

EFEECTO DEL RECTIFICADO DE CUCHILLAS SOBRE LA CALIDAD SUPERFICIAL DE MADERA CEPILLADA DE PINO RADIATA

EFFECTS OF KNIVES JOINTING ON PLANED SURFACE QUALITY OF RADIATA PINE WOOD



Gerson Rojas-Espinoza^{1,}*

<https://orcid.org/0000-0002-6369-6936>

Sergio Contreras-Espinoza²

<https://orcid.org/0000-0003-3075-4922>

Claudio Montero³

<https://orcid.org/0000-0001-7176-1892>

RESUMEN

La operación de rectificado permite obtener una órbita de corte única para todas las cuchillas instaladas en un cabezal rotativo. Durante este proceso, una piedra esmeril pasa sobre los filos de las cuchillas en movimiento, generando un bisel cuyo ancho varía dependiendo de la intensidad de la rectificación. Una adecuada selección del ancho de bisel es esencial para garantizar un corte homogéneo y de calidad en la superficie de la madera. Este estudio tuvo por objetivo evaluar como el ancho de bisel y el nivel de desgaste de las cuchillas (representado por la longitud de cepillado) influyen en el consumo de energía y en la calidad superficial de la madera de pino radiata. Para ello, se probaron cuatro anchos de bisel y cuatro niveles de desgaste de cuchillas, utilizando la resistencia al cizalle de uniones encoladas como indicador de la calidad de la superficie. Los resultados revelaron que tanto el ancho de bisel como la longitud de cepillado tienen una relación directa con el consumo de energía, mientras que presentan una relación inversa con la resistencia al cizalle. En función de estos hallazgos, se recomienda emplear un ancho bisel de 0,3 mm para el cepillado de madera de pino radiata, ya que presenta menor consumo de energía y mayor resistencia al cizalle.

Palabras claves: Ancho bisel, consumo energía de corte, desgaste de cuchillas, pino radiata, resistencia al cizalle, calidad superficial, cepillado de madera.

ABSTRACT

The jointing allows obtaining a single cutting orbit, for all knives installed on the periphery of a rotary knife holder. An emery stone is worked over the cutting edge when they are in motion, which produces a bevel, which is formed according to level of the rectification. Accurate selection of the bevel allows a uniform cut of the surface of the lumber. The objective of this research, was to evaluate the effect of bevel width and wear level (planning length) of knives, on energy consumption and surface quality, during the planning process in radiata pine lumber. Four bevel widths and four wear levels were tested. The planning process was carried out using a molding machine specifically adjusted for this purpose. Gluing shear strength was used as a criterion to evaluate the wood surface quality. The results showed a positive relationship between energy consumption and

¹Universidad del Bío-Bío. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería en Maderas. Concepción, Chile.

²Universidad del Bío-Bío. Facultad de Ciencias. Departamento de Estadística. Concepción, Chile.

³Universidad del Bío-Bío. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Adhesivos y Materiales Compuestos. Laboratorio de Diseño y Tecnología de la Madera. Concepción, Chile.

*Autor para correspondencia: grojas@ubiobio.cl

Recibido: 30.12.2023 Aceptado: 24.01.2025

both bevel width and wear level, and a negative relationship with gluing shear strength. Based on the above, using a 0,3 mm bevel, allowed to minimize the energy consumption and to maximize the gluing shear strength during the planing of radiata pine, since it exhibited lower energy consumption and higher shear resistance.

Keywords: Bevel width, cutting energy consumption, knife wear, radiata pine, gluing shear strength, surface quality, wood planing.

INTRODUCCIÓN

En Chile, la madera de pino radiata es utilizada principalmente para la fabricación de madera aserrada y productos de alto valor agregado, dada su disponibilidad y aceptación en el mercado. Estos últimos productos, se caracterizan por una adecuada calidad superficial, basada en criterios técnicos o estéticos, que están principalmente relacionados con la capacidad de absorción de revestimientos y adhesivos, afectando directamente la calidad de la adhesión entre las superficies tratadas (Aguilera y Muñoz 2011, Tiryaki *et al.* 2014). Una comprensión de los factores que influyen en la calidad superficial de la madera permitiría incrementar la utilidad en la industria de remanufactura, así como generar productos con valor agregado.

La calidad superficial de la madera cepillada es afectada principalmente por las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de ésta, la geometría de la herramienta de corte, las condiciones de operación y la experiencia del operador de la máquina cepilladora. El grado de calidad superficial puede expresarse en términos del daño en la superficie de la madera durante el proceso de cepillado. Para tal propósito, se utiliza una máquina cepilladora, la cual corta virutas unitarias en la superficie de la pieza de madera, a través de la acción intermitente de las cuchillas planas instaladas en la periferia del cabezal rotativo.

