



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍA DE LA MADERA



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
DOCTORADO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA

Evaluación de tableros de fibras  
por medio de la rugosidad superficial en procesos de  
manufactura por control numérico computarizado (CNC)

Tesis para obtener el grado de

Doctor en Ciencias y Tecnología de la Madera

Presenta

Vladimir Becerril Mendoza

Director

Dr. Pablo López Albarrán

Codirector

Dr. Raúl Espinoza Herrera

Sinodales

Dr. Jorge Enrique Ambriz Parra,  
Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones,  
Dr. Francisco Javier Castro Sánchez.

Morelia, Michoacán

Diciembre de 2021.

## *Agradecimientos*

Agradezco a mi alma mater, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo “Cuna de héroes y crisol de pensadores”, a la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera y la División de Estudios de posgrados, por esta etapa de crecimiento académico y formación Doctoral.

Al Dr. Pablo López Albarrán, por mi formación Doctoral, el apoyo, impulso y conocimiento transmitido en esta etapa, impulsando siempre el alcance de esta investigación.

Al Dr. Raúl Espinoza Herrera, por la enseñanza y acompañamiento en la investigación, exposiciones y trabajo de tesis, gracias por su orientación.

A los Doctores de mi mesa sinodal; el Dr. Jorge Enrique Ambriz Parra, Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones y Dr. Francisco Javier Castro Sánchez, por sus aportaciones al tema de tesis, sus observaciones y consejos para esta investigación y mi formación.

A la Coordinadora del Posgrado, la Dra. Nancy Eloísa Rodríguez Olalde, por quien recibí apoyo en los procesos como estudiante.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Baja California “Por la realización plena del hombre”, por el apoyo para mis estudios en el Doctorado, así como el acompañamiento por el Órgano de Propiedad Intelectual de la UABC, por su asesoramiento e impulso ante la protección intelectual del diseño del mobiliario.

Gracias a mis compañeros, colegas, amigos y alumnos que aportaron de alguna manera a este trabajo.

## *Dedicatoria*

Dedico este trabajo a mi esposa Nelly, por impulsarme y apoyarme en esta y otras metas de vida.

A mi mamá Elvia y mi tía Nohema por hacerme el ser humano que cada día busco ser, gracias y les dedico este logro.

A mi papá Pascual y mi hermano Oscar por el impulso que han dado en mis diferentes etapas y ahora en este grado.

A mi hijo Santiago y mi hija Nohema, quienes me impulsaron con alegrías, y me dieron de su tiempo para este logro.

Gracias a Mary Zarate, por el apoyo, desde el inicio y hasta el final, y por la amistad.

## Contenido

Índice de cuadros .....	iii
Índice de figuras.....	v
Índice de nomenclatura.....	vii
Resumen . .....	ix
Abstract .....	xi
<b>1. Introducción</b> .....	1
<b>2. Marco teórico</b> .....	13
2.1. Calidad en el maquinado.....	13
2.2. Tecnologías de manufactura del mueble: sistemas CAD, CAM y maquinas CNC .....	23
2.3. Tableros de madera .....	29
<b>3. Antecedentes</b> .....	33
3.1. Rugosidad superficial y procesos en la madera.....	33
3.2. La rugosidad superficial en tableros MDF y operaciones en router CNC.....	35
3.3. La rugosidad superficial en tableros MDF y otros procesos .....	42
3.4. La rugosidad superficial en router CNC, en la industria del mueble.....	47
<b>4. Justificación</b> .....	51
<b>5. Objetivo general</b> .....	53
5.1. Objetivos específicos.....	53
<b>6. Hipótesis</b> .....	55
6.1. Hipótesis específicas.....	55
<b>7. Materiales y métodos</b> .....	57
7.1. Diseño experimental: variables del corte para el maquinado de vaciado .....	63
7.2. Diseño experimental: maquinado de vaciado para tableros de partículas y MDF.....	64
7.3. Diseño experimental en corte periférico y axial, para tablero MDF .....	65
7.4. Rugosidad superficial en las operaciones por router CNC para MDF .....	66
7.5. Rugosidad superficial, muebles y ensamblés .....	67
<b>8. Resultados y discusiones</b> .....	71
8.1. Resultados del maquinado, dirección, velocidad y profundidad para el maquinado de vaciado .....	71
8.2. Resultados del maquinado de vaciado para tableros de partículas y MDF.....	82
8.3. Rugosidad superficial de operación de vaciado en tableros aglomerados.....	84
8.4. Rugosidad superficial de operación de vaciado en tableros MDF.....	86
8.5. Rugosidad superficial en corte periférico y axial, para tablero MDF.....	92
8.6. Rugosidad superficial en las operaciones por router CNC para MDF .....	97
8.7. Aplicación de la rugosidad superficial en el diseño, fabricación y uso de un mueble .....	105
<b>9. Conclusiones</b> .....	111
<b>10. Bibliografía</b> .....	113
<b>11. Anexos</b> .....	129



## Índice de cuadros

Cuadro 1. Rangos típicos de rugosidad superficial mediante procesos de maquinados en el área metal mecánica (Fiel et al., 1997). .....	15
Cuadro 2. Variables que afectan la rugosidad superficial en un maquinado (Ozcelik & Bayramoglu, 2006). .....	18
Cuadro 3. Condiciones que afectan la rugosidad superficial en un maquinado (Khorasani & Yazdi, 2012). .....	18
Cuadro 4. Variables y rugosidad superficial en investigaciones previas sobre maquinados en tableros MDF. ....	42
Cuadro 5. Parámetros de corte en empresas de fabricación de muebles, en el municipio de Tijuana, B.C. ....	48
Cuadro 6. Rugosidad superficial en maquinados de corte del sector industrial. ....	49
Cuadro 7. Condiciones de los tableros a maquinar. ....	57
Cuadro 8. Características generales de las herramientas de corte. ....	58
Cuadro 9. Características de <i>Router Techno</i> CNC LS Series 4896. ....	59
Cuadro 10. Condiciones para el experimento preliminar de maquinado por vaciado en MDF. .	64
Cuadro 11. Parámetros del diseño del experimento de maquinados de vaciado en tableros de partículas y MDF. ....	65
Cuadro 12. Parámetros del diseño experimental, para evaluar el corte periférico y axial. ....	66
Cuadro 13. Parámetros del diseño experimental, para evaluar la operación de corte y barrenado. ....	66
Cuadro 14. Parámetros del diseño experimental, para evaluar la operación del vaciado. ....	67
Cuadro 15. Parámetros del diseño experimental, de la rugosidad para el ensamble suave. ....	68
Cuadro 16. Rugosidad superficial con las variables de velocidad de avance, profundidad de corte y dirección del corte. ....	72
Cuadro 17. Resultados estadísticos de las variables de la rugosidad superficial $R_a$ , $R_q$ y $R_z$ , en tableros MDF. ....	76
Cuadro 18. Tabla ANOVA de la operación de vaciado, corte axial en MDF. ....	77
Cuadro 19. Resumen del ANOVA para los factores de las variables dependientes de $R_a$ , $R_q$ y $R_z$ , en corte axial. ....	79
Cuadro 20. Resumen del ANOVA y las interacciones entre factores de las variables dependientes de $R_a$ , $R_q$ y $R_z$ , entre tableros MDF. ....	79
Cuadro 21. Comparación por parejas de Tukey, en un coeficiente de confianza de 95%, en tableros MDF. ....	80
Cuadro 22. Resumen estadístico de la rugosidad superficial en maquinado de vaciado, para diferentes tipos de tableros. ....	83

Cuadro 23. Tabla ANOVA del experimento en tableros aglomerados. ....	84
Cuadro 24. Comparación por parejas de Tukey, para tableros aglomerados en maquinado de vaciado.....	86
Cuadro 25. Tabla ANOVA del experimento, tableros MDF. ....	88
Cuadro 26. Comparación por parejas de Tukey, para tableros MDF en maquinado de vaciado. ....	90
Cuadro 27. Rugosidad superficial del maquinado de corte periférico, herramienta de un filo. ..	93
Cuadro 28. Rugosidad superficial del maquinado de corte periférico, herramienta dos filos. ...	93
Cuadro 29. Resultados de rugosidad superficial para el tablero MDF maquinado de vaciado... ..	95
Cuadro 30. Resultados de rugosidad superficial para el tablero MDF maquinado de corte lado derecho. ....	96
Cuadro 31. Resultados de rugosidad superficial para el tablero MDF maquinado de corte lado izquierdo.....	96
Cuadro 32. Resumen estadístico de rugosidad superficial del proceso de corte. ....	98
Cuadro 33. Resumen estadístico de rugosidad superficial del proceso del vaciado a 2mm de profundidad. ....	98
Cuadro 34. Resumen estadístico de rugosidad superficial en el vaciado a 4mm de profundidad. ....	99
Cuadro 35. Resumen estadístico de rugosidad superficial del proceso de barrenado. ....	100
Cuadro 36. ANOVA del proceso de corte, para $Ra$ , $Rq$ y $Rz$ . ....	101
Cuadro 37. ANOVA del proceso de vaciado, para $Ra$ , $Rq$ y $Rz$ . ....	102
Cuadro 38. ANOVA del proceso de barrenado, para $Ra$ , $Rq$ y $Rz$ . ....	102
Cuadro 39. Comparación por parejas de Tukey, de los parámetros de maquinado, en las operaciones de vaciado, barrenado y corte.....	104
Cuadro 40. Valores promedios de la rugosidad superficial y la fuerza de agarre en el ensamble. ....	108

## Índice de figuras

Figura 1. Categorías que se integran en el diseño industrial de un mueble (Rodríguez, 2004). .	13
Figura 2. Perfil de la Rugosidad superficial y sus parámetros. ....	15
Figura 3. Variables que intervienen en el maquinado con un cortador en el router. ....	17
Figura 4. Variables de corte dentro del material de trabajo.....	17
Figura 5. Ensamblajes de madera con aplicación CAD/CAM y CNC, a) esquinado, b) en T, c) de marco, d) empalme con llave y e) empalme; (Gros, 2001). ....	28
Figura 6. Perfil de densidad de un tablero MDF de 18 mm de espesor, (Thoemen et al., 2010).	31
Figura 7. Probetas de corte proporcionadas por Noble Millwork y Redworks Industries.....	49
Figura 8. Gráfica de los perfiles de densidad de los tableros, en el espesor de los MDF. ....	58
Figura 9. Herramientas de corte utilizadas en la investigación: a) cortador de punta V90, b) cortador recto 2 filos y c) cortador recto un filo. ....	59
Figura 10. Equipos utilizados: a) router CNC, b) Rugosímetro y c) Banco de pruebas. ....	60
Figura 11. Esquema de tipos de maquinados a realizar en las probetas.....	61
Figura 12. Zona de medición de la rugosidad superficial en las operaciones de maquinado y trayectoria del maquinado, a) operación de corte, b) operación de vaciado, y c) operación de barrenado.....	62
Figura 13. Plano de las dimensiones de probetas para el ensamble suave.....	68
Figura 14. Maquinado de la probeta de MDF con los maquinados del diseño experimental preliminar. ....	71
Figura 15. Gráfica de la rugosidad superficial en relación con la profundidad. ....	72
Figura 16. Gráfica de la rugosidad superficial en relación con la velocidad de corte. ....	73
Figura 17. Gráfica de la rugosidad superficial en función de la dirección de corte.....	73
Figura 18. Gráfica del análisis por bloques, tablero A de densidad $759 \text{ kg/m}^3$ y tablero B de densidad $652 \text{ kg/m}^3$ .....	74
Figura 19. Gráfica de la rugosidad superficial en función de la densidad del tablero en cada capa.....	75
Figura 20. Graficas de residuos para la rugosidad superficial $R_a$ , corte axial en MDF. ....	78
Figura 21. Gráfica de interacción entre factores y niveles para $R_a$ , en tableros MDF.....	81
Figura 22. Probetas de maquinado de vaciado, en la medición de la rugosidad superficial. ....	82
Figura 23. Tablero de partículas a base de lignina despolimerizada, maquinado por medio de vaciado, no se logró medir la rugosidad de superficial debido a la porosidad.....	83
Figura 24. Gráfica de efectos principales en los tableros aglomerados. ....	85



Figura 25. Medición de la superficie maquinada en un corte axial, en el tablero MDF.....	87
Figura 26. Gráfica de caja la rugosidad superficial en los diferentes tableros MDF.....	88
Figura 27. Gráfica de efectos principales en los tableros MDF. ....	89
Figura 28. Perfiles de rugosidad superficial.....	91
Figura 29. Rugosidad superficial 3D del maquinado por vaciado, a) $Ra=9.19 \mu\text{m}$ , y b) $Ra=16.06 \mu\text{m}$ .....	91
Figura 30. Ejemplo de la operación del vaciado. ....	92
Figura 31. Perfil de rugosidad superficial, corte periférico de tablero MDF. ....	94
Figura 32. Rugosidad superficial 3D del maquinado por corte, lado izquierdo; a) Rugosidad Superficial mínima $Ra=13.617 \mu\text{m}$ , b) Rugosidad superficial máxima $Ra=18.16 \mu\text{m}$ . ....	94
Figura 33. Mediciones de la rugosidad superficial, a) vaciado, b)corte izquierdo y c) corte derecho. ....	95
Figura 34. Gráfica de efectos principales de los procesos de maquinado para $Ra$ .....	103
Figura 35. Configuración con muebles modulares diseñados. ....	106
Figura 36. Vista de las piezas del mueble modular. ....	106
Figura 37. Detalles de los ensambles del mueble modular y la adaptación de las probetas. ....	107
Figura 38. Gráfica del esfuerzo del ensamble, para $Ra$ de 12.442 y 15.13 $\mu\text{m}$ .....	109
Figura 39. Grafica de dispersión de la rugosidad superficial y la fuerza de agarre. ....	109

## Índice de nomenclatura

$R_a$	Desviación media aritmética de la rugosidad del perfil.
$R_z$	Altura máxima del perfil de la rugosidad
$R_q$	Rugosidad media cuadrática
$L_m$	Largo de la medición
$V_c$	Velocidad de corte
$D$	Diámetro de la herramienta
$f_t$	Velocidad de rotación
$V_a$	Velocidad de avance
$f_z$	Avance por diente
$Z_n$	Número de dientes
$\%C_z$	Avance por diente porcentual
$a_p$	Profundidad de corte
$a_p$	Ancho de corte
$T_1$	Altura de profundidad/ ondulación
$t$	Profundidad del paso del diente
$\delta$	Densidad
$\% C. H.$	Porcentaje de contenido de humedad
pMDI	Mitelendifenil diisocianato
MUF	Melamina urea formaldehido
TF	Tanino formaldehido
$e_m$	Espesor de materiales
MDF	Tableros de fibras de densidad media
MDP	Tablero de partículas de densidad media
CAD	Diseño asistido por computadora
CAM	Manufactura asistida por computadora
CNC	Control numérico computarizado
CAE	Sistemas de Ingeniería Asistida por Computadora
GL	Grados de libertad
SC	Suma de cuadrados
CM	Cuadrados medios



## Resumen

La rugosidad superficial es un indicador directo de la calidad del proceso de sustracción de material, en donde influye el material de trabajo, la herramienta de corte, la máquina herramienta y los parámetros de corte. Esta tesis presenta una investigación de las operaciones de maquinado del router de control numérico computarizado (CNC); al evaluar los tableros de fibras de densidad media (MDF) en los procesos de corte, vaciado y barreado. La rugosidad se midió con un perfilómetro de contacto para medir el promedio de rugosidad ( $Ra$ ), la altura media de pico a valle ( $Rz$ ) y la raíz cuadrada media ( $Rq$ ), del perfil de la superficie maquinada. Las variables que se manejaron dentro del proceso de maquinado fueron la velocidad de avance, la velocidad de rotación, la profundidad de corte, la herramienta de corte y cinco tableros a base de madera. El análisis estadístico fue por medio de un diseño factorial, de tres niveles, con seis réplicas. Revisando la significancia de cada factor y los efectos de interacción por medio de un análisis de la varianza, se utilizó el método de Tukey, como parte del análisis estadístico de las variables de respuesta que identifican la rugosidad superficial en la investigación. Los resultados presentados indican los diferentes rangos de rugosidad superficial en cada proceso de maquinado y entre los diferentes tableros, identificando los parámetros de corte que influyen en la calidad de la superficie maquinada, se encontró que el incremento de la velocidad de rotación reduce significativamente la rugosidad superficial, a menor densidad del tablero se incrementa la rugosidad superficial, mientras que el incremento de la velocidad de avance incrementa la rugosidad superficial, lo que coincide con otras investigaciones. Finalmente se presenta la aplicación en el diseño de un mueble modular de empaque plano, listo para ensamblar sin el uso de accesorios adicionales, indicando cómo se pueden modificar los parámetros de mecanizado para lograr un ensamblaje suave e identificar la rugosidad de la superficie que se requiere en las áreas de contacto de las piezas del mueble.

Palabras clave: Rugosidad superficial, tableros de fibras, operaciones de maquinado, control numérico computariza,



## **Abstract**

Surface roughness is a direct indicator of the quality of subtraction manufacturing, influenced by the work material, cutting tool, machine, and cutting parameters. This thesis investigates the milling operations of the computer numerical control (CNC); when evaluating medium density fiberboard (MDF) in the cutting, grooving, and drilling processes. A contact profilometer was used to measure roughness average ( $Ra$ ), mean peak-to-valley height ( $Rz$ ), and Root-mean-square ( $Rq$ ). The independent variables within the machining process were the feed rate, the spindle speed, the depth of cut, the cutting tool, and five wood bases panels. The statistical analysis utilized a factorial design, of three levels, with six replications, the significance of each factor and the interaction effects through an analysis of variance. The Tukey test was used as part of the statistical analysis of the response variables that identify surface roughness in the investigation. The results presented indicate the different ranges of surface roughness in each machining process and between the boards; identifying the different cutting parameters that influence the quality of the machined surface, it was found that increasing the spindle speed significantly reduces roughness. Furthermore, the lower the density of the board, the surface roughness increases, while the increase in the feed rate of advance increases the surface roughness, which coincides with other investigations. Finally, is presented in the design of flat-packed modular furniture, ready to assemble without additional accessories, indicating how the machining parameters can be modified to achieve a smooth assembly and identify the surface roughness required in the contact areas of the furniture parts

Keywords: Surface roughness, fiberboard, milling operations, computer numerical control.



## **1. Introducción**

La elaboración de muebles es una de las actividades más antiguas del mundo, esta actividad ha evolucionado al pasar del tiempo en avances de diseño y al desarrollo tecnológico, pero a pesar de lo anterior, hoy en día el sector del mueble es aún una industria que ocupa un alto porcentaje de trabajo manual y maquinaria convencional para realizar los procesos de barrenado, escopleado, moldurado, grabado, corte transversal, corte longitudinales, doblado, entre los procesos que se requieran por características del diseño o capacidad de producción de la empresa (González et al., 2016). Los países más industrializados han conseguido sustituir el trabajo humano por máquinas sumamente sofisticadas, obligados por el alto costo de este (ONUUDI, 2016), aunque dicha automatización ha sido fomentada gracias al desarrollo de tableros (paneles) de madera, que permiten y favorecen operaciones mecánicas en los equipos automatizados (Laika, 1990).

En la actualidad tanto a nivel educativo, industrial, como artístico, los diseños de productos suelen desarrollarse en algún momento en sistemas de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés), esta herramienta permite crear modelos/prototipos/diseños de manera rápida, con exactitud en sus características, y con la posibilidad de realizar diseños altamente complejos en virtud de la retroalimentación visual que ofrecen (Manja et al., 2013); si bien estos programas nos dan una visión virtual del diseño elaborado, el paso más importante de todo el proceso es a fin de cuentas el de materializarlo, ya sea como prototipo o para su producción. Una opción tecnología es el uso de un sistema de Manufactura Asistido por Computadora (CAM, por sus siglas en inglés). En esta etapa se generan ajustes en la propuesta que depende de las características de la maquinaria de control numérico computarizado (CNC, por sus siglas en inglés), y de la materia prima a maquinar como es la madera, de manera que se mejore el tiempo de fabricación y el uso del material (Manja et al., 2013). Por otra parte, el análisis entre el diseño y la producción, señala la importancia del uso de las tecnologías CAD/CAM y CNC, al optimizar material, reducir costos y tener calidad del producto (Su et al., 2014). El uso de tecnología CAM/CNC en el diseño de muebles optimizados por CNC, implican: innovaciones, soluciones ergonómicas, facilidad de producción, transporte, almacenamiento lo que se refleja en propuestas



económicas y funcionales (Šimek et al., 2013).

En México, se tiene un tipo de industria semi-desarrollada de capacidades instaladas ociosas y bajos volúmenes, con poca maquinaria especializada y un gran número de pequeñas empresas (Espinoza, 2012). González et al., (2016) coincide con la descripción de la industria del mueble e indican con respecto a la situación de la industria en México, que no es posible satisfacer demandas de gran volumen por falta de maquinaria y tecnología dado que se elevan los costos y afectan la calidad y competitividad respecto a la industria global. La industria mueblera en México se encuentra en un proceso de actualización en el uso de nuevas tecnologías, la automatización de sus procesos de manufactura, y el uso de nuevas materias primas. Mientras que la producción del mueble en México está en crisis, el crecimiento de este sector es mínimo, esto por el rezago tecnológico, capacidad instalada ociosa, bajos volúmenes de producción y el impacto de las importaciones.

La industria del mueble se integra por pequeñas, medianas y grandes empresas, se tiene el mueble tradicional, el mueble artesanal y los nuevos productos que han desarrollado conceptos por innovación y diseño a partir de funcionalidad y confort del usuario, esto ha permitido que México genere exportaciones del mueble principalmente a los Estados Unidos un 86.6% de las exportaciones nacionales y en una minoría al resto del mundo con un 8.4% y el Acuerdo Transpacífico de Cooperación Económica (TPP) con un 5%, mientras que las importaciones de muebles al país, se centran en el resto del mundo con un 59.6%, después en los Estados Unidos con un 34.2% y finalmente en TPP con un 6.3% (México, 2015). Es importante mencionar que el 43% de producción de muebles se concentra en el centro del país y está fraccionada en miles de pequeños y micro negocios (De La Torre, 2017). En 2018, México fue el treceavo productor de la industria de muebles a nivel mundial, y el segundo proveedor de muebles de Estados Unidos, es importante señalar que estas industrias exportadoras hacen uso de software especializado en la industria para el diseño, fabricación y optimización de corte (UIN, 2018). En el 2017 se identifican los estados con mayor aportación al Producto Interno Bruto (PIB) en la industrial, siendo el Estado de México, Jalisco, Nuevo León y Baja California, los cuatro principales (camdi, 2017). A partir de esto, se identifica la oportunidad del mercado de exportación y por otra parte la amenaza de las

importaciones, en estos dos casos se requiere que la industria del mueble sea competitiva. Debe señalarse que la industria del mueble, se comporta de diferente manera en cada estado del país y región, se han realizado estudios, análisis y reportes de la situación del sector del mueble, presentando a continuación una revisión de los estados de Durango, Jalisco, Puebla, Michoacán y Baja California.

En Durango la integración de la microindustria de muebles de madera se encontró en búsqueda de la competitividad. La industria mueblera está considerada como una actividad de tradición familiar, joven, con poca resistencia al cambio y de estilo predominantemente artesanal, de escaso diseño y poco avance tecnológico. Para mantenerse en el mercado nacional y estar en posibilidades de competir en el mercado internacional, el sector requiere mejorar sus procesos productivos, desarrollar sus diseños y canales de distribución. La industria está enfrentando una fuerte competencia de muebles importados en el mercado nacional, así como la integración de nuevas materias primas como es la utilización de tableros MDF (Gutiérrez Viggers, 2003). Resulta claro que el rezago de tecnología incurre en baja escala de producción y en mayores costos de fabricación, limitando los segmentos del mercado potencial. La tecnología permite ofrecer mejores satisfactores con mayor calidad, bajo costo y a una mayor velocidad de producción y entrega (Gutiérrez Viggers, 2004), por lo que la microindustria del mueble debe integrar el uso de maquinaria automatizada como es el router CNC.

En Jalisco desde el año 2000, las medianas y grandes empresas, identificaron la necesidad de modificar y simplificar sus procesos, así como incluir nueva maquinaria en etapas del proceso que anteriormente se hacía a mano, todo esto como parte de innovar ante la apertura comercial (López Méndez & Montes Reyes, 2001). En Jalisco al igual que en México la industria del mueble está considerada como una industria de tradición familiar, con poca resistencia al cambio y estilo predominante artesanal. Hasta hace algunos años el nivel de calidad del mueble mexicano era el adecuado para el mercado nacional; sin embargo, para mantenerse en éste y estar en posibilidades de competir con el mercado internacional, el sector ha requerido actualizar sus procesos y su mentalidad. Estas empresas ocupan menos del 50% de su capacidad instalada, son intensivas en mano de obra y tienen una orientación

artesanal de bajo volumen, lo que origina un bajo crecimiento en su productividad, por su parte, China ha desplazado a México en el mercado de Estados Unidos, mientras que China tiene una creciente inversión en ciencia y tecnología dentro del sector, en México es escasa este tipo de inversión. También cada día hay una mayor competencia al estar disminuyendo las exportaciones de este sector e incrementar las importaciones de muebles a México. La industria del mueble de madera presenta diversos esquemas de producción dependiendo al segmento que están dirigidos: muebles producidos en serie, muebles de madera artesanal, muebles para oficina, muebles para cocina. Dentro de las debilidades de la industria del mueble en el aspecto tecnológico se define la falta de tecnología en la maquinaria de fabricación (UTZMG, 2009). Lo anterior prevalece en al presente, en donde el volumen de ventas del 2019, se define en los siguientes segmentos: muebles sueltos de maderas comerciales, juego de muebles de maderas comerciales, muebles de oficina de maderas aglutinadas, muebles sueltos de maderas preciosas, juego de muebles de madera aglutinada, muebles oficina de maderas comerciales, siendo su proporción de volúmenes de venta en un 62%, 7%, 17%, 7%, 1%, 3%, respectivamente, teniendo que los muebles generados por tableros a base de madera corresponden a un 18% del total (PORTE, 2019b).

En los últimos años Jalisco ha tenido una modernización de sus plantas industriales, un incremento en sus exportaciones y con la apuesta del sector mueblero a profundizar en su integración a la industria 4.0, para lograr competir en las exportaciones con China, Vietnam y Canadá (Mercedes, 2018). Del 2009 al 2018 la industria del mueble de madera ha incrementado su número de trabajadores, también del 2009 al 2016 se incrementaron el número de patrones permanente, pasando de 966 a 1036 en el estado de Jalisco y las exportaciones de muebles se han incrementado desde el 2009 hasta el registro que se tiene del 2018 (*Ficha Sectorial Cifras Empleo IMSS Trabajadores Asegurados*, 2018). El crecimiento de la industria del mueble vendrá asociado a tres fenómenos: Primero, el continuo desarrollo urbanístico, especialmente de las urbes más grandes. Segundo, el boyante sector turístico, con nuevos complejos en las costas del país. Tercero, el aumento de edificios corporativos. A pesar de esta concentración geográfica, la industria del mueble está fraccionada en miles de pequeños y micro negocio. Sólo en el Estado de Jalisco, casi 30,000 de las 33,600 empresas registradas en 2014 eran micro-negocios (hasta diez empleados). Apenas 222 firmas tenían

más de 100 empleados. Y sin embargo, la producción mexicana, al generarse mayoritariamente en pequeños negocios de tamaño familiar, carece la financiación necesaria para incorporar innovaciones tecnológicas y obtener producciones industriales mayores para la exportación (De La Torre, 2017).

En Puebla la competencia de la industria del mueble de madera se ha visto afectada por el mercado global, empresas en donde sus exportaciones representan el 30% de su producción y se ven directamente afectadas por la competencia global de China, Vietnam e India, quienes tienen fuerte presencia en tiendas departamentales del país (Hernández, 2017).

En Michoacán de Ocampo se define una proporción de un carpintero por cada 100 personas ocupadas lo que indica la importancia dentro del estado del sector del mueble. La fabricación de muebles ya sea artesanal o industrial, es una actividad que sobresale en las comunidades de habla indígena, los municipios de Uruapan, Nahuatzen, Paracho y Cherán que pertenecen a la Meseta Purépecha, a estos se suman los municipios de Hidalgo, Morelia, Uruapan y Nahuatzen, que se encuentran entre los principales productores de muebles, a pesar del comportamiento de la producción de muebles ha sido favorable en los últimos años, no se han tenido estrategias para el desarrollo regional o estatal que ayuden a fomentar el sector (Fregoso Jasso et al., 2018). De aquí que se puede definir que el sector del mueble artesanal puede ser competitivo al contar con una gran identidad y valor cultural para ofrecer de manera local, nacional e internacionalmente, dejando en un segundo plano la integración de tecnología CAD/CAM y CNC. Mientras que municipios como Hidalgo, en donde sus empresas se caracterizan por ser de estructura familiar y de micro, pequeño o mediano tamaño, así como de emprendedores en donde se tiene la tradición familiar y que generan el nuevo taller para lograr una independencia económica (Silvestre Ramírez et al., 2017), es importante considerar el cambio tecnológico, en donde se capacite y se den a conocer los alcances tecnológicos CAD/CAM y CNC, para lo cual se requiere difusión de estas tecnologías, financiamiento y apoyos gubernamentales.

En Baja California se tiene una gran proporción de exportaciones dentro del sector del mueble, el 35.4% de las exportaciones del total nacional, esto por su ubicación transfronteriza (UIN, 2018), en años anteriores se perdió la competitividad de este sector, en la región de

Tijuana-Rosarito, B.C., en donde el Diseño como factor de ventaja representa únicamente el 11%, de las empresas y solo el 50% de las empresas encuestadas cuentan con maquinaria y equipo moderno, a juicio del Vega et al., (2010), se recomienda la necesidad de crear por parte de los empresarios un centro de diseño e innovación. También se puede integrar la necesidad de modernizar el equipo y procesos de fabricación, para lograr la competitividad global.

Ahora bien en los últimos diez años el comercio internacional de muebles ha crecido más rápido que la producción de muebles, los principales países importadores son Estados Unidos, Alemania, Francia y el Reino Unido, mientras que las exportaciones están concentradas en su mayoría por China, Alemania, Polonia, Italia y Vietnam (PORTE, 2019a).

En Estados Unidos a partir de 1957 la tecnología CNC fue aceptada por la industria, principalmente en el área metalmecánica y en 1980 por la industria del mueble (Wiedenbeck & Parsons, 2010). La tecnología CNC y la tecnología CAM, comenzó a ser más accesible, para las medianas empresas y algunas pequeñas empresas del sector del mueble después de los años noventa, al integrar esta tecnología se demostró cómo se puede agilizar proceso del diseño, la producción y hasta las ventas. Algunas observaciones sobre la adopción de clasificaciones de mecanizado CNC proporcionadas por 67 empresas encuestadas con capacidades de mecanizado CNC indicaron en lo general que: "Los nuevos equipos CNC son fáciles de aprender a operar y programar" y "Cada máquina CNC comprada ha llevado a un aumento de las ganancias". La precisión mejorada del mecanizado fue ampliamente reconocida como una ventaja asociada con el mecanizado CNC. Se indica que la tecnología CAD, CAM y CNC se integra fácilmente en las empresas medianas y grandes, pero se observó una resistencia por las pequeñas empresas: por espacio, un mal entendimiento del costo-beneficio y resistencia al cambio (Wiedenbeck et al., 2009). Los talleres pequeños que han integrado esta tecnología han logrado ampliar su mercado.

Es importante conocer que la competencia extranjera en México puede afectar a la industria nacional si no cuenta con los medios y estrategias para ser competitivo, por ejemplo, se proyecta la apertura de la primera tienda IKEA en México con el concepto de diseño y bajo costo (low cost), con la planta de producción en Saltillo, Coahuila (PORTE, 2019c). Beneficiando con la gran inversión extranjera, en la generación de empleos y ampliando la

oportunidad de proveedores de materias primas y consumibles, pero sin identificar como afectara a las micros, pequeñas y medianas empresas del país y que tendrán que mejorar sus procesos, costos y propuestas de diseño de muebles. Sin embargo, la llegada de IKEA implica la necesidad de profesionistas preparados para las líneas de producción y adaptaciones al mercado nacional.

Se han generado estrategias para el impulso de la modernización de equipo y tecnología, esto se indica en el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 mediante la política “México Próspero”, en donde se plantea acceso al financiamiento y generar la política orientada a apoyarlas a las MiPymes productivas, formales y a los emprendedores. Estas acciones se reflejan en el programa de estímulos para la innovación, ofertada en el Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) y el Sistema Regional de Innovación SRI cuarta hélice: sociedad, educación, gobierno y empresa (Peña, 2013). Dentro del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 de los tres ejes propuestos esta investigación impacta en el eje 3: Desarrollo económico, y en las estrategias: 3.3 al Promover la innovación, la competencia, la integración en las cadenas de valor y la generación de un mayor valor agregado en el sector productivo bajo un enfoque de sostenibilidad y en la estrategia 3.10 al fomentar un desarrollo económico que promueva la reducción de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero y la adaptación al cambio climático para mejorar la calidad de vida de la población (PND, 2019). También el CONACYT ha establecido nuevas políticas de Ciencia, Tecnología e Innovación, a través de cinco ejes estratégicos: 1) Fortalecimiento de la comunidad científica; 2) Ciencia de frontera; 3) Programas Nacionales Estratégicos (Pronaces); 4) Desarrollo tecnológico e innovación abierta, y 5) Acceso universal al conocimiento con el objetivo de potenciar y articular las capacidades de investigación diseminadas en el territorio nacional, para de esta manera, contribuir en la solución de los grandes retos que enfrenta México en materia social, ambiental y de salud (Álvarez-Buylla, 2020; Conacyt, 2020). Para lo que es necesario generar y divulgar investigaciones, estudios, análisis y reportes que favorezcan al sector del mueble en sus diferentes niveles, un buen ejemplo es definir los beneficios y alcances de la tecnología CAD/CAM y CNC y de las nuevas materias primas que se deben integrar a la industria del mueble de manera que se justifique la inversión en esta tecnología y permita ser competitivos dentro del mercado.

La oferta en México de router CNC, se ha incrementado en los últimos años, encontrando ahora diferentes marcas de países como: Japón, China, Italia, Alemania, Estados Unidos, así como marcas nacionales, los equipos pueden variar desde doscientos mil pesos de los más básicos, o equipos más sofisticados que superan el millón de pesos, la diferencia entre los diferentes equipos, es su capacidad de producción y alcance de calidad. Las empresas que venden router CNC, ofrecen diferentes financiamientos e impulsan a emprendedores de manera que integren esta tecnología en su producción, también ofertan otros equipos CNC, como corte laser, plasma e impresión 3D y software CAD y CAM. Dentro de las características de los router CNC, los hay para producciones bajas, producciones medias y centros de maquinado con mayor potencial para grandes volúmenes de producción, en todos los casos tienen la versatilidad de producir diferentes tipos de piezas en diferentes materias primas como son los tableros a base de madera (Mueble equipo, 2019), es importante reconocer que integrar un router CNC dentro de la producción permite la eficiencia, eliminando el error humano, siendo competitivos en el mercado a un ritmo rápido, ya que esta maquinaria permite hacer una amplia gama de procesos como es cortar, ranurar, tallar, grabar y barrenar (Visión, 2020). De esta manera, estos equipos se pueden integrar a las pequeñas, medianas y grandes empresas.

La calidad de un proceso de maquinado se define por las características de la superficie, en el caso de los equipos CNC, por ser un proceso de sustracción de material, la calidad se define por el proceso de desbaste, las características de la materia prima y de la herramienta. De manera microscópica la superficie presenta irregularidades e imperfecciones, con relación a la superficie nominal (Groover, 2007). La rugosidad superficial en la madera es una propiedad importante que influye en procesos, lijado y terminados (Klaus et al., 1995; Taylor et al., 1999). Asimismo, es resultado de los diferentes procesos de corte: lijado, corte con sierra circular, sierra de banda y brocas. La rugosidad influye en el atractivo estético, generando una percepción visual y al tacto (Jakub & Martino, 2005), lo que resulta en calidad y un valor agregado al producto.

Los tableros de madera a base de fibras, partículas y chapas, son de los materiales más requeridos para la elaboración de muebles, productos de construcción y decoración, esto por

sus dimensiones, características, propiedades y costo. Referente a estos materiales la *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2014), indica la evolución de los materiales de madera que sustituyen la madera sólida, refiriéndose a los tableros laminados, listonados, de chapas, fibras, hojuelas y compuestos. Aunado a la anterior, el procesado de los nuevos tableros (paneles) de madera requiere del conocimiento de su composición para promover el aprovechamiento de la infraestructura nacional, así como un escenario de desarrollo hacia su automatización. En otros países como Italia, una de las potencias en el área de diseño de muebles de madera, en donde al igual que México se integra por un gran número de empresas pequeñas y con un tipo de industria que se caracteriza por el diseño artesanal, esto con la diferencia del tipo de maquinaria y equipo que utiliza; se tiene registrado en el 2015 que en Italia el 81.4% de la industria del mueble de madera usa la tecnología CNC, siendo la industria de la madera y mueble la que mayor impacto tiene en el uso de estos equipos (Mecelli, 2015). Italia utiliza grandes cantidades de tableros de partículas para la fabricación de muebles. El consumo de MDF (tablero de fibra de densidad media) está creciendo constantemente y solo se utilizan pequeñas cantidades de tableros listonados. La industria del mueble internacional ha visto un incremento del uso de tableros MDF, desplazando el uso de los tableros de partículas, como es el caso de Italia y España, los tableros de MDF, se utilizan principalmente en la fabricación de muebles de dormitorio, al tener las ventajas de una textura plana, resistencia a los insectos y menor riesgo de agrietarse como es el caso de la madera sólida, también los elementos de tableros permiten ensamblarse fácilmente y al tener un precio más accesible, son cada vez más populares (ITTO/UNCTAD/WTO, 2004).

Siendo los tableros a base de madera, materiales potenciales para la fabricación de muebles con procesos de transformación por medio de máquinas CNC. La industria del mueble de madera se ha alejado de las fuentes de materia prima del mercado nacional, en México el 73% de la madera que se consume es importada y el 23% nacional (Mueblequipo, 2019), lo mismo sucede con los tableros de madera. La necesidad de alcanzar y satisfacer estándares internacionales en el diseño, manufactura y acabado de muebles de madera requiere que se disponga de tableros que sean capaces de soportar su mecanizado en procesos automatizados (CNC) y que nos lleven a la producción de muebles con costos mínimos y calidad superior a lo que ofrecen los actuales proveedores.



De esta forma concluimos que desde una perspectiva general, podemos identificar claramente los diferentes tipos de industria del mueble en México, en donde se encuentra el mueble artesanal, el mueble generado por las Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (MiPymes) y el del sector industrial con capital extranjero o que exporta parte de su producción, de aquí definimos que no es adecuado integrar las tecnologías CAD/CAM y CNC en el sector artesanal, mientras que las industrias de capital extranjero o que exportan muebles ya manejan algunas de estas herramientas tecnología, es necesario ver a las MiPymes como un sector clave en donde las tecnologías CAD/CAM y CNC se pueden integrar, permitiendo la competitividad ante las importaciones de mobiliario, para ampliar su mercado y lograr cumplir con requerimientos de exportar. Este trabajo de investigación genera conocimiento tanto para las MiPymes, como las grandes empresas, que cuenten o estén por integrar equipos CNC al incidir en la calidad de las piezas producidas con esta tecnología.

Es importante mencionar que los pronósticos de crecimiento y desarrollo del sector del mueble en el presente son inciertos debido a la pandemia del COVID-19, por una parte se reporta que los fabricantes de tableros y el comercio de la madera han sido afectados por la pandemia del COVID-19 (NotiFix, 2020). Pero también se abren nuevos mercados, por ejemplo: el caso de Ikea, que fortaleció su comercio en línea y su categoría de oficina en casa, logrando beneficios en esta situación. (Herrera, 2020), o el incremento de la demanda del tipo de mobiliario para exterior, con base en la nueva normalidad y en donde los espacios abiertos son más seguros y se solicita a los comercios contar con estas áreas. Pero tanto las grandes empresas en donde se cerró el comercio exterior, como fabricantes pequeños están siendo afectados, teniendo que adaptarse a los cambios, tecnológicos, de materias primas y del mercado.

A partir de lo anterior, en esta investigación se evalúan los tableros de fibras comerciales, generando conocimiento que apoya a la manufactura al identificar los procesos y características de maquinado, integrando las herramientas tecnologías CAD/CAM y CNC, eliminando la brecha que existente entre estas. Los tableros a base de madera, se encuentran en un constante cambio, integrando diferentes procesos, y materias primas; entre estos el tipo de partículas o fibras y la cantidad y tipo de resina, con una tendencia de ofrecer tableros

amigables con el medio ambiente y el interés del consumidor de productos saludables que incluye la adquisición de productos funcionales, estéticos, económicos y de calidad, lo cual es resultado de un proceso de diseño que da solución a las necesidades actuales, logrando la fabricación de muebles por medio de herramientas tecnológicas, para lo cual se definen características de maquinado y de los tableros de madera, que pondere la parte tecnológico en las operaciones de maquinado y en el diseño de mobiliario, en el caso práctico de un ensamble suave para muebles de empaque plano (flat pack), listos para armar.



## 2. Marco teórico

Se presentan el marco teórico dentro de cuatro categorías; calidad en los maquinados, tecnología de manufactura del mueble, tableros de madera y antecedentes de revisión de investigaciones previas que abordan el tema de rugosidad superficial en tableros MDF. Estas cuatro categorías logran integrarse dentro de la industria mueblera desde el diseño del mobiliario con la expresión, función, tecnología y comercio (Rodríguez, 2004), que definen el aspecto y forma del mueble y que garantizan el éxito del mueble en el mercado. En la Figura 1 se identifica que un mueble debe integrar diferentes atributos y elementos, los cuales se encuentran en constante cambio. En el presente trabajo nos enfocamos en la tecnología, con los tableros de fibras como materia prima, el router CNC en los procesos y la calidad y tiempos como parte de los costos. Este conocimiento incide favorablemente en la función, expresión y comercio del mueble.

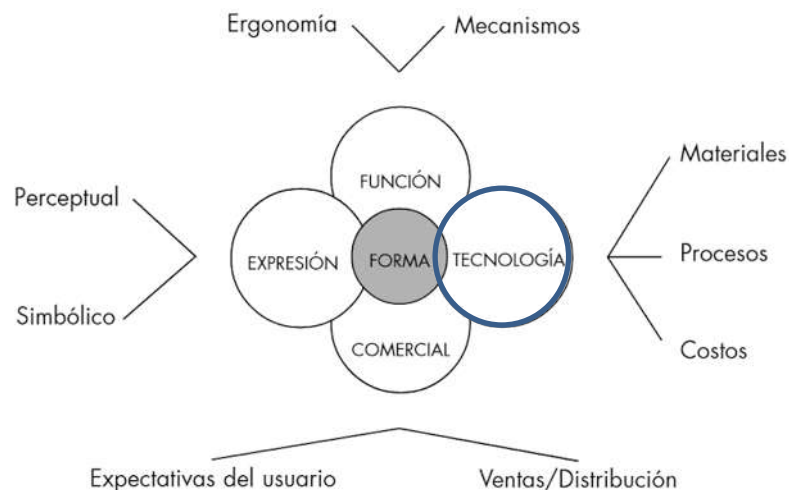


Figura 1. Categorías que se integran en el diseño industrial de un mueble (Rodríguez, 2004)

### 2.1. Calidad en el maquinado

La Calidad se define como la propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor (REA,2001), a partir de la calidad se definen los criterios para catalogar si un producto es bueno o malo de acuerdo con las especificaciones previamente establecidas, por los procesos de manufactura y las propiedades del material (Cubillos

Rodríguez & Rozo Rodríguez, 2009). En los procesos de fabricación, las variables del proceso deben manejarse para alcanzar estándares de calidad (Ramos-Maldonado & Aguilera-Carrasco, 2021). Para identificar la calidad, es necesario: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar, -DMAIC, por sus siglas en inglés- y esto permite precisar los estándares de calidad (Uddin, 2021). En el proceso de fabricación de mobiliario se tienen diferentes etapas; que inician desde la obtención de materia primas, seguido de los procesos de manufactura donde se da forma de las piezas que construye el mueble, el ensamblado, la aplicación de recubrimientos y el proceso de empaque. Las calidades en las diferentes etapas del proceso están influenciadas por la mano de obra, la capacidad del equipo y las características del material (Uddin, 2021).

La calidad de un producto se puede definir como la suma de características especificadas del proceso, costos y estándares de acuerdo con diferentes criterios. Especialmente, la calidad de la superficie, así como la precisión de la forma, son relevantes para el proceso de mecanizado (Cristovao, 2013). El objetivo de las operaciones de maquinado por router CNC, es generar piezas de trabajo con las dimensiones, forma, y calidad de la superficie requeridas para los procesos subsecuentes o el uso de las piezas.

La calidad de una superficie maquinada depende de factores que pueden agruparse en: Propiedades de la pieza de trabajo, propiedades de la herramienta, parámetros de corte, factores de vibración y de la máquina herramienta, estos se describen en el Cuadro 1. El manejo de la calidad superficial es bien conocido en el área de metal mecánica con investigaciones que se enfocan en la optimización del proceso, generar modelos matemáticos para control y mejorar la calidad. También en instrumentos de medición y tolerancias (Groover, 2007).

Cuadro 1. Rangos típicos de rugosidad superficial mediante procesos de maquinados en el área metal mecánica (Fiel et al., 1997)

Proceso	Rugosidad superficial ( $Ra$ ) $\mu\text{m}$
Aserrado	25 a 1.6
Planeado	12.5 a 1.5
Barrenar	6.3 a 3.2
Tornear	6.3 a 0.50
Fresar	6 a 1
Rectificado	1.6 a 0.10
Pulido	0.4 a 0.10

La rugosidad superficial o textura de una superficie presenta micro irregularidades en relación con superficie ideal, los parámetros de rugosidad en este caso se basan en la media de la profundidad de la rugosidad. La Rugosidad Media ( $Ra$ ) se define con la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas del perfil de la rugosidad con la línea media del largo de la medición. En la Figura 2, se definen de manera general: la longitud de la medición  $l_m$ , los diferentes parámetros:  $Ra$  que es uno de los parámetros más utilizados y aplica al proceso de fresado.  $Rq$  es la rugosidad media cuadrática y  $Rz$  la altura de las irregularidades. La norma de medición, los parámetros y los filtros utilizados, permiten obtener las mediciones que correspondan al proceso de maquinado.

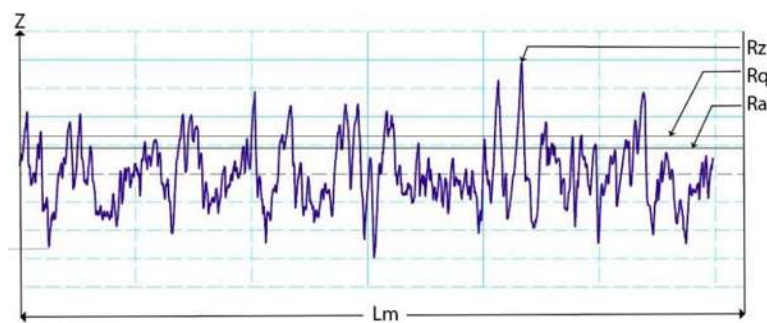


Figura 2. Perfil de la Rugosidad superficial y sus parámetros

La altura máxima del perfil ( $Rz$ ), no muestran una correlación entre diferentes maderas debido a que estos picos pueden ser modificados por el palpador al realizar la medición (Magoss, 2008).

La rugosidad de la superficie refleja la calidad de un material y la calidad de un maquinado, se ha encontrado una relación entre el espesor de viruta y la velocidad de corte, ec. (1).

$$V_c = \frac{D * \pi * f_t}{1000} \dots\dots\dots(1)$$

Donde;

- $V_c$  = Velocidad de corte (mm/min)
- $D$  = Diámetro de la herramienta (mm)
- $f_t$  = Velocidad de rotación (rpm)

De modo que conforme se reduzca el diámetro de la herramienta, la velocidad de corte debe de ser mayor. La velocidad de corte que se aplica en el maquinado depende de las propiedades del material a desbastar, del filo y material de la herramienta y de la velocidad de avance y profundidad de pasada, así como el avance por diente ( $f_z$ ) que define el proveedor de la herramienta.

La velocidad de avance se puede expresar en milímetros por minuto, en milímetros por diente o en milímetros por vuelta, en este caso se expresará en milímetros por minuto  $V_a$  [mm/min] y se determina a partir de las siguientes variables: avance por diente  $h_{max}$  [mm], que es la distancia lineal recorrida por la herramienta durante el corte de uno de sus filos, número de dientes o filos de la herramienta  $Z_n$  y por último las revoluciones por minuto  $f_t$ . De esta forma la velocidad de avance queda determinada por:

$$V_a = h_{max} * Z_n * f_t \dots\dots\dots(2)$$

$$h_{max} = h_{max} \% * D \dots\dots\dots(3)$$

El material de trabajo se define por un volumen el cual tendrá un proceso de maquinado por medio de sustracción de material, la Figura 3, indica los variables de corte dentro del parámetro de maquinado que intervienen en el proceso.

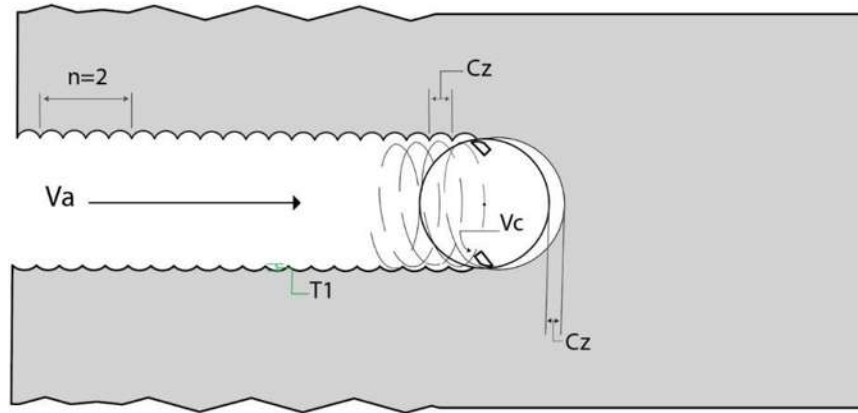


Figura 3. Variables que intervienen en el maquinado con un cortador en el router

Se logra definir que el maquinado de fresado genera una ondulación que conforme disminuye la velocidad de alimentación o aumenta la velocidad de rotación, es menor la distancia  $Cz$  que es el paso por diente, mientras que la altura  $T1$ , se hace más baja. Pauliny et al., (2012), presenta el modelo matemático para simular la superficie maquinada en relación con las vibraciones durante el cepillado y los parámetros de corte (velocidad de corte, velocidad de rotación, diámetro de la herramienta, filo recto y número de dientes), logrando identificar  $Ra$  y  $Rz$ , e identificando el aumento de la aspereza al disminuir el diámetro de la herramienta y / o aumentando la alimentación por diente. Dentro del proceso de maquinado también es necesario definir variables de dirección del corte, profundidad de corte y espesor del material y dirección del avance, como se indican en la Figura 4.

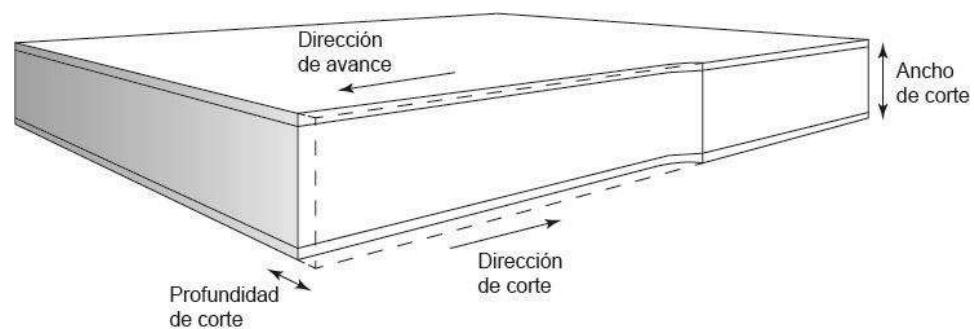


Figura 4. Variables de corte dentro del material de trabajo

La optimización del maquinado se mide al disminuir la rugosidad superficial, que es afectada por diferentes factores, en el área metal mecánica se han estudiado dentro de la



máquina herramienta, en la herramienta de corte y por características del material de trabajo.

Cuadro 2. Variables que afectan la rugosidad superficial en un maquinado (Ozcelik & Bayramoglu, 2006)

Máquina herramienta	Herramienta de corte	Pieza de trabajo
Tolerancias	Material	Longitud de la pieza
Balance del husillo	Geometría	Dureza
Potencia	Radio de la punta	Espesor del material
	Ángulo	Sujeción de la pieza
	Desgaste	

La calidad de la superficie también depende de los parámetros de la máquina, las propiedades de la pieza de trabajo, condiciones del corte de herramienta y los fenómenos de corte inciden en los rangos de rugosidad superficial obtenidos en el proceso de maquinado.

Cuadro 3. Condiciones que afectan la rugosidad superficial en un maquinado (Khorasani & Yazdi, 2012)

Condiciones de corte	Condiciones térmicas	Condiciones dinámicas
Profundidad de corte	Refrigerante	Vibración de la herramienta
Velocidad de avance	Temperatura en corte	Vibración de la pieza de trabajo
Traslape	Nivel de gris (Ga)	Vibración del porta herramienta
Velocidad de rotación		Formación de viruta
Dirección de alimentación		Fuerzas de cortes (Fx, Fy, y Fz)
Relación entre el ancho del corte diámetro de la herramienta		

La rugosidad superficial de la madera define la geometría de la superficie en relación con la superficie nominal, esta es principalmente el resultado de los procesos de maquinado y la relación herramienta-pieza de trabajo, también interviene la anatomía de la madera, el grano, la densidad, el contenido de humedad, el proceso de corte y en menor grado factores como: temperatura, humedad del aire, descomposición química o degradación (Jakub & Martino, 2005). Por otra parte, los cambios en los parámetros de corte, como son: velocidad de rotación, la velocidad de avance y el espesor de la viruta no influyen significativamente en la calidad superficial como es el caso del corte de la madera por ser un material anisótropo y la textura de la madera (Thoma et al., 2015). La importancia de la rugosidad superficial en la madera impacta dentro de los diferentes procesos de corte, ya que influyen en procesos siguientes como el pegado, terminados y durabilidad (Klaus et al., 1995).

Según Aguilera y Vega, (2004) el efecto de las condiciones de maquinado sobre la rugosidad superficial resultante del proceso de maquinado y los factores que intervienen; monitorean el consumo de potencia de corte y adicionalmente hacen variar los ángulos de las fibras de las probetas para observar su efecto sobre la calidad superficial. Los resultados permiten el conocimiento de las condiciones de maquinado. Observan las influencias de las velocidades de avance y rotación sobre la calidad. Se indica que la relación de estas velocidades más la profundidad de corte y el diámetro de la herramienta de corte permiten definir el espesor de viruta, como elemento clave en la determinación tanto de la calidad como del consumo de potencia del proceso. En cuanto a la influencia del ángulo de las fibras, los valores encontrados permiten confirmar la teoría, en cuanto que un incremento del ángulo deteriora fuertemente la calidad, obteniéndose muy buenas correlaciones respecto del espesor de viruta.

Por medio de un perfilómetro de contacto se ha identificado la calidad en el corte por medio de la rugosidad superficial, en donde se analizan como variables independientes, la dirección del corte que fue radial y tangencial, la velocidad de rotación, de 12000 y 18000 rpm, velocidad de avance de 2 y 6 m/min y el diámetro de la herramienta de 16 y 24 mm, reportando valores mínimos de rugosidad de la superficie de las direcciones de corte tangencial y radial de 3.58 y 3.21  $\mu\text{m}$ , respectivamente, para una madera sólida de *Abies nordmanniana*. Los resultados de la velocidad de rotación, la profundidad de corte, la velocidad de avance y los valores del radio de la herramienta de 18,000 rpm, 2 mm, 2 m/min y 8 mm se consideraron condiciones óptimas de mecanizado, respectivamente, para muestras de dirección de corte tangencial. Los valores correspondientes para la dirección de corte radial fueron 18,000 rpm, 6 mm, 2 m/min y 8 mm (Hazir et al., 2018).

El factor del material a maquinar; como el contenido de humedad de la madera, la densidad de la madera y la dirección del hilo de la madera; inciden en la rugosidad obtenida en su maquinado; dentro de la pieza al ser un material anisótropo el comportamiento “cortante” es diferente según la dirección de la sollicitación mecánica bajo la acción de la herramienta de corte. Esto explica por qué las herramientas de corte tienen geometrías diferentes según su dirección de corte. Las propiedades mecánicas de la madera, el ángulo de

ataque y otras variables deberán combinarse adecuadamente para obtener el mejor corte posible, lo que en la actualidad no se consideran en el sistema CAM y dentro del proceso de diseño rara vez se toma en cuenta, ya que depende de la experiencia obtenida en un proceso de prueba y error (Eyma et al., 2004).

Gurau y Irle, (2017), realizan una revisión de investigaciones para definir cómo medir y evaluar la rugosidad superficial en la madera, esto por sus características anatómicas, por lo que se definen instrumentos, métodos, mediciones de perfil contra mediciones de áreas, longitud y resolución de medición, así como eliminación de errores de forma, de filtrado, selección de la longitud del corte y eliminación de la anatomía de la madera y cálculos de los parámetros de la rugosidad. Mediciones no menores a 40 mm, la resolución de medición de 5  $\mu\text{m}$ , la eliminación del error por parte de la anatomía de la madera, el uso del filtro de regresión gaussiano robusto, longitud de corte de 2.5 mm, el mejor parámetro de rugosidad para describir la rugosidad de procesamiento ( $Ra$ ), así como un método para separar la rugosidad de procesamiento de la rugosidad anatómica mediante el uso de una curva Abbot.

Los ensambles y uniones en un mueble de madera, permiten generar la función y estética de los muebles, estas uniones buscan aumentar la estabilidad del mobiliario (Yao et al., 2017). La evolución del diseño y la tecnología en el sector del mobiliario se ha visto impulsada en los últimos años, a partir de los cambios culturales y hábitos de trabajo han surgido mobiliarios funcionales y modulares (ITTO/UNCTAD/WTO, 2004). Los mobiliarios de empaque plano que terminan siendo muebles tridimensionales son de gran interés por sus propiedades de resistencia-peso, bajo costo, almacenaje, transporte e impulso por el comercio electrónico, pero la creación de estos muebles está limitada a expertos en el campo, debido a la falta de conocimiento (Yan et al., 2013).

Las ventajas de los muebles empaquetado en plano, se identifican por ser práctico y fácil de transportar e instalar, ser transportable en el maletero de un coche, dando solución a las necesidades de la sociedad en esta era moderna (Agustiano y Col. 2018)

Los muebles de empaque plano se caracterizan por ser armados por el usuario, contienen elementos de otros materiales y requieren accesorios para lograr su armado. La

investigaciones se han centrado en la resistencia de diferentes tipos de ensambles, revisando parámetros de conectores con acero de perno y tuerca, en diferentes direcciones de la fibra y el parámetro de interferencia (0.8 mm) entre la tuerca, el orificio y la profundidad (25 mm), reportando una resistencia a la tracción mayor a 5 KN (Chen et al., 2019). Por otra parte, los conectores llave para muebles de empaque plano ensamblables, conocidos como **minifix**, se analizó la eficiencia a diferentes longitudes y número de conectores, se encontró que la resistencia al momento de flexión tanto en tableros MDF como en tableros aglomerados incremento al aumentar el número de conectores, la resistencia al momento de flexión fue 40% mayor en el tablero MDF que en el tablero aglomerado (Malkocoglu et al., 2013). Los conectores pueden ser de madera, plástico, metal o materiales compuestos. Kasal et al., (2020) presenta una investigación sobre conectores auxéticos para conectar muebles listos para ensamblar, los conectores son fabricados por medio de impresión 3D, con diferentes dimensiones, el coeficiente de Poisson, la resistencia a la tracción, la presión de contacto y los coeficientes de fricción se realizaron mediante análisis numérico, se encontró que la resistencia disminuye al disminuir la interferencia. Además, la presión de contacto y la tensión fue más baja en los conectores no auxéticos bajo la fuerza de tracción (valores medios de 25 a 189 N). Otros procesos de armado o unión de piezas en un mueble utilizan la unión de clavos neumáticos o grapas. Demirel y Kalayci, (2020) reporta la medición y estimación de la fuerza cortante de uniones de madera con grapas múltiples acomodadas en fila, aplicación dentro de armazones de muebles comúnmente tapizados, señala que la densidad tuvo un efecto estadísticamente significativo en la fuerza de corte de la unión por grapas (191 a 424 N).

Los reportes encontrados sobre uniones y ensambles en madera buscan siempre que garantice la resistencia de la unión de las piezas. Pero en un mueble listo para ensamblar que pueda ser armado y desarmado por el usuario el objetivo del ensamble cambia, a la fecha no se encontró ningún reporte sobre un ensamble que tenga esta función y cómo puede afectar la interferencia entre los elementos a unir y desensamblar.

Uno de los problemas principales dentro de un ensamble es la tolerancia y coeficiente de rugosidad, para garantizar un ensamble por interferencia que garantice la unión de las piezas. Pero al requerir que el mueble se pueda armar y desarmar para los requerimientos del

usuario, por ejemplo, su transporte. En este último caso se requiere que el ensamble tenga una resistencia para el buen uso y función del mobiliario, pero que también pueda ser desarmado sin requerir alguna herramienta o poner en riesgo de la salud al usuario (NIOSH, 2015). Por lo que se requiere que la resistencia del ensamble sea no mayor a 19.6 N, lo que indica que no hay un esfuerzo que ponga en riesgo al usuario (COPE, 2016).

El Coeficiente de fricción se define por la rugosidad superficial entre las áreas de contacto, de manera que al ser modificada la rugosidad por el proceso de manufactura en este caso el router CNC, se logra controlar la resistencia para unir el mueble y para que un usuario adulto, logre armar y desarmar con facilidad. El ensamble implementado en el mobiliario, se basa en un ensamble donde la pieza tiene en una cara la hembra y del otro costado se une a hueso, como el sistema implementado en los trojes purépechas de Michoacán México, teniendo la particularidad de poder ser desarmados y trasladados a otros lugares (Arreguín, 2020), en esta propuesta de mobiliario se integra el concepto de los rompecabezas de nudo gregoriano, permitiendo que al unir las diferentes elementos del mueble, logran un mobiliario en donde la última pieza es el candado que mantendrá unidas a las piezas anteriores para que el mueble no se desarme al ser manipulado.

La tribología estudia todos los aspectos relacionados con fricción, lubricación y desgaste. En los ensambles se puede afirmar que los no-metales en general cumplen las cuatro leyes básicas de la fricción. Para el caso de la fricción seca, se establecen en la actualidad cuatro leyes básicas. La primera ley: La resistencia a la fricción es proporcional al área real de contacto; la cual es función de la carga normal, las propiedades de los materiales y la rugosidad superficial. Esta constituye del 0.01 al 0.1% del área nominal de contacto. La segunda ley: La resistencia friccional es independiente del área geométrica de los cuerpos en contacto. La tercera ley: La resistencia friccional es dependiente de la velocidad de deslizamiento, se reconoce sin embargo que en un amplio diapasón de velocidad la fricción casi no varía. Y la cuarta ley: La resistencia friccional depende de la naturaleza de los materiales en contacto. Lo que quiere decir que un cambio de materiales en el sistema tribológico representa una variación significativa del coeficiente de fricción, aun cuando el resto de los parámetros permanezcan invariables (Linares, 2010).

La fuerza de rozamiento, crean un efecto de sostenimiento. Desde el punto de vista del rozamiento, la fuerza de sujeción actúa como una fuerza normal. La verdadera función de sujeción la realizan las fuerzas de rozamiento, que se crean según la ley de rozamiento de Coulomb, en una dirección opuesta a la de movimiento y opuesta a la gravedad debida al peso del objeto sujetado.

## **2.2. Tecnologías de manufactura del mueble: sistemas CAD, CAM y maquinas CNC**

La producción del mueble en México está en crisis, el crecimiento de este sector es mínimo por el rezago tecnológico, el impacto de la importación, la capacidad de instalación ociosa y bajos volúmenes de producción; esto lo describe Espinosa, (2012), quien indica que uno de los factores que pueden ayudar a repuntar este sector es dar valor agregado a sus productos por medio del diseño, procesos y materiales. El Plan de Desarrollo Nacional (2013-2018) identifica las barreras existentes en competitividad mundial, en relación con la necesidad de promover el uso y consumo de productos amigables con el ambiente y de tecnologías limpias, eficientes y de bajo carbono (Peña, 2013). De forma más puntual Choodoung y Smutkupt (2012), mencionan los factores que afectan el diseño de muebles de madera sólida, recalcan la importancia de recolectar información de las especificaciones de la madera para la fabricación del mueble, así como de analizar la factibilidad del mueble diseñado. También dan por hecho el uso de herramientas tecnológicas como la Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE por sus siglas en inglés), para pruebas de estabilidad, balance y centro de gravedad; evitando así la aplicación de ensayos en prototipo que son de mayor costo.

En relación con la zona Norte del país, que es donde se realizará el trabajo de campo de la presente investigación; (Vega et al., 2010), menciona las causas que han provocado la pérdida de competitividad del sector del Mueble de madera en la región de Tijuana-Rosarito, B.C., en donde el Diseño como factor de ventaja representa únicamente el 11%, y solo el 50% de las empresas encuestadas cuentan con maquinaria y equipo moderno. A juicio de los autores se recomienda la necesidad de crear por parte de los empresarios un centro de diseño e

innovación. A lo que habría que agregar, la necesidad de modernizar el equipo y procesos de fabricación.

Por otra parte, se han caracterizado los resultados del proceso de mecanizado CNC, con madera sólida definiendo el parámetro del material de trabajo. Por ejemplo, dentro de los relieves y grabados, por medio de router CNC que permiten la producción en masa; (Sütçü & Karagöz, 2013), exploran el proceso en paneles listonados de tres diferentes maderas, a velocidades de avance de 0.25, 0.5, 0.75 y 1 m/min, velocidades de rotación de 12000, 15000 y 18000 rpm, con un traslape de 1, 2, 3 y 4 mm, y una profundidad de corte de 2, 4 y 6 mm. Por medio de un perfilómetro de contacto se evalúa la calidad del grabado, reportando una rugosidad superficial (Ra) de 3.42, 4.32 y 5.00  $\mu\text{m}$  para la madera con densidad 627, 609 y 478  $\text{kg/m}^3$  respectivamente. También se realizó el experimento de variar las velocidades, rotación y herramientas de corte, para dos tipos de grabados de estilo modernismo - Art Nouveau- en donde la calidad de la superficie se evaluó de forma visual identificando los defectos que ocurrieron durante el proceso, los maquinados se realizaron en tres maderas solidas diferentes, una madera dura, una madera blanda y otra resinosa, siendo la madera de fresno -madera dura- la que mejor comportamiento tiene ante procesos de grabado, los resultados no definen parámetros específicos para el diseño de grabado o los tipos de madera (Coşoreanu & Cismaru, 2014).

Es claro que estas tecnologías han venido a facilitar el proceso de Diseño, un buen ejemplo lo menciona Dovramadjiev *et al.*, (2013), en donde la utilidad del sistema CAD, en el desarrollo de modelos virtuales, soluciona problemas de diseño; ergonómicos, funcionales y constructivos, y en este caso en particular las ventajas de esta herramienta tecnológica para diseñar muebles ergonómicos multifuncionales. Esto concuerda con lo reportado por Gawroński, (2011) quien describe cómo el uso de las nuevas herramientas tecnológicas usadas en las etapas del proceso de diseño del mueble, optimizan el proceso de producción. El problema en estas investigaciones es que la metodología se ve como un proceso secuencial, y esto se refleja en correcciones y modificaciones en las etapas de producción lo cual se debe evitar. En otra investigación se desarrolla el análisis entre el diseño y la producción de una silla, en donde se señala la importancia del uso de las tecnologías CAD y CNC para optimizar

material, reducir costos y tener calidad del producto; así como la necesidad de recordar que el valor de un mueble lo determina la función, su forma y estructura (Su et al., 2014).

Existe una gran variedad de procesos de diseño, la mayoría con base a las metodologías de diseño tradicionales, los cuales han ido evolucionando porque se cuenta con nuevas metodologías del diseño, más complejas y especializadas. Son de nuestro interés aquellas metodologías enfocadas a la producción.

Un ejemplo general lo menciona Rodríguez (2004), la “Forma” se define integralmente por cuatro factores: *Expresión, Función, Tecnología y Comercial*. Los dos primeros se pueden definir en la disciplina del diseñador, mientras que las otras son interdisciplinarias, en *Tecnología* se integran los materiales con sus propiedades y características, sus procesos de transformación lo que impacta en el costo del producto. Por último, se integra la parte *comercial*, en donde se analiza la logística de distribución, la exhibición, el costo competitivo y el servicio al cliente. Un problema en el proceso de Diseño es la barrera que suele existir entre el departamento de diseño y el de producción, en donde suelen hacerse cambios sustanciosos en la propuesta de los nuevos productos, por falta de información para la producción o recursos para fabricarlos, tiempos y costos, así como la comprensión de las características en composición de los tableros (paneles) de madera.

Según Rizo (1999), existe la necesidad de contar con un enfoque del equipo de diseño y fabricación orientado al proyecto: la fabricación por productos es una buena solución, aumenta el enfoque proyectual de la producción y considera en conjunta el ciclo de vida del producto: *Concepción, diseño, prototipado, producción, comercialización, utilización, eliminación*. De aquí resalta el uso del Análisis de Modo y Efecto de Falla (FMEF, por sus siglas en inglés) como una herramienta dentro de la metodología de diseño, para determinar el atractivo estético de mueble, que se puede aplicar tanto para verificar un producto ya en venta, así como un producto en el proceso de diseño, de aquí que los factores o características a considerar son: el atractivo estético, armonía del color, material, estilo, proporciones y elegancia (Antal, 2016).

Los procesos de diseño son fáciles de aplicar en ambientes multidisciplinarios, pero no



tanto en el ambiente educativo, ni en las Pequeñas y Medianas Empresas (Pymes), en donde el trabajo del proyecto de diseño recae sobre una sola persona o disciplina, lo que implica dar mayor importancia y relevancia a los factores tecnológicos y de diseño.

Dentro del proceso del diseño del mueble, después de la generación de un concepto, de la exploración de propuestas, desarrollo de maquetas y otras técnicas para evaluar las propuestas viables, se llega a la etapa de diseño a detalle, en la cual se elabora el modelo virtual con ayuda de un sistema CAD, que permite verificar geometrías, restricciones y propiedades (peso, tolerancias, ensambles, partes, colisiones, mecanismos, entre otros). También es importante la generación de *renders* y planos, que permite la visualización del objeto diseñado de forma digital. Los planos técnicos y las especificaciones pueden pasar a producción. El sistema CAD es una de las tecnológicas digitales más utilizadas dentro de la industria del mueble con un 63%, teniendo por debajo las tecnologías CNC y CAM con 41 y 22%, respectivamente (Wiedenbeck & Parsons, 2010).

Para enlazar la etapa de diseño CAD con la manufactura con base a tecnologías CNC, existen los sistemas CAM, en donde el objetivo es generar el código máquina, y verificar por medio de simulación el proceso de maquinado correcto. