



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

Consumo de energía y calidad superficial en el procesamiento de madera seca con sierra circular

Patrocinante: Sr. Alfredo Aguilera L.

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

DELIA CAROLINA PEZOA RAMÍREZ

VALDIVIA
2006

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

	Nota
Patrocinante: Sr. Alfredo Aguilera L.	6.2
Informante: Sr. Roberto Juacida P.	6.0
Informante: Sr. Luis Inzunza D.	6.3

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 León

Dedicada a todos los que quiero

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo lo dedico a mi madre, mis hermanos y a mi novio, ya que con su apoyo y amor incondicional he podido crecer, dando paso al aprendizaje y fortaleciendo mis propósitos en la vida.

Quiero agradecer especialmente a mis amigas por la simple razón de ser lo que son y por haber levantado mi vuelo cuando creía que todas las luces estaban extintas.

Me imagino que esta es la circunstancia especial que estaba esperando para decirle a mi abuela y a mi amigo Mario Vera que la magia aún existe entre nosotros y que siguen aquí, ayudándome a concluir esta etapa de mi vida como un verdadero heraldo en tierra de dragones.

Agradezco también a los profesores de mi comité de titulación y al cuerpo docente en general, por transmitir sus conocimientos y experiencias, las cuales son fundamentales para desarrollarnos íntegramente.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEORICO	3
2.1 Energía	3
2.1.1 Emisión acústica	4
2.1.2 Parámetros de emisión acústica	4
2.1.3 Medición de emisión acústica	5
2.2 Calidad superficial	6
2.2.1 Rugosidad Superficial	7
2.3 Parámetros que afectan la calidad superficial y la energía	8
2.3.1 Madera	8
2.3.2 Herramientas de corte	11
2.3.3 Proceso de corte	12
2.4 Sierra Circular	14
2.4.1 Sierras circulares partidoras	14
2.4.2 Sierras circulares trozadoras	15
3. MATERIAL Y MÉTODOS	16
3.1 Material	16
3.1.1 Madera	16
3.2 Equipos e instrumentos	17
3.2.1 Portaprobeta	17
3.2.2 La máquina	17
3.2.3 Herramientas de corte	17
3.1 Metodología	19
3.2.1 Medición de la energía	19
3.2.3 Medición de la calidad superficial	21
3.3 Diseño experimental	22
3.3.1 Condiciones de corte y medición de rugosidad y emisión acústica.	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	26
4.1 Emisión acústica	29
4.1.1 Consumo energético respecto al espesor de viruta.	29
4.1.2 Efecto de la velocidad de rotación en la emisión acústica para madera de <i>Pinus radiata</i> .	32

	Página
4.1.3 Efecto de la velocidad de alimentación en la emisión acústica para madera de <i>Pinus radiata</i> .	33
4.1.4 Efecto de la altura de corte en la emisión acústica para madera de <i>Pinus radiata</i> .	34
4.1.5 Efecto del tipo de sierra empleada sobre la emisión acústica para madera de <i>Pinus radiata</i> .	35
4.1.6 Energía respecto a factor de esponjamiento	36
4.2 Rugosidad superficial	38
4.2.1 Efecto del espesor de viruta en la rugosidad superficial para madera de <i>Pinus radiata</i> .	38
4.2.2 Efecto de la velocidad de rotación en la rugosidad superficial para madera de <i>Pinus radiata</i> .	41
4.2.3 Efecto de la velocidad de alimentación en la rugosidad superficial para madera de <i>Pinus radiata</i> .	43
4.2.4 Efecto del tipo de sierra empleada sobre la rugosidad superficial para madera de <i>Pinus radiata</i> .	44
5. CONCLUSIONES.	45
6. BIBLIOGRAFIA.	47

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Condiciones de corte.	22
Cuadro 2. Condiciones de medición de emisión acústica.	22
Cuadro 3. Condiciones de medición de rugosidad.	22
Cuadro 4. Diseño experimental con diámetro de sierra igual a 180mm	24
Cuadro 5. Diseño experimental con diámetro de sierra igual a 200mm	25
Cuadro 6. Tabla de medias por mínimos cuadrados para RMS con 95,0 intervalos de confianza	27
Cuadro 7. Tabla de medias por mínimos cuadrados para Rz con 95,0 intervalos de confianza	27
Cuadro 8. Análisis de la Varianza para RMS - Sumas de Cuadrados de Tipo III	28
Cuadro 9. Análisis de la Varianza para Rz - Sumas de Cuadrados de Tipo III	28
Cuadro 10. Contraste Múltiple de Rangos para RMS según RPM	32
Cuadro 11. Contraste Múltiple de Rangos para RMS según Vf	33
Cuadro 12. Contraste Múltiple de Rangos para RMS según h	34
Cuadro 13. Contraste Múltiple de Rangos para RMS según Tipo de Sierra	35
Cuadro 14. Contraste Múltiple de Rangos para Rz según RPM	41
Cuadro 15. Contraste Múltiple de Rangos para Rz según Vf	43
Cuadro 16. Contraste Múltiple de Rangos para Rz según Tipo de Sierra	44

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Superficie de la madera tras la mecanización	6
Figura 2. Esfuerzo de corte (Kg.) respecto a diferentes contenidos de humedad (%).	9
Figura 3. Esfuerzos de corte en (Kg.) relacionados con diferentes densidades de la madera (Kg./ m ³).	10
Figura 4. Ángulos de corte de una sierra circular.	11
Figura 5. Sierra circular partidora	14
Figura 6. Sierra circulares trozadoras	15
Figura 7. Forma y dimensiones de la probeta	16
Figura 8. Porta probetas con sensor piezoeléctrico en el centro	17
Figura 9. Sierras empleadas en el estudio	17
Figura 10. Esquema de corte en sentido radial	18
Figura 11. A) Diagrama de la zona de corte en la probeta; B) Cortes sucesivos a realizar con la sierra circular.	18
Figura 12. Sensor piezoeléctrico vista inferior	19
Figura 13. Sensor piezoeléctrico vista superior	19
Figura 14. Proceso general de la emisión acústica	20
Figura 15. Comportamiento de la emisión acústica respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 3200 RPM.	29
Figura 16. Comportamiento de la emisión acústica respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 4200 RPM.	30
Figura 17. Comportamiento de la emisión acústica respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B 6000 RPM.	30
Figura 18. Comportamiento de la emisión acústica respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 8000 RPM.	31
Figura 19. Efecto de la velocidad de rotación (RPM) en los valores de emisión acústica RMS para madera de <i>Pinus radiata</i> .	32
Figura 20. Efecto de la velocidad de alimentación (m/min) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de <i>Pinus radiata</i> .	33

	Página
Figura 21. Efecto de la altura de corte (m/min.) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de <i>Pinus radiata</i> .	34
Figura 22. Efecto del tipo de sierra en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de <i>Pinus radiata</i> , donde A corresponde a la sierra con diámetro 180mm y Kerf igual a 1.5mm y B a la sierra con diámetro 200mm y Kerf de 3.4mm.	35
Figura 23. Relación del factor de esponjamiento con la emisión acústica para sierra A (diámetro 180mm, kerf 1.5mm) y B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) a 3200 RPM.	36
Figura 24. Relación del factor de esponjamiento con la emisión acústica para sierra A (diámetro 180mm, kerf 1.5mm) y B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) a 4200 RPM.	36
Figura 25. Relación del factor de esponjamiento con la emisión acústica para sierra A (diámetro 180mm, kerf 1.5mm) y B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) a 6000 RPM.	37
Figura 26. Relación del factor de esponjamiento con la emisión acústica para sierra A (diámetro 180mm, kerf 1.5mm) y B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) a 8000 RPM.	37
Figura 27. Comportamiento de la Rugosidad superficial respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 3200 RPM.	38
Figura 28. Comportamiento de la Rugosidad superficial respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 4200 RPM.	39
Figura 29. Comportamiento de la Rugosidad superficial respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 6000 RPM	39
Figura 30. Comportamiento de la Rugosidad superficial respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 8000 RPM.	40
Figura 31. Efecto de la velocidad de rotación (RPM) en la rugosidad superficial Rz (μm) para madera de <i>Pinus radiata</i> .	42
Figura 32. Efecto de la velocidad de alimentación (m/min) en la rugosidad superficial Rz (μm) para madera de <i>Pinus radiata</i> .	43
Figura 33. Efecto de el tipo de Sierra en los valores de) para la rugosidad superficial Rz (μm) para madera de <i>Pinus radiata</i> .	44

RESUMEN

Al conocer el comportamiento de la madera de *Pinus radiata* frente a distintas condiciones de maquinado con sierra circular se puede ayudar a mejorar el aprovechamiento y rendimiento de esta especie.

El propósito de este estudio corresponde a la investigación del efecto de las condiciones de maquinado sobre la rugosidad superficial y el monitoreo de las energías requeridas para llevar a cabo el proceso.

En este caso se estudiaron dos tipos de sierra (1.5 y 3.4 Kerf), dos velocidades de avance (4 y 11 m/min.), cuatro velocidades de corte (3200, 4200, 6000 y 8000 RPM) y tres profundidades de corte (5, 10 y 15 mm). El consumo energético se midió a través de la emisión acústica y se determinó la rugosidad superficial según el parámetro Rz, definido por Japanese Industrial Standard (JIS), para los distintos espesores de viruta.

Las relaciones obtenidas entre las velocidades de corte y avance más las profundidades de corte y el tipo de herramienta permitieron precisar los valores promedio de espesor de viruta, el cual corresponde a un elemento clave en la determinación tanto de la calidad como del consumo energético. En ambos casos se encontraron relaciones positivas con los diferentes espesores de viruta. La misma respuesta se obtuvo al relacionar factor de esponjosidad con energía.

Con este estudio se pretende adquirir los conocimientos necesarios para mejorar la automatización de los procesos de maquinado con sierra circular ajustando algunos parámetros de corte, tales como la velocidad de corte, velocidad de alimentación y profundidad de corte, con el propósito de conseguir productos de alta calidad y análogamente disminuir los costos asociados al consumo de energía.

Palabras claves: rugosidad superficial, energía, sierra circular

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día las maderas aserradas y dimensionadas ocupan un segundo lugar en las exportaciones forestales inmediatamente después de la celulosa. No obstante, el existir de este sector productivo, no solo está sujeto a los costos de producción, demanda de mercado y competencia sino que también a la calidad del producto. Esta última juega un papel cada día más importante en el posicionamiento del mercado, puesto que la elaboración enfocada hacia la producción de madera clear, molduras, madera seca y derecha, entre otras, se enfrenta a un mercado con clientes exigentes bajo el resguardo de instituciones legales. Es por ello que la calidad de la madera aserrada juega un papel fundamental en relación a las direcciones de corte, al aspecto de la madera, terminación de superficies, contenido de humedad final del producto, actividades relacionadas con los procesos de maquinado y secado de ésta.

La transformación de la madera, requiere para competir con éxito en los mercados nacionales e internacionales, mantener un alto nivel de productividad y calidad, lo que ha obligado que los planes de producción se orienten a la optimización de los recursos, para ello se deben realizar controles rigurosos en los procesos de maquinado con el fin de mantener la calidad del producto y disminuir los costos que implica la transformación de la madera. En este aspecto, se deben considerar la optimización de recursos y de herramientas.

La sierra circular corresponde a un elemento presente en todos los establecimientos de aserrío y elaboración de madera. El avance tecnológico que ha desarrollado nuevos tipos de sierras circulares, de múltiples aplicaciones, ha permitido que esta herramienta de corte se mantenga en el tiempo sin que su utilización haya sido reemplazada.

Dentro de los problemas que presenta el empleo de sierra circular destaca la cantidad significativa de madera que es convertida en aserrín, debido a que el ancho de corte del diente es muy grande, lo que implica que el consumo de energía para realizar el corte sea muy elevado. Para ello es indispensable controlar y ajustar algunos parámetros de corte, tales como la velocidad de corte, velocidad de alimentación y profundidad de corte, con el propósito de conseguir productos de alta calidad y paralelamente disminuir los costos asociados al consumo de energía.

Por las razones expuestas, el propósito de este estudio corresponde a la investigación del consumo energético a través de las señales de emisión acústica con diferentes condiciones de corte, siendo necesario además la medición de rugosidad superficial ya que corresponde a un parámetro de respuesta del procesamiento de la madera seca con sierra circular y clarifica las relaciones entre la emisión acústica y las diferentes condiciones de corte.

1.1 Objetivo general

El objetivo general de esta investigación corresponde al análisis de la energía y la calidad superficial en el procesamiento de madera seca de *Pinus radiata* con sierra circular.

1.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del cambio de las velocidades de corte sobre la calidad superficial y el consumo de energía.
- Estudiar el cambio de energía asociado a la variación de la profundidad de corte.
- Evaluar la calidad y energía frente a un cambio de la velocidad de alimentación.
- Determinar el factor de esponjamiento de la madera y su efecto en la energía consumida.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Energía

De acuerdo a Montalembert (1965), citado por Vega M. 2004., la energía requerida para producir el corte en la madera es llamado "trabajo específico", y se puede definir como la potencia de corte requerida para transformar un cm³ de madera en viruta, en 1 minuto.

Los factores que afectan al trabajo específico de corte están dados por la siguiente fórmula:

$$W_{sp} = \frac{P_c}{ae * ap * Vf} \quad (W/cm^3/min)$$

Donde:

P_c: Potencia de corte (W)
ap: Altura de corte (cm)
ae: Ancho de corte (cm)
V_f: Velocidad de avance (cm/min)

La potencia de corte se puede obtener a través de la siguiente relación matemática:

$$P_c = Z * N * F_c * \sqrt{ap * D} \quad (W)$$

Donde:

Z: Número de dientes
N: Velocidad de rotación
F_c: Esfuerzo de corte
ap: Altura de corte
D: Diámetro del cabezal

El consumo energético está relacionado en forma prácticamente proporcional con el espesor de viruta, incluso en caso de que la viruta sea muy delgada el esfuerzo no será despreciable. Se debe considerar que ambos parámetros variarán de acuerdo a la naturaleza de la madera y la forma del diente.

2.1.1 Emisión acústica

La emisión acústica se define como un fenómeno creador de ondas transitorias por la liberación rápida de energía a partir de fuentes localizadas en el interior del material. La señal de la emisión acústica se detecta por sensores, los que estimulados por ondas de esfuerzo transforman las ondas mecánicas en señales eléctricas.

La emisión acústica corresponde a una técnica no destructiva de materiales que por definición es una disciplina que identifica las propiedades físicas y mecánicas de un material sin alterar sus capacidades en el uso final de éste (Ross, et al., 1998, citado por Vega, 2004).

2.1.2 Parámetros de emisión acústica

De acuerdo a Huang (1998), citado por Vega (2004), las señales de emisión acústica poseen parámetros que admiten rescatar información ventajosa sobre los sucesos que se evalúan.

- Umbral: Nivel de energía en Volt prefijado con el objetivo de eliminar las señales indeseables.
- Energía: Es la energía producida por el evento de la emisión acústica. Se mide en Volt y corresponde al área encerrada bajo la curva en el eje positivo.
- Duración de la señal: Tiempo acontecido entre la primera y última señal sobre el nivel de energía prefijado.
- Amplitud del evento de emisión acústica: Se mide en Volt y se define como el máximo valor alcanzado durante el evento de la emisión acústica.
- Tiempo Máxima amplitud: Concierno al tiempo que transcurre entre la primera señal que sobrepasa la señal máxima de amplitud y el nivel de tensión determinado por el umbral.
- Conteos: Corresponde al número de veces que la señal de emisión acústica sobrepasa el umbral y se contabiliza como el número de veces del evento por unidad de tiempo.

2.1.3 Medición de emisión acústica

De acuerdo a Vallen (2002) citado por Vega (2004), el proceso de medición de la emisión acústica posee algunos elementos básicos que se describen a continuación.

1.- El objeto del estudio es evaluado: Aplicando un corte, carga, etc. Esto es denominado fuente de la emisión acústica, la que produce tensión mecánica.