La etapa final de la instalación de las cuchillas en el cabezal, es la operación de rectificadas. Esta tiene como propósito lograr que las cuchillas presenten una órbita de corte única, la cual tiende a no ser homogénea dependiendo del tipo de montaje del cabezal en el eje. Como resultado, una adecuada calidad superficial de la madera se hace evidente al generar virutas de igual espesor (Dunsmore 1965), y al reducir las marcas de corte en la superficie maquinada (Aguilera y Fernández 2012).

El rectificado consiste en pasar una piedra esmeril sobre el filo de cada cuchilla instalada en el cabezal, mientras este gira en vacío, generando un bisel cuyo ancho depende de la intensidad del rectificado. El ancho de bisel (referido en la dirección perpendicular al filo) forma la superficie posterior del filo de la cuchilla y se rectifica para generar un ángulo libre igual a 0°. Sin embargo, debido al avance de la madera, este ángulo se vuelve negativo, lo que provoca compresión perpendicular y fricción con la nueva superficie de la madera (Hoadley 1980). Por tanto, el ancho de bisel debe ser lo más estrecho posible para minimizar el calentamiento por fricción que provoca la compresión perpendicular. Este fenómeno puede atribuirse al incremento de la componente normal de la fuerza de corte durante el proceso de cepillado (Hernández y Rojas 2002, De Moura y Hernández 2006).

A pesar de lo anterior, el rectificado de cuchillas sigue siendo la mejor solución para resolver la inexactitud del elemento de corte al cepillar madera (Ogun y Jackson 2017). Esta práctica es habitual en la industria maderera (Aguilera y Fernández 2012). Factores como el ancho del bisel, el nivel de desgaste de las cuchillas y otros parámetros del proceso de cepillado, impactan significativamente en la calidad superficial y en la resistencia de la unión adhesiva, y aún necesitan ser estudiados en detalle (Hernández y Naderi 2001, Singh *et al.* 2002).

En esta dirección, Hernández y Naderi 2001, Hernández y De Moura 2002 y Hernández y Rojas 2002, observaron que el nivel de rectificado depende tanto de la especie a procesar como del nivel de desgaste del filo de la herramienta. Para Kuljich *et al.* 2013, el nivel de rectificado y ángulo de ataque de las cuchillas, afectan la calidad superficial de la madera durante el proceso de cepillado. Por otro lado Ogun y Jackson (2017), han señalado que las cuchillas sin rectificadas generan marcas de corte significativas en la superficie de las piezas de madera. Asimismo, Jones (1994), ha indicado que un ancho de bisel excesivo o irregular produce imperfecciones en la superficie cepillada, lo que disminuye su calidad. Este daño aumenta a medida que el desgaste del filo de las cuchillas incrementa, ya sea por uso continuo o por contacto con zonas de madera de mayor densidad, nudos o elementos extraños (Aguilera y Fernández 2012).

Diferentes valores de ancho de bisel para cuchillas han sido recomendados en la literatura. Dunsmore (1965), recomendó un máximo de tres o cuatro rectificadas, y un ancho de bisel no mayor a 1,2 mm. Jones (1994), ha indicado que el primer rectificado no debe superar los 0,31 mm. Por otro lado, Wengert (1988) y ASTM D1667-87 (2004) han establecido que el ancho máximo admisible de bisel antes de volver a afilar debe ser de 0,8 mm. Turner (1999), ha concluido que un ancho de bisel de 1,0 mm no afecta la calidad superficial durante el moldurado de madera de pino radiata. Hoadley (1980), ha señalado que un bisel de hasta 0,25 mm no genera problemas significativos en la calidad superficial, Hernández y Rojas (2002), recomendaron que un ancho de bisel de 0,9 mm para el cepillado de madera de arce, mientras que Aguilera y Muñoz (2011) aconsejan valores entre 0,8 mm y 1,2 mm.

En general, la madera de pino radiata presenta buena trabajabilidad. Sin embargo, el proceso de cepillado aún enfrenta problemas relacionados con la calidad superficial de las piezas obtenidas, y su efecto en la calidad de la unión adhesiva en productos de remanufactura. Así, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del ancho de bisel y del nivel de desgaste de las cuchillas sobre el consumo de energía y la resistencia al cizallamiento en madera de pino radiata durante el proceso de cepillado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material de ensayo

Un primer grupo de 520 piezas de madera aserrada de corte tangencial de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) de 50 mm x 75 mm x 3200 mm, fue secado en un secador convencional hasta obtener un contenido de humedad promedio de 12 % por pieza. El contenido de humedad de las piezas fue medido en tres puntos equidistantes en las caras de las piezas utilizando un xilohigrómetro digital de contacto marca Wagner. Los nudos presentes en algunas de estas piezas de madera fueron eliminados para evitar el efecto de estos sobre el desgaste de las cuchillas. Esta madera fue utilizada solamente para generar cuatro diferentes niveles de desgaste en las cuchillas planas, con longitudes de cepillado de 0 m, 5000 m, 10000 m y 15000 m, respectivamente.

