento de la velocidad de alimento en la profundidad de corte constante (0.5 mm) en condición seca al aire, y las fuerzas cortantes disminuyen así como la velocidad de corte se incrementan.

Figura 10, muestra que las fuerzas cortantes decrecen como la velocidad de corte aumenta y las fuerzas de corte aumentan con el incremento de la profundidad de corte en la velocidad de alimento constante (0.5 m/min) en condición seca al aire.

Las condiciones cortantes optimas para este experimento usando SKH 51 con cubierta de Titanio (TiN) en condición seca al aire fueron profundidad de corte (0.5 mm), velocidad de alimento (0.5 m/min) y velocidad de corte (40 m/seg) con un valor de fuerza cortante de 0.246 N/mm, (Fig. 8, Fig. 9 y Fig. 10).

Las fuerzas cortantes usando W.C. (Carburo de Tungsteno), la cual tuvo el mínimo desgaste dentro de las herramientas investigadas para la condición húmeda en la variación de la velocidad cortante (10, 20, 30, 40 m/seg), profundidad de corte (0.5, 1, 2, 3 mm), y la velocidad de alimento (0.5, 1, 1.5, 2 m/min), esto puede ser observado en las figuras 11, 12 y 13.

Figura 10. Fuerzas cortantes obtenidas con la velocidad de alimento constante (0.5 m/min) en la variación de la velocidad cortante (v.c.) y la profundidad de corte, usando SKH 51 con cubierta de Titanio (TiN) en condición seca al aire.

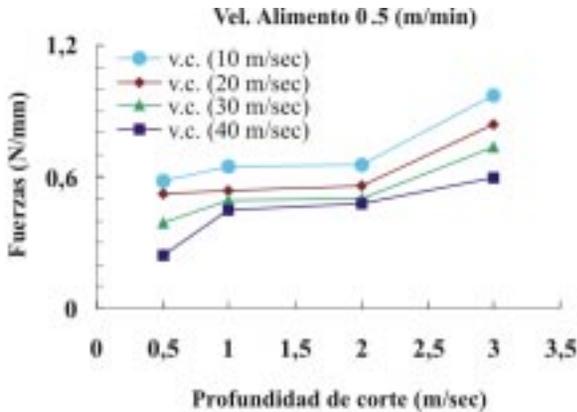


Figura 11, muestra que la fuerza cortante se incrementa con el aumento de la profundidad de corte y la velocidad de alimento con la velocidad de corte (40 m/seg) constante en condición húmeda.

Figura 12, muestra que las fuerzas cortantes se incrementan con el aumento de la velocidad de alimento en la profundidad de corte constante (0.5 mm) en condición húmeda y las fuerzas cortantes disminuyen cuando la velocidad de corte se incrementan.

Figura 11. Fuerzas cortantes obtenidas con velocidad cortante constante (40 m/seg) en la variación de la profundidad de corte (p.c.) y velocidad de alimento, usando W.C. (Carburo de Tungsteno) en condición húmeda.

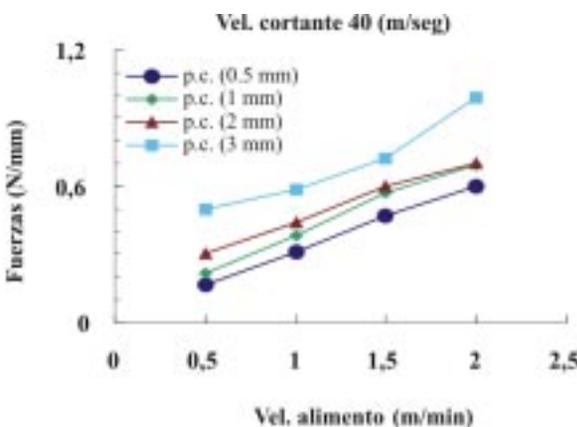


Figura 12. Fuerzas cortantes obtenidas con la profundidad de corte constante (0.5 mm) en la variación de la velocidad de alimento (v.a.) y la velocidad cortante, usando W.C. (Carburo de Tungsteno) en condición húmeda.