2.- Fuente: Corresponde al punto donde se aplica el esfuerzo. Es de este punto de donde se produce un lanzamiento de energía mecánica elástica.

3.- Propagación de la onda: Desde la fuente al sensor.

4.- Sensor o sensores: son los encargados de transformar la onda mecánica en señal eléctrica de emisión acústica.

5.-Adquisición de datos medidos: Convertir la señal eléctrica de emisión acústica en un set de datos electrónicos.

6.- Muestra de datos medidos: Consiste en la formulación de diagramas de datos medidos.

7.- Evaluación de la muestra: Corresponde a la interpretación de los datos y diagramas generados.

Existen además algunos elementos complementarios como el preamplificador que se emplea para minimizar la interferencia del ruido ambiente y así prevenir la pérdida de señales de la emisión acústica y el filtro utilizado para remover los ruidos indeseables.

2.2 Calidad superficial

El control de la calidad superficial de la madera implica un análisis e inspección de una parte del producto para poder realizar acciones correctivas en el procesamiento de ésta con el fin de eliminar las imperfecciones ocasionadas durante el mecanizado.

Como resultado del procesamiento, la madera no presenta una superficie lisa, sino a base de ondulaciones (Figura 1), resultado del corte de la madera con herramientas dotadas de movimiento circular. (Vignote y Jiménez, 2000)

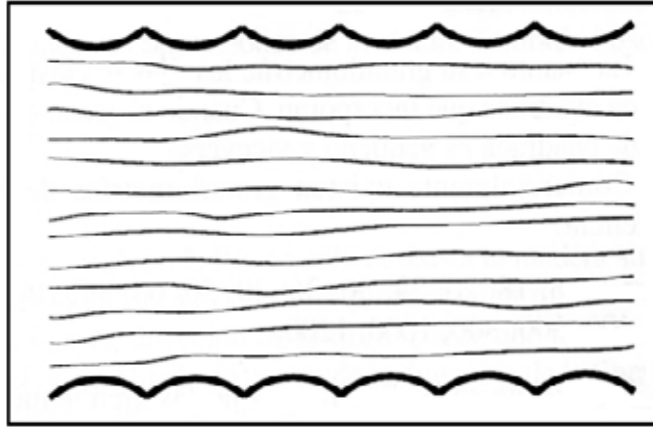


Figura 1: Superficie de la madera tras la mecanización. (Fuente: Vignote y Jiménez, 2000)

El tipo de sierra empleada en el maquinado de la madera seca influye directamente sobre la calidad de la superficie. Por otra parte está condicionada por el tipo de maquinado y las diversas condiciones de corte que se apliquen. Si se excede la velocidad de rotación, producto de un mal tensionado, y se emplea una velocidad de alimentación inadecuada se producen vibraciones en la sierra que generan calidades de corte bajas.

Otro factor que condiciona la calidad de la superficie corresponde al volumen de aserrín generado por el corte, ya que un exceso de éste, además de provocar quemaduras en la superficie y daños en el elemento cortante, produce desviaciones en el corte que influirán directamente sobre la calidad de la superficie.

Uno de los principales indicadores de la calidad superficial de la madera corresponde a la rugosidad, ya que esta puede ser descrita como las anomalías producidas en la parte exterior de la madera durante el procesamiento con elementos cortantes.

2.2.1 Rugosidad superficial

La rugosidad superficial de la madera es resultado del procesamiento de ésta. El dimensionado con elementos cortantes produce algunas irregularidades en la superficie de la madera.

La magnitud de las irregularidades y formas dependen de variados factores interrelacionados entre sí, sin embargo, éstas se pueden agrupar en tres, de acuerdo a Mariam, et al (1958), citado por Vega (2004) como son:

- La anatomía de la madera; diámetro de traqueidas, espesor de las paredes celulares, tamaño de vasos, etc.
- Forma de Maquinado; marcas por los dientes de la sierra o las ondas formadas por las cepilladora, etc.
- Variaciones producidas dentro del proceso de maquinado; como son vibraciones, desaliniamiento de los ejes, etc.

De acuerdo a Williams et al, (2000), citado por Vega (2004), la importancia de la rugosidad superficial sobre los recubrimientos superficiales radica en que juega un importante rol en el rendimiento y estabilidad del recubrimiento específico aplicado en la madera. Dependiendo si es madera aserrada en bruto, cepillada, producto de madera lijada, etc.; el recubrimiento se comportará en forma diferente, además si la madera está en el exterior o interior, su comportamiento también variará.

Los fundamentos de las herramientas en el proceso de moldurado son los mismos que para las sierras, en donde el concepto de la mordida y de la velocidad de avance se hace mucho más patente. Los defectos de superficie causados por la cuchilla o fresa obedecen a la velocidad de avance de la madera, aumenta el paso de la ondulación y la apariencia del defecto. De la misma forma, aumentando la profundidad de corte, aumenta la irregularidad de la superficie y pierde calidad el trabajo (Vignote y Jiménez, 2000).

El espesor de viruta corresponde a un buen indicador de la calidad superficial para diferentes condiciones de maquinado, ya que integra una serie de condiciones de corte en conjunto (Aguilera y Vega, 2004).

2.3 Parámetros que afectan la calidad superficial y la energía

Existen múltiples factores que intervienen o afectan tanto la calidad superficial como el consumo de energía de las máquinas empleadas en el procesamiento de madera. De acuerdo a Koch (1972), citado por Vega (2004), se pueden diferenciar tres grandes grupos: los factores relacionados con el material, los referidos a la herramienta de corte y, por último, los relacionados al proceso de corte. La segmentación en estos tres grupos, no impide la interrelación entre los factores.

2.3.1 Madera

Dentro de los factores de la madera que afectan a la energía y la calidad superficial, se encuentran los siguientes:

- Especie
- Contenido de humedad
- Densidad

Especie: El comportamiento de la madera ante el procesamiento o maquinado se encuentra íntimamente relacionado a la anatomía propia de cada especie.

La madera posee características que influenciarán especialmente sobre la transformación mecánica, una de ellas es que corresponde a un material anisotrópico. Esta anisotropía se refiere al comportamiento desigual que tiene la madera en las tres direcciones principales. Esta singularidad se manifiesta, por tanto, en muchos de los productos fabricados con madera. (Díaz-vaz, 2003)

Las diferencias de composición de la madera entre especies y dentro de ellas, corresponde básicamente a la heterogeneidad en la composición celular de ésta, lo que conlleva primordialmente a una variación de densidad. Tanto el grosor de las paredes celulares como las dimensiones de las porosidades también son variables. Es necesario hacer notar además que la densidad de la madera varía aún dentro del mismo árbol. Por ello es de suma importancia conocer las características y propiedades de cada especie al momento de transformarlas en las actividades ligadas al aserrío.

Contenido de humedad: El contenido de humedad de la madera corresponde a uno de los factores que más incide en el proceso de transformación de ésta. A mayor contenido de humedad disminuye el requerimiento energético, ya que la resistencia específica de corte depende de muchos factores, entre los cuales cabe destacar el contenido de humedad que posee la madera a la hora de procesarla.

De acuerdo a Vignote y Jiménez (2000), cuanto más seca es la madera es más dura, y por tanto mayor es el esfuerzo de corte necesario. (Figura 2)

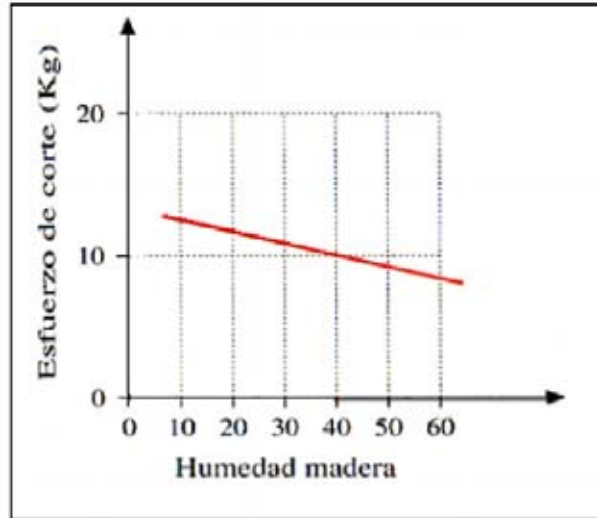


Figura 2: Esfuerzo de corte (kg) respecto a diferentes contenidos de humedad (%). (Fuente: Vignote y Jiménez, 2000)

Densidad: La densidad es la cantidad de materia contenida en una unidad de volumen y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Densidad = \frac{Masa}{Volumen}$$

Donde:

D= Densidad (Kg/m³).

M=Masa de una pieza de madera de un determinado contenido de humedad, en kilogramos (Kg).

V=Volumen de la misma pieza a igual contenido de humedad, en metros cúbicos (m³).

La densidad se encuentra íntimamente relacionada con el contenido de humedad que posee la madera. Esto se debe básicamente a la porosidad o espacios que poseen las células para contener el agua.

Se definen diferentes densidades según el contenido de humedad al cual se evalúan y también existe la densidad real que es independiente de la porosidad, es decir, de los constituyentes de la madera. Esta última es muy parecida para diferentes especies, ya sea coníferas o latifoliadas, y su valor es aproximadamente 1,5 g/ cm³. Para efectos tecnológicos, solo se emplean dos densidades, denominadas densidad anhidra (1) y densidad básica (2).

Densidad anhidra (1)

Es una medida de la densidad cuando la madera esta completamente seca.

$$\text{Densidad Anhidra} = \frac{\text{Peso anhidro (Kg)}}{\text{Volumen anhidro (m}^3\text{)}}$$

Densidad básica (2)

La densidad básica es la relación entre el peso de madera seca y su volumen verde. Es un importante indicador de la calidad de la madera, particularmente resistencia mecánica.

$$\text{Densidad Básica} = \frac{\text{Peso anhidro (Kg)}}{\text{Volumen verde (m}^3\text{)}}$$

A medida que aumenta la densidad de la madera, mayor es la dureza de ésta y por lo tanto aumenta el esfuerzo de corte incrementando de este modo los valores de energía. (Figura 3)

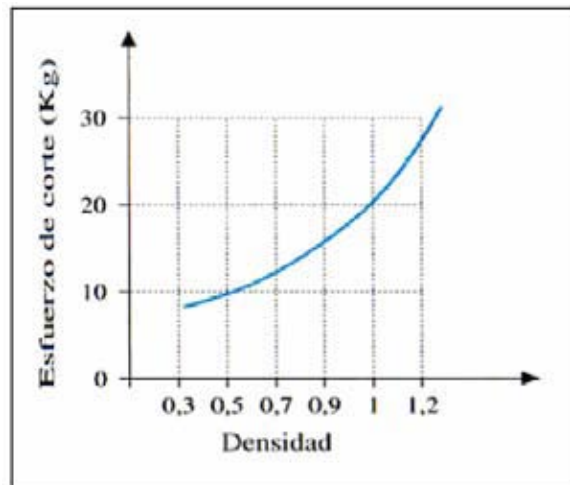


Figura 3: Esfuerzos de corte en (Kg) relacionados con diferentes densidades de la madera (Kg/ m³). (Fuente: Vignote y Jiménez, 2000)

2.3.2 Herramientas de corte

Los factores de la herramienta de corte que afectan a la energía y la rugosidad superficial se clasifican en aquellos que forman parte de la naturaleza del elemento de corte, y los que son inherentes a la herramienta de corte en sí.

Factor inherente al elemento de corte:

- Geometría del diente: esta se define básicamente por tres ángulos respecto a la dirección de corte. Los ángulos principales corresponden a: ángulo de incidencia (α), de perfil (β) y de ataque (δ), como se detalla en la Figura 4.

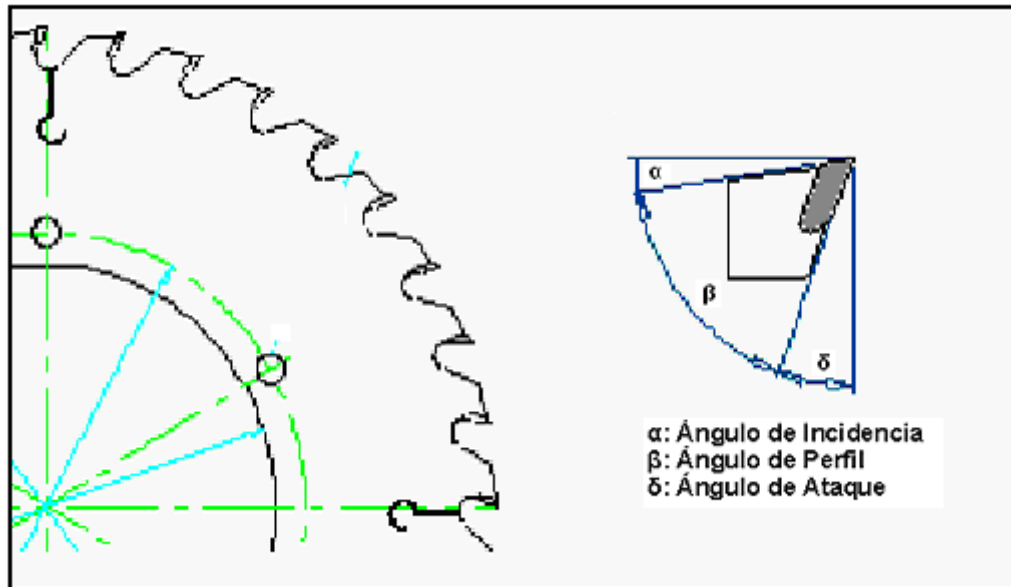


Figura 4: Ángulos de corte de una sierra circular.

La geometría del diente afecta la rugosidad superficial a través de los valores asignados a los ángulos α y δ , así como también por el desgaste del elemento cortante.

Factores de la herramienta de corte:

- Velocidad de corte (V_c): Corresponde a la velocidad del elemento de corte, se mide en metros por segundo (m/s).

Para lograr superficies de buenos acabados, se requiere también una alta velocidad de corte en la sierra. Normalmente cada fabricante indica la velocidad de corte de sus sierras, a veces sumamente altas, para lo que asume que las condiciones de operación son las adecuadas: máquinas bien montadas, exenta de vibraciones. (Quezada, 1995)

- Diámetro de la sierra (D): Se mide desde un extremo a otro de los elementos de corte y se expresa en milímetros (mm).

- Número de dientes (Z): Se refiere al número de dientes que posee la herramienta de corte.

2.3.3 Proceso de corte

Múltiples son los factores que afectan tanto a la rugosidad como a la energía durante el proceso de corte, dentro de los cuales se destacan:

- Velocidad de alimentación (V_f): Es la velocidad con que se mueve la madera cuando está siendo procesada. Se expresa en metros por minutos (m/min) o en pies por minuto (pies/min.).
- Profundidad de corte: Corresponde a la penetración que alcanza la herramienta de corte en la madera, con uno o más de sus dientes.

2.3.3.1 Espesor de viruta

La madera removida a través del proceso de maquinado se denomina viruta. Este producto varía en espesor debido a que el elemento cortante se encuentra en movimiento rotacional, por lo tanto es conveniente calcular el espesor de viruta promedio.

El espesor de viruta promedio para la sierra circular se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$e\bar{x} = \frac{e \text{ mín} + e \text{ máx}}{2}$$

Donde:

e \bar{x} : Espesor viruta promedio

e mín: Espesor de viruta mínimo

e máx: Espesor de viruta máximo

Las fórmulas requeridas para el cálculo del espesor de viruta mínimo y máximo son:

$$e \text{ mín} = fz * \sqrt{\left(\frac{2F}{R}\right) - \left(\frac{F^2}{R^2}\right)}$$

$$e \text{ máx} = fz * \sqrt{\left(\frac{2(F+h)}{R}\right) - \left(\frac{(F+h)^2}{R^2}\right)}$$

Donde:

e mín: Espesor de viruta mínimo

e máx: Espesor de viruta máximo

fz: Avance por diente

F: Espacio libre

R: Radio de corte

h: Altura de corte

2.4 Sierra circular

La sierra circular corresponde a una hoja circular o disco, que aplicado sobre un eje gira a velocidad variable, de tal forma que los dientes ubicados en su periferia penetran en la madera y cortan.

Las máquinas de sierra circular se caracterizan por:

- Diámetro máximo de la sierra
- Velocidad de corte
- Velocidad de alimentación
- Potencia del motor
- Número de revoluciones por minuto del eje motriz

De acuerdo a Quezada (1995), independiente del grado de tecnología empleado en la fabricación de las sierras circulares para madera, estas se dividen en dos grupos fundamentales:

2.4.1 Sierras circulares partidoras

Las sierras circulares partidoras (Figura 5) están destinadas a aserrar la madera en el sentido longitudinal de la fibra. Dentro de sus características principales se pueden mencionar sus amplias gargantas y un número de dientes bajo, lo cual permite un mayor desalojo de la viruta y mayores velocidades de avance.



Figura 5: Sierra circular partidora

2.4.2 Sierras circulares trozadoras

Utilizadas para cortar la madera en el sentido transversal a la fibra. Existen sierras circulares trozadoras (Figura 6) de variados tamaños y formas. Comúnmente se encuentran de dos tipos: las convencionales de dientes fijos y las de dientes calzados con plaquitas duras.

Sus usos son variados, pero siempre en cortes transversales, en máquinas trozadoras, máquinas finger, entre otras.



Figura 6: Sierras circulares trozadoras

La sierra circular corresponde a la herramienta más utilizada en la industria de carpintería y mueble, por la calidad de superficie que puede proporcionar, independiente de los problemas, que como contrapunto a la sierra huincha pueda tener. El acabado que puede proporcionar una sierra circular, permite que la pieza pueda pasar directamente al lijado, previo al acabado del mueble (Vignote; Jiménez 2000).

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Madera

Se empleó madera de *Pinus radiata* para confeccionar las probetas necesarias en el experimento.

Las probetas que se utilizaron en la medición de rugosidad y emisión acústica, además de presentar su cara mayor en sentido radial, presentaron una forma trapezoidal que se ajustó correctamente a la forma de sujeción de la probeta en el portaprobeta. Las dimensiones y forma correspondieron a las indicadas en la figura. (Figura 7).

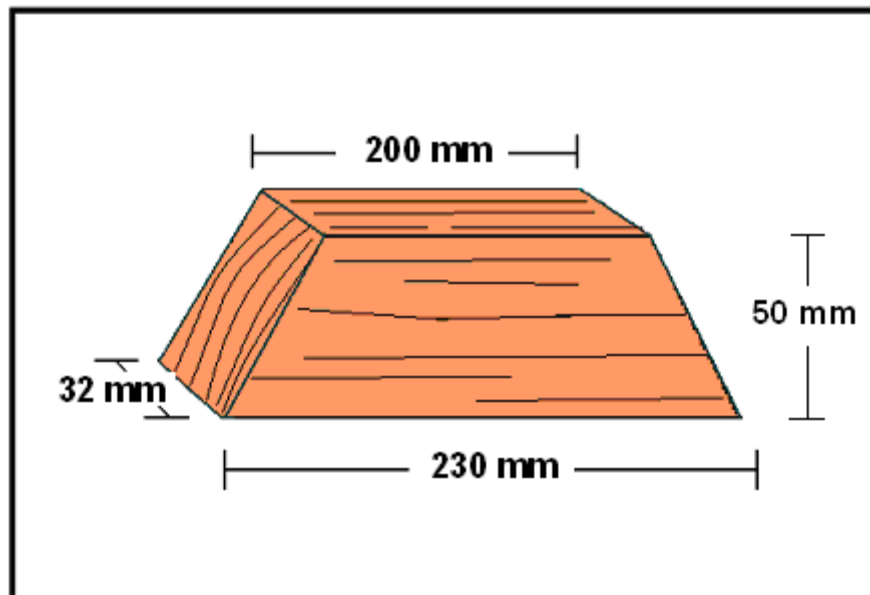


Figura 7: Forma y dimensiones de la probeta.

La madera seleccionada para la confección de las probetas debió estar libre de defectos (nudos, grietas, bolsas de resina, etc.).

Antes de comenzar los procedimientos requeridos en la medición de rugosidad y energía, las probetas fueron secadas artificialmente hasta alcanzar un contenido de humedad igual a 11.7% promedio. La densidad de la madera fue calculada como densidad básica y alcanzó un valor promedio equivalente a 0.362 grs./ cm³.

3.2 Equipos e instrumentos

3.2.1 Portaprobeta

La función del Portaprobeta (Figura 8) correspondió a la sujeción de la probeta durante el proceso de corte.



Figura 8: Porta probetas con sensor piezoeléctrico en el centro

3.2.2 La máquina

Para la realización de los ensayos se empleó una máquina tupí con motor de 4KW de potencia máxima, cuya velocidad de rotación del eje varía entre 3200 y 8000 RPM. Además se utilizó un carro de avance automático que permitió regular la velocidad de alimentación en 2 niveles (4 y 11 m/min).

3.2.3 Herramientas de corte

Las herramientas de corte correspondieron a dos sierras circulares (Figura 9) cuyos diámetros son iguales a 200mm y 180mm. Para el diámetro de 200mm se tiene un kerf de 3.2mm y un Z igual a 34. En el caso del diámetro de 180mm el kerf corresponde a 1.5mm y el Z es igual a 54.



Figura 9: Sierras empleadas en el estudio

El corte se realizó en sentido radial (Figura 10). El resultado del procesamiento de la probeta con la sierra circular junto a la representación de cortes sucesivos que se ejecutaron se puede apreciar en el esquema representado en la figura 11.

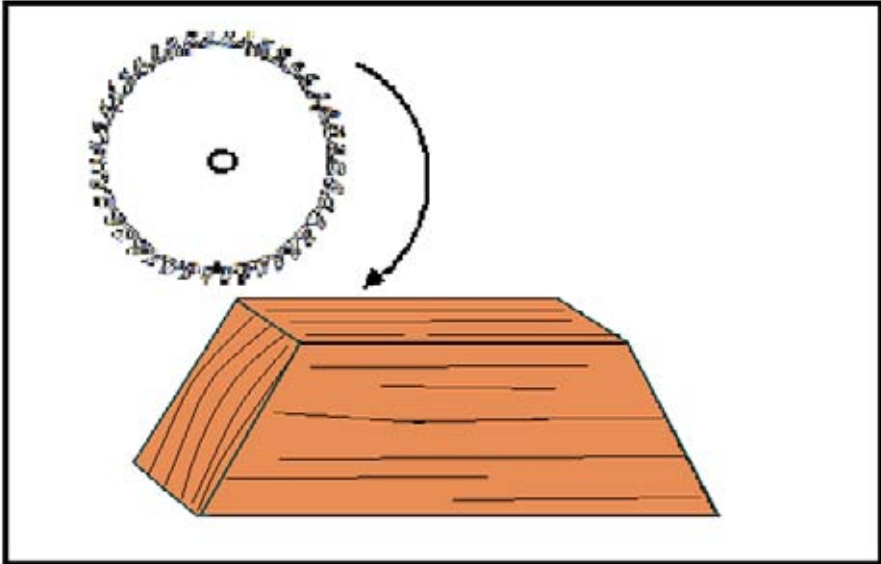


Figura 10: Esquema de corte en sentido radial

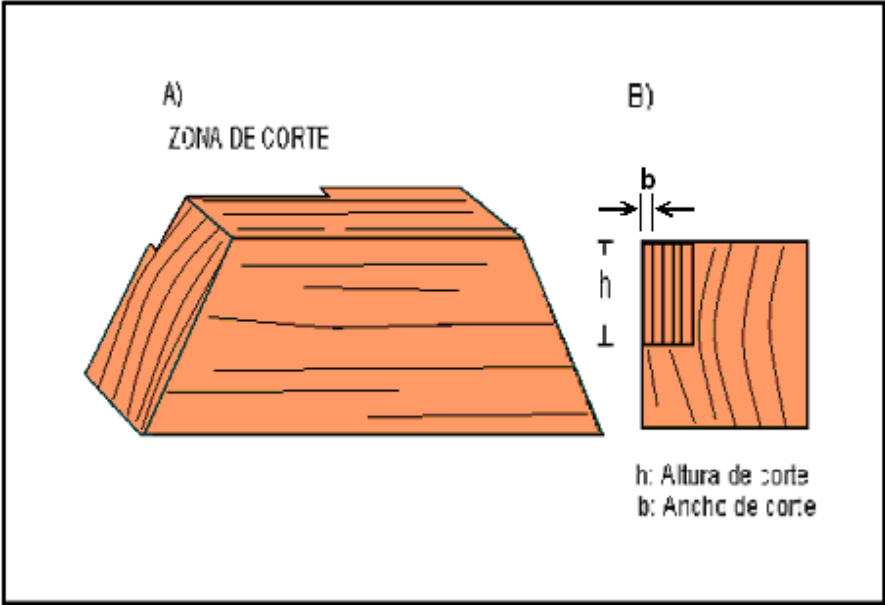


Figura 11: A) Diagrama de la zona de corte en la probeta;
B) Cortes sucesivos a realizar con la sierra circular.

3.3 Metodología

3.3.1 Medición de la energía

Medición de la emisión acústica

La energía fue medida a través de la *emisión acústica*, para ello se empleó un sensor piezo-eléctrico (Figuras 12 y 13), que al entrar en contacto con la probeta entregó señales con una frecuencia de respuesta de 1MHz. Las emisiones fueron recibidas por una tarjeta SEK 3243 y posteriormente interpretadas por un programa compatible con el PC.

El proceso general de la medición de emisión acústica que se llevó a cabo en el experimento se puede apreciar a través del esquema representado en la figura 14.



Figura 12: Sensor piezoeléctrico vista inferior



Figura 13: Sensor piezoeléctrico vista superior

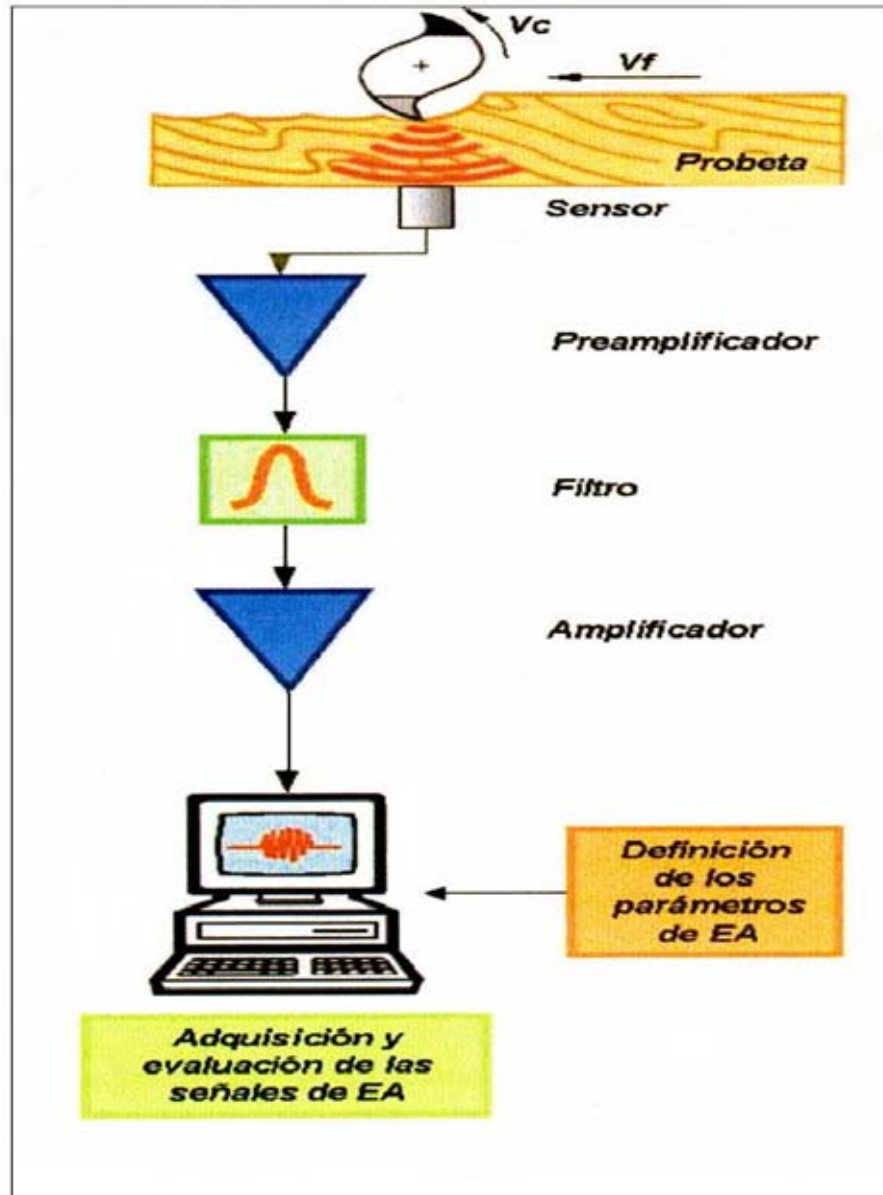


Figura 14: Proceso general de la emisión acústica.

3.3.2 Medición de la calidad superficial

Rugosidad superficial

La rugosidad superficial se midió con un Rugosímetro de contacto tipo stylus, marca Mitutoyo, modelo SJ-210. Las mediciones se realizaron en forma perpendicular a las marcas producidas por los dientes. Se ejecutaron 5 mediciones, siguiendo la norma JIS.

Factor de esponjamiento

El factor de esponjamiento corresponde a relación existente entre el volumen seco de aserrín y el volumen seco sólido del área de corte, es decir:

$$\text{Factor de esponjamiento} = \frac{\text{Volumen de aserrín}}{b \cdot h \cdot L}$$

Donde:

b: Ancho de corte (mm).

h: h: Altura de corte (mm).

L: Largo del corte (mm).

Para determinar el volumen de aserrín solamente se requirió de un matríz. Se llevaron a cabo un número de mediciones necesarias para estimar un factor de esponjamiento con cierto grado de certeza.

3.4 Diseño experimental

3.4.1 Condiciones de corte y medición de rugosidad y emisión acústica.

En la primera parte del experimento se procesaron las probetas bajo las condiciones de corte, medición de la emisión acústica y rugosidad descritas en los cuadros 1, 2 y 3 respectivamente.

Cuadro 1: Condiciones de corte.

Factor	Condiciones
Velocidad de avance (Vf) en m/min	4 y 11
Velocidad de rotación en RPM	3200, 4200, 6000 y 8000
Diámetro de la sierra en mm	180 y 200
Número de dientes	54 y 34
Profundidad de corte en mm	5, 10 y 15
Probeta	<i>Pinus radiata</i>

Cuadro 2: Condiciones de medición de Emisión acústica.

Factor	Condición
Método de medición (v)	RMS
Umbral (mV)	55
Amplificador (dB)	0

Cuadro 3: Condiciones de medición de Rugosidad.

Factor	Condición
Método de medición	Rugosímetro de contacto
Parámetro de Rugosidad (μm)	Rz de acuerdo a JIS
Puntos de evaluación	5

En ambos procesos de medición se tienen las siguientes variables y constantes:

Variables del proceso

- Velocidad de avance
- Velocidad de rotación
- Ancho de corte
- Diámetro de la sierra
- Número de dientes
- Profundidad de corte
- Kerf

Constantes del proceso

- Geometría
- Dirección de corte
- Contenido de humedad de la probeta
- Densidad de la probeta

Para la elección de las condiciones de maquinado se consideraron como base las velocidades de avance y de rotación, las cuales generaron numerosos espesores de viruta y avances por diente.

Los espesores de viruta fueron calculados a través de la siguiente fórmula:

$$em = \frac{Vf}{Z * N} * \sqrt{\frac{Ap}{D}}$$

Donde

em: Espesor de viruta (mm).

Vf: Velocidad de alimentación (m/min.).

Z: Número de dientes.

N: Velocidad de rotación (RPM).

Ap: Profundidad de corte (mm).

D: Diámetro de la sierra (mm).

Se pudo emplear esta fórmula ya que el corte realizado por la sierra no traspasó la pieza completa, asemejándose al corte que realiza un cabezal sepillador.

El factor de avance por diente (fz) fue calculado por medio de la siguiente fórmula:

$$fz = \frac{Vf}{Z * N} \text{ (mm)}$$

Donde:

fz: Avance por diente (mm).

Vf: Velocidad de alimentación (m/min).

Z: Número de dientes.

N: Velocidad de rotación (RPM).

Cuadro 4: Diseño experimental con diámetro de sierra igual a 180mm

h (mm)	Z	RPM	Vf (m/min)	D (mm)	em (mm)	fz (mm)	Repeticiones
5	54	3200	4	180	0,0039	0,0231	5
10	54	3200	4	180	0,0055	0,0231	5
15	54	3200	4	180	0,0067	0,0231	5
5	54	3200	11	180	0,0106	0,0637	5
10	54	3200	11	180	0,0150	0,0637	5
15	54	3200	11	180	0,0184	0,0637	5
5	54	4200	4	180	0,0029	0,0176	5
10	54	4200	4	180	0,0042	0,0176	5
15	54	4200	4	180	0,0051	0,0176	5
5	54	4200	11	180	0,0081	0,0485	5
10	54	4200	11	180	0,0114	0,0485	5
15	54	4200	11	180	0,0140	0,0485	5
5	54	6000	4	180	0,0021	0,0123	5
10	54	6000	4	180	0,0029	0,0123	5
15	54	6000	4	180	0,0036	0,0123	5
5	54	6000	11	180	0,0057	0,0340	5
10	54	6000	11	180	0,0080	0,0340	5
15	54	6000	11	180	0,0098	0,0340	5
5	54	8000	4	180	0,0015	0,0093	5
10	54	8000	4	180	0,0022	0,0093	5
15	54	8000	4	180	0,0027	0,0093	5
5	54	8000	11	180	0,0042	0,0255	5
10	54	8000	11	180	0,0060	0,0255	5
15	54	8000	11	180	0,0074	0,0255	5

Cuadro 5: Diseño experimental con diámetro de sierra igual a 200mm

h (mm)	Z	RPM	Vf (m/min)	D (mm)	em (mm)	fz (mm)	Repeticiones
5	34	3200	4	200	0,0058	0,0368	5
10	34	3200	4	200	0,0082	0,0368	5
15	34	3200	4	200	0,0101	0,0368	5
5	34	3200	11	200	0,0160	0,1011	5
10	34	3200	11	200	0,0226	0,1011	5
15	34	3200	11	200	0,0277	0,1011	5
5	34	4200	4	200	0,0044	0,0280	5
10	34	4200	4	200	0,0063	0,0280	5
15	34	4200	4	200	0,0077	0,0280	5
5	34	4200	11	200	0,0122	0,0770	5
10	34	4200	11	200	0,0172	0,0770	5
15	34	4200	11	200	0,0211	0,0770	5
5	34	6000	4	200	0,0031	0,0196	5
10	34	6000	4	200	0,0044	0,0196	5
15	34	6000	4	200	0,0054	0,0196	5
5	34	6000	11	200	0,0085	0,0539	5
10	34	6000	11	200	0,0121	0,0539	5
15	34	6000	11	200	0,0148	0,0539	5
5	34	8000	4	200	0,0023	0,0147	5
10	34	8000	4	200	0,0033	0,0147	5
15	34	8000	4	200	0,0040	0,0147	5
5	34	8000	11	200	0,0064	0,0404	5
10	34	8000	11	200	0,0090	0,0404	5
15	34	8000	11	200	0,0111	0,0404	5

Las determinaciones que se llevaron a cabo en cada probeta se realizaron antes, durante y después del maquinado, dependiendo de lo que se quiera medir.

- La densidad y el contenido de humedad se obtuvieron antes de comenzar el procesamiento de las probetas.
- La determinación de la emisión acústica se realizó durante el maquinado.
- Una vez terminado el maquinado se midió la rugosidad superficial y el factor de esponjamiento.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de emisión acústica RMS (v) y rugosidad superficial (R_z) fueron analizados con el paquete estadístico SATATGRAPHICS Plus 5.0.

Al inicio del análisis estadístico se examinaron las relaciones entre las diferentes condiciones de maquinado y las variables de respuesta, es decir la EA y la rugosidad superficial, para luego llevar a cabo un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%.

Una vez realizado el análisis de varianza (ANDEVA) de dos vías con un nivel de confianza del 95% para la EA y rugosidad superficial, respecto de la velocidad de corte, velocidad de alimentación y profundidad de corte, se realizó una prueba de Tukey a los factores independientes. Ambas pruebas fueron realizadas en los dos tipos de sierra utilizados en el estudio.

Los cuadros 6 y 7 muestran el diseño del análisis de varianza para determinar los efectos de las variables de corte sobre la emisión acústica y la rugosidad.

Variables Independientes

- Velocidad de alimentación (m/min)
- Velocidad de corte (RPM)
- Altura de corte (mm)
- Tipo de sierra

Variables Dependientes

- Emisión acústica RMS (V)
- Rugosidad superficial R_z (μm)

Los cuadros 6 y 7 corresponden a los valores promedio para cada una de las condiciones de corte empleadas en el estudio

Cuadro 6: Tabla de medias por mínimos cuadrados para RMS con 95,0 intervalos de confianza

	Nivel	Límite Media	Límite Estándar	Inferior	Superior
RPM	3200	0,120	0,004	0,112	0,127
	4200	0,133	0,004	0,126	0,141
	6000	0,150	0,004	0,143	0,158
	8000	0,186	0,004	0,178	0,193
Vf	4	0,141	0,003	0,135	0,146
	11	0,154	0,003	0,149	0,159
h	5	0,127	0,003	0,121	0,134
	10	0,157	0,003	0,150	0,163
	15	0,158	0,003	0,151	0,164
Sierra	A	0,115	0,003	0,110	0,120
	B	0,180	0,003	0,175	0,185

Cuadro 7: Tabla de medias por mínimos cuadrados para Rz con 95,0 intervalos de confianza

	Nivel	Límite Media	Límite Estándar	Inferior	Superior
RPM	3200	30,744	0,579	29,605	31,883
	4200	27,919	0,579	26,780	29,058
	6000	25,869	0,579	24,730	27,008
	8000	23,526	0,579	22,387	24,665
Vf	4	26,692	0,409	25,887	27,498
	11	27,336	0,409	26,531	28,142
Sierra	A	23,895	0,409	23,089	24,700
	B	30,134	0,409	29,329	30,939

Los valores que se aprecian en los cuadros 8 y 9 corresponden a la probabilidad estadística de los p valores obtenidos a través del análisis de varianza.

Cuadro 8: Análisis de la Varianza para RMS - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grado de Libertad	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
A:RPM	0,174496	3	0,0581653	56,41	0.000
B:Vf	0,012385	1	0,012385	12,01	0,0006
C:h	0,057015	2	0,0285075	27,65	0.000
D:SIERRA	0,304658	1	0,304658	295,48	0.000
RESIDUOS	0,288697	280	0,00103106		
TOTAL (Corregido)	0,837251	287			

Un p valor menor a 0.05 indica influencias estadísticas significativas, por lo tanto al observar los resultados para análisis de varianza para RMS se puede afirmar que la emisión acústica (RMS) se ve afectada en forma significativa por la velocidad de rotación (RPM), velocidad de avance (m/min), altura de corte (mm) y el tipo de sierra usada en el experimento.

Cuadro 9: Análisis de la Varianza para Rz - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grado de Libertad	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
A:RPM	2030,73	3	676,909	28,08	0,000
B:Vf	29,8713	1	29,8713	1,24	0,0026
D:SIERRA	2802,98	1	2802,98	116,29	0.000
RESIDUOS	6749,06	280	24,1038		
TOTAL (Corregido)	11641,5	287			

Como ya se mencionó anteriormente los p valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que los tres p valores son inferiores a 0.05, los factores correspondientes a las velocidades de avance y rotación y el tipo de sierra tienen un efecto estadísticamente significativo para Rz.

4.1 Emisión acústica

4.1.1 Consumo energético respecto al espesor de viruta.

La energía requerida para remover la viruta depende del espesor promedio de ésta. Es necesario utilizar el espesor de viruta para comprender los resultados obtenidos en la interacción de las diferentes variables de corte sobre la emisión acústica, ya que corresponde al resultado de dichas interacciones.

Para efectos del estudio se realizaron gráficos separados del comportamiento de la emisión acústica respecto a los diferentes espesores de viruta de acuerdo a cada una de las profundidades de corte (5, 10 y 15 mm), velocidades de rotación (3200, 4200, 6000 y 8000 RPM) y al tipo de sierra empleadas en el experimento.

En las siguientes figuras (Figura 15, 16, 17 y 18) se aprecian los cambios de la emisión acústica obtenidos con la sierra A (diámetro 180mm, kerf 1.5mm) y B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) en función al espesor de viruta de acuerdo a cada una de las velocidades de rotación en estudio.

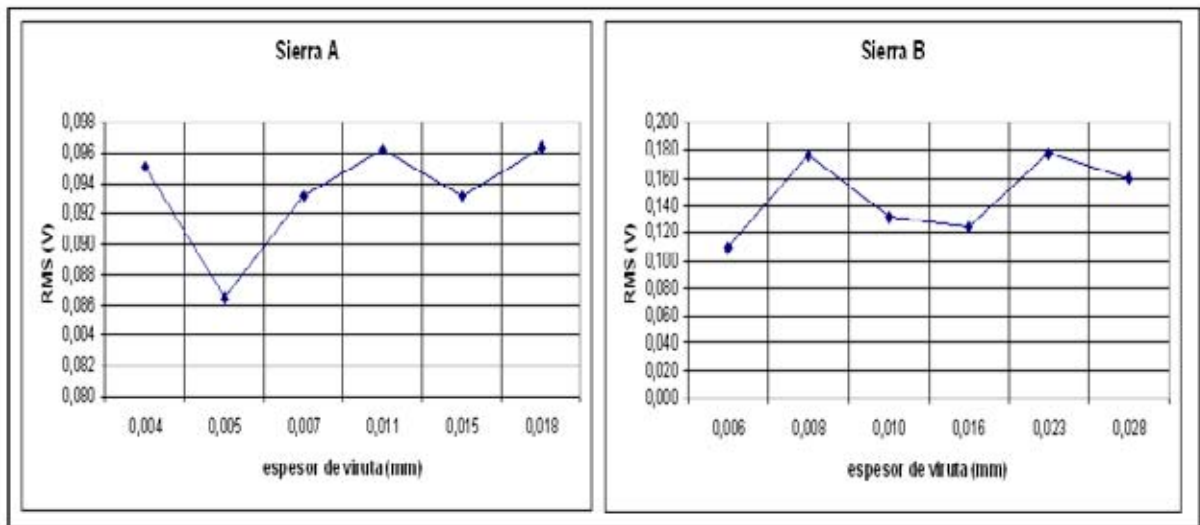


Figura 15: Comportamiento de la emisión acústica respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 3200 RPM.

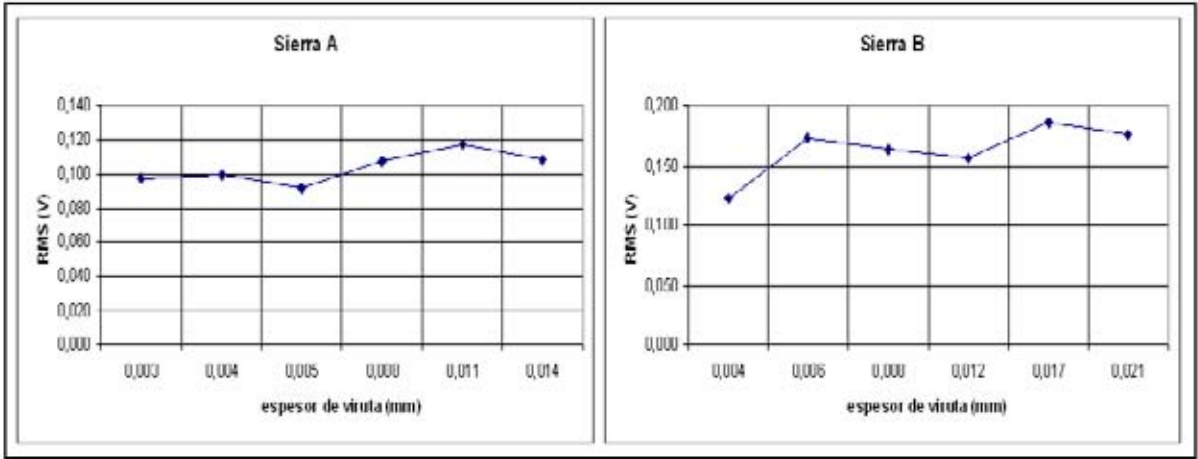


Figura 16: Comportamiento de la emisión acústica respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 4200 RPM.

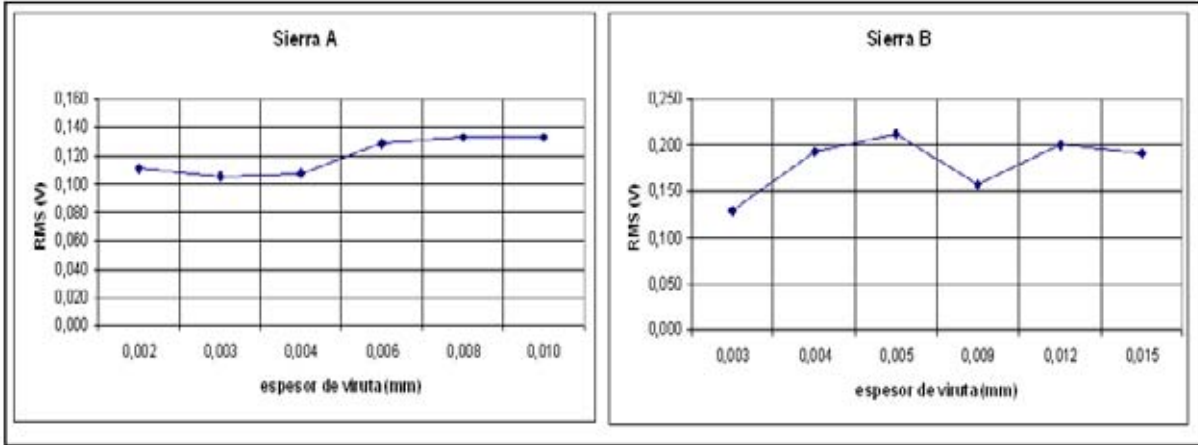


Figura 17: Comportamiento de la emisión acústica respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B 6000 RPM.

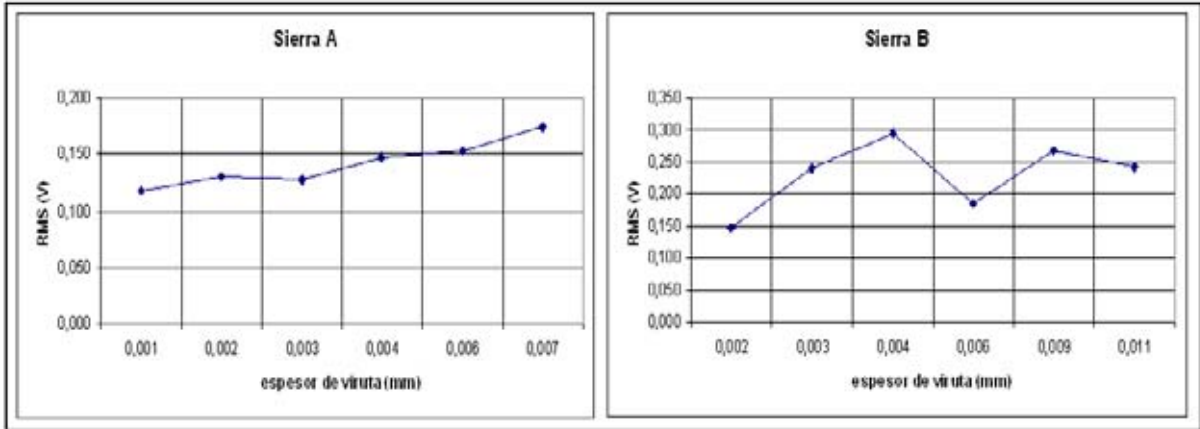


Figura 18: Comportamiento de la emisión acústica respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 8000 RPM.

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que a medida que aumenta el espesor de viruta la emisión acústica tiende a incrementarse, sin embargo se aprecian algunos valores que escapan de la línea de tendencia. El origen de estas elevaciones anormales en los valores no pudo ser determinada, pero si se puede observar que se originaron con más frecuencia en el maquinado con la sierra B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm).

4.1.2 Efecto de la velocidad de rotación en la emisión acústica para madera de *Pinus radiata*.

Al analizar el efecto de las diferentes velocidades de rotación (RPM) en la emisión acústica (EA) se puede determinar la tendencia al aumento, tal como se aprecia en el cuadro 10 y la figura 19.

En el cuadro se observan diferencias significativas, a mayor velocidad de rotación mayor es la emisión acústica. .

Cuadro 10: Contraste Múltiple de Rangos para RMS según RPM

RPM	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
3200	72	0,119	0,00378	X
4200	72	0,133	0,00378	X
6000	72	0,150	0,00378	X
8000	72	0,185	0,00378	X
Contraste			Diferencias	
3200-4200			-0,01335	
3200-6000			*-0,03041	
3200-8000			*-0,06569	
4200-6000			*-0,017060	
4200-8000			*-0,052339	
6000-8000			*-0,035278	

* indica una diferencia significativa.

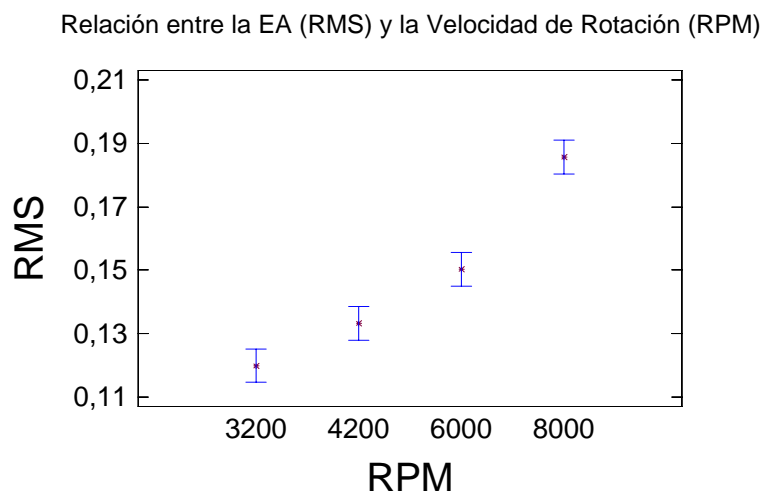


Figura 19: Efecto de la velocidad de rotación (RPM) en los valores de emisión acústica RMS para madera de *Pinus radiata*.

4.1.3 Efecto de la velocidad de alimentación en la emisión acústica para madera de *Pinus radiata*.

En el siguiente cuadro (Cuadro 11) se aprecian diferencias estadísticas significativas en el efecto de la velocidad de alimentación (m/min.) sobre la emisión acústica (EA). Este resultado se debe básicamente al incremento que se obtiene en el espesor de viruta al aumentar la velocidad de alimentación lo que conlleva a una acentuación de la emisión acústica, tal como lo indica Lemaster y Jackson (2000) en su estudio del efecto de la velocidad de alimentación sobre la emisión acústica.

Cuadro 11: Contraste Múltiple de Rangos para RMS según Vf

Vf	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
4	144	0,140	0,00267	X
11	144	0,153	0,00267	X
Contraste			Diferencias	
4--11			*-0,0131	
* indica una diferencia significativa.				

Relación entre la EA (RMS) y la Velocidad de Alimentación (m/min)

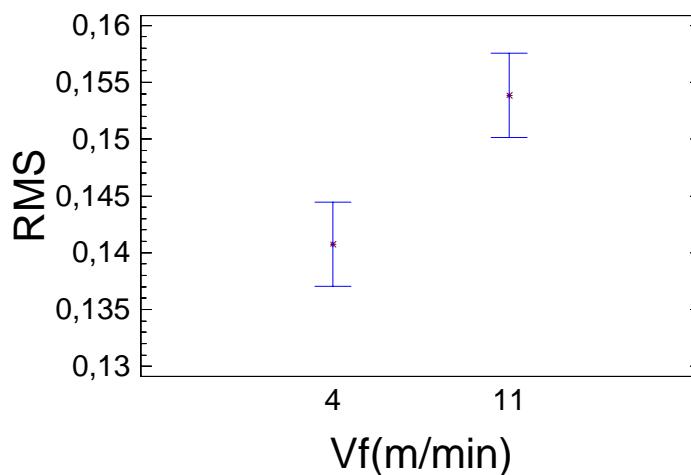


Figura20: Efecto de la velocidad de alimentación (m/min.) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de *Pinus radiata*.

4.1.4 Efecto de la altura de corte en la emisión acústica para madera de *Pinus radiata*.

El análisis estadístico entregó diferencias significativas en el efecto de la altura de corte sobre la emisión acústica solo en la altura de 5mm, ya que en las alturas de 10mm y 15mm se aprecia una gran homogeneidad (la diferencia es insignificante).

Cuadro 12: Contraste Múltiple de Rangos para RMS según h

h	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
5	96	0,127	0,00327	X
15	96	0,156	0,00327	X
10	96	0,157	0,00327	X
Contraste			Diferencias	
5--10			*-0,02923	
5--15			*-0,03042	
10--15			-0,00119	
* indica una diferencia significativa.				

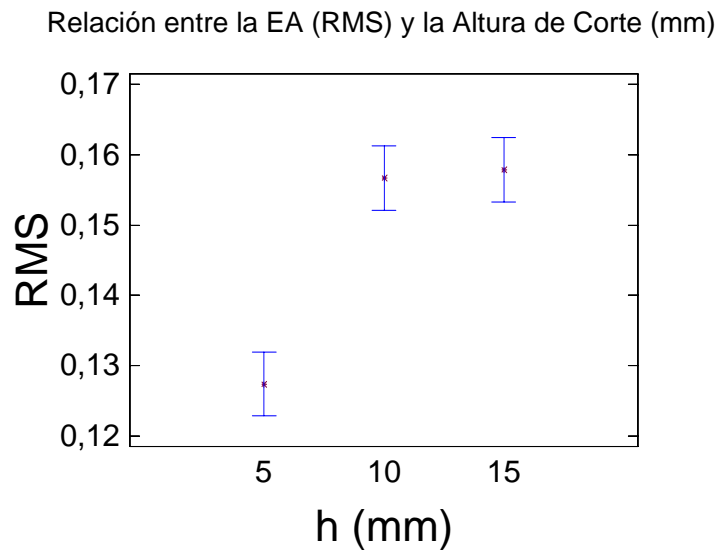


Figura21: Efecto de la altura de corte (m/min.) en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de *Pinus radiata*.

4.1.5 Efecto del tipo de sierra empleada sobre la emisión acústica para madera de *Pinus radiata*.

Existe un aumento en la emisión acústica al emplear la sierra B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm). El cuadro 13 entrega una diferencia significativa al evaluar la relación entre la sierra A (diámetro 180mm, kerf 1.5mm) y la B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) con respecto a la emisión acústica.

Cuadro 13: Contraste Múltiple de Rangos para RMS según Tipo de Sierra

Sierra	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
A	144	0,114	0,00267	X
B	144	0,179	0,00267	X
Contraste			Diferencias	
A--B			*-0,06504	
* indica una diferencia significativa.				

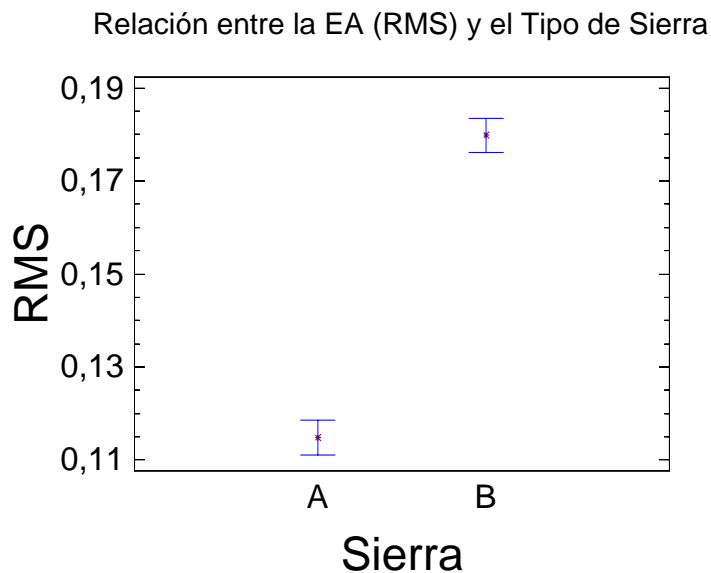


Figura 22: Efecto del tipo de sierra en los valores de emisión acústica RMS (V) para madera de *Pinus radiata*, donde A corresponde a la sierra con diámetro 180mm y Kerf igual a 1.5mm y B a la sierra con diámetro 200mm y Kerf de 3.4mm.

4.1.6 Energía respecto a factor de esponjamiento

Como puede apreciarse en las figuras 23, 24, 25 y 26 se requiere un mayor consumo energético a medida que el factor de esponjamiento aumenta en ambas sierras. Esta relación se debe básicamente al aumento del espesor de viruta que se obtiene de los procesos de maquinado, lo cual nos entrega como resultado un incremento en el volumen de aserrín generado con las distintas profundidades de corte (5, 10 y 15mm).

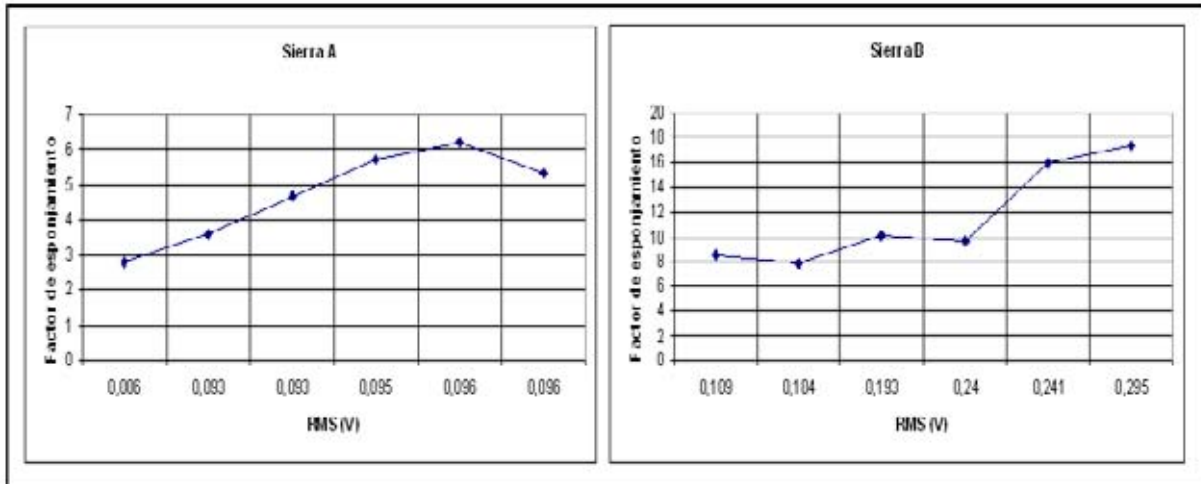


Figura 23: Relación del factor de esponjamiento con la emisión acústica para sierra A (diámetro 180mm, kerf 1.5mm) y B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) a 3200 RPM.

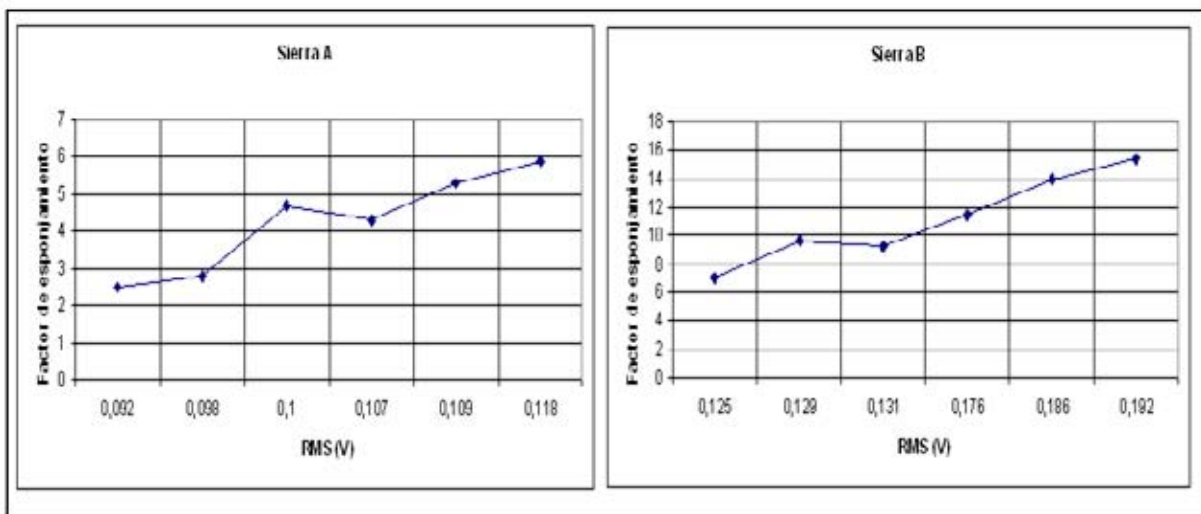


Figura 24: Relación del factor de esponjamiento con la emisión acústica para sierra A (diámetro 180mm, kerf 1.5mm) y B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) a 4200 RPM.

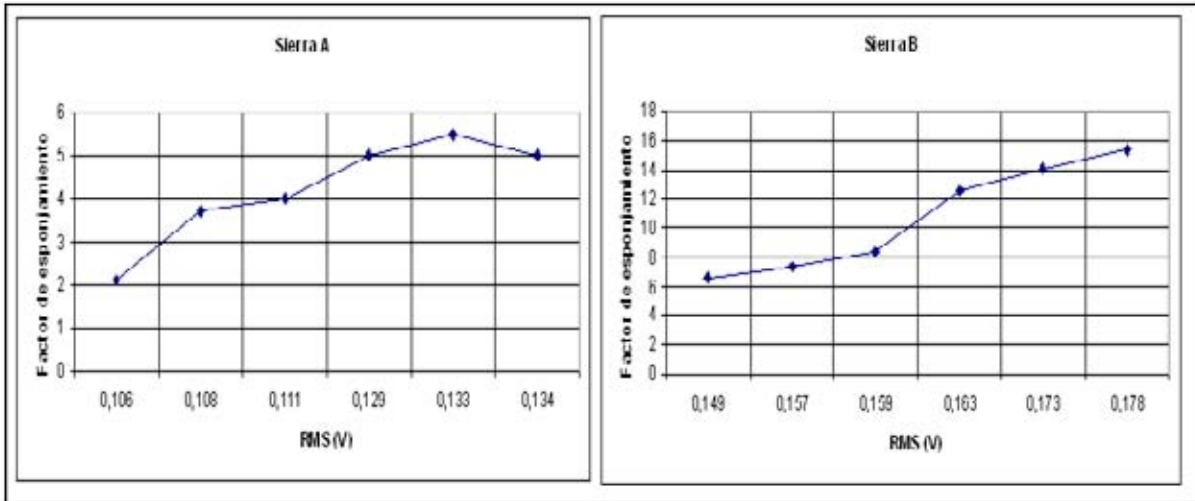


Figura 25: Relación del factor de esponjamiento con la emisión acústica para sierra A (diámetro 180mm, kerf 1.5mm) y B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) a 6000 RPM.

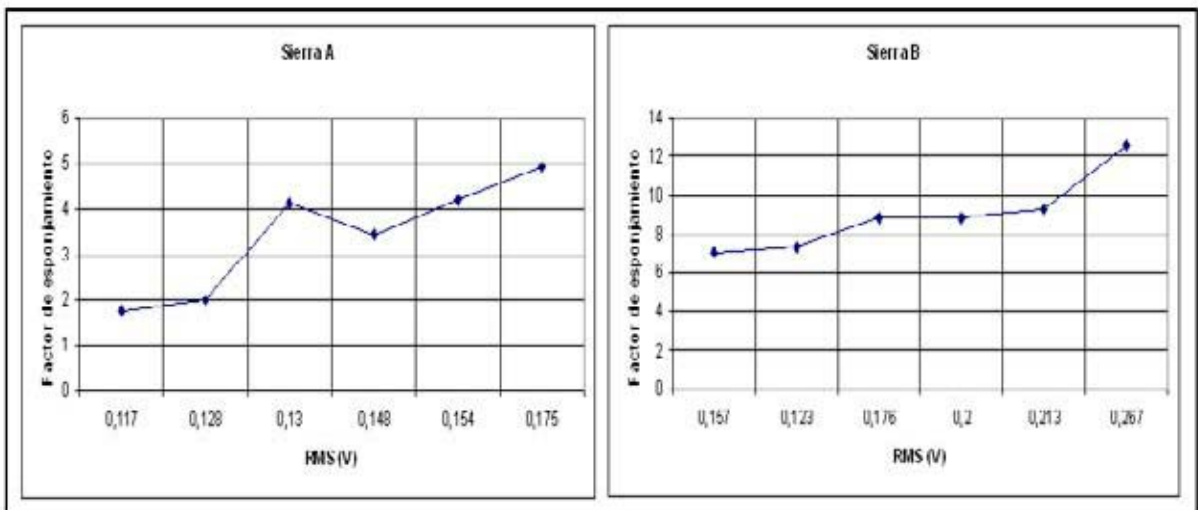


Figura 26: Relación del factor de esponjamiento con la emisión acústica para sierra A (diámetro 180mm, kerf 1.5mm) y B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) a 8000 RPM.

Los gráficos indican claramente que los valores del factor de esponjamiento aumentaron al emplear la sierra B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm).

En todos los gráficos se observan algunos valores que escapan de la línea de tendencia. No se pudo determinar la causa, pero puede deberse a la heterogeneidad de la estructura anatómica de la madera, sin embargo este parámetro no fue considerado en este experimento.

4.2 Rugosidad superficial

4.2.1 Efecto del espesor de viruta en la rugosidad superficial para madera de *Pinus radiata*.

Al considerar la interacción de los diferentes parámetros de corte empleados en el estudio (velocidad de rotación, velocidad de avance, altura de corte, tipo de sierra) se puede observar el resultado del espesor de viruta en la calidad de la superficie obtenida.

En las figuras 27, 28, 29, y 30 se aprecia el comportamiento de los valores obtenidos de rugosidad superficial, parámetro Rz, obtenidos con la sierra A (diámetro 180mm, kerf 1.5mm) y B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) para los diferentes espesores de viruta promedio de acuerdo a cada una de las velocidades de rotación en estudio.

Si se analizan las tendencias conseguidas se concuerda con Vega (2004), ya que sus estudios indican que al aumentar el avance por diente el valor de espesor de viruta aumenta incrementando de este modo la rugosidad superficial de la madera.

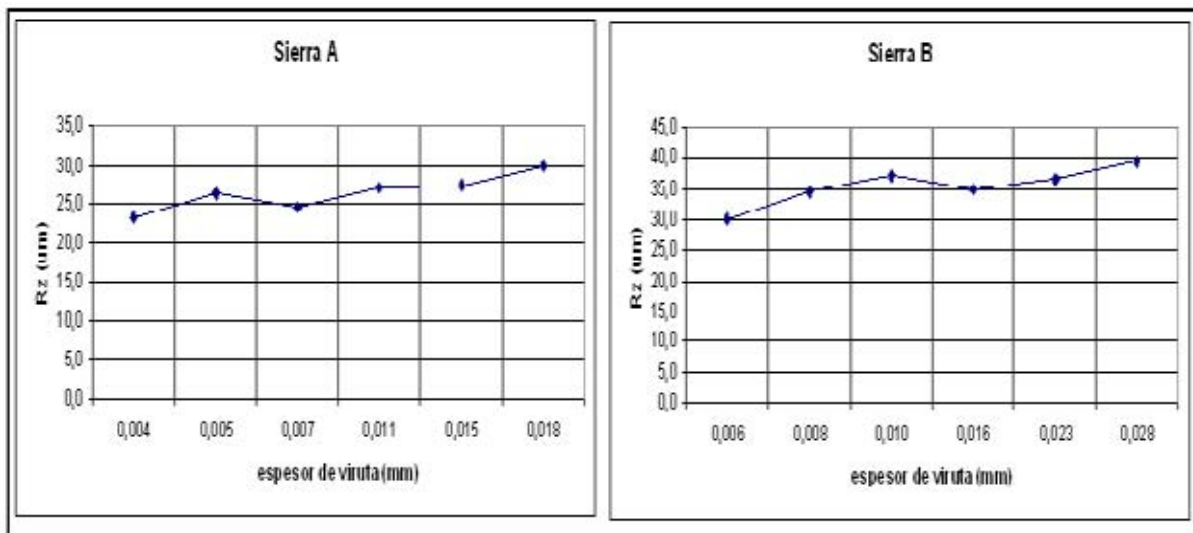


Figura 27: Comportamiento de la Rugosidad superficial respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 3200 RPM.

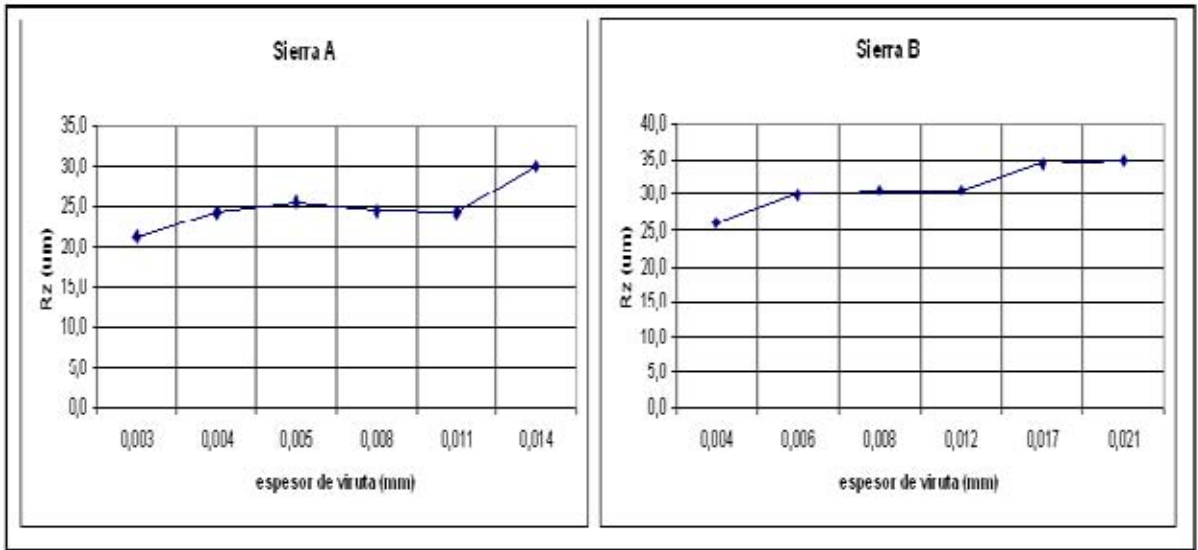


Figura 28: Comportamiento de la Rugosidad superficial respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 4200 RPM.

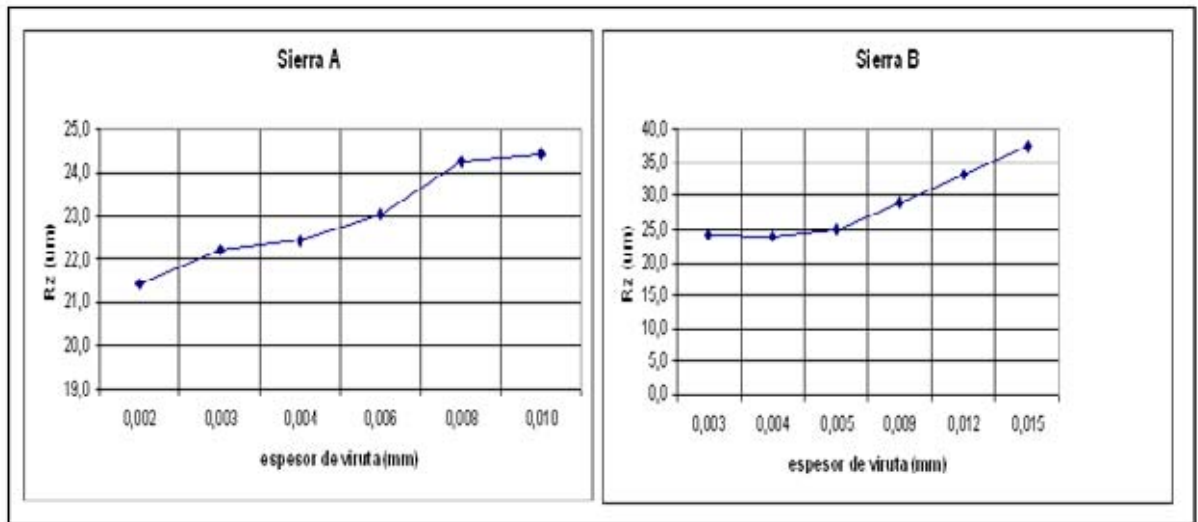


Figura 29: Comportamiento de la Rugosidad superficial respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 6000 RPM

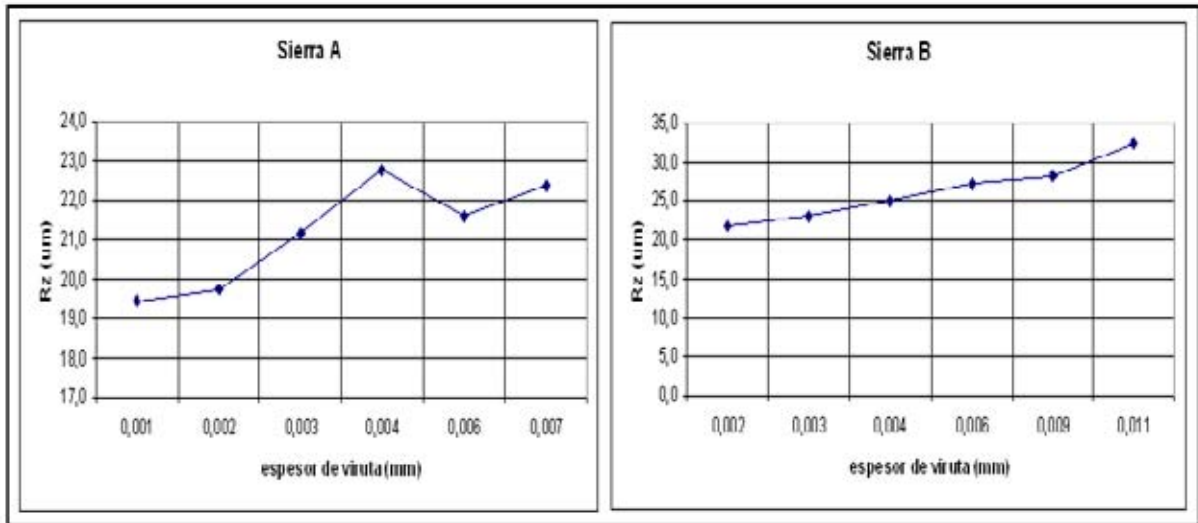


Figura 30: Comportamiento de la Rugosidad superficial respecto a los diferentes espesores de viruta con sierra A y B a 8000 RPM.

Los gráficos indican que los valores de rugosidad superficial aumentaron para todos los espesores de viruta al emplear la sierra B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) en el estudio.

En los gráficos se observan algunas irregularidades en los datos, esto se puede apreciar claramente en el gráfico que representa la relación rugosidad superficial respecto a espesor de viruta para sierra A a 8000 RPM, ya que existe una elevación anormal notoria en la rugosidad superficial para el espesor de viruta de 0.004mm, lo cual se puede deber a la anatomía de la especie. Por otra parte el empleo del método de contacto para medir rugosidad superficial es extremadamente variable debido a las numerosas diferencias que se pueden encontrar en la pieza de madera.

4.2.2 Efecto de la velocidad de rotación en la rugosidad superficial para madera de *Pinus radiata*.

Un aumento de la velocidad de rotación (RPM) produce superficies menos rugosas debiéndose a que la amplitud de las ondas provocadas por el corte decrece a medida que se aumenta la velocidad de rotación (RPM).

El efecto de la velocidad de rotación (RPM) sobre la rugosidad se aprecia en el siguiente cuadro (Cuadro 14), ya que el análisis estadístico realizado nos entrega diferencias significativas entre los diferentes tipos de velocidad de rotación empleados (3200, 4200, 6000 y 8000).

Cuadro 14: Contraste Múltiple de Rangos para Rz según RPM

RPM	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
3200	72	30,743	0,57859	X
4200	72	27,918	0,57859	X
6000	72	25,868	0,57859	X
8000	72	23,526	0,57859	X
Contraste			Diferencias	
3200-4200			*2,82492	
3200-6000			*4,87489	
3200-8000			*7,21736	
4200-6000			2,04997	
4200-8000			*4,39244	
6000-8000			*2,34247	
* indica una diferencia significativa.				

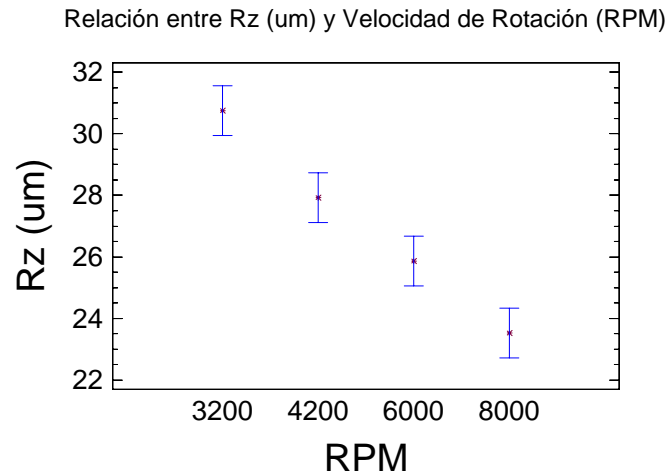


Figura 31: Efecto de la velocidad de rotación (RPM) en la rugosidad superficial Rz (μm) para madera de *Pinus radiata*.

En el figura anterior (Figura 31) se observa que a medida que la velocidad de rotación aumenta los valores de rugosidad superficial disminuyen, obteniéndose como resultado una mejor calidad en la superficie, tal como lo indica Aguilera y Vega (2004) en la publicación que asocia la rugosidad superficial con las diferentes condiciones de maquinado.

4.2.3 Efecto de la velocidad de alimentación en la rugosidad superficial para madera de *Pinus radiata*.

Los valores de rugosidad superficial aumentan a medida que los valores de velocidad de avance (m/min.) crecen.

Cuadro 15: Contraste Múltiple de Rangos para Rz según Vf

Vf	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
4	144	26,692	0,40913	X
11	144	27,336	0,40913	X
Contraste			Diferencias	
4--11			-0,64411	
* indica una diferencia significativa.				

En la siguiente figura (Figura 32) es posible identificar claramente la tendencia de la rugosidad superficial para una velocidad de alimentación de 4 y 11 (m/min.)

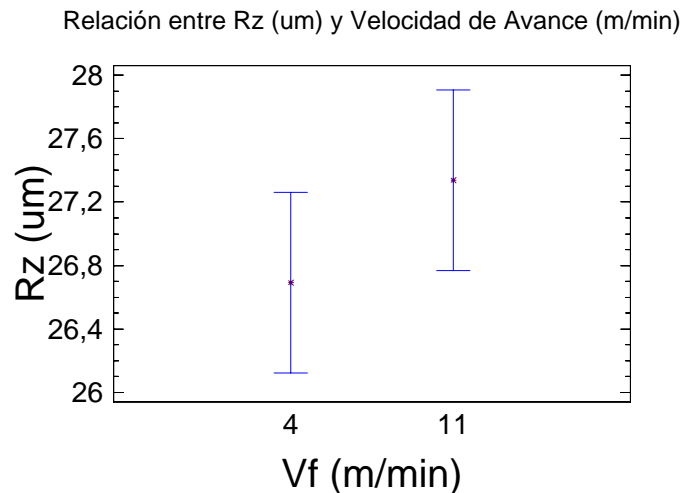


Figura 32: Efecto de la velocidad de alimentación (m/min.) en la rugosidad superficial Rz (um) para madera de *Pinus radiata*.

Un aumento en la velocidad de alimentación disminuye el tiempo de contacto de la pieza de madera procesada con el elemento cortante, lo que ocasiona superficies con rugosidades altas y por lo tanto un deterioro en la plano procesado.

4.2.4 Efecto del tipo de sierra empleada sobre la rugosidad superficial para madera de *Pinus radiata*.

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las Sierras de distinto diámetro y distinto kerf, apreciándose claramente que la rugosidad de la madera aumenta al emplear la sierra B (diámetro 200mm, kerf 3.4mm) en comparación a la sierra A (diámetro 180mm, kerf 1.5mm).

Cuadro 16: Contraste Múltiple de Rangos para Rz según Tipo de Sierra

Sierra	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
A	144	23,8946	0,40913	X
B	144	30,134	0,40913	X
Contraste			Diferencias	
A--B			*-6,23942	
* indica una diferencia significativa.				

La representación gráfica (Figura 33) indica que se obtuvieron promedios de rugosidad superficial mayores en la utilización de la sierra B (kerf 3.4).

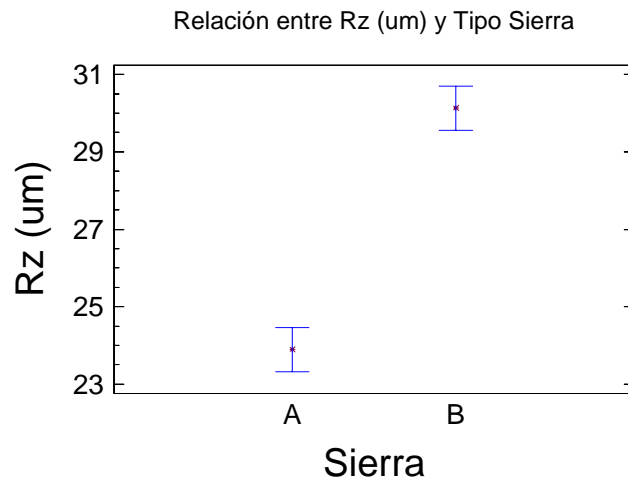


Figura 33: Efecto de el tipo de Sierra en los valores de) para la rugosidad superficial Rz (µm) para madera de *Pinus radiata*.

5. CONCLUSIONES

Consumo Energético

- La emisión acústica se incrementa a medida que aumenta el espesor de viruta para las velocidades de corte estudiadas en las dos sierras circulares.
- Se obtuvieron mayores valores de emisión acústica al aumentar la velocidad de rotación. También se determinó que al aumentar la velocidad de alimentación aumentan los resultados de emisión acústica.
- Existe un incremento significativo de la emisión acústica con el aumento de la altura de corte, a mayor altura mayor es el consumo de energía.
- Los valores de emisión acústica variaron de acuerdo al tipo de sierra empleada. Ambos resultados son significativos, sin embargo existió una mayor emisión acústica al aumentar en diámetro y kerf de la sierra circular. Por lo cual se recomienda trabajar con la sierra de menor diámetro,
- En el estudio se aprecia el efecto que tiene el factor de esponjamiento sobre el consumo energético. A medida que se incrementan los valores de éste, producto de un aumento en el espesor de viruta, el consumo de energía se incrementa en ambas sierras.

Calidad Superficial

- La rugosidad superficial aumenta al incrementar el espesor de viruta, siendo este último un buen indicador de la rugosidad en maderas procesadas ya que corresponde a la respuesta de una serie de condiciones de corte en conjunto.
- La velocidad de rotación tiene una influencia significativa sobre la rugosidad superficial en madera de ***Pinus radiata D.Don***. Frente a un aumento de la velocidad de rotación, los valores de rugosidad superficial disminuyen.
- El estudio entrega visiblemente el efecto de la velocidad de alimentación sobre el deterioro de la calidad superficial procesada. Frente a un aumento de las velocidades de alimentación, los valores de rugosidad superficial se incrementan, siendo consistente a la revisión bibliográfica.

- En ambas sierras utilizadas se obtuvo el mismo comportamiento de la rugosidad superficial en relación a las variables de corte. Los valores de esta variable de respuesta se incrementaron al aumentar el diámetro y el kerf de la herramienta cortante. Razón por la cual se recomienda trabajar con la sierra de menor diámetro, ya que el resultado de rugosidad superficial promedio obtenido con esta sierra fue de 23.89 en comparación a un 30.13 alcanzado con la sierra de mayor diámetro.

6. BIBLIOGRAFIA.

Aguilera A.; Vega H. 2004. Efecto del Cambio de las Condiciones de Maquinado Sobre la Rugosidad Superficial de *Pinus radiata* D. Don. Volumen 25 N° 3, diciembre 2004, p. 25-32.

Diaz-vaz J. E. 2003. Anatomía de Maderas. Valdivia-Chile. Universidad Austral de Chile, Marisa Cuneo Ediciones. 151 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.

Pérez Pons Y. A. 1996. Vibraciones de Sierras Circulares. Tesis Ingeniero Mecánico, Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. de la Ingeniería. 116 p.

Pérez Aguilar R. A. 1991. Proceso de Afilado para Sierras Circulares Empleadas en Madera. Tesis Ingeniero Mecánico, Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. de la Ingeniería. 63 p.

Puig R. sin fecha. Maquinaria para la Elaboración de la Madera. 97 p.

Quezada A. 1995. Acondicionamiento y Mantenimiento de Sierras Circulares. Infor 1995. 94 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. 223 p.

Vignote S.; Jiménez F. 2000. Tecnología de la Madera. 2º Edición. Madrid-España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaria General Técnica, Centro de Publicaciones. 653 p.

Wettling González O. sin fecha. El Aserradero de Sierras Circulares. 52p.

Williston Ed M. 1978. Saws. Design, selection, operation, maintenance. USA. Miller Freeman Publications, Inc. 288 p.

ANEXOS

ANEXOS 1
Abstract

ABSTRACT

Upon knowing the behavior of the wood of radiata pine in front of different conditions of machining one with circular saws it could help to improve the utilization of this species.

The purpose of this study corresponds to the investigation of the effect of the conditions of machining on the surface roughness and the monitored of the energy required in order to carry out the process.

In this case two types of circular saws studied (1.5 and 3.4 Kerf), two feed speeds of (4 and 11 m/min.), four speeds of cut (3200, 4200, 6000 and 8000 RPM) and three depths of cut (5, 10 and 15 mm.). The energy consumption was measured through the acoustic emission and was determined the surface roughness according to the Rz parameter, defined by Japanese Industrial Standard (JIS), for the different of chip thickness.

The relationships obtained between the speeds of cut and feed more the depths of cut and the type of tool allowed to specify the values average of chip thickness, which corresponds to a key element in the determination so much of the quality like of the energy consumption. They in both cases were positive relationships with the different of chip thickness. The same answer was obtained upon relating factor of sponginess with energy.

It with this study are sought to acquire the necessary knowledge in order to improve the automation of the processes of machining with circular saw adjusting some parameters of cut, such like the cut speed, feed speed and depth of cut, with the purpose of getting products of good quality and similarly diminish the costs associated with the consumption of energy.

Key words: surface roughness, energy, circular saw.

ANEXOS 2

1. Humedad de la madera
2. Densidad de la madera

1. Contenido de humedad de la madera

Cuadro 1a. Registro Contenido de humedad

Probeta	Peso Húmedo (grs.)	Peso Seco (grs.)	Cont. Humedad (%)
1	31,388	27,852	12,696
1'	31,209	27,306	14,294
2	25,738	23,433	9,837
2'	28,718	26,035	10,305
4	32,499	29,153	11,477
4'	28,436	25,789	10,264
5	29,988	27,134	10,518
5'	25,353	22,963	10,408
6	26,125	23,792	9,806
6'	25,189	22,869	10,145
7	34,751	30,893	12,488
7'	33,027	29,11	13,456
8	34,475	30,545	12,866
8'	33,154	29,251	13,343
9	33,259	29,586	12,415
9'	32,642	29,301	11,402
10	26,517	23,43	13,175
10'	28,559	25,419	12,353

Cuadro 1b. Estadística descriptiva para Registro Contenido de humedad

	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Contenido de Humedad	11,7	1,4	9,8	14,3

2. Densidad de la madera

Cuadro2a. Registro Densidad Básica

Peso probeta (grs.)	Ancho (cm.)	Espesor (cm.)	Largo (cm.)	Volumen (cm3)	Densidad (grs./cm3)
27,852	3,46	2,0786	10,27	73,86	0,377
27,306	3,44	2,083	10,28	73,66	0,371
23,433	3,17	2,0902	10,43	69,11	0,339
26,035	3,27	2,0784	10,52	71,50	0,364
29,153	3,24	2,1037	10,4	70,89	0,411
25,789	3,31	2,0926	10,41	72,10	0,358
27,134	3,29	2,0987	10,35	71,46	0,380
22,963	3,21	2,1065	10,26	69,38	0,331
23,792	3,26	2,0991	10,44	71,44	0,333
22,869	3,25	2,1083	10,38	71,12	0,322
29,412	3,4	2,1545	10,44	76,48	0,385
26,994	3,41	2,1483	10,41	76,26	0,354
30,545	3,35	2,1435	10,44	74,97	0,407
29,251	3,39	2,1465	10,38	75,53	0,387
29,586	3,45	2,1405	10,53	77,76	0,380
29,301	3,41	2,1426	10,51	76,79	0,382
23,43	3,4	2,1282	10,43	75,47	0,310
25,419	3,42	2,1464	10,42	76,49	0,332

Cuadro 2b. Estadística descriptiva para Registro Densidad Básica

	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Densidad Básica	0,362	0,029	0,310	0,411

Cuadro 2c.Registro Densidad Normal

Peso probeta (grs.)	Ancho (cm.)	Espesor (cm.)	Largo (cm.)	Volumen (cm3)	Densidad (grs./cm3)
31,388	3,2621	2,0655	10,06	67,78	0,463
31,209	3,29	2,0645	10,06	68,33	0,457
25,738	3,0819	2,0722	10,07	64,31	0,4
28,718	3,1206	2,0694	10,11	65,29	0,44
32,499	3,1008	2,0925	10,5	68,13	0,477
28,436	3,1184	2,0835	10,04	65,23	0,436
29,988	3,1241	2,0867	10,09	65,78	0,456
25,353	3,0959	2,0861	10,07	65,04	0,39
26,125	3,1068	2,0884	10,12	65,66	0,398
25,189	3,0975	2,0973	10,07	65,42	0,385
33,977	3,27	2,119	10,08	69,85	0,486
30,891	3,274	2,124	10,09	70,17	0,44
34,475	3,271	2,123	10,06	69,86	0,493
34,154	3,3	2,1329	10,09	71,02	0,481
33,259	3,3	2,1349	10,1	71,16	0,467
32,642	3,29	2,1285	10,07	70,52	0,463
26,517	3,285	2,1298	10,09	70,59	0,376
28,559	3,2999	2,1299	10,07	70,78	0,404

Cuadro 2d. Estadística descriptiva para Registro Densidad Normal

	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Densidad Normal	0,440	0,038	0,376	0,493

ANEXOS 3

Estadística descriptiva

1. Emisión acústica
2. Rugosidad superficial
3. Factor de esponjamiento

1. Emisión acústica

Estadística descriptiva de emisión acústica

Cuadro 1a. Estadística descriptiva para Emisión Acústica Sierra A

Probeta	RPM	h(mm)	Diámetro	Vf (m/min.)	Promedio RMS (V)	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
1	3200	5	180	4	0,095	0,002	0,093	0,097
2	4200	5	180	4	0,098	0,007	0,089	0,104
3	6000	5	180	4	0,111	0,009	0,102	0,121
4	8000	5	180	4	0,117	0,005	0,111	0,125
5	3200	5	180	11	0,096	0,015	0,076	0,114
6	4200	5	180	11	0,107	0,009	0,094	0,115
7	6000	5	180	11	0,129	0,007	0,121	0,136
8	8000	5	180	11	0,148	0,016	0,126	0,167
9	3200	10	180	4	0,086	0,003	0,083	0,090
10	4200	10	180	4	0,100	0,007	0,091	0,106
11	6000	10	180	4	0,106	0,008	0,095	0,117
12	8000	10	180	4	0,130	0,015	0,110	0,146
13	3200	10	180	11	0,093	0,014	0,081	0,115
14	4200	10	180	11	0,118	0,009	0,118	0,118
15	6000	10	180	11	0,133	0,021	0,117	0,168
16	8000	10	180	11	0,154	0,034	0,103	0,209
17	3200	15	180	4	0,093	0,008	0,085	0,105
18	4200	15	180	4	0,092	0,004	0,088	0,097
19	6000	15	180	4	0,108	0,007	0,101	0,120
20	8000	15	180	4	0,128	0,024	0,102	0,160
21	3200	15	180	11	0,096	0,004	0,092	0,100
22	4200	15	180	11	0,109	0,004	0,102	0,112
23	6000	15	180	11	0,134	0,000	0,118	0,143
24	8000	15	180	11	0,175	0,003	0,130	0,264

Cuadro 1b. Estadística descriptiva para Emisión Acústica Sierra B

Probeta	RPM	h(mm)	Vf (m/min.)	Diámetro	Promedio RMS (V)	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
1	3200	5	4	200	0,109	0,015	0,092	0,130
2	4200	5	4	200	0,123	0,009	0,114	0,009
3	6000	5	4	200	0,129	0,017	0,114	0,155
4	8000	5	4	200	0,149	0,019	0,134	0,177
5	3200	5	11	200	0,125	0,009	0,115	0,137
6	4200	5	11	200	0,157	0,018	0,132	0,173
7	6000	5	11	200	0,157	0,024	0,127	0,190
8	8000	5	11	200	0,184	0,023	0,154	0,212
9	3200	10	4	200	0,176	0,022	0,147	0,204
10	4200	10	4	200	0,173	0,043	0,124	0,239
11	6000	10	4	200	0,193	0,033	0,154	0,242
12	8000	10	4	200	0,240	0,026	0,213	0,276
13	3200	10	11	200	0,178	0,057	0,115	0,253
14	4200	10	11	200	0,186	0,078	0,110	0,307
15	6000	10	11	200	0,200	0,038	0,167	0,262
16	8000	10	11	200	0,267	0,049	0,187	0,318
17	3200	15	4	200	0,131	0,009	0,123	0,145
18	4200	15	4	200	0,163	0,033	0,131	0,217
19	6000	15	4	200	0,213	0,036	0,166	0,251
20	8000	15	4	200	0,295	0,058	0,208	0,362
21	3200	15	11	200	0,159	0,021	0,135	0,191
22	4200	15	11	200	0,176	0,052	0,130	0,264
23	6000	15	11	200	0,192	0,059	0,106	0,249
24	8000	15	11	200	0,241	0,057	0,182	0,333

Emisión acústica y espesor de viruta

Cuadro 1c. Resumen de la emisión acústica promedio generada a distintos espesores de viruta con Sierra A y B (3200 RPM)

Sierra	RPM	h(mm)	em	Promedio RMS (v)	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
A	3200	5	0,004	0,095	0,002	0,093	0,097
A	3200	10	0,005	0,086	0,003	0,083	0,090
A	3200	15	0,007	0,093	0,008	0,085	0,105
A	3200	5	0,011	0,096	0,015	0,076	0,114
A	3200	10	0,015	0,093	0,014	0,081	0,115
A	3200	15	0,018	0,096	0,004	0,092	0,100
B	3200	5	0,006	0,109	0,015	0,092	0,130
B	3200	10	0,008	0,176	0,022	0,147	0,204
B	3200	15	0,010	0,131	0,009	0,123	0,145
B	3200	5	0,016	0,125	0,009	0,115	0,137
B	3200	10	0,023	0,178	0,057	0,115	0,253
B	3200	15	0,028	0,159	0,021	0,135	0,191

Cuadro 1d. Resumen de la emisión acústica promedio generada a distintos espesores de viruta con Sierra A y B (4200 RPM)

Sierra	RPM	h(mm)	em	Promedio RMS	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
A	4200	5	0,003	0,098	0,007	0,089	0,104
A	4200	10	0,004	0,100	0,007	0,091	0,106
A	4200	15	0,005	0,092	0,004	0,088	0,097
A	4200	5	0,008	0,107	0,009	0,094	0,115
A	4200	10	0,011	0,118	0,009	0,118	0,118
A	4200	15	0,014	0,109	0,004	0,102	0,112
B	4200	5	0,004	0,123	0,009	0,114	0,009
B	4200	10	0,006	0,173	0,043	0,124	0,239
B	4200	15	0,008	0,163	0,009	0,123	0,145
B	4200	5	0,012	0,157	0,018	0,132	0,173
B	4200	10	0,017	0,186	0,078	0,110	0,307
B	4200	15	0,021	0,176	0,052	0,130	0,264

Cuadro 1e. Resumen de la emisión acústica promedio generada a distintos espesores de viruta con Sierra A y B (6000 RPM)

Sierra	RPM	h(mm)	em	Promedio RMS (v)	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
A	6000	5	0,002	0,111	0,009	0,102	0,121
A	6000	10	0,003	0,106	0,008	0,095	0,117
A	6000	15	0,004	0,108	0,007	0,121	0,136
A	6000	5	0,006	0,129	0,007	0,121	0,136
A	6000	10	0,008	0,133	0,021	0,117	0,168
A	6000	15	0,010	0,134	0,000	0,118	0,143
B	6000	5	0,003	0,129	0,017	0,114	0,155
B	6000	10	0,004	0,193	0,033	0,154	0,242
B	6000	15	0,005	0,213	0,036	0,166	0,251
B	6000	5	0,009	0,157	0,024	0,127	0,190
B	6000	10	0,012	0,200	0,038	0,167	0,262
B	6000	15	0,015	0,192	0,059	0,106	0,249

Cuadro 1f. Resumen de la emisión acústica promedio generada a distintos espesores de viruta con Sierra A y B (8000 RPM)

Sierra	RPM	h(mm)	em	Promedio RMS (v)	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
A	8000	5	0,001	0,117	0,005	0,111	0,125
A	8000	10	0,002	0,130	0,015	0,110	0,146
A	8000	15	0,003	0,128	0,024	0,102	0,160
A	8000	5	0,004	0,148	0,016	0,126	0,167
A	8000	10	0,006	0,154	0,034	0,103	0,209
A	8000	15	0,007	0,175	0,003	0,130	0,264
B	8000	5	0,002	0,149	0,019	0,134	0,177
B	8000	10	0,003	0,240	0,026	0,213	0,276
B	8000	15	0,004	0,295	0,058	0,208	0,362
B	8000	5	0,006	0,184	0,023	0,154	0,212
B	8000	10	0,009	0,267	0,049	0,187	0,318
B	8000	15	0,011	0,241	0,057	0,182	0,333

2. Rugosidad superficial

2.1 Estadística descriptiva de rugosidad superficial

Cuadro 2a. Estadística descriptiva para Rugosidad Superficial Sierra A

Probeta	RPM	h(mm)	Vf (m/min.)	Diámetro	Promedio Rz	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
1	3200	5	4	180	23,3	5,744	16,56	31,86
2	4200	5	4	180	21,2	3,342	16,46	25,74
3	6000	5	4	180	21,4	2,586	19,08	24,72
4	8000	5	4	180	19,4	3,501	15,85	24,71
5	3200	5	11	180	27,1	5,917	22,75	36,85
6	4200	5	11	180	24,6	1,461	22,3	25,92
7	6000	5	11	180	23,0	3,518	19,18	28,72
8	8000	5	11	180	22,8	5,564	16,05	29,99
9	3200	10	4	180	26,3	3,217	22,41	30,04
10	4200	10	4	180	24,3	2,892	20,18	28,22
11	6000	10	4	180	22,2	5,840	16,38	31,4
12	8000	10	4	180	19,8	5,532	13,53	28,6
13	3200	10	11	180	27,2	3,458	25,08	33,24
14	4200	10	11	180	24,3	3,931	18,54	28,41
15	6000	10	11	180	24,3	3,090	20,83	28,98
16	8000	10	11	180	21,6	2,986	18,43	26,21
17	3200	15	4	180	24,6	4,912	20,07	31,65
18	4200	15	4	180	25,6	4,565	18,95	30,22
19	6000	15	4	180	22,5	3,674	17,89	27,15
20	8000	15	4	180	21,2	2,954	17,98	24,74
21	3200	15	11	180	29,8	3,680	27,31	35,89
22	4200	15	11	180	29,9	3,933	24	34,63
23	6000	15	11	180	24,4	2,482	20,93	26,24
24	8000	15	11	180	22,4	3,393	16,76	25,89

Cuadro 2b. Estadística descriptiva para Rugosidad Superficial Sierra B

Probeta	RPM	h(mm)	Vf (m/min.)	Diámetro	Promedio Rz	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
1	3200	5	4	200	29,9	3,650	24,13	32,94
2	4200	5	4	200	26,1	4,012	21,21	32,2
3	6000	5	4	200	24,2	4,675	19,45	31,72
4	8000	5	4	200	21,8	2,839	18,03	25,96
5	3200	5	11	200	34,8	3,749	30,94	39,57
6	4200	5	11	200	30,6	3,738	25,23	34,39
7	6000	5	11	200	28,9	2,333	25,74	31,59
8	8000	5	11	200	27,4	2,206	24,54	30,41
9	3200	10	4	200	34,6	2,785	31,14	38,71
10	4200	10	4	200	30,2	8,665	17,77	37,99
11	6000	10	4	200	23,7	2,383	20,73	26,18
12	8000	10	4	200	23,0	3,444	19,87	29,33
13	3200	10	11	200	36,4	2,785	31,14	38,71
14	4200	10	11	200	34,3	4,023	26,46	35,61
15	6000	10	11	200	33,2	11,258	14,5	43,47
16	8000	10	11	200	28,4	7,597	18,34	37,68
17	3200	15	4	200	37,1	7,021	26,07	45,46
18	4200	15	4	200	30,6	3,738	25,23	34,39
19	6000	15	4	200	25,1	6,914	19,9	37,17
20	8000	15	4	200	25,0	3,444	19,87	29,33
21	3200	15	11	200	39,4	6,703	33,83	48,31
22	4200	15	11	200	34,9	3,527	30,18	37,85
23	6000	15	11	200	37,5	6,359	30,18	44,92
24	8000	15	11	200	32,5	4,906	26,77	40,15

2.2 Rugosidad superficial y espesor de viruta

Cuadro 2c. Resumen de la Rugosidad superficial promedio generada a distintos espesores de viruta con Sierra A y B (3200 RPM)

Sierra	RPM	em	Promedio Rz	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
A	3200	0,004	23,3	5,744	16,56	31,86
A	3200	0,005	26,3	3,217	22,41	30,04
A	3200	0,007	24,6	4,912	20,07	31,65
A	3200	0,011	27,1	5,917	22,75	36,85
A	3200	0,015	27,2	3,458	25,08	33,24
A	3200	0,018	29,8	3,680	27,31	35,89
B	3200	0,006	29,9	3,650	24,13	32,94
B	3200	0,008	34,6	2,785	31,14	38,71
B	3200	0,010	37,1	7,021	26,07	45,46
B	3200	0,016	34,8	3,749	30,94	39,57
B	3200	0,023	36,4	2,785	31,14	38,71
B	3200	0,028	39,4	6,703	33,83	48,31

Cuadro 2d. Resumen de la Rugosidad superficial promedio generada a distintos espesores de viruta con Sierra A y B (4200 RPM)

Sierra	RPM	em	Promedio Rz	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
A	4200	0,003	21,2	3,342	16,46	25,74
A	4200	0,004	24,3	2,892	20,18	28,22
A	4200	0,005	25,6	4,565	18,95	30,22
A	4200	0,008	24,6	1,461	22,3	25,92
A	4200	0,011	24,3	3,931	18,54	28,41
A	4200	0,014	29,9	3,933	24	34,63
B	4200	0,004	26,1	4,012	21,21	32,2
B	4200	0,006	30,2	8,665	17,77	37,99
B	4200	0,008	30,6	3,738	25,23	34,39
B	4200	0,012	30,6	3,738	25,23	34,39
B	4200	0,017	34,3	4,023	26,46	35,61
B	4200	0,021	34,9	3,527	30,18	37,85

Cuadro 2e. Resumen de la Rugosidad superficial promedio generada a distintos espesores de viruta con Sierra A y B (6000 RPM)

Sierra	RPM	em	Promedio Rz	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
A	6000	0,002	21,4	2,586	19,08	24,72
A	6000	0,003	22,2	5,840	16,38	31,4
A	6000	0,004	22,5	3,674	17,89	27,15
A	6000	0,006	23,0	3,518	19,18	28,72
A	6000	0,008	24,3	3,090	20,83	28,98
A	6000	0,010	24,4	2,482	20,93	26,24
B	6000	0,003	24,2	4,675	19,45	31,72
B	6000	0,004	23,7	2,383	20,73	26,18
B	6000	0,005	25,1	6,914	19,9	37,17
B	6000	0,009	28,9	2,333	25,74	31,59
B	6000	0,012	33,2	11,258	14,5	43,47
B	6000	0,015	37,5	6,359	30,18	44,92

Cuadro 2f. Resumen de la Rugosidad superficial promedio generada a distintos espesores de viruta con Sierra A y B (8000 RPM)

Sierra	RPM	em	Promedio Rz	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
A	8000	0,002	19,4	3,501	15,85	24,71
A	8000	0,002	19,8	5,532	13,53	28,6
A	8000	0,003	21,2	2,954	17,98	24,74
A	8000	0,004	22,8	5,564	16,05	29,99
A	8000	0,006	21,6	2,986	18,43	26,21
A	8000	0,007	22,4	3,393	16,76	25,89
B	8000	0,002	21,8	2,839	18,03	25,96
B	8000	0,003	23,0	3,444	19,87	29,33
B	8000	0,004	25,0	3,444	19,87	29,33
B	8000	0,006	27,4	2,206	24,54	30,41
B	8000	0,009	28,4	7,597	18,34	37,68
B	8000	0,011	32,5	4,906	26,77	40,15

3. Factor de esponjamiento

Cuadro 3a. Promedio Factor de Esponjamiento para Sierra A y B a 3200 RPM.

Sierra	RPM	Vf (m/min.)	h (mm)	em (mm)	fz (mm)	RMS (V)	FE Promedio
A	3200	4	5	0,004	0,023	0,095	5,7
A	3200	4	10	0,005	0,023	0,086	2,8
A	3200	4	15	0,007	0,023	0,093	3,6
A	3200	11	5	0,011	0,064	0,096	6,2
A	3200	11	10	0,015	0,064	0,093	4,7
A	3200	11	15	0,018	0,064	0,096	5,3
B	3200	4	5	0,004	0,023	0,184	7,8
B	3200	4	10	0,005	0,023	0,193	10,1
B	3200	4	15	0,007	0,023	0,295	17,4
B	3200	11	5	0,011	0,064	0,109	8,5
B	3200	11	10	0,015	0,064	0,24	9,6
B	3200	11	15	0,018	0,064	0,241	16

Cuadro 3b. Promedio Factor de Esponjamiento para Sierra A y B a 4200 RPM.

Sierra	RPM	Vf (m/min.)	h (mm)	em (mm)	fz (mm)	RMS (V)	FE Promedio
A	4200	4	5	0,003	0,018	0,098	2,8
A	4200	4	10	0,004	0,018	0,1	4,7
A	4200	4	15	0,005	0,018	0,092	2,5
A	4200	11	5	0,008	0,049	0,107	4,3
A	4200	11	10	0,011	0,049	0,118	5,9
A	4200	11	15	0,014	0,049	0,109	5,3
B	4200	4	5	0,003	0,018	0,125	7,1
B	4200	11	5	0,008	0,049	0,129	9,6
B	4200	4	15	0,005	0,018	0,131	9,3
B	4200	4	10	0,004	0,018	0,176	11,5
B	4200	11	10	0,011	0,049	0,186	13,9
B	4200	11	15	0,014	0,049	0,192	15,4

Donde

FE: Factor de Esponjamiento

Cuadro 3c. Promedio Factor de Esponjamiento para Sierra A y B a 6000 RPM.

Sierra	RPM	Vf (m/min.)	h (mm)	em (mm)	fz (mm)	RMS (V)	FE Promedio
A	6000	4	5	0,002	0,012	0,108	3,7
A	6000	4	10	0,003	0,012	0,106	2,1
A	6000	4	15	0,004	0,012	0,111	4,0
A	6000	11	5	0,006	0,034	0,133	5,5
A	6000	11	10	0,008	0,034	0,129	5,0
A	6000	11	15	0,010	0,034	0,134	5,0
B	6000	4	5	0,002	0,012	0,157	7,4
B	6000	4	10	0,003	0,012	0,173	14,1
B	6000	4	15	0,004	0,012	0,163	12,5
B	6000	11	5	0,006	0,034	0,149	6,6
B	6000	11	10	0,008	0,034	0,178	15,4
B	6000	11	15	0,010	0,034	0,159	8,4

Cuadro 3d. Promedio Factor de Esponjamiento para Sierra A y B a 8000 RPM.

Sierra	RPM	Vf (m/min.)	h (mm)	em (mm)	fz (mm)	RMS (V)	FE Promedio
A	8000	4	5	0,002	0,009	0,117	1,767
A	8000	4	10	0,002	0,009	0,13	4,133
A	8000	4	15	0,003	0,009	0,128	2
A	8000	11	5	0,004	0,025	0,148	3,467
A	8000	11	10	0,006	0,025	0,154	4,2
A	8000	11	15	0,007	0,025	0,175	4,933
B	8000	4	5	0,002	0,009	0,157	7,059
B	8000	4	10	0,002	0,009	0,267	12,559
B	8000	4	15	0,003	0,009	0,213	9,3
B	8000	11	5	0,004	0,025	0,123	7,353
B	8000	11	10	0,006	0,025	0,2	8,824
B	8000	11	15	0,007	0,025	0,176	8,824

Donde
FE: Factor de Esponjamiento