Un segundo grupo de 60 piezas de madera, con dimensiones iniciales de 25 mm x 75 mm x 3200 mm, también fue secado en un secador convencional hasta alcanzar un contenido de humedad promedio de 12 % y luego acondicionadas en una cámara de clima. Estas piezas de madera fueron distribuidas de manera aleatoria en 4 grupos de 15 piezas, asignando cada grupo asignado a uno de los niveles de desgaste evaluados (0 m, 5000 m, 10000 m y 15000 m). Posteriormente, las piezas fueron redimensionadas a 20 mm x 65 mm x 3200 mm y luego cortadas en cuatro secciones (probetas) de 650 mm de largo. Cada probeta se asignó a un nivel específico de ancho de bisel (0 mm, 0,3 mm, 0,6 mm y 0,9 mm). Finalmente, se obtuvieron 240 probetas con dimensiones de 20 mm x 65 mm x 650 mm, las cuales fueron utilizadas en este estudio para realizar el ensayo de cepillado y la medición del consumo de energía.

Cepillado de madera

Las probetas de madera de cada grupo fueron cepilladas en una máquina moldurera de cinco cabezales, con montaje convencional, perteneciente al Pabellón Tecnológico de la Madera (PTM) de la Universidad del Bío-Bío. Una sola de las cuatro cuchillas instaladas en el cabezal superior de la máquina (cuarto cabezal), con un diámetro igual de 125 mm y girando a 6000 rpm, realizó el corte, siendo de calidad de acero D2 con aleación de carbono, material utilizado comúnmente para procesar maderas blandas. La razón de avance fue de 13 marcas de cuchilla por pulgada, la altura de cepillado fue ajustada para remover 1 mm por pasada y la velocidad de avance de la madera fue de 12 m/min. El valor de la razón de avance se calculó dividiendo 25,4 mm (1 pulgada) entre el avance por cuchilla (velocidad de avance/rpm del cabezal x número de cuchillas que cortan).

La preparación (rectificado) de las cuchillas con los diferentes anchos de bisel a evaluar (0 mm, 0,3 mm, 0,6 mm y 0,9 mm) fue realizada por la empresa proveedora de las cuchillas, utilizando una piedra rectificadora de cuchillas marca Norton de óxido de aluminio blanco, grano 80 y dureza L, girando a 3000 rpm. El ángulo de perfil y el ángulo libre de la cuchilla antes del rectificado eran de 45° y 15°, respectivamente. Después del rectificado, estos ángulos se ajustaron a 45° y 0° respectivamente. La verificación de los ángulos de las cuchillas se realizó utilizando un goniómetro digital de base magnética. Para cada ancho de bisel se utilizó una cuchilla diferente, las cuales se trabajaron de manera sucesiva para alcanzar los cuatro niveles de desgaste a evaluar.

El ensayo de cepillado de las probetas asociadas a cada condición de corte comenzó utilizando la cuchilla

con 0 mm de ancho de bisel y un nivel de desgaste 0 m. Esta cuchilla fue posteriormente trabajada hasta completar 5000 m y se realizó el ensayo de cepillado para esta condición de corte, es decir, 0 mm de ancho de bisel y 5000 m de nivel de desgaste. Esta operación se repitió hasta completar los niveles de desgaste 10000 m y 15000 m, manteniendo un ancho de bisel 0 mm. El ensayo de cepillado con las cuchillas de 0,3 mm, 0,6 mm y 0,9 mm de ancho de bisel, en los diferentes niveles de desgaste, se llevó a cabo siguiendo la misma secuencia descrita para el ancho de bisel 0 mm.

Medición del consumo de energía

La medición del consumo de energía durante el cepillado de la madera fue realizada utilizando un medidor industrial de potencia trifásico marca Fluke modelo 43B. Este equipo, fue conectado directamente al tablero eléctrico del motor y mediante un sistema de adquisición de datos, se registró el consumo de energía en vacío y durante el cepillado de cada probeta. La diferencia promedio de ambos valores fue determinada y considerada como valor de consumo de energía asociado a cada probeta de los diferentes niveles de desgaste y ancho de bisel evaluados durante este estudio.

Medición de la resistencia al cizalle de la línea de cola

Finalizado el ensayo de cepillado de la madera, las probetas para el ensayo de resistencia al cizalle fueron preparadas a partir de esta madera según lo descrito en la norma ASTM D5751-99 (2012). Cada pieza de madera de 19 mm x 65 mm x 650 mm (después del ensayo de cepillado) fue cortada transversalmente para obtener dos secciones de 325 mm de largo, y luego, las caras cepilladas fueron encoladas utilizando un adhesivo comercial PVA, con un nivel de esparcido de 200 g/m². Para realizar el encolado de las caras cepilladas las piezas fueron puestas en una balanza de precisión |marca AND GF-4000 (0,01g) para registrar el peso y luego el adhesivo fue aplicado utilizando una espátula. Inmediatamente después de aplicado el adhesivo, ambas secciones fueron unidas formando un bloque laminado de 38 mm x 65 mm x 325 mm, aplicando una presión de 0,98 MPa durante una hora y cuyo valor de presión fue verificado en el manómetro de la prensa utilizada para este fin. Posteriormente estos bloques laminados fueron redimensionados en el ancho (50,8 mm) y luego se obtuvieron probetas de 38 mm x 50,8 mm x 52 mm, de acuerdo con la norma ASTM D5751-99 (2012), utilizadas para el ensayo de resistencia al cizalle de la línea de cola.

Posteriormente estas probetas fueron ensayadas en una máquina universal de ensayos mecánicos marca Instron modelo 4468, a una velocidad del cabezal de 0,38 mm/min para obtener el valor de resistencia al cizalle de cada probeta y luego el valor promedio de resistencia al cizalle para cada condición de corte fue calculado. Posteriormente, mediante una inspección visual se determinó el porcentaje de falla de madera asociado al ensayo de resistencia al cizalle de la línea de cola, como el cociente entre el área de ensayo donde se produjo la rotura en la madera y el área de ensayo de la probeta. Se superpuso la zona de contacto de la unión encolada, una plantilla cuadrículada y graduada en porcentaje, estimándose el porcentaje de falla de madera de cada probeta.

Análisis estadístico de los datos

Los resultados del análisis estadístico fueron obtenidos utilizando el software R versión 4.4.3 (2022). Para cada una de las variables de interés, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con dos factores fijos, considerando como factores el ancho de bisel y nivel de desgaste de cuchillas con cuatro niveles cada uno, con un nivel de significancia de 5 %. La comprobación de los supuestos para la aplicación de la ANOVA se realizó utilizando el comando plot (modelo) del software R, el cual presenta como resultados los gráficos de Residuos v/s valores ajustados, Q-Q norm, Residuos estandarizados y Residuos v/s niveles de los factores. A partir de estos gráficos, se concluyó que no existe evidencia para rechazar los supuestos de normalidad, independencia y homocedasticidad. Al identificar un factor significativo, se realizaron comparaciones de medias utilizando la prueba Least Significance Difference (LSD) con un nivel de confianza de un 95 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Consumo de energía

Los resultados obtenidos de los valores promedios del consumo de energía durante el cepillado de madera, en función del nivel de desgaste y ancho de bisel, se presentan en la Tabla 1. Se observa que, para los cuatro niveles de desgaste, los menores y mayores valores de consumo de energía fueron obtenidos para las cuchillas con 0 mm y 0,9 mm de ancho de bisel, respectivamente. Se deduce también que el menor y mayor valor promedio de consumo de energía fue de 814 W para el ancho de bisel 0 mm y de 1753 W para 0,9 mm de ancho de bisel. El mayor incremento en el consumo de energía ocurrió entre 0 mm y 0,3 mm de ancho de bisel, excepto para el nivel de desgaste 0 m, donde el aumento en el consumo de energía fue de 754 W, entre 0,6 y 0,9 mm de ancho de bisel. Sin embargo, a pesar de que la cuchilla con ancho de bisel de 0 mm fue la que presentó menores valores de consumo de energía comparado con los otros anchos de bisel, en general, la tasa de incremento observada fue mayor a medida que aumentó el nivel de desgaste. En contraste, para la cuchilla con ancho de bisel de 0,9 mm, a pesar de que registró los mayores consumos de energía, en general, la tasa de incremento fue menor a medida que aumentó el nivel de desgaste, excepto entre 0 m y 5000 m, donde se observó una disminución.

Cualquiera sea el nivel de desgaste, el consumo de energía aumentó en función del incremento del ancho de bisel y cuyas diferencias fueron estadísticamente significativas (Tabla 1). Los valores promedios del consumo de energía obtenidos para los distintos anchos de bisel en función del aumento del nivel de desgaste indicaron un aumento del consumo de energía, excepto para el ancho de bisel 0,9 mm donde disminuyó entre 0 m y 5000 m.

Para el ancho de bisel 0 mm, la comparación de los valores de consumo de energía indicó que estos fueron estadísticamente significativos, mientras que, para el ancho de bisel 0,3 mm no se observaron diferencias significativas entre los niveles de desgaste 5000 m y 10000 m, siendo las medias para los otros niveles de desgaste estadísticamente diferentes entre sí. Para el caso del ancho de bisel 0,6 mm no se observaron diferencias significativas del consumo de energía entre los niveles de desgaste 5000 m, 10000 m y 15000 m. Finalmente, en el caso del bisel 0,9, solo existen diferencias significativas entre 5000 m y 15000 m de nivel de desgaste.

En general, estos resultados están en acuerdo con la teoría del rectificado de cuchillas, ya que al incrementar el nivel de rectificado (ancho del bisel), un mayor contacto del dorso de la cuchilla con la superficie de la madera es producido, aumentando el roce y como consecuencia, el incremento del consumo de energía durante el cepillado de la madera (Hoadley 1980).

Una tendencia similar a la obtenida en el consumo de energía en función del aumento del ancho de bisel fue también observada en el consumo de energía a medida que el nivel de desgaste aumentó, siendo este comportamiento observado para todos los anchos de bisel. Valores promedios de consumo de energía de 951 W, 1293 W, 1362 W y 1530 W fueron obtenidos para los niveles de desgaste 0 m, 5000 m, 10000 m y 15000 m, respectivamente. A partir de estos niveles de consumo de energía, en general, queda en evidencia un mayor incremento del consumo de energía entre 0 m y 5000 m de nivel de desgaste, lo cual ocurre para todos los anchos de bisel con excepción de 0,9 mm.

Entre los 5000 m y 15000 m de nivel de desgaste, el incremento del consumo de energía fue menor. Este comportamiento del consumo de energía durante el cepillado de madera podría estar asociado al desgaste o pérdida del filo de las cuchillas producto del aumento en metros lineales de corte. Esto es consistente con lo reportado por Kirbach y Bonac (1977), Kirbach y Bonac (1982), quienes indicaron que normalmente los aceros durante el proceso de desgaste presentan dos etapas, siendo al comienzo un desgaste rápido del filo de la herramienta de corte, y luego un desgaste lento y más estable del mismo. Hernández y Rojas (2002) también reportaron un aumento del desgaste del filo de cuchillas con el aumento del nivel de desgaste.

Tabla 1: Valores promedios de consumo de energía (W), en función del nivel de desgaste y ancho de bisel.

Nivel de desgaste (m)	Ancho de bisel (mm)	Consumo de energía (watt)			
		Promedio ¹	Error ²	Bisel ³	Desgaste ⁴
0	0	322,3	(8,8)	A	a
	0,3	811,2	(31,3)	B	a
	0,6	959,0	(59,1)	C	a
	0,9	1713,3	(56,4)	D	ab
5000	0	793,3	(28,1)	A	b
	0,3	1199,0	(36,3)	B	b
	0,6	1499,5	(55,2)	C	b
	0,9	1681,3	(37,8)	D	b
10000	0	872,7	(7,1)	A	c
	0,3	1179,6	(41,7)	B	b
	0,6	1507,3	(25,9)	C	b
	0,9	1790,2	(49,7)	D	ab
15000	0	1268,4	(14,5)	A	d
	0,3	1457,9	(26,6)	B	c
	0,6	1566,7	(32,6)	C	b
	0,9	1827,9	(41,5)	D	a

¹Promedio de 15 probetas²Error estándar con un nivel de confianza de 95 % para la media respectiva³Las letras mayúsculas son para la comparación del ancho de bisel.⁴Las letras minúsculas son para la comparación del nivel de desgaste, para cada nivel de desgaste y ancho de bisel por separado. Los promedios de la columna seguida de la misma letra no son significativamente diferentes para un nivel de probabilidad de 5 %.

Los resultados del análisis estadístico (ANOVA) indicaron un efecto significativo del ancho de bisel y nivel de desgaste sobre el consumo de energía, junto con una interacción significativa entre estas dos variables, tal como se indica en la Tabla 2. El análisis de comparaciones de medias realizado utilizando el test LSD, indicó la existencia de diferencias significativas entre los consumos de energía asociados a cada ancho de bisel, en los cuatro niveles de desgaste (Tabla 1).

Para el consumo de energía en el ancho de bisel 0 mm asociado a cada nivel de desgaste, se observaron diferencias significativas, mientras que diferencias no significativas fueron obtenidas para el ancho de bisel 0,3 mm entre 5000 y 10000 m de nivel de desgaste. Para el ancho de bisel 0,6 mm no se observaron diferencias significativas entre los 5000 m, 10000 m y 15000 m de nivel de desgaste. Finalmente, para el ancho de bisel 0,9 mm solo se observaron diferencias significativas entre 5000 m y 15000 m (Tabla 1).

Los resultados indican que la cuchilla sin bisel (0 mm) registró los menores valores de consumos de energía, como era previsible, debido a la mínima interacción entre el dorso de la cuchilla y la superficie de la madera, en comparación con las cuchillas rectificadas con diferentes anchos de bisel. La ausencia de bisel permite tener un mayor ángulo libre de la cuchilla, reduciendo el nivel de roce entre el dorso de la cuchilla con la madera. Sin embargo, en aplicaciones prácticas, y considerando el uso de cabezales convencionales como en esta investigación, el rectificado de las cuchillas es fundamental para garantizar una órbita de corte homogénea. En este contexto, los resultados muestran que la cuchilla con ancho de bisel de 0,3 mm, comparada con los anchos de bisel 0,6 mm y 0,9 mm, permitió minimizar el consumo de energía al momento de cepillar madera de pino radiata.

Tabla 2: Resultados análisis de varianza para el consumo de energía.

Fuente de variación	df	Mean square	F value	Pr > F
Nivel de desgaste	3	3447272	151,37	< 0,0001
Ancho de bisel	3	9051697	397,46	< 0,0001
Desgaste x bisel	9	439057	19,28	< 0,0001
Residuals	224	22774		

Resistencia al cizalle de la línea de cola

En la Tabla 3 se presentan los valores promedios obtenidos para la resistencia al cizalle de la línea de cola y el porcentaje de falla de la madera para los diferentes niveles de desgaste y ancho de bisel de las cuchillas. Se observó que la resistencia al cizalle de la línea de cola disminuyó con el aumento de ancho de bisel y el nivel de desgaste. De igual manera se observa, que la cuchilla con ancho de bisel 0 mm (sin bisel) presentó los mayores valores de resistencia al cizalle, con un valor promedio de 11,9 MPa, considerando todos los niveles de desgaste, mientras que los menores valores de resistencia al cizalle, se obtuvieron para el ancho de bisel 0,9 mm, con un valor promedio de 6,6 MPa. Las cuchillas con anchos de bisel de 0,3 mm y 0,6 mm, presentaron valores promedios de 8,6 MPa y 7,6 MPa, respectivamente. Los valores de resistencia al cizallamiento mostraron una tendencia decreciente a medida que aumentaba el nivel de desgaste, con promedios registrados de 9,5 MPa, 9,2 MPa, 8,5 MPa y 7,6 MPa para distancias de 0 m, 5000 m, 10000 m y 15000 m, respectivamente. Este comportamiento está relacionado con el deterioro progresivo de la superficie de la madera, lo que dificulta la penetración efectiva del adhesivo. Estudios previos han señalado que la resistencia al cizalle de la línea de cola se ve afectada directamente por el daño superficial provocado por cuchillas rectificadas, ya que genera microfisuras que reducen la capacidad de adhesión. Además, se ha reportado que un mayor nivel de rectificad disminuye el ángulo libre de la cuchilla, lo que incrementa la fricción entre el filo y la madera. Este roce contribuye al desgaste acelerado de la herramienta, impactando negativamente en la calidad de la madera cepillada (Hernández y Rojas (2002).

Un patrón similar se observó en los valores del porcentaje de falla de la madera. Los mayores y menores valores estuvieron asociados a anchos de bisel de 0 mm y 0,9 mm, respectivamente, lo que refleja la influencia del desgaste en la integridad de la unión adhesiva. Este porcentaje es un indicador clave de la calidad de la unión, ya que un bajo porcentaje de falla en la madera indica que el adhesivo es más débil que la propia madera, mientras que un alto porcentaje sugiere lo contrario, evidenciado una mayor fortaleza de la unión adhesiva (Marra 1992).

Tabla 3: Valores promedios de resistencia al cizalle de la línea de cola y porcentaje de falla de madera en función del nivel de desgaste y ancho de bisel.

Niveles de desgaste (m)	Ancho de bisel (mm)	Resistencia cizalle (MPa)				Falla de madera (%)			
		Promedio ¹	Error ²	Bisel ³	Desgaste ⁴	Promedio ¹	Error ²	Bisel ³	Desgaste ⁴
0	0	13,3	(0,2)	A	a	68	(1,1)	A	a
	0,3	9,3	(0,2)	B	a	52	(1,2)	B	a
	0,6	8,2	(0,3)	C	a	46	(1,5)	C	a
	0,9	7,3	(0,2)	D	a	41	(1,1)	D	a
5000	0	12,5	(0,2)	A	b	61	(1,6)	A	b
	0,3	9,3	(0,3)	B	a	51	(1,5)	B	a
	0,6	7,9	(0,3)	C	a	45	(1,5)	C	a
	0,9	7,2	(0,2)	D	a	40	(1,1)	D	a
10000	0	11,7	(0,2)	A	c	54	(0,9)	A	c
	0,3	8,4	(0,3)	B	b	47	(1,7)	B	b
	0,6	7,6	(0,4)	C	a	40	(1,7)	C	b
	0,9	6,3	(0,3)	D	b	38	(1,7)	C	a
15000	0	10,3	(0,2)	A	d	52	(1,1)	A	c
	0,3	7,5	(0,2)	B	c	42	(1,3)	B	b
	0,6	6,8	(0,3)	C	b	37	(1,1)	C	b
	0,9	5,6	(0,2)	D	c	33	(0,8)	D	b

¹Promedio de 15 probetas

²Error estándar con un nivel de confianza de 95% para la media respectiva

³Las letras mayúsculas son para la comparación del ancho de bisel.

⁴Las letras minúsculas son para la comparación del nivel de desgaste, para cada nivel de desgaste y ancho de bisel por separado. Los promedios de la columna seguida de la misma letra no son significativamente diferentes para un nivel de probabilidad de 5 %.

Los resultados del análisis estadístico (ANOVA) indicaron un efecto significativo del nivel de desgaste y ancho de bisel sobre la resistencia al cizalle y porcentaje de falla de la madera, existiendo interacción solamente para el porcentaje de falla en la madera (Tabla 4). Diferencias estadísticas significativas fueron observadas al comparar los valores promedios de la resistencia al cizalle entre los diferentes anchos de bisel para

los cuatro niveles de desgaste (Tabla 3). Al comparar la resistencia al cizalle entre las longitudes de cepillado para cada ancho de bisel, solo se presentaron diferencias significativas para el ancho de bisel 0 mm (Tabla 3).

Se identificó un comportamiento comparable, para el porcentaje de falla de la madera, excepto para los anchos de bisel 0,6 mm y 0,9 mm, en el nivel de desgaste 10000 m, donde la diferencia entre medias no fue significativa (Tabla 3). La comparación de los resultados obtenidos para cada ancho de bisel con respecto al nivel de desgaste (Tabla 3), indicó una mayor variación en los niveles de significancia.

Tabla 4: Análisis de varianza para la resistencia al cizalle y porcentaje de falla de la madera.

Fuente de variación	df	Mean square	Resistencia Cizalle		Falla de madera		
			F value	Pr > F	Mean square	F value	Pr > F
Nivel de desgaste	3	47,2	61,22	< 0,0001	1282	47,82	< 0,0001
Ancho de bisel	3	326,5	423,12	< 0,0001	4968	185,36	< 0,0001
Desgaste x Ancho	9	1,3	1,3	0,0812	52	1,94	0,0467
Residuals	224	0,8			27		

Finalmente, los resultados obtenidos durante el desarrollo de este estudio indican que una cuchilla sin rectificar (0 mm de ancho de bisel) generaría la mejor calidad superficial de la madera, sustentado por una mayor resistencia al cizalle de la línea de cola. Sin embargo, en la práctica es necesario rectificar las cuchillas una vez que han sido instaladas en el cabezal, para que estas generen la misma órbita de corte durante el cepillado. Con base en los resultados, se recomienda un ancho de bisel de 0,3 mm como valor máximo para cepillar madera de pino radiata.

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio indicaron que el consumo de energía, la resistencia al cizalle de la línea de cola y el porcentaje de falla de madera son afectados por el ancho de bisel y el nivel de desgaste de las cuchillas durante el cepillado de madera de pino radiata.

A medida que aumentó el ancho de bisel de las cuchillas también aumentó el consumo de energía, mientras que la resistencia al cizalle de la línea de cola y porcentaje de falla de la madera disminuyeron.

El aumento del nivel de desgaste de las cuchillas generó un aumento del consumo de energía durante el cepillado. Sin embargo la resistencia al cizalle y el porcentaje de falla de madera, las cuales disminuyeron.

Finalmente, se recomienda utilizar un ancho del bisel de 0,3 mm para cepillar madera de pino radiata. Si bien es cierto, la cuchilla sin rectificar presentó los mejores resultados, es necesario utilizar un cierto nivel de rectificado (ancho de bisel) para generar una órbita de corte única e igual para las cuchillas instaladas en un cabezal convencional de una máquina cepilladora de madera. Con este nivel de rectificado es posible minimizar el consumo de energía y al mismo tiempo maximizar la resistencia al cizalle de la línea de cola, y como consecuencia obtener una buena calidad superficial. De igual manera se recomienda evaluar anchos de bisel superiores a 0,3 mm e inferiores a 0,6 mm.

Declaración de autorías

G. R-E.: Formulación, dirección proyecto de investigación, recursos, borrador original, edición final del manuscrito.

S. C-E: Diseño de experimentos, análisis estadísticos de los datos obtenidos.

C. M.: Redacción inicial del estado del arte y colaboración en la supervisión durante el desarrollo exper-

imental del proyecto.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal del Pabellón de Tecnología de la Madera, de la Universidad del Bío-Bío, por el soporte durante el desarrollo de la parte experimental de esta investigación. Esta investigación fue financiada por la Dirección de Investigación de la Universidad del Bío-Bío, a través del Proyecto interno 100912 3/R.

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM. 2004.** Standard test methods for conducting machining test of wood and wood-based materials. ASTM D1666-87. ASTM. West Conshohocken, PA, USA. <https://www.astm.org/d1666-22.htm>
- ASTM. 2012.** Standard specification for adhesive used for laminate joints in nonstructural lumber products. ASTM D5751-99 (Reapproved 2012). ASTM. West Conshohocken, PA, USA. <https://www.astmwebstore.com/standards/ASTM-D5751-99-2012>
- Aguilera, A.; Muñoz, H. 2011.** Rugosidad superficial y potencia de corte en el cepillado de acacia melanoxylon y sequoia sempervirens. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 13(1): 19-28. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2011000100002>
- Aguilera, A.; Fernández, C. 2012.** Efecto del rectificado y desgaste de cuchillos en la calidad superficial de molduras de pino radiata. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 14(2): 175-184. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2012000200005>
- De Moura, L.F.; Hernández, R. 2006.** Effects of abrasive mineral, grit size and feed speed on the quality of sanded surfaces of sugar maple wood. *Wood Science and Technology* 40(6): 517-530. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0070-0>
- Dunsmore, L.F. 1965.** *The technique of woodworking machinery.* MacDonald & Co Ltd: London, UK.
- Hernández, R.; Naderi, N. 2001.** Effect of knife jointing on the gluing properties of wood. *Wood and Fiber Science* 33(2): 292-301. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1589>
- Hernández, R.; De Moura, L.F. 2002.** Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of northern red oak wood. *Wood and Fiber Science* 34(4): 540-552. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1612>
- Hernández, R.; Rojas, G. 2002.** Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of sugar maple wood. *Wood and Fiber Science* 34(2): 293-305. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1994>
- Hoadley, R.B. 1980.** *Understanding wood. A craftsman's guide to wood technology.* The Taunton Press: Newtown, CT. USA.
- Jones, C. 1994.** *Cutterhead and knives for machining wood.* Seattle, WA. USA.
- Kirbach, E.; Bonac, T. 1977.** Cutting unseasoned western red cedar with titanium carbide-coated, carbide-tipped saws. En Proceedings. Fifth International Wood Machining Seminar: California, USA.
- Kirbach, E.; Bonac, T. 1982.** Alloy tipping for reduced sawtooth dulling. *Forest Products Journal* 32(8):36-40. <https://www.cabidigitalibrary.org/doi/full/10.5555/19830683599>
- Kuljich, S.; Cool, J.; Hernández, R. 2013.** Evaluation of two surfacing methods on black spruce wood in relation to gluing performance. *Journal of Wood Science* 59(3): 185-194. <https://dx.doi.org/10.1007/s10086-012-1318-y>
- Marra, A. A. 1992.** Bond performance: Testing and evaluation. Technology of Wood Bonding Principles in practice. Van Nostran Reinhold: New York, NY. USA.

Ogun, S.P.; Jackson, R.M. 2017. Active vibration control and real time cutter path modification in rotary wood planing. *Mechatronics* 46(1):21-31. <https://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.06.007>

Singh, A.; Anderson, C.; Warnes, J.; Matsumura, J. 2002. The effect of planning on the microscopic structure of *Pinus radiata* wood cells in relation to penetration of PVA glue. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60(5): 333-341. <https://dx.doi.org/10.1007/s00107-002-0321-1>

Tiryaki, S.; Malkoçoğlu, A.; Özşahin, Ş. 2014. Using artificial neural networks for modeling surface roughness of wood in machining process. *Construction and Building Materials* 66: 329-335. <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.098>

Turner, J. 1999. Cutting angles and feed speeds for planer-moulding radiata pine. En Proceedings. 4th International Wood Seminar-, Paris, Espial, Cluny, Francia.

Wengert, G. 1988. *The Wood doctor's Rx*. Virginia Polytechnic Institute and State University: Blacksburg, Va. USA.