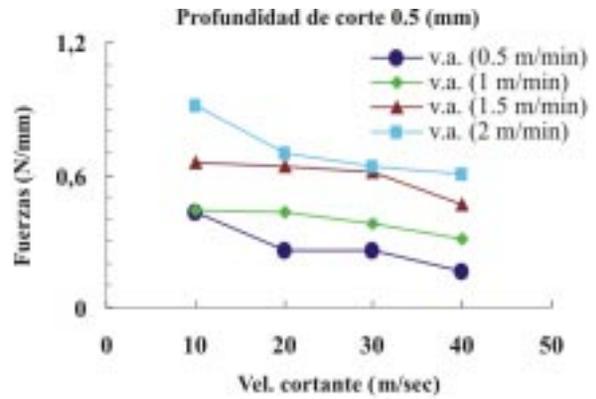
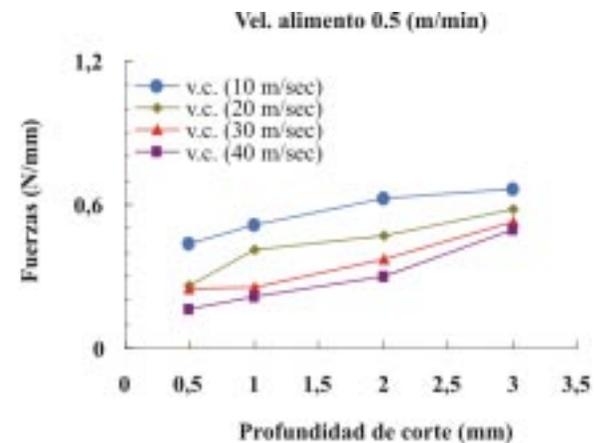


Figura 13, muestra que las fuerzas cortantes decrecen como la velocidad de corte aumenta y las fuerzas de corte aumentan con el incremento de la profundidad de corte en la velocidad de alimento constante (0.5 m/min) en condición húmeda.

Las condiciones cortantes optimas para este experimento usando W.C. (Carburo de Tungsteno) en condición húmeda. Figura 14, muestra mayores fuerzas cortantes en la condición seca al aire que en condición húmeda. La fuer-

Figura 13. Fuerzas cortantes obtenidas con la velocidad de alimento constante (0.5 m/min) en la variación de la velocidad cortante (v.c.) y la profundidad de corte, usando W.C. (Carburo de Tungsteno) en condición húmeda.



zas cortantes disminuyen con el incremento de la velocidad de corte con la profundidad de corte (0.5 mm) y velocidad de alimento (0.5 m/min) constantes en ambas condiciones seca al aire y húmeda. húmeda fueron profundidad de corte (0.5 mm), velocidad de alimento (0.5 m/min) y velocidad de corte (40 m/sec) con un valor de fuerza cortante 0.164 N/mm, (Figura 11, Figura 12 y Figura 13).

Las condiciones cortantes optimas para este experimento en ambas condiciones seca al aire y húmeda fueron profundidad de corte (0.5 mm), velocidad de alimento (0.5 m/min) y velocidad cortante (40 m/seg) (Figura 14).

Figura 14. Fuerzas cortantes obtenidas con la profundidad de corte constante (p.c.) (0.5 mm) y velocidad de alimento (v.a.) (0.5 m/min) en la variación de la velocidad cortante en las condiciones seca al aire y húmeda.

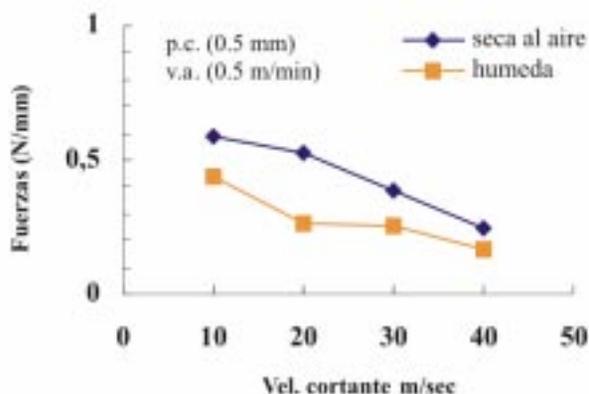


Figura 15. Desgaste de herramienta y aspereza de la superficie relacionada con la distancia de madera cortada usando SKH 51 con cubierta de Titanio (TiN), maquinada en condición seca al aire.

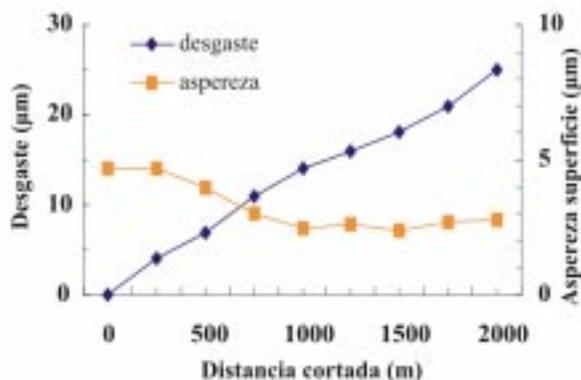
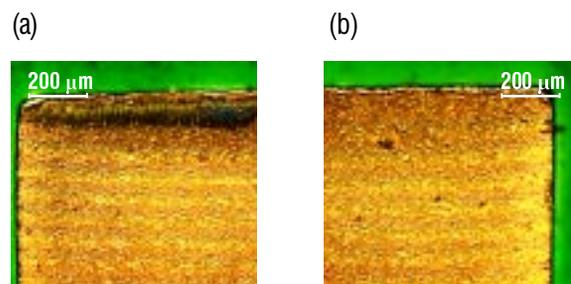


Figura 16. Desgaste de herramienta sobre la cara de ataque para una máxima distancia de madera cortada de 2000 m usando SKH 51 con cubierta de Titanio (TiN), maquinada en condición seca al aire; (a) Sección cortante, (b) Sección no cortante.



Aspereza de la superficie

La aspereza de la superficie de $2.8 \mu\text{m}$ fue obtenida con un desgaste en la herramienta de $25 \mu\text{m}$ sobre la cara de corte para la condición seca al aire sobre una distancia total de madera cortada de 2000 m. La aspereza de la superficie maquinada disminuyo como aumento el desgaste de la herramienta y la distancia de madera cortada (Figura 15 y Figura 16).

La aspereza de la superficie de $3.9 \mu\text{m}$ fue obtenida con un desgaste en la herramienta de $17 \mu\text{m}$ sobre la cara de ataque en condición húmeda para una máxima distancia de madera cortada de 2000 m. La aspereza de la superficie maquinada se incremento como aumentaron el desgaste de la herramienta y la distancia de madera cortada. (Figura 17 y Figura 18).

Figura 17. Desgaste de Herramienta y aspereza de superficie relacionada con la distancia de madera cortada usando W.C. (Carburo de Tungsteno), maquinada en condición húmeda.

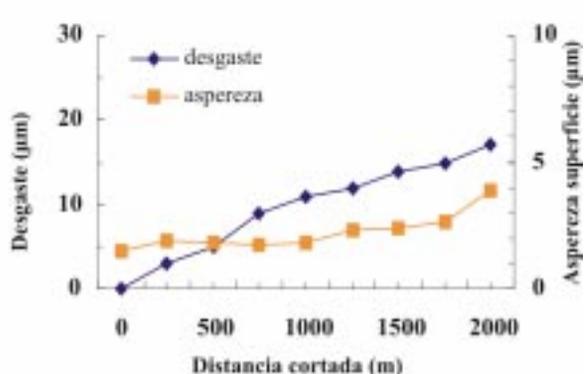
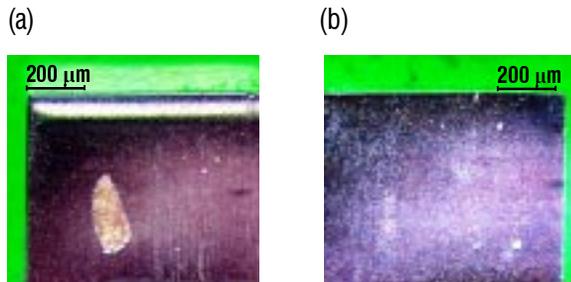


Figura 18. Desgaste de herramienta sobre la cara de ataque para una distancia de madera cortada de 2000 m usando W.C. (Carburo de Tungsteno), maquinada en condición húmeda; (a) Sección cortante, (b) Sección No cortante.



CONCLUSIÓN

El maquinado del fresado periférico en el Nogal (*Cordia alliodora*) (condiciones seca al aire y húmeda) mostró incremento del desgaste de la herramienta así como aumento la distancia de madera cortada. Las fuerzas cortantes resultantes aumentaron con el incremento de la velocidad de alimento y la profundidad de corte; y las fuerzas de corte decrecieron como aumento la velocidad cortante. La aspereza de la superficie fue afectada debido al incremento del desgaste de la herramienta y a la distancia de madera cortada. Los resultados sugieren que el método mas eficiente para el procesamiento de las muestras de madera de Nogal (*Cordia alliodora*) en condición seca al aire es usando la herramienta SKH 51 con cubierta de Titanio (TiN), mientras en la condición húmeda se debe usar la herramienta W.C. (Carburo de Tungsteno), Con dimensiones de 25° ángulo cortante y 20° ángulo libre para las dos herramientas, y las condiciones de corte optimas son velocidad de alimento 0.5 m/min, profundidad de corte 0.5 mm, y velocidad cortante 40 m/seg. Bajo estas condiciones se puede lograr el menor desgaste de la herramienta, y mantener una buena calidad en el maquinado de la superficie de la pieza de trabajo.

REFERENCIAS

- (1) LIEGEL, Leon. y STEAD, Jena. (1990). Silvics of North America. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Vol. 2, pp. 270-277.
- (2) VEGA, Leonidas. La silvicultura de *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken como especie exótica en Surinam. 1977. p. 3 -26. (Boletín del Instituto Forestal Latino-Americano de Investigación y Capacitación; no 52).
- (3) EYMA, Frank y MARTIN, Philip. Influence of the transitional zone of wood species on cutting forces in the router cutting process (90-0). France. 2001. p. 489-490. (Holz als Roh-und Werkstoff. no 59).
- (4) Taylor Hobson Precision. Surtronic 3+ Operator's Handbook. Leicester: Taylor Hobson PNEUMO. 1993, 80 p.
- (5) TANAKA, Chiaki y KITAYAMA, Shigeru. Wood Science Series. 6 ed. Japon: Lakeside BIWAKO, 1992. p. 9-50.
- (6) KALPAKJIAN, Schmid. Manufacturing Engineering and Technology. 3 ed. Addison-wesley publishing company, 1995. 1271 p.
- (7) BISHOP, Robert. LabVIEW Student. 6i ed. Prentice Hall, 2001. 505 p.
- (8) SAGLAM, Haci y UNUVAR, Ali. Three-component, strain gage based milling dynamometer design and manufacturing, 2001. p. 95-109. (Journal of Integrated Design and Process Science. Vol. 5, no.2).
- (9) RICHTER, Klaus.; FEIST, William y KNAEBE, Mark. Effect of surface roughness on the performance of finishes. 1995, (Forest Products Journal., no 45, p. 91-97).
- (10) SANDAK, Jakub y TANAKA, Chiaki. Sensors selection for evaluation of wood surface smoothness. En: Proceedings of the 16th International Wood Machining Seminar (IWMS). (Part 2, 2003, p. 679-688.)