



Universidad Austral de Chile
Facultad de Ciencias Forestales

Determinación de la calidad superficial del cepillado de *Pinus radiata* D.Don

Patrocinante: Sr. Alfredo Aguilera L.

Trabajo de Titulación presentado como parte de los requisitos para optar al Título de **Ingeniero en Maderas**.

EDER JOSUE PARDO QUEZADA

VALDIVIA
2009

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		Nota
Patrocinante:	Sr. Alfredo Aguilera L.	6.3
Informante:	Sr. Luis Inzunza D.	6.0
Informante:	Sr. Aldo Rolleri S.	5.0

El patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

Sr. Alfredo Aguilera L.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres Elisa y Ramón, por su comprensión, apoyo y cariño brindado durante toda mi vida.

Agradezco en forma particular a mi Profesor Patrocinante don Alfredo Aguilera L. por su buena disposición, y dedicación para la realización de este trabajo, también hago extensivos mis agradecimientos a los Profesores Informantes Don Luis Inzunza y Don Aldo Roller por sus oportunas críticas y correcciones.

También a cada una de las personas que trabajan en el Instituto de Tecnología de Productos Forestales, los cuales me entregaron las herramientas para crecer como persona y como profesional.

Además agradecer a personas que de una u otra forma me apoyaron durante mi vida universitaria: Mami Tina, Tía Wilma, Antonio Recio, Tío Javier, Carolina y en especial al Prof. Hugo Ramirez (Instituto de Matemáticas).

Y finalmente a mis amigos que siempre estuvieron allí estudiando y apoyándome siempre: Juan Carlos, Víctor, César, Carlos, Francisco, Maikel, Fernando. Muchas gracias a todos.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
Objetivos	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Especie	3
2.1.1 Densidad	3
2.2 Teoría de corte	3
2.2.1 Proceso de Cepillado	3
2.2.2 Corte periférico	3
2.2.3 Direcciones de corte	4
2.3 Geometría de la herramienta de corte	6
2.3.1 Ángulo de corte o ataque (γ)	7
2.3.2 Ángulo de perfil (β)	7
2.3.3 Ángulo de incidencia o libre (α)	8
2.3.4 Aceros para herramienta de corte (HSS)	8
2.4 Formación de viruta	9
2.4.1 Tipos de viruta corte 90-0°	9
2.4.1.1 Viruta tipo I	9
2.4.1.2 Viruta tipo II	10
2.4.1.3 Viruta tipo III	10
2.4.2 Espesor de viruta	11
2.5 Rugosidad superficial	12
2.5.1 Parámetros de rugosidad	12
2.6 Defectos del cepillado que afectan la calidad superficial	13
2.6.1 Calamina o marcas de cuchillo	13
2.6.2 Quemaduras de cuchillos	14
2.6.3 Fibra levantada	15
2.6.4 Fibra apelmusada	15
2.6.5 Fibra encontrada	16
2.7 Factores del maquinado que afectan la calidad superficial	17
2.7.1 Velocidad de avance	17
2.7.2 Velocidad de corte	17
2.7.3 Relación de la velocidad de avance por cuchillo sobre la calidad superficial	18
2.7.4 Relación de la profundidad de corte y la calidad superficial	19
3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	20
3.1 Material y equipo	20
3.1.1 Material	20
3.1.2 Fresadora	21
3.1.3 Herramienta de corte	21
3.2 Método	22
3.2.1 Determinación de la densidad de la madera y contenido de humedad	22
3.2.2 Medición de la rugosidad superficial	22

3.2.3	Norma ASTM D 1666-87	22
3.3	Diseño experimental	23
3.4	Análisis estadístico	26
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
4.1	Densidad de madera central y madera de lateral de Pinus radiata	26
4.2	Norma ASTM D 1666-87	26
4.3	Rugosidad superficial	27
4.3.1	Efecto de la velocidad de avance en la rugosidad superficial para madera central y lateral	27
4.3.2	Efecto de la densidad en los valores de rugosidad superficial para madera central y lateral	29
4.3.3	Efecto del espesor de viruta sobre la rugosidad superficial para madera central y lateral	31
4.3.4	Efecto de la velocidad de avance sobre la rugosidad superficial para madera central y lateral	32
4.3.5	Efecto de la altura de corte sobre la rugosidad superficial para madera central y lateral	33
5.	CONCLUSIONES	35
6.	BIBLIOGRAFÍA	36
	ANEXOS	
	Anexo 1. Abstract	
	Anexo 2. Valores de la madera y análisis estadístico	

INDICE DE CUADROS

		Página
Cuadro 1.	Modo de emplear nomenclatura Mackenzie	5
Cuadro 2.	Valores angulares según tipo de madera y material de corte para cuchillos cepilladores	7
Cuadro 3.	Condiciones de corte	23
Cuadro 4.	Condiciones de medición de rugosidad superficial	23
Cuadro 5.	Diseño Experimental para madera central	24
Cuadro 6.	Diseño Experimental para madera lateral	25
Cuadro 7.	Variables para determinar número de probetas	25
Cuadro 8.	Densidad de madera central y madera lateral de <i>Pinus radiata</i> D.Don	26
Cuadro 9.	Resumen de valores rugosidad superficial Rz para madera central y lateral.	27

INDICE DE FIGURAS

	Página	
Figura 1.	Trabajo en oposición	4
Figura 2.	Trabajo en concordancia	4
Figura 3.	Corte 90-0°	4
Figura 4.	Corte 90-90°	4
Figura 5.	Corte 0-90°	5
Figura 6.	Movimientos de corte según (Koch 1964)	6
Figura 7.	Ángulos de corte	7
Figura 8.	Viruta tipo I a favor de la fibra	9
Figura 9.	Viruta tipo I contra de la fibra	9
Figura 10.	Viruta tipo II	10
Figura 11.	Viruta tipo III	10
Figura 12.	Parámetro Rz de rugosidad superficial	13
Figura 13.	Marcas de cuchillos	14
Figura 14.	Quemaduras de cuchillos	14
Figura 15.	Fibra levantada	15
Figura 16.	Muestra de fibra apelusada	16
Figura 17.	Fibra encontrada	16
Figura 18.	Avance por cuchillo sobre la calidad superficial	18
Figura 19.	Profundidad de la onda	19
Figura 20.	Rugosímetro Mitutoyo SJ-201	20
Figura 21.	Maquina tupí	21
Figura 22.	Cabezal convencional Z=4	21
Figura 23.	Efecto de la velocidad de avance sobre la rugosidad superficial para madera central en relación a distintas alturas de corte	28
Figura 24.	Efecto de la velocidad de avance sobre la rugosidad superficial para madera lateral en relación a distintas alturas de corte	29
Figura 25.	Efecto de la densidad (Kg/m ³) en los valores de rugosidad superficial para madera central y lateral	30
Figura 26.	Efecto del espesor de viruta (mm) sobre la rugosidad superficial para madera central en relación a las distintas alturas de corte	31
Figura 27.	Efecto del espesor de viruta (mm) sobre la rugosidad superficial para madera lateral en relación a las distintas alturas de corte	32
Figura 28.	Efecto de la velocidad de avance sobre la rugosidad superficial para madera central y lateral	33

Figura 29. Efecto de la altura de corte sobre la rugosidad superficial para madera central y lateral

34

RESUMEN EJECUTIVO

Se estudió en corte 90-0, la influencia del cambio de las condiciones de maquinado, en particular la velocidad de alimentación, profundidad de corte y tipo de madera, sobre la rugosidad superficial de *Pinus radiata*.

Se prepararon muestras de madera central y madera lateral de la especie, acondicionando las probetas hasta alcanzar un contenido de humedad homogéneo. Posteriormente las probetas fueron maquinadas con tres diferentes velocidades de avance (4, 8, y 11 m/min) y con una velocidad de rotación constante de 4200 rpm. Para ambos tipos de madera (central y lateral), y las condiciones ya indicadas, se probaron además tres alturas de corte 1, 2 y 3 (mm).

Los principales resultados indican que las velocidades de avance influyen significativamente sobre la rugosidad superficial resultante del proceso, lo que permite confirmar resultados de estudios anteriores, ya que un incremento de esta velocidad genera superficies de inferior calidad para velocidades de rotación constantes.

Para el factor tipo de madera, se obtuvo por resultado una menor rugosidad superficial en madera lateral en relación a madera central debido principalmente al efecto que las condiciones de maquinado seleccionadas así como la geometría de corte, las cuales permitieron una mejor formación de viruta para las maderas de mayor densidad. En relación al cambio de la altura de corte, se pudo observar menores rugosidades a alturas de corte mayor con resultados estadísticamente significativos al 95% de confianza.

Palabras claves: maquinado, *Pinus radiata*, rugosidad superficial, madera lateral y central.

1. INTRODUCCION

El pino radiata es la especie más importante que utiliza la industria maderera chilena, posee plantaciones que ascienden a 1.4 millones de hectáreas, que corresponde al 67.8% del total de superficie de plantaciones en el país. La disponibilidad futura de madera de *Pinus radiata* será creciente, por lo cual habrá un mayor volumen a ser procesado en la industria, la que exigirá una mayor productividad que asociado a los mayores requerimientos en volumen y calidad de los mercados internacionales, implicará una mejora sustancial de los procesos en la industria nacional. En la actualidad existen más de 400 productos exportados a 83 países, principalmente EE.UU. Japón, China, México e Italia.

La importancia de este estudio radica en determinar la calidad superficial resultante para diferentes condiciones de maquinado, identificando las variables y constantes de proceso, tales como velocidades de alimentación, profundidad de corte, velocidad de los cabezales, etc. que afectan la calidad superficial de *Pinus radiata* tanto en madera lateral como central.

Uno de los principales problemas de la industria de la madera en Chile es el desconocimiento de las condiciones adecuadas de maquinado de las materias primas, en el caso de la madera la cual posee una gran heterogeneidad. Entre las características que podemos mencionar se encuentran la densidad, ángulos de las fibras dentro de una misma pieza de madera y dentro del mismo árbol. Estas variables afectan indiscutiblemente a calidad de la superficie y los esfuerzos de corte.

El ajuste adecuado de las condiciones de maquinado es esencial para la obtención de una calidad superficial requerida, implica una reducción de la pérdida de materia prima a su vez disminuir defectos que producen rechazos de productos y desgastes inútiles de herramientas. Lo que involucra proyectar a largo plazo una mayor utilidad para la industria de la madera.

Objetivo general:

Evaluar el efecto del cambio en las condiciones de maquinado en la rugosidad superficial y su relación con la densidad de la madera.

Objetivos específicos:

- Evaluar la calidad superficial en función del cambio de la velocidad de avance.
- Establecer la relación entre profundidad del cepillado y rugosidad superficial.
- Evaluar el efecto de la densidad de la madera en el proceso de cepillado para obtener una calidad superficial dada.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Especie

Son muchos los factores en el proceso de transformación de la madera que participan en la formación de las superficies y en su calidad final. Estos factores pueden ser internos o externos a la madera. De acuerdo con García (2002) refiriéndose a los factores internos principalmente a: la orientación del grano, el contenido de humedad, y densidad de la madera. Entre los factores externos se refiere principalmente al proceso de mecanizado parámetros tales como: la velocidad de alimentación, la profundidad de corte, la herramienta de corte y la geometría de corte. Generalmente las coníferas, conocidas como maderas blandas, se cepillan con menor dificultad que las latifoliadas conocidas como maderas duras.

2.1.1 Densidad

El esfuerzo de corte se encuentra directamente ligado con la densidad de las especies, esto se debe a que la madera más densa presenta una mayor resistencia al cepillado y viceversa. Según lo cita Koch (1964), los esfuerzos de corte aumentan a medida que la densidad crece y el consumo energético aumenta casi linealmente respecto al aumento de la densidad.

2.2 Teoría de corte

2.2.1 Proceso de Cepillado

Según Vignote y Jiménez (2000) el cepillar o sacar una cara en limpio de la madera es un proceso secundario de la transformación de madera. Esta operación se efectúa en las primeras etapas de la línea de producción de los productos y permite obtener un grosor igual en la pieza y una superficie uniforme en las caras. El desbaste del material se efectúa con cuchillos que son colocados en un cabezal que gira mientras la madera es arrastrada en la mesa mediante rodillos.

2.2.2. Corte periférico

El corte periférico es un proceso de corte rotatorio en el cual la madera es removida en forma de viruta individual, esta viruta es formada por la acción intermitente de cuchillos en la madera colocadas en un porta cuchillos en movimiento rotatorio. Por lo tanto la superficie resultante está constituida por una serie de marcas de cuchillos individuales generada por la acción sucesiva de cada cuchillo.

Existe un aspecto importante que se encuentra relacionado con la dirección de la fibra al momento de realizar el corte. Esto explica como se relaciona la dirección

de rotación del cabezal portacuchillos, con la dirección de alimentación, esta relación supone dos situaciones: que se trabaje en oposición o concordancia, como se observa en las (Figuras 1, 2).

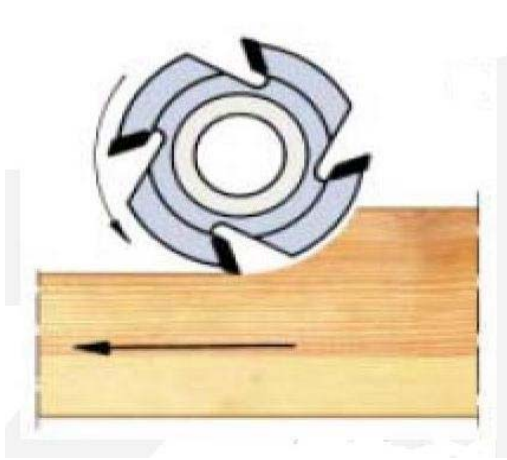


Figura 1: Trabajo en oposición.

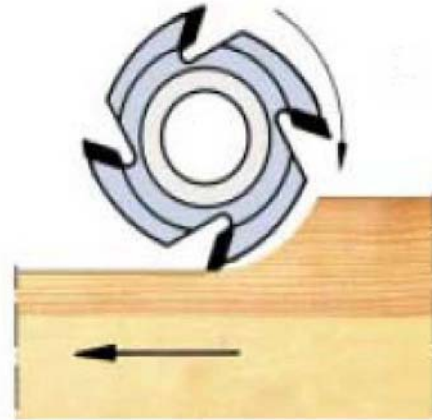


Figura 2: Trabajo en concordancia

La diferencia entre ambos procesos radica principalmente en como se produce la viruta. En el avance por oposición la formación de viruta inicia con un espesor mínimo y termina con uno máximo. En el caso del avance por concordancia se comienza con un espesor máximo y se termina con un mínimo.

Según lo cita Moya (1986) habrá un mayor esfuerzo de corte en concordancia que en oposición. Este tipo de corte debería significar un mayor consumo de energía y una mejor calidad superficial.

2.2.3 Direcciones de corte

Existe una notación para identificar el tipo de corte según su dirección. Esta es conocida por su simplicidad y capacidad para describir las diferentes situaciones que pueden presentarse durante el corte de madera. En el estudio de procesos de corte se utiliza la nomenclatura consistente en dos cifras (dos ángulos ϕ - Φ) 0° - 90° , 90° - 0° y 90° - 90° , como se muestra en las (Figuras 3, 4, 5), esta nomenclatura fue descrita por Mackenzie.

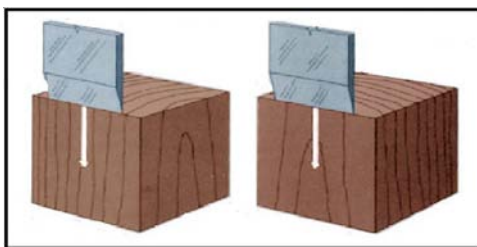


Figura 3. Corte 90-0°

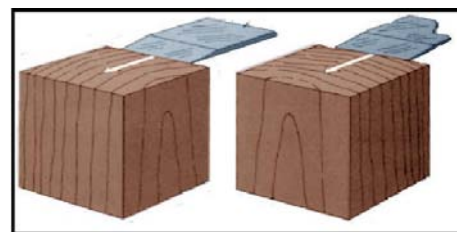


Figura 4. Corte 90-90°

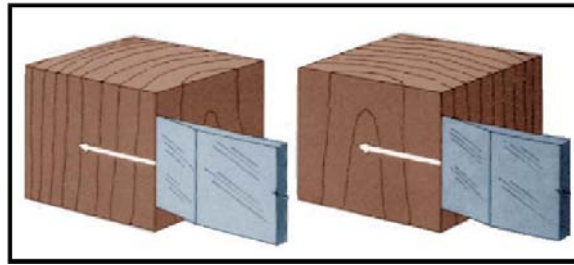


Figura 5. Corte 0-90°

Donde:

φ : ángulo entre el filo y la dirección de la fibra.

Φ : ángulo entre la dirección del movimiento de corte y la fibra.

Cuadro 1: Modo de emplear nomenclatura Mackenzie

Corte	φ	Φ	Ejemplo
1	90	90	Aserrió Longitudinal con sierra huincha
2	90	0	Cepillado plano
3	0	90	Debobinado, Torneado
4	0	90	Trozado
5	90	0	Moldurado
6	90	90	Fresado

A partir de los diferentes tipos de cortes se origina el proceso de transformación del material para producir cambios de forma, dimensiones y calidad superficial (Cuadro 1).

La transformación mecánica es producida con dos movimientos relativos entre el elemento cortante y el material, como se indica en la (Figura 6), estos son el movimiento principal o de corte y el movimiento secundario o de avance. El elemento cortante es una herramienta de corte que remueve capas de material, llamada viruta. El corte recibe también el nombre de operación de mecanizado (Koch, 1964).

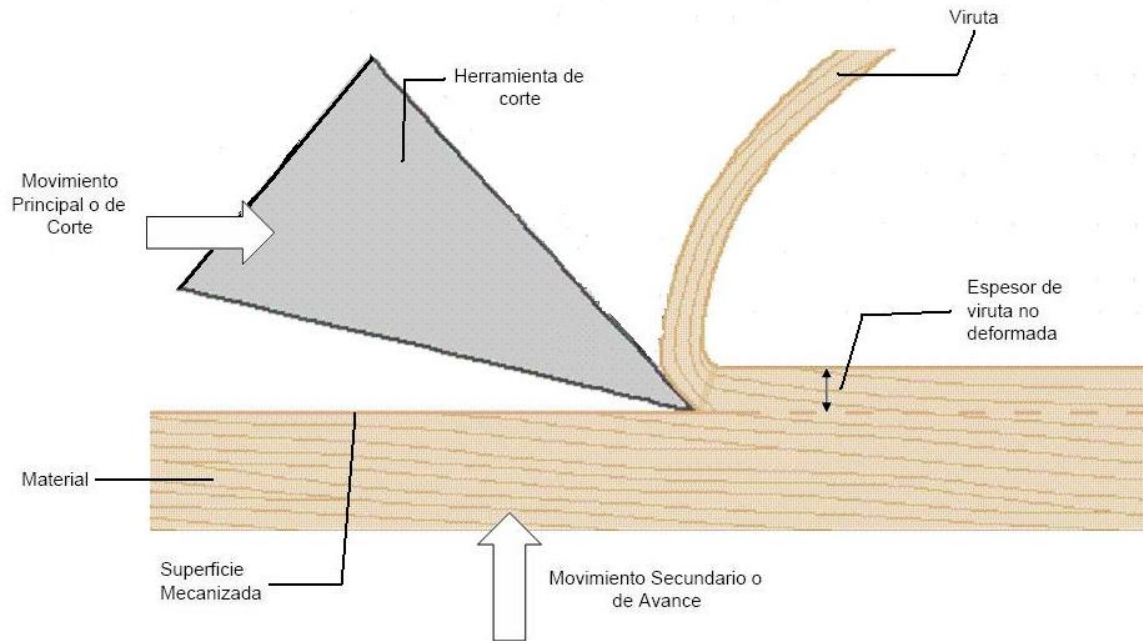


Figura 6: Movimientos de corte según (Koch 1964)

2.3 Geometría de la herramienta de corte

En la relación entre herramienta de corte y material existen tres ángulos que la definen en relación al tipo de corte a obtener, como se observa en la (Figura 7). La suma de estos tres ángulos es igual a 90°

$$\alpha + \beta + \gamma = \frac{\pi}{2}$$

Para determinar la correcta geometría de la herramienta de corte, es conveniente tomar en cuenta la densidad de la especie que se desea maquinar, debido a que la geometría de corte es un factor determinante para la obtención de la calidad superficial que se desea lograr.

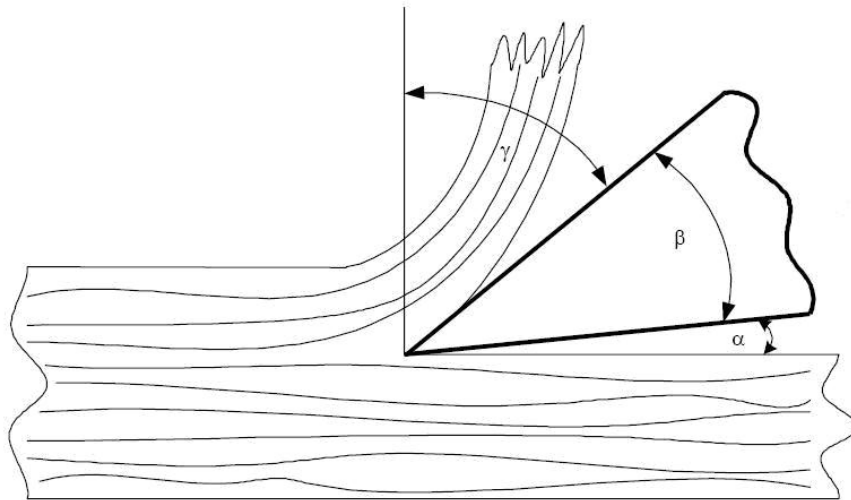


Figura 7. Ángulos de corte

Las características de los ángulos que forma la herramienta de corte son las siguientes:

2.3.1. Ángulo de corte o ataque (γ)

Este ángulo es la causa de la formación de viruta. Es el responsable del estado de la superficie obtenida. Para maderas relativamente blandas, libre de nudos, con un ángulo de 45° se logra un buen cepillado. La superficie obtenida es relativamente lisa y la fuerza de corte reducida. Con ángulos mayores que 45° no se consiguen mejores resultados, se reduce el ángulo β del elemento de corte haciendo difícil una buena terminación del afilado y con ello su desgaste prematuro.

2.3.2. Ángulo de perfil (β)

Otorga a la herramienta de corte robustez desde el punto vista de la resistencia del elemento (diente de corte) es favorable mantener el β lo más grande posible.

Cuadro 2. Valores angulares según tipo de madera y material de corte para cuchillos cepilladores.

Tipo de Madera	Material de corte	Ángulo de perfil
Blanda	HSS	$30-45^\circ$
Dura	HSS	$50-55^\circ$
Blanda	Cromo-vanadio	$35-45^\circ$
Dura	Cromo-vanadio	$45-48^\circ$
Blanda	HM	50°
Dura	HM	55°

En el (Cuadro 2) podemos observar que para especies duras, utilizando cuchillos de HSS se requiere un mayor ángulo de perfil, por el contrario para maderas blandas, se necesita un ángulo de perfil menor.

2.3.3 Ángulo de incidencia o libre (α)

Evita la fricción entre la parte posterior de la herramienta y el material, el tamaño de este ángulo no influye mayormente sobre el trabajo de cepillado. Este ángulo tiene valores que oscilan entre 1 y 25°, pero generalmente se utilizan ángulos entre 10 y 25°.

2.3.4 Aceros para herramienta de corte (HSS)

Debido a las características que posee la madera y a las complejas condiciones de trabajo a las que son sometidas las herramientas de maquinado (tensión, fricción o altas temperaturas), éstas deben cumplir con ciertas exigencias para asegurar su calidad y vida útil, como: fortaleza para evitar su desgaste y garantizar su capacidad de trabajo (durante el corte), plasticidad que es la capacidad de la herramienta para adecuarse a determinado proceso, dureza que es la estabilidad del metal ante el desgaste y resistencia, ante los efectos corrosivos de la humedad sobre su superficie. Es por ello que la elección adecuada del tipo de cuchillo y el material que está constituido es importante para evitar las pérdidas de tiempo, materias primas y dinero.

El acero rápido HSS (high-speed steel) es utilizado generalmente para trabajos de cepillado, planeado y machihembrado en maderas blandas y semiduras, en las que se pueden obtener buenos acabados superficiales.

Las propiedades requeridas para estos aceros son la resistencia al desgaste y la dureza a altas temperaturas, además de la tenacidad para prevenir cualquier rotura de los bordes de corte. Estas propiedades garantizan una larga vida útil de las herramientas.

Cuchillas de HSS son aleaciones de hierro-carbono con un contenido de carbono de entre 0.7 y 0.9 % a la cual se le agrega un elevado porcentaje de tungsteno (13 a 19%), cromo (3.5 a 4.5 %), y de vanadio (0.8 a 3.2 %). De acuerdo al porcentaje de aleación las cuchillas HSS se pueden clasificar como de mayor o menor resistencia y durabilidad, siendo estos; factores que determinan el tipo de trabajo a realizar. (Sandvik Coromant, 1994).

Para procesos productivos en serie en los que las cuchillas deben trabajar durante un largo tiempo, se encuentran las cuchillas de HSS al 18 por ciento (porcentaje de aleación), que se caracterizan por ser duras, razón por la cual son ideales para trabajar maderas duras. Generalmente son cuchillas importadas y de un valor comercial superior a las utilizadas para maderas blandas. (Barrantes, 1996).

Este tipo de aceros son la opción más económica para mecanizar. En comparación con HM o metal duro las cuales tienen un precio entre cinco y siete veces mayor que las cuchillas HSS.

2.4 Formación de viruta

El corte convencional es definido como la acción de una herramienta de corte en una pieza de madera, la cual produce virutas de dimensiones y espesores variables. La formación de estas virutas depende de la geometría de la herramienta de corte, de la humedad de la madera y del movimiento de la herramienta con respecto a la orientación de la fibra. (Ramos, 2006).

Los tipos de viruta y la calidad superficial que generan los cortes se pueden estudiar con la notación de MacKenzie donde se explica la formación de viruta para los tres tipos de corte más relevantes: corte $90-0^\circ$, $0-90^\circ$, $90-90^\circ$. en el caso del cepillado es $90-0^\circ$ lo cual es de interés para este estudio.

2.4.1. Tipos de viruta corte $90-0^\circ$

Este tipo de corte es el que tiene mayor relevancia, se encuentra presente en la mayoría de los procesos, siendo el más estudiado. El cepillado es el proceso de corte más común que posee el corte $90-0^\circ$.

Según estudios realizados por Franz (1958) citado por Koch (1964) describe que las virutas se pueden clasificar en virutas de tipo I, II, y III,

2.4.1.1. Viruta tipo I

Este tipo de viruta se produce cuando el cuchillo penetra en la madera originándose una rasgadura que se propaga delante del cuchillo. Como se muestra en la (Figura 8, 9). La superficie maquinada a consecuencia del rajado de la madera aparece frecuentemente astillada. Los factores que influyen en la formación de este tipo de viruta son ángulos de ataque elevados mayores a 25° , bajo contenido de humedad de la madera, por bajo coeficiente de fricción entre la viruta y la cara de la herramienta de corte, y baja resistencia al clivaje.

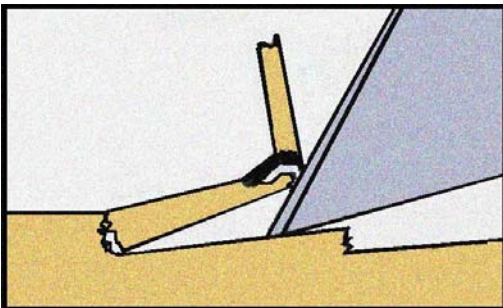


Figura 8: Viruta tipo I a favor de la fibra

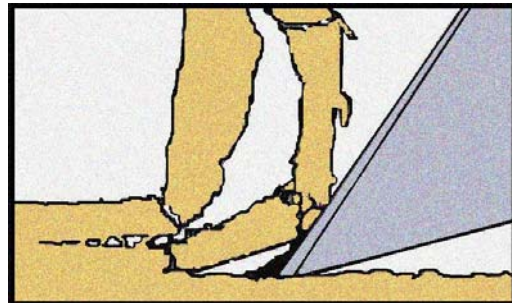


Figura 9: Viruta tipo I contra de la fibra

2.4.1.2. Viruta tipo II

La viruta se rompe por cizalle oblicuo en un plano inclinado ya que se forma directamente en el filo de la herramienta. Este tipo de viruta es deseado, ya que produce una buena calidad superficial. La viruta tipo II (Figura 10) se forma bajo condiciones limitadas como tener un contenido de humedad intermedio y espesor de viruta pequeño, la madera no debe presentar defectos como fibra revirada, y el ángulo de ataque moderado menor a 30° .

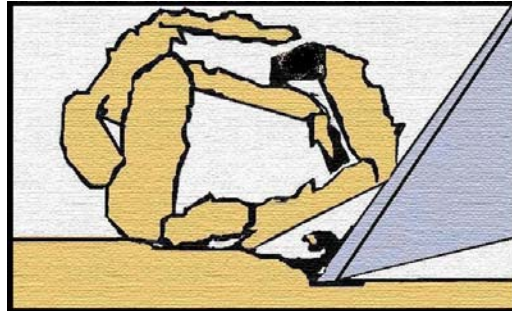


Figura 10: Viruta tipo II

2.4.1.3 Viruta tipo III

Esta viruta se forma cuando la fuerza en la herramienta provoca la ruptura por compresión y rajado longitudinal de la madera. La superficie maquinada aparecerá a menudo con repelo pues los cuchillos no separan las fibras de la madera en forma limpia, los factores que permiten la formación de viruta tipo III, son alto contenido de humedad, filo de la herramienta de corte desgastados, ángulos de ataque pequeños o negativos, y alto coeficiente de fricción entre la viruta y la cara del cuchillo la potencia requerida es grande y el desafilado se produce rápidamente. (Figura 11).

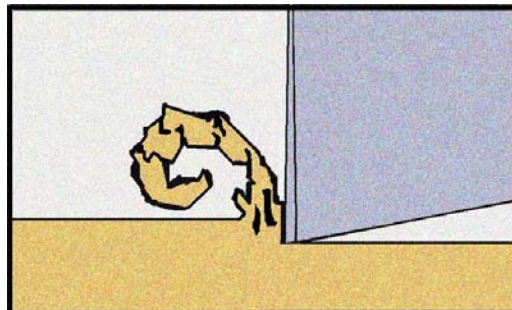


Figura 11: Viruta tipo III

2.4.2 Espesor de viruta

El espesor de viruta es un buen indicador de la rugosidad superficial para diferentes condiciones de maquinado, ya que integra una serie de condiciones de corte en conjunto. (Aguilera A., Vega M., 2004)

La viruta es producto de la acción ejercida por la herramienta de corte en una pieza de madera, la cual presenta dimensiones y espesores variables. La formación de viruta depende de la geometría de la herramienta, la humedad de la madera y del movimiento de la herramienta con respecto a la orientación de la fibra.

El espesor de viruta debe ser lo más pequeño posible, de manera de evitar la formación de ondas muy pronunciadas. “fz” debe ser lo más grande posible para disminuir el gasto de energía y aumentar la vida útil del filo de los cuchillos.

El espesor medio de viruta se describe en la siguiente formula:

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

fz = Avance del elemento cortante (mm)

Ap= profundidad de corte (mm)

D = diámetro de la herramienta (mm)

Según Koch (1972), la rugosidad superficial está determinada por la arista de corte y el tipo de viruta obtenido en el proceso de corte.

Uno de los factores que más influye sobre el acabado superficial es la distancia entre cortes de cuchillos (fz) este tiene influencia sobre el espesor de viruta (em) y por ende en la duración del filo de los cuchillos. En general, lo que facilita el proceso de cepillado es una gran distancia entre cortes de cuchillo, lo que permite aumentar el espesor de viruta, esto trae como consecuencia un gran ahorro de energía con una alta productividad, dado que esto se consigue con altas velocidades de alimentación. El punto en contra es la calidad del cepillado obtenida.

2.5 Rugosidad superficial

Una de las propiedades más importantes de las superficies es la rugosidad. Puede ser definido como la medida de las irregularidades finas de una superficie. Su tamaño y frecuencia establecen la calidad de la superficie. (Hiziroglu, 1998).

La rugosidad superficial se relaciona en forma frecuente a la obtención de la menor rugosidad superficial que genera el elemento de corte, sin embargo la rugosidad superficial dependerá del uso final que se le de a la pieza de madera.

Según Marian, *et al* (1958), citado por Vega M. (2004) La magnitud de estas irregularidades y formas dependen de variados factores e interrelacionados entre si, sin embargo, éstas se pueden agrupar en tres:

1. La estructura anatómica y propiedades físicas de la madera.
2. Método de maquinado; marcas por dientes de la sierra o las ondas formadas por la cepilladora, etc.
3. Variaciones producidas dentro del proceso de maquinado, como son vibraciones, desalineamientos de los ejes, etc.

2.5.1 Parámetros de rugosidad.

En general los parámetros que se utilizan para medir la rugosidad pueden interpretarse como parámetros propios de la distribución estadística de alturas de perfil o superficie bajo análisis. Los parámetros de rugosidad más usados en ingeniería son Rz, Ra y Rmax. Rz representa la altura máxima promedio en cinco zonas del perfil de rugosidad. Ra es la altura de un rectángulo cuya área es igual al área presente en un perfil de rugosidad. Rmax es la altura máxima dentro del perfil total de rugosidad (López, 2005). Al revisar la literatura adecuada se consideró que para realizar la medición de rugosidad el parámetro Rz, es el que mejor explicaba la rugosidad superficial para este estudio.

R_z (Altura de diez puntos irregulares): es el valor medio, en micrómetros, del valor absoluto de los cinco picos más altos (Y_{pi}), más el valor medio del valor absoluto de lo cinco valles más profundos (Y_{vi}), dentro de la longitud de muestra, (Figura 12).

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^N Y_{pi} + \frac{1}{5} \sum_{i=1}^N Y_{vi}$$

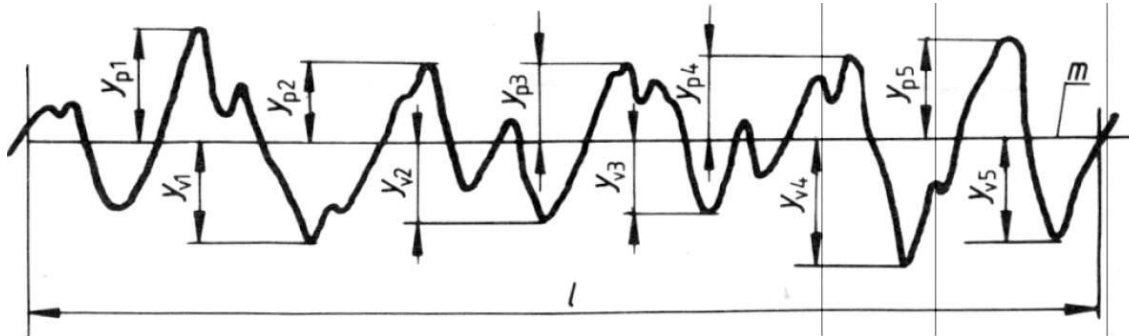


Figura 12. Parámetro Rz de rugosidad superficial.

2.6 Defectos del cepillado que afectan la calidad superficial

2.6.1 Calamina o marcas de cuchillo

Son irregularidades que se presentan en la superficie del cepillado que aparecen en forma continua (Figura 13).

La rotación del cuchillo en el proceso de cepillado con una velocidad de alimentación constante describe un cicloide sobre la madera, esto produce la formación de ondas. Las cuales corresponden a marcas generadas por el proceso

En forma contraria una alimentación discontinua también produce ondas en la superficie maquinada, que en este caso representa un defecto. (Aguilera, 2006).

Este defecto tiene una importancia significativa en los procesos productivos, implica mayor mano de obra y en consecuencia mayor tiempo de producción para su acabado final, este defecto puede ser corregido lijando la superficie afectada por este defecto, o bien ajustando, correctamente las condiciones de operación, revisando el estado mecánico del equipo y finalmente revisando la homogeneidad de los espesores de las piezas.



Figura 13. Marcas de cuchillos

2.6.2 Quemaduras de cuchillos

Este defecto aparece como un área oscurecida quemada donde la madera fue sobrecalentada (Figura 14). Esto es a menudo causada por una pausa en la alimentación de la pieza de madera, de manera que los cuchillos se frotan sobre la madera. Esto también puede ser causado por cuchillos desgastados que son forzados hacia la pieza. (Aguilera, 2006).



Figura 14. Quemaduras de cuchillos.

2.6.3 Fibra levantada

Las fibras levantadas se originan cuando los cuchillos empujan la madera densa de verano hacia las células de madera blanda de primavera. Generalmente las células más blandas se rompen al adquirir humedad después del maquinado y se expandirán para retomar su forma original, creando una superficie semejante a una tabla de lavado. (Ver Figura 15).

Existen cuatro factores de maquinado que contribuyen a la generación de fibra levantada: el primer factor y de mayor importancia son cuchillos desgastados; demasiado land en jointeado; insuficiente ángulo de incidencia y presión excesiva de los rodillos de alimentación, por último, un elevado contenido de humedad (20% o más aumentará el problema). Aguilera (2006).



Figura 15. Fibra levantada

2.6.4 Fibra apelusada

Este defecto se caracteriza por grupos de fibras de madera que no han sido cortadas limpiamente en la superficie y estas se mantienen aún levantadas (Figura 16). Es común en las maderas duras y madera de tensión. Al parecer, estas fibras no son lo suficientemente fuertes como para mantenerse en pie cuando se produce el corte, por lo que se doblan y no son cortadas. Este defecto se puede controlar trabajando con bajos contenido de humedad y con elementos de corte bien afilados. Posiblemente un mayor ángulo de ataque también ayudará a resolver este defecto. (Wengert, 1998).



Figura 16. Muestra de fibra apelmada.

2.6.5 Fibra encontrada

Este defecto se caracteriza por presentar una superficie donde astillas pequeñas de madera se han roto o desgarrado (Figura 17). Ocurre cuando los cuchillos están en contra al grano, a menudo este defecto se produce alrededor de nudos. Cuchillos bien afilados (cuchillos de acero pueden ser más filosos que carburo, por lo tanto, el acero puede resultar mejor en situaciones críticas) y cortes más pequeños es decir, más cortes por pulgada o más pequeños será una medida de control más efectiva en una situación de producción. (Wengert, 1998).



Figura 17. Fibra encontrada

2.7 Factores del maquinado que afectan la calidad superficial

2.7.1 Velocidad de avance

Esta velocidad está dada por la velocidad de avance de la madera y depende directamente de la magnitud del avance del elemento de corte, o marcas que deja la herramienta de corte por cada pulgada, (f_z), también dependerá del número de elementos de corte (Z) y del número de revoluciones (N). (Moya, 1986). En consecuencia la fórmula para la velocidad de avance es la siguiente.

$$V_f = f_z * Z * N$$

V_f = Velocidad de avance (m/min.)

f_z = Avance del cuchillo (mm)

Z = Número de cuchillos

N = RPM. del eje rotativo (min.^{-1})

Este parámetro es de suma importancia en el proceso de maquinado pues la elección apropiada de la velocidad de avance (v_f) nos permitirá obtener una calidad superficial adecuada. A su vez deriva en el desgaste de los cuchillos pues el aumento de la velocidad de avance aumenta el desgaste y disminuye el tiempo de uso de las herramientas de corte.

2.7.2 Velocidad de corte (V_c)

Determinado por el número de revoluciones por minuto de rotación y diámetro del cabezal, influyen en la duración y la calidad de la superficie a conseguir (INFOR, 1994)

$$V_c = \pi * D * N \text{ (m/seg.)}$$

D = Diámetro del cabezal (mm)

N = RPM. del cabezal (min.^{-1})

Diámetro del cabezal (D): se considera esta medida desde los extremos de corte. Se expresa en mm.

Número de cuchillos (Z): Se consideran como número de cuchillos a aquellos que intervienen en el corte. ($Z=4$, equivale a decir cabezal con 4 cuchillos), Vega (2004)

La velocidad de corte esta influenciada por la velocidad de rotación del elemento de corte. Las mayores velocidades de corte (o rotación) generarán una mejor calidad superficial, para el caso de cabezales cepilladores trabajando dentro de márgenes de seguridad admitidos en madera blanda y con cuchillos de acero

rápido (HSS), donde la velocidad de corte debe fluctuar entre 50 y 70 m/s (Lemaster, 2000).

2.7.3 Relación de la velocidad de avance por cuchillo sobre la calidad superficial

El avance del elemento de corte (fz), equivale a la distancia entre la entrada y salida de cuchillos sucesivos, (Figura 18) este parámetro interfiere directamente sobre la calidad superficial, debido a que se producen ondas en la superficie, mientras más largo es el paso menos marcas quedarán en la superficie dejando una mayor rugosidad, por el contrario si el fz es menor, la superficie resultante será más lisa. En consecuencia se puede afirmar que la velocidad de avance tiene un rol fundamental, debido a que de ella depende el paso del corte (Weinig, s/f).

$$fz = \frac{Vf}{n * Z}$$

fz = Avance del elemento cortante (mm)
 Vf = Velocidad de avance (m/min.)
 N = Velocidad de rotación RPM. (min.^{-1})
 Z = Número de cuchillos

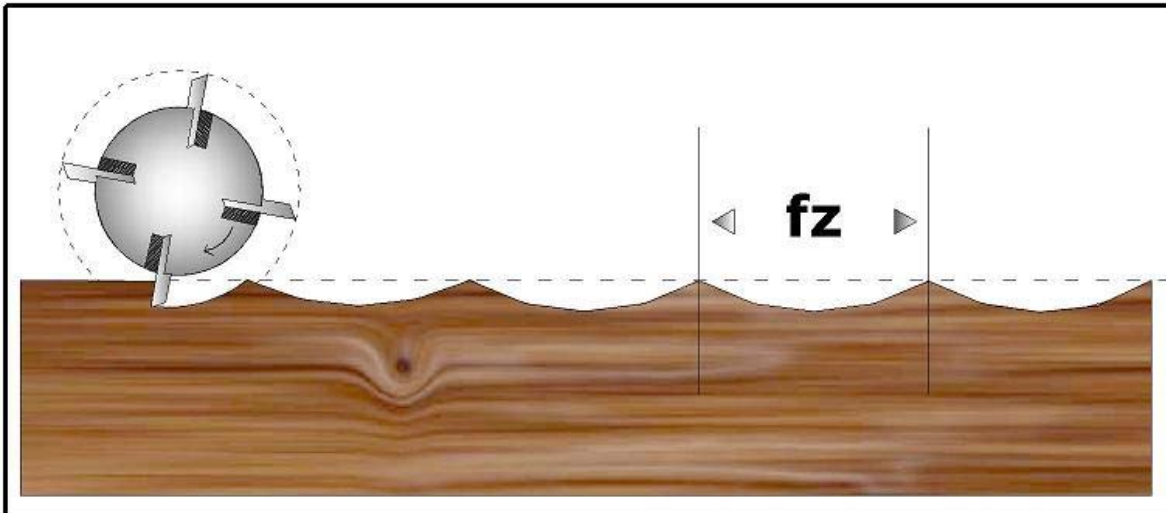


Figura 18. Avance por cuchillo sobre la calidad superficial

Tanto las velocidades de avance como de rotación muestran comportamientos seguros en cuanto a su efecto sobre la rugosidad superficial, donde un aumento de la velocidad de avance genera superficies de inferior calidad para velocidades de rotación constantes. Un aumento de la velocidad de rotación produce superficies menos rugosas para velocidades de avance constantes. El espesor de viruta es un buen indicador de la rugosidad superficial para diferentes condiciones

de maquinado, ya que integra una serie de condiciones de corte en conjunto. (Aguilera y Vega, 2004)

2.7.4 Relación de la profundidad de corte y la calidad superficial

Otro parámetro importante que determinará la calidad de la superficie es la profundidad de la onda la cual es la entrada del filo de la cuchilla en la madera (Figura 19). Cuanto menor sea la entrada del cuchillo en la madera mejor será la superficie de la pieza trabajada.

Las ondas con profundidades y largos pequeñas son deseables, estas se encuentran asociadas a una menor rugosidad superficial, no obstante se requiere mayor energía y esto conlleva un mayor desgaste de los elementos de corte, la cual es lograda con un incremento del diámetro del cabezal y número de cuchillos a su vez una reducción de la velocidad de alimentación. (Koch, 1972). De esta forma se puede evaluar la rugosidad superficial en el cepillado.

En consecuencia la profundidad de la onda (t) depende de la longitud de paso de la cuchilla (fz) y del número u órbita que describa la herramienta (D), para generar una buena calidad superficial, la profundidad de la onda ideal que se ha obtenido de variados estudios es de 0,005 mm y este valor es obtenido de la siguiente fórmula

$$t = \frac{fz^2}{4D} (mm)$$

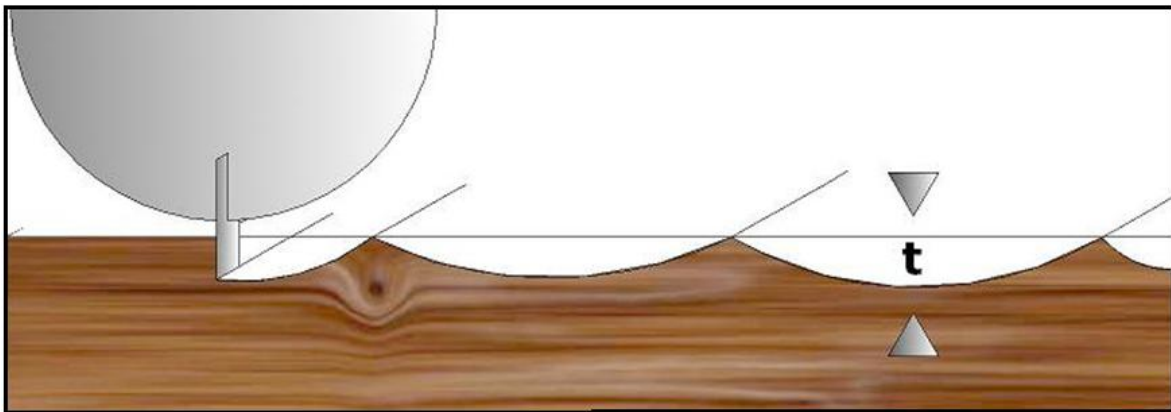


Figura 19. Profundidad de la onda.

3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

En este punto se hace referencia al material, equipamiento y metodología empleada para lograr los objetivos planteados, con el fin de facilitar el entendimiento de los procedimientos empleados para la realización de este estudio.

3.1 Material y equipo

3.1.1 Material

Se utilizó madera de *Pinus radiata* D. Don proveniente de Valdivia, encontrándose un contenido de humedad de 12 % con una densidad básica promedio de 0.47 g/cm³ para madera lateral y 0.39 g/cm³ para madera central. Las dimensiones de las probetas para el estudio fueron de 200 mm de largo, 35 mm de ancho y 40 mm alto, se tomaron subprobetas para verificar la densidad y contenido de humedad. Para la realización de las mediciones de rugosidad se utilizó un rugosímetro de contacto tipo stylus modelo Mitutoyo SJ-201 (Figura 20) instrumento capaz de medir con una precisión de 0.001 mm. Con un diámetro de cabezal de 5 μm. Las mediciones se realizaron en forma perpendicular a las marcas producidas por los cuchillos durante el proceso de corte, con un recorrido de 25 mm.



Figura 20. Rugosímetro Mitutoyo SJ-201

3.1.2 Fresadora

Para la el maquinado de las probetas se utilizó una máquina tupí marca GRIGGIO T100 (Figura 21), que consta de un motor de 4 KW de potencia máxima, velocidad de rotación del eje variable entre 3200 a 8.000 RPM y un carro de avance automático con 4 velocidades de alimentación 4, 8, 11 y 22 m/min.



Figura 21. Maquina tupí

3.1.3 Herramienta de corte

La herramienta de corte utilizada para el maquinado de las probetas, es un cabezal de montaje convencional (Figura 22), que tiene un diámetro de 125 mm y un diámetro del eje de 40 mm, cuenta con 4 cuchillos (Z=4) los cuchillos son de acero rápido (HSS) y tiene por dimensiones 60 x 30 x 3 mm con perfil recto, cuyo ángulo de ataque es 25°.



Figura 22. Cabezal convencional Z=4

3.2 Método

3.2.1 Determinación de la densidad de la madera y contenido de humedad

Se determinó la densidad básica y contenido de humedad de acuerdo a los procedimientos estipulados en la Norma Chilena NCh176/2 y NCh176/1 respectivamente. Tanto los valores de densidad y contenido de humedad fueron verificados en forma periódica durante el mes septiembre en el laboratorio del TEIM.

3.2.2 Medición de la rugosidad superficial

Para obtener las medidas de rugosidad superficial se utilizó un rugosímetro de contacto el cual mide las irregularidades que se producen en la superficie producto del maquinado. utilizando el parámetro Rz basados en las normas Din 4768, ISO 13563, que lo indican como uno de los valores más adecuados para la estimación de la rugosidad superficial en materiales sólidos. Se realizaron mediciones en 5 partes de la superficie, posterior a cada maquinado, estas mediciones se realizaron en sentido longitudinal.

3.2.3 Norma ASTM D 1666-87

Se tomó como referencia la norma ASTM D 1666-87, la cual establece el procedimiento de trabajo para la realización de ensayos de trabajabilidad en madera. En esta se menciona que la evaluación de las probetas se debe realizar mediante una inspección visual, donde se identifican fibra levantada, marcas de cuchillo, fibra apelmada, fibra encontrada.

Dependiendo de la magnitud de los defectos se clasifican las probetas sobre la base de la siguiente escala:

- Grado 1: Excelente
- Grado 2: Bueno
- Grado 3: Regular
- Grado 4: Pobre
- Grado 5: Muy Pobre

3.3 Diseño experimental

Las probetas fueron procesadas según las condiciones de corte que se describen en el (Cuadro 3). Para la realización de las medidas de rugosidad superficial Rz las condiciones de medición se encuentran en el (Cuadro 4).

Cuadro 3. Condiciones de corte

Factor	Condición
Velocidad de avance (Vf) m/min	4 - 8 - 11
Velocidad de rotación (RPM)	4200
Diámetro del Cabezal (D) en (mm)	125
Número Cuchillos (Z)	4
Profundidad de corte (ap) mm	1 - 2 - 3
Ancho de corte en mm	35
Probeta	Pinus radiata D. Don
Tipo Madera	Central y Lateral
Densidad básica madera central Kg/m ³	390
Densidad básica madera lateral Kg/m ³	470
Contenido de humedad	12%

A su vez las condiciones de medición de la rugosidad se presentan el siguiente cuadro.

Cuadro 4. Condiciones de medición de rugosidad superficial

Factor	Condición
Aparato de medición	Rugosímetro de contacto
Parámetro de rugosidad superficial	Rz
Longitud evaluación (mm)	25
Puntos de medición en probeta	5

La rugosidad superficial fue medida a través del parámetro Rz .Se tomaron 5 mediciones distribuidas en los extremos y centro de cada probeta.

Las constantes del proceso son:

- Material de la probeta
- Contenido de humedad (CH%)
- Material de corte (HSS)
- Diámetro de corte
- Ancho de Corte
- Velocidad de Rotación

- Número de Cuchillos

Las Variables del Proceso:

- Velocidad de Alimentación
- Profundidad de Corte (ap)
- Densidad (madera central , madera lateral)

Parámetro de Respuesta

- Medición de la rugosidad superficial Rz (μm)

Antes del proceso de maquinado se procedió a la elaboración de las probetas de madera central y madera lateral, realizándose una inspección visual para identificar la presencia de nudos, alabeos u otros defectos que pudiesen alterar el estudio.

Seguidamente se extrajeron subprobetas para determinar el contenido de humedad y densidad básica. En forma posterior se procedió al maquinado de las piezas de madera central y lateral para obtener las mediciones de rugosidad superficial correspondientes.

Para la determinación de la rugosidad superficial las probetas fueron maquinadas a velocidad de rotación constante de 4200 RPM con 3 velocidades de avance 4, 8 y 11 m/min. Con una profundidad de corte de 1,2 y 3 mm tanto para maderas lateral y central. En los cuadros 5 y 6 se indican las combinaciones de las velocidades de avance y altura de corte que generan los espesores de viruta tanto para los dos tipos de madera.

Cuadro 5. Diseño Experimental para madera central

V. Alimentación (m/min)	Ap (mm)	V. Rotación RPM	Z	Diámetro Cabezal (mm)	emv (mm)	Número de repeticiones
4	1	4200	4	125	0.021	3
4	2	4200	4	125	0.031	3
4	3	4200	4	125	0.036	3
8	1	4200	4	125	0.042	3
8	2	4200	4	125	0.060	3
8	3	4200	4	125	0.073	3
11	1	4200	4	125	0.058	3
11	2	4200	4	125	0.082	3
11	3	4200	4	125	0.101	3

Cuadro 6. Diseño Experimental para madera lateral

V. Alimentación (m/min)	Ap (mm)	V. Rotación RPM	Z	Diámetro Cabezal (mm)	emv (mm)	Número de repeticiones
4	1	4200	4	125	0.021	3
4	2	4200	4	125	0.031	3
4	3	4200	4	125	0.036	3
8	1	4200	4	125	0.042	3
8	2	4200	4	125	0.060	3
8	3	4200	4	125	0.073	3
11	1	4200	4	125	0.058	3
11	2	4200	4	125	0.082	3
11	3	4200	4	125	0.101	3

Para determinar el número de probetas a ensayar se considero la cantidad de variables relacionadas con el proceso de cepillado como lo son: altura de corte, velocidad de avance, y tipo de madera (Cuadro 7). En total son 3 variables de altura de corte, 3 variables de velocidad de avance y 2 variables del tipo de madera.

Cuadro 7. Variables para determinar número de probetas

Altura de corte (mm)	Velocidad de avance (m/min)	Tipo de madera
1	4	Lateral
2	8	Central
3	11	

De esta manera se ensayaron 18 probetas 9 para madera central y 9 para madera lateral, realizándose 3 repeticiones de corte por probeta, en donde se midió 5 veces la rugosidad superficial, en consecuencia 15 medidas de rugosidad superficial por probeta, generándose un total de 270 datos de rugosidad superficial (Rz).

3.4 Análisis estadístico

Para la evaluación de la rugosidad superficial Rz obtenida del maquinado de las probetas, se efectuaron 2 tipos de análisis estadístico, un análisis descriptivo y un análisis de varianza multifactorial. El cual realiza múltiples test con representaciones gráficas para determinar los factores que tienen efectos significativos sobre la respuesta del proceso rugosidad superficial Rz.

Previa a la medida del efecto, que es el resultado final al que se pretende llegar, se aplicó un test de homogeneidad para comprobar si los distintos estudios son homogéneos y se pueden combinar entre sí.

En el caso de este estudio nuestra variable dependiente es la rugosidad superficial (Rz), y los factores son el la velocidad de avance (Vf) tipo de madera (central, lateral), y la altura de corte (ap).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Densidad de madera central y madera de lateral de *Pinus radiata*

A continuación se presentan los valores de densidad básica obtenidos según norma Chilena NCh176/2. En el Cuadro 8 se puede observar la diferencia entre la densidad de madera central con respecto a madera lateral.

Cuadro 8. Densidad de madera central y madera lateral de *Pinus radiata* D.Don

Densidad	Madera Central (kg/m ³)	Madera lateral (Kg/m ³)
Básica	394.7	465.4

En cuanto a la densidad básica obtenida en las probetas con que se realizaron los ensayos concuerda con lo estudios realizados por Romero (1965) que encontró una densidad básica promedio de 477 (kg/m³).

4.2 Norma ASTM D 1666-87

En relación a la norma ASTM D 1666-87, se evaluó cada probeta mediante una inspección visual, donde se buscó identificar fibra levantada, fibra apelmada, fibra encontrada.

De acuerdo a la evaluación visual realizada a las probetas, estas se encontraban en el Grado 1 de la escala de clasificación, o sea ninguna de las probetas presentaba algún tipo de defecto en cuanto a fibra levantada, fibra apelmada, fibra encontrada. Esto se podría explicar por las bajas velocidades de alimentación que

generan un espesor medio de viruta muy pequeño, asimismo por el buen estado del filo de los cuchillos y por el hecho que la madera estaba libre de defectos (nudos).

4.3 Rugosidad superficial

En el siguiente cuadro (cuadro 9) se presenta un resumen de los resultados obtenidos de rugosidad superficial, caracterizando cada tipo de variable utilizada en el estudio.

Cuadro 9. Resumen de valores rugosidad superficial Rz para madera central y lateral.

N	Vf	Ap	ec	Rugosidad Rz madera central	Rugosidad Rz madera lateral
4200	4	1	0,021	20,34	17,41
4200	4	2	0,031	19,48	16,33
4200	4	3	0,036	19,99	17,12
4200	8	1	0,042	23,01	21,18
4200	8	2	0,060	21,88	22,26
4200	8	3	0,073	20,66	21,44
4200	11	1	0,058	25,85	25,42
4200	11	2	0,082	25,28	24,64
4200	11	3	0,101	23,28	24,79

N = velocidad de rotación (rpm) Rz = rugosidad superficial (um) Ap= altura de corte (mm)
ec = espesor de viruta (mm) Vf = velocidad de avance (m/min.)

En el cuadro anterior se puede apreciar en forma resumida los valores obtenidos de rugosidad superficial, los cuales corresponden a las medias de las rugosidades para cada tratamiento o nivel y los dos tipos de madera.

4.3.1. Efecto de la velocidad de avance en la rugosidad superficial para madera central y lateral.

El análisis de varianza con respecto a la velocidad de avance utilizado en los ensayos de rugosidad, arrojó un p-valor menor a 0.05, lo que indica que hay influencias estadísticas significativas en la rugosidad superficial con respecto a la velocidad de avance.

Para determinar entre que tipos de velocidades de avance hay diferencias significativas, se realizaron comparaciones múltiples con el método de *Tukey* con un intervalo del 95% de confianza. Determinándose diferencias significativas entre velocidades de avance de 4, 8 y 11 (m/min).

En las velocidades de avance que existe una mayor diferencia de rugosidad son entre 4 y 11 (m/min) dado que los resultados de rugosidad superficial menores se

encuentran a una velocidad de avance de 4 (m/min) y los valores de rugosidad mayor se encuentran a una velocidad de avance de 11 (m/min).

Es decir a medida que aumenta la velocidad de avance, se puede apreciar un aumento significativo de la rugosidad superficial. En la figura 23 se puede ver esta tendencia ascendente a velocidades de avance de 4, 8 y 11 (m/min) para madera central.

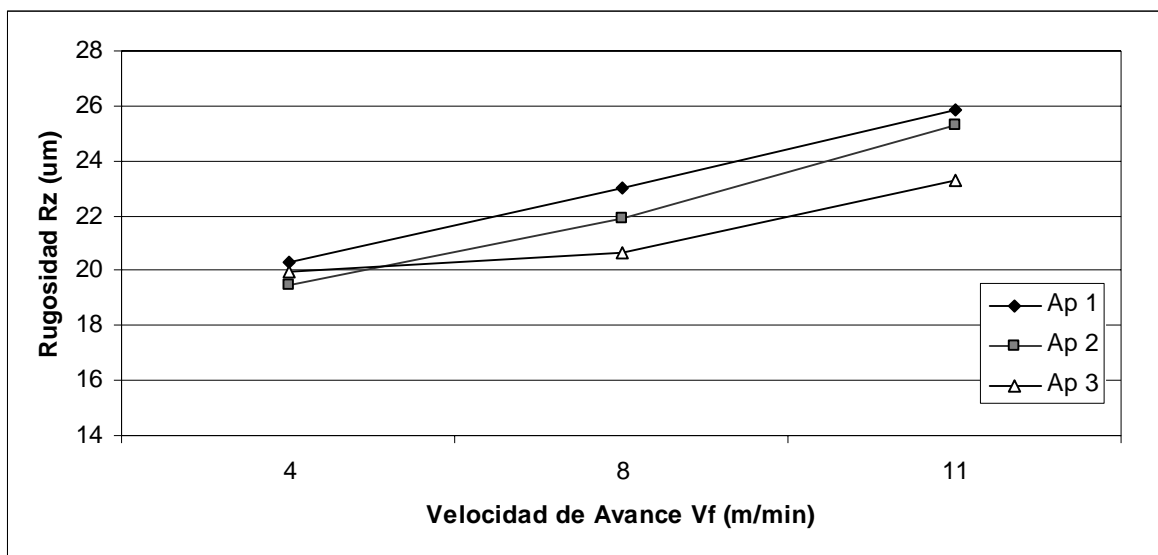


Figura 23. Efecto de la velocidad de avance sobre la rugosidad superficial para madera central en relación a distintas alturas de corte.

Del grafico anterior podemos mencionar que la menor rugosidad superficial (19,48 um), se obtuvo a una velocidad de avance de 4 (m/min) y altura de corte 2 (mm) resultando ser la mejor calidad superficial.

En contraste con lo anterior y de acuerdo con la teoría el incremento de la velocidad de avance 11 (m/min) y altura de corte 1 (mm) se obtuvo, la mayor rugosidad superficial (25,85 um) generándose una calidad superficial menor.

Para la velocidad de avance 8 (m/min) se observa que a mayor altura de corte 3 (mm) se obtiene una menor rugosidad superficial (20,66um), debido a la mayor remoción de material leñoso.

Al igual que para madera central, el efecto de la velocidad de avance en madera lateral es ascendente, con la diferencia que los valores de rugosidad obtenidos son menores. Esto se puede apreciar en la figura 24.

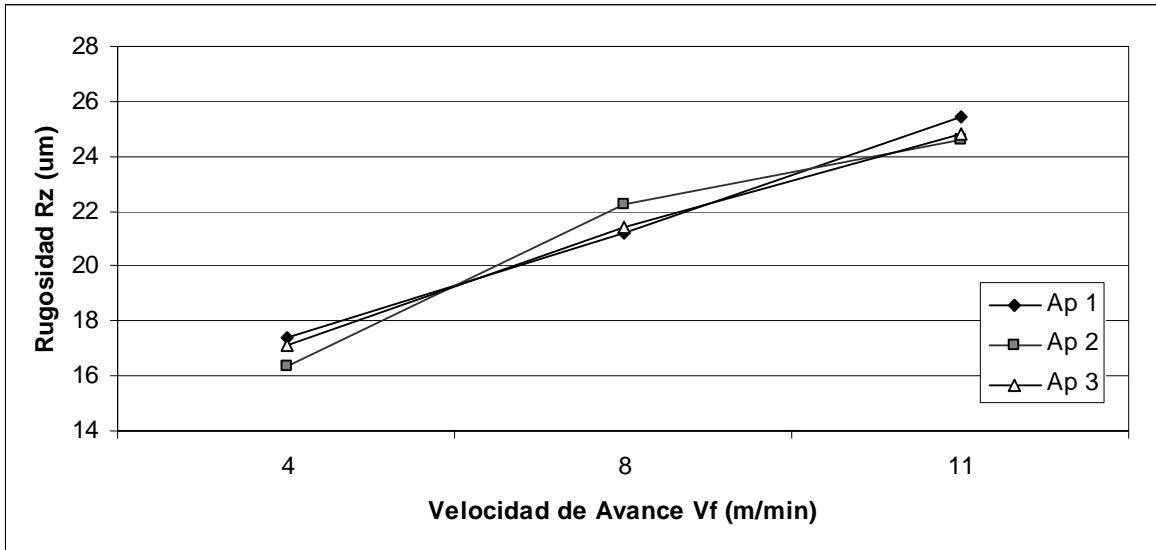


Figura 24. Efecto de la velocidad de avance sobre la rugosidad superficial para madera lateral en relación a distintas alturas de corte.

Del grafico anterior se puede apreciar que la menor rugosidad superficial (16,33 um) se obtuvo a una velocidad de avance 4 (m/min) y una altura de corte 2 (mm).

En tanto la mayor rugosidad superficial (25,42 um) se obtuvo a una velocidad de avance de 11 (m/min) y altura de corte de 1 (mm).

Para la velocidad de avance 8 (m/min) la mayor rugosidad superficial (22,26 um) se genera a una altura de corte 2 (mm) y en las alturas de corte 1 y 3 (mm) la calidad superficial es similar.

Como consecuencia del aumento de la velocidad de avance, el tiempo de contacto entre la pieza de madera y la herramienta de corte disminuye, esto produce superficies con menor calidad superficial. En la industria de la madera reducir la velocidad de avance es un parámetro difícil de controlar, ya que se privilegia la producción y no la calidad superficial obtenida. Debido a que velocidades de avance menores provocan menores producciones.

4.3.2 Efecto de la densidad en los valores de rugosidad superficial para madera central y lateral.

Como fue descrito anteriormente en el método, se realizó una medición de la densidad básica a cada probeta de madera central y lateral maquinada.

El análisis de varianza referente al tipo de madera que se utilizó en los ensayos de rugosidad superficial, arrojó un p-valor de 0,0028, este valor indica que hay diferencias estadísticas significativas en la rugosidad superficial respecto al tipo de madera utilizada en los ensayos.

La densidad para madera central varía de 360 y 430 (kg/m³), en tanto para madera lateral 440 y 510 (kg/m³) siendo mayor la densidad de madera lateral.

Para establecer el efecto de la densidad sobre la rugosidad superficial se determinó la correlación entre ambas variables. En la figura 25 muestra esta relación.

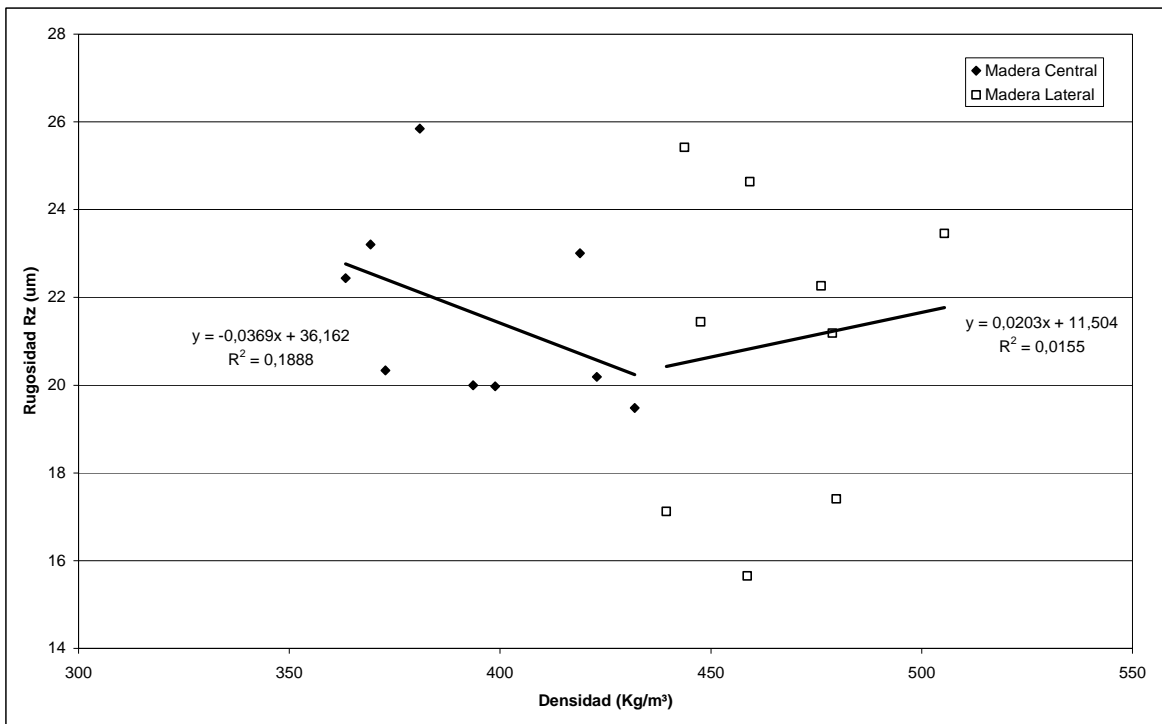


Figura 25. Efecto de la densidad (Kg/m³) en los valores de rugosidad superficial para madera central y lateral.

Según los resultados obtenidos para densidad de madera central, muestran una relación inversa con respecto a la rugosidad superficial, si bien es cierto que no es una fuerte relación, existe una tendencia que a medida que aumenta la densidad disminuye la rugosidad superficial.

En cuanto al efecto que tiene la densidad de madera lateral sobre la rugosidad superficial, existe una leve tendencia a aumentar la rugosidad superficial a medida que la densidad es mayor. La madera cepillada que generalmente se produce en la industria maderera es madera lateral debido a que este tipo de madera ofrece una menor cantidad de defectos, como lo son los nudos y médula, ya que estos defectos quedan en la zona central del fuste.

4.3.3 Efecto del espesor de viruta sobre la rugosidad superficial para madera central y lateral.

El espesor de viruta es un buen indicador de la rugosidad superficial, ya que integra una serie de condiciones de corte en conjunto. En los valores obtenidos de rugosidad superficial para madera central y lateral existen diferencias significativas, debido a que los valores de rugosidad para madera central son mayores. En la figura 26 se puede observar la influencia del espesor de viruta sobre al rugosidad superficial para madera central.

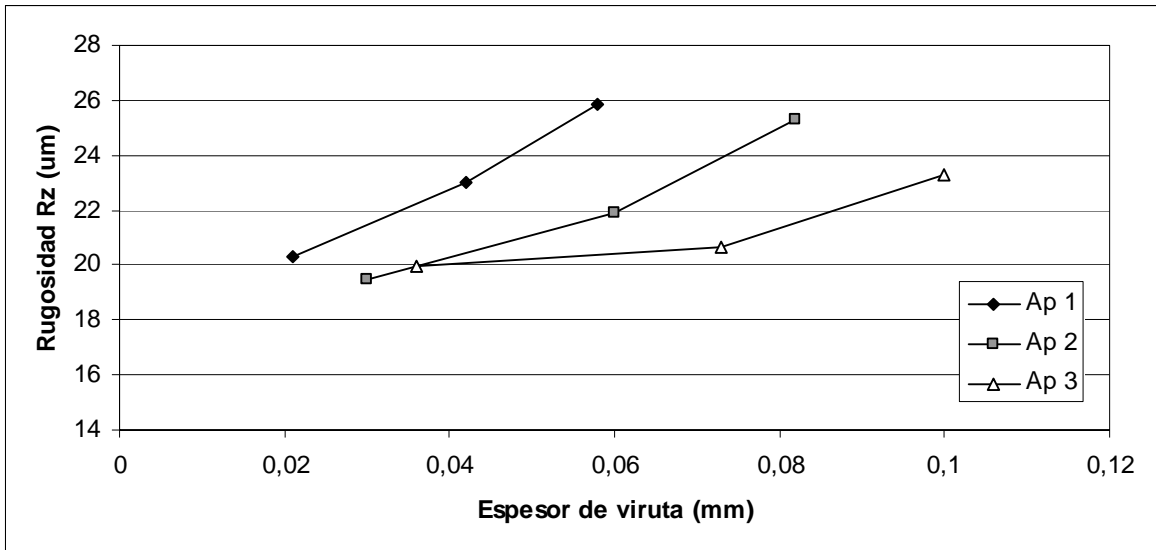


Figura 26. Efecto del espesor de viruta (mm) sobre la rugosidad superficial para madera central en relación a las distintas alturas de corte.

El resultado que arroja el gráfico anterior, muestra que al aumentar el espesor de viruta, también lo hace la rugosidad superficial. Generando una menor rugosidad a medida que la altura de corte aumenta. Como es el caso de una altura de corte de 1 (mm) donde la rugosidad superficial es mayor, obteniéndose una calidad superficial menor.

En el caso de madera lateral, la rugosidad superficial también aumenta con el incremento del espesor de viruta. Como se puede ver en la figura 27.

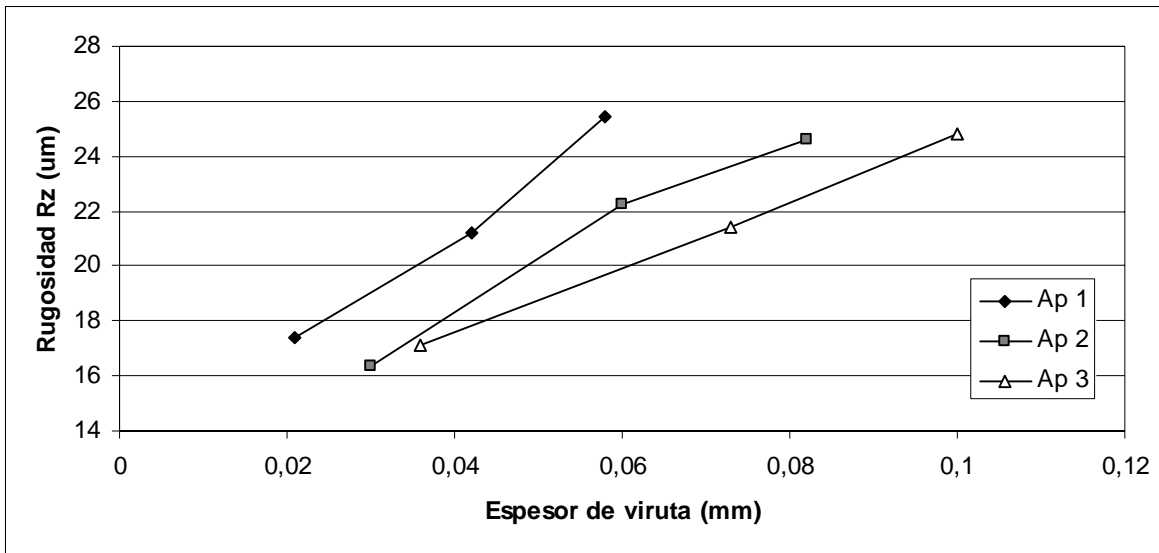


Figura 27 Efecto del espesor de viruta (mm) sobre la rugosidad superficial para madera lateral en relación a las distintas alturas de corte.

En madera lateral los valores de rugosidad superficial obtenidos son similares y levemente menores, en comparación a los de madera central. Los espesores de viruta pequeños generan una mejor calidad superficial.

Para el caso de madera lateral la menor rugosidad se obtuvo a una altura de corte de 2 (mm), generándose a esta altura de corte la mayor calidad superficial.

4.3.4 Efecto de la velocidad de avance sobre la rugosidad superficial para madera central y lateral

La rugosidad superficial se vio afectada por la velocidad de avance como se muestra en la figura 28.

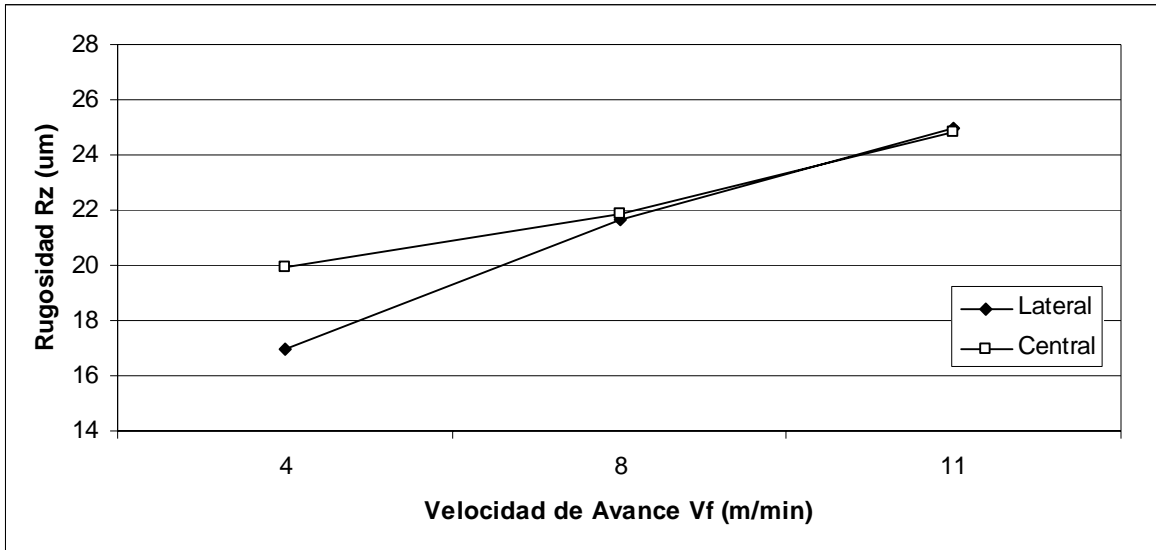


Figura 28. Efecto de la velocidad de avance sobre la rugosidad superficial para madera central y lateral.

Para la velocidad de avance de 4 (m/min) se obtuvieron los menores resultados de rugosidad superficial (16,95 µm), obteniéndose la mejor calidad superficial en madera lateral.

En el segundo nivel de velocidad de avance 8 (m/min) aumenta la rugosidad superficial en comparación con la velocidad de avance de 4 (m/min), en este nivel la diferencia entre la rugosidad superficial de madera central y lateral es mínimo, siendo levemente inferior la rugosidad de madera lateral (21,63 µm).

Para la velocidad de avance de 11 (m/min). La rugosidad superficial es superior en comparación a las velocidades de avance anteriores, existiendo una ínfima diferencia entre la rugosidad de madera central y lateral. En esta velocidad de avance la calidad superficial obtenida es menor.

Al aumentar la velocidad de avance, mayor es también la rugosidad superficial, eso concuerda con estudios realizados anteriormente por Aguilera y Vega, (2004), donde se señala la relación entre la rugosidad y la velocidad de avance, a medida que aumenta la velocidad de avance aumenta la rugosidad superficial, por lo cual se generan superficies de inferior calidad, esto para velocidades de rotación constantes.

4.3.5 Efecto de la altura de corte sobre la rugosidad superficial para madera central y lateral.

Una vez obtenidos los resultados de rugosidad se procedió a analizar los resultados por medio de un análisis de varianza, para así poder comprender claramente el comportamiento de esta variable.

El análisis de varianza referente a la altura de corte requerido para los ensayos de rugosidad superficial, arrojó un p-valor de 0.0118, al tener un p-valor menor a 0.05, indica que hay influencias estadísticas significativas en la rugosidad superficial con respecto a la altura de corte.

Respecto a la rugosidad superficial y el tipo de madera, se obtuvieron valores de rugosidad superficial menores en madera lateral, en comparación a madera central, como se puede ver en la figura 29.

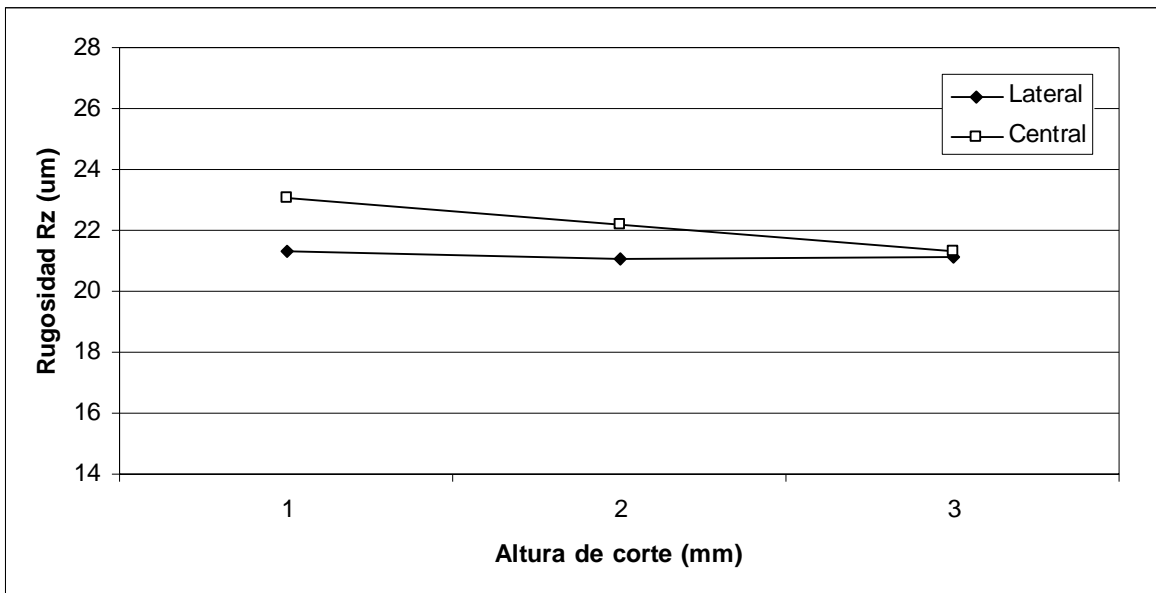


Figura 29. Efecto de la altura de corte sobre la rugosidad superficial para madera central y lateral.

En el caso de madera central la rugosidad superficial es descendente, y el nivel de profundidad que genera una mayor calidad superficial para este tipo de madera, es a una altura de corte de 3 (mm).

En madera lateral las fluctuaciones de rugosidad para las distintas alturas de corte son mínimas, el nivel de profundidad del cepillado que genera una mayor calidad superficial es a una altura de corte de 2 (mm).

Esto concuerda con lo citado por Davis (1962) la rugosidad superficial aumenta progresivamente a medida que disminuye la profundidad de corte. Con una mayor remoción de material leñoso se obtiene una menor rugosidad superficial. Sin embargo la obtención de una menor rugosidad superficial, no se privilegia en la industria maderera, ya que al remover una mayor cantidad de madera significa un incremento en la pérdida de material

5. Conclusiones

Según el estudio realizado se pudo comprobar que existe una variación en la rugosidad superficial, al variar las condiciones de maquinado en velocidad de avance, tipo de madera y altura de corte.

La velocidad de avance produce una variación significativa en los resultados de la rugosidad superficial. Para velocidades de avance 4 (m/min) la rugosidad superficial obtenida en los ensayos resultó ser menor, y se obtiene una mayor calidad superficial, respecto a velocidades de avance mayores 8 y 11 (m/min) presentan mayores niveles de rugosidad. Obteniéndose menor calidad superficial.

Para *Pinus radiata*, el efecto de la variación de la velocidad de avance sobre la rugosidad superficial da resultados similares para 8 y 11 (m/min) en ambos tipos de madera (lateral y central) siendo más sensibles las diferencias a 4 (m/min), donde como se pensaba, la mejor calidad se obtiene en madera lateral.

El espesor de viruta resultó ser un buen indicador de la rugosidad superficial resultante del maquinado, pudiéndose determinar al mismo tiempo las fluctuaciones de la profundidad de corte sobre la rugosidad superficial, así como también las diferencias entre ambos tipos de madera ensayada.

El efecto del cambio de la profundidad de corte proporcionó resultados muy interesantes, siendo muy claros respecto del espesor de viruta, no muy nítidos respecto de la velocidad de avance, sin embargo respecto del tipo de madera podría concluirse que el incremento de la profundidad de corte tiende a mejorar la calidad superficial, siendo más sensible los resultados en madera central.

6. BIBLIOGRAFÍA

Aguilera, A., 2006. Publicación docente. Técnicas de cepillado y elaboración de madera. p: 54-79.

Aguilera, A.; Vega, M. 2004. Efecto del cambio de las condiciones de maquinado sobre la rugosidad superficial de pinus radiata D. Don. Bosque (Chile), Volumen 25 N° 3, diciembre 2004, 25-32 p.

Barrantes D. s/f Cuchillos para afilar, cortar o perfilar INTERNET: <http://www.revista-mm.com/rev50/herramientas1.pdf> (Abril 22, 2008)

Davis, E. 1962. Machining and related characteristics of United States hardwoods. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. 49 p.

García, L. 2002. La madera y su tecnología: Aserrado, Chapa, tableros contrachapados. Fundación Conde del Valle de Salazar: Mundi-Prensa: AITIM 336P

Gene Wengert, 1998. Departamento de selvicultura, universidad de Wisconsin-Madison. *Defectos del cepillado en la madera*. INTERNET: http://www.woodweb.com/knowledge_base/Rx_for_Wood_Machining_Defects.html (Abril 19, 2008)

Hiziroglu, S, M Graham. 1998. Effect of press closing time and target thickness on surface roughness of particleboard. Forest Products Journal INTERNET: <http://www.scielo.cl> (Mayo 9, 2008)

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

Koch, P. 1972 Utilization of southern pines. Washington, U.S.A Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 769 p.

Lemaster, R., Lu, L., Jackson, S 2000. The use of process monitoring techniques on CNC wood routers, part 1, sensor selection. Forest products journal 50 (7/8):31 – 38.

López, E.; Cavazos R.; Delgado M. 2003. Caracterización de superficies maquinadas por medio de parámetros de rugosidad. División de Ingeniería Mecánica, FIME-UANL, México. 62-68 p.

Michael Weinig AG www.weinigusa.com

Moya, C. 1986 Teoría de corte en la Madera. Corporación Nacional Forestal. Chile Forestal, Documento Técnico N°119.

NCh176/1 Of 84, 1984. INN (Instituto Nacional de Normalización, Chile). Determinación de la humedad. Santiago, Chile.

NCh176/2 Of 86, 1988. INN (Instituto Nacional de Normalización, Chile). Determinación de la densidad. Santiago, Chile.

Norma ASTM D 1666-87, 1994. *Métodos para realizar ensayos de mecanización en madera y en materiales derivados de la madera.*

Ramos, M. 2006. Procesos de corte en remanufactura, Apuntes del curso. Concepción, Chile 26 p.

Sandvik Coromant, 1994 *“El Mecanizado Moderno, Manual Práctico”*, Departamento de Ediciones Técnicas de Sandvik Coromant, Suecia, 35-40 p.

Vega M. 2004. Comportamiento de madera de pinus radiata D. Don. Frente a diferentes condiciones de fresado. Magíster Ing. Forestal. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales.

Vignote, S.; Jiménez, F. 2000. Tecnología de la madera. 2da ed. Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 337 p.

ANEXOS

ANEXO 1

Abstract

ABSTRACT

It was studied, in orthogonal cutting, parallel to grain (90-0 direction), the influence of machining conditions, particularly the feed speed, cut depth and wood type, on the surface roughness of *Pinus radiata*.

Samples of central wood and lateral wood of this specie were prepared, setting up the test specimens until equal moisture content. Then, the test samples were set with three different feed speeds (4, 8 and 11 m/min) to a constant cutting speed of 4200 rpm. For both types of wood (central and lateral), and the above indicated conditions, three cut depth were also tested 1, 2 and 3 (mm).

The main results showed that the feed speed has an important influence upon the surface roughness obtained through the process, which allows the confirmation of the results in previous studies due to the fact that the increment of this speed generates lower quality surfaces to constant rotation speeds.

To the wooden kind factor, the result was a lower surface roughness in lateral wood in relation to central wood mainly due to the effect of the machining conditions selected and the cut geometry, which allowed a better chip formation for the highest density woods. In relation to the change in the cut depth, it was possible to see smaller amount of roughness in high cutting depths with results statistically significant at 95% of trustiness.

Key words: machining, *Pinus radiata*, surface roughness, lateral and central wood.

ANEXO 2

Valores de la madera y análisis estadístico

1. Contenido de humedad

Cuadro 1a. Datos contenido humedad probetas centrales

Probeta	Peso Húmedo (grs.)	Peso Seco (grs.)	Cont. Humedad (%)
1	113,21	100,56	12,57
2	117,26	103,62	13,16
3	103,32	91,67	12,70
4	116,92	103,62	12,83
5	101,32	88,40	14,50
6	100,53	89,02	12,92
7	118,47	104,49	13,30
8	103,52	91,77	12,80
9	94,68	83,89	12,86

Cuadro 1b. Datos contenido humedad probetas laterales

Probeta	Peso Húmedo (grs.)	Peso Seco (grs.)	Cont. Humedad (%)
1	133,44	118	13,08
2	127,65	114,15	12,70
3	114,34	102,36	11,70
4	134,58	118,71	13,36
5	131,55	117,17	12,27
6	117,61	104,02	13,06
7	129,47	115,03	12,55
8	124,07	110,67	12,10
9	120,84	107,03	12,90

Cuadro 1c. Contenido de humedad para cada tipo de madera.

	Contenido humedad para cada tipo de madera	
	Lateral	Central
	Contenido de Humedad (%)	Contenido de Humedad (%)
Promedio	12,64	13,07
Mínimo	11,7	12,57
Máximo	13,36	14,5
Total muestra	9	9
Desviación Estándar	0,53	0,58

2. Densidad de la madera

Cuadro 2a. Datos densidad básica madera central

Probeta	Peso Seco (grs.)	Volumen (cm ³)	Densidad (gr./cm ³)
1	100,56	269,73	0,373
2	103,62	239,91	0,432
3	91,67	229,87	0,399
4	103,62	247,32	0,419
5	88,40	239,4	0,369
6	89,02	226,15	0,394
7	104,49	247,08	0,423
8	91,77	240,91	0,381
9	83,89	230,88	0,363

Cuadro 2b. Datos densidad básica madera lateral

Probeta	Peso Seco (grs.)	Volumen (cm ³)	Densidad (gr./cm ³)
1	118,00	245,98	0,480
2	114,15	248,91	0,459
3	102,36	232,95	0,439
4	118,71	247,93	0,479
5	117,17	246,08	0,476
6	104,02	232,40	0,448
7	115,03	259,25	0,445
8	110,67	240,98	0,459
9	107,03	211,77	0,505

Cuadro 2c. Densidad para cada tipo de madera

	Densidad para cada tipo de madera	
	Lateral	Central
Promedio	0,47	0,39
Mínimo	0,44	0,36
Máximo	0,51	0,43
Total Muestra	9	9
Desviación Estándar	0,0214	0,0252

3. Rugosidad superficial

Resultados obtenidos en las mediciones de Rz para velocidad de avance, altura de corte y tipo de madera.

Cuadro 3. Datos Rugosidad superficial Rz para madera central y lateral según pasadas.

N	Vf	Ap	Primera pasada		Segunda pasada		Tercera pasada	
			Rz Central	Rz Lateral	Rz Central	Rz Lateral	Rz Central	Rz Lateral
4200	4	1	21,53	17,07	17,21	18,28	19,23	17,59
4200	4	1	18,75	19,70	21,42	15,45	16,61	18,16
4200	4	1	24,05	16,65	20,17	16,76	22,32	15,12
4200	4	1	16,67	15,65	23,86	15,27	19,62	14,84
4200	4	1	22,35	21,35	22,39	21,14	18,88	18,14
4200	8	1	18,67	19,04	23,90	24,69	19,44	19,37
4200	8	1	22,71	19,80	19,98	19,96	20,35	17,98
4200	8	1	23,72	25,41	27,70	20,63	22,01	25,94
4200	8	1	22,61	23,83	26,40	21,04	27,62	20,41
4200	8	1	23,72	17,08	23,30	20,27	23,00	22,27
4200	11	1	24,38	27,32	21,95	27,13	25,77	23,03
4200	11	1	24,39	27,65	24,85	28,40	25,49	23,14
4200	11	1	26,98	23,31	25,76	32,43	25,71	26,26
4200	11	1	26,23	25,39	20,67	22,56	25,75	25,70
4200	11	1	25,38	25,42	25,53	21,32	26,52	22,25
4200	4	2	16,37	16,65	20,03	20,31	15,02	15,81
4200	4	2	23,31	15,59	20,35	15,63	19,15	16,34
4200	4	2	19,30	17,13	21,38	19,47	19,08	19,35
4200	4	2	18,58	14,45	19,02	16,45	20,94	19,46
4200	4	2	18,60	13,41	22,35	13,47	16,33	20,05
4200	8	2	21,29	22,92	21,01	25,81	21,02	17,95
4200	8	2	20,62	25,42	18,76	21,51	21,21	19,70
4200	8	2	21,64	24,33	19,40	20,98	23,03	18,57
4200	8	2	26,67	21,31	22,12	19,85	19,12	23,50
4200	8	2	21,69	22,12	21,53	23,08	18,22	23,16
4200	11	2	23,63	23,16	26,28	24,70	22,51	19,74
4200	11	2	25,90	27,07	23,90	26,82	25,89	18,78
4200	11	2	25,01	20,30	25,44	24,53	25,81	24,58
4200	11	2	26,81	24,33	24,48	25,99	26,10	21,16
4200	11	2	25,15	26,75	27,07	24,26	25,08	22,02
4200	4	3	18,33	14,32	21,27	21,62	21,07	14,53
4200	4	3	18,94	14,49	20,45	15,82	19,93	14,90
4200	4	3	21,26	17,71	23,18	23,89	16,17	16,74
4200	4	3	19,77	15,48	15,95	20,13	16,43	13,92
4200	4	3	17,49	16,95	24,08	18,96	16,70	16,31

4200	8	3	18,98	18,21	17,35	24,23	25,07	24,01
4200	8	3	21,96	21,66	19,19	24,61	22,96	19,99
4200	8	3	19,90	19,96	22,19	20,72	19,89	20,07
4200	8	3	19,19	20,32	16,83	26,71	18,18	22,30
4200	8	3	22,63	19,50	25,73	24,07	21,16	24,89
4200	11	3	23,02	23,39	28,87	25,15	24,41	19,96
4200	11	3	25,55	25,90	19,83	24,64	17,74	23,69
4200	11	3	21,69	27,01	23,76	20,23	22,61	18,18
4200	11	3	20,52	21,26	22,16	23,27	26,13	21,20
4200	11	3	24,39	28,69	24,21	26,03	21,22	19,29

N = velocidad de rotación (rpm)

Ap = altura de corte (mm)

Rz = rugosidad superficial (um)

Vf = velocidad de avance (m/min.)

4. Análisis de varianza con respecto a la velocidad de avance

Cuadro 4a. Tabla ANOVA para rugosidad superficial Rz según velocidad de avance

Fuente	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-ratio	P-valor
Entre grupos	1554,46	2	777,229	112,01	0,0000
Intra grupos	1852,75	267	6,93914		
Total (Corregido.)	3407,21	269			

Dado que un p-valor es inferior a 0,05, este factor tiene efecto estadísticamente significativo en Rz para un 95,0%.

Cuadro 4b. Contraste múltiple de rango para rugosidad superficial según Velocidad de avance, según método de Tukey con 95% de confianza

Vf	Recuento	Media LS	Grupos Homogéneos
4	90	18,4044	X
8	90	21,6982	X
11	90	24,2669	X

Contraste	Diferencias	+/- Límites
4 – 8	*-3,29378	0,902907
4 – 11	*-5,86244	0,902907
8 – 11	*-2,56867	0,902907

Con respecto al grupo homogéneo este muestra que hay diferencias estadísticamente significativas, además se indica en las diferencias que entre cada nivel de velocidad de avance hay diferencias significativas, estas están representadas por el asterisco.

5. Análisis de varianza con respecto a la altura de corte

Cuadro 5a. Tabla ANOVA para rugosidad superficial Rz según alturas de corte

Fuente	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-ratio	P-valor
Entre grupos	59,2816	2	29,6408	2,36	0,0118
Intra grupos	3347,93	267	12,5391		
Total (Corregido.)	3407,21	269			

Dado que un p-valor es inferior a 0,05, este factor tiene efecto estadísticamente significativo en Rz para un 95,0%.

Cuadro 5b. Contraste múltiple de rango para rugosidad superficial según altura de corte, según método de Tukey con 95% de confianza

Altura corte	Recuento	Media LS	Grupos Homogéneos
3	90	20,925	X
2	90	21,3796	XX
1	90	22,065	X

Contraste	Diferencias	+/- Límites
1 – 2	0,685444	0,902907
1 – 3	*1,14	0,902907
2 - 3	0,454556	0,902907

Con respecto al grupo homogéneo esta muestra que hay diferencias estadísticamente significativas, además se indica en las diferencias que entre cada nivel de altura de corte hay diferencias significativas, estas están representadas por el asterisco. Encontrándose en el contraste 1-3 de la altura de corte diferencias estadísticas significativas.

6. Análisis de varianza con respecto al tipo de madera

Cuadro 6a. Tabla ANOVA para Rugosidad superficial Rz según Tipo de madera

Fuente	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-ratio	P-valor
Entre grupos	59,8311	2	59,8311	4,79	0,0028
Intra grupos	3347,93	267	12,4902		
Total (Corregido.)	3407,21	269			

Dado que un p-valor es inferior a 0,05, este factor no tiene efecto estadísticamente significativo en Rz para un 95,0%

Cuadro 6b. Contraste múltiple de rango para rugosidad superficial según tipo de madera, según método de Tukey con 95% de confianza

Tipo Madera	Recuento	Media LS	Grupos Homogéneos
1	135	20,9858	X
2	135	21,9273	X

Contraste	Diferencias	+/- Límites
1 - 2	*-0,941481	0,614143

Con respecto al grupo homogéneo este muestra que hay diferencias estadísticamente significativas, además se indica en las diferencias que entre cada nivel de tipo de madera hay diferencias significativas, estas están representadas por el asterisco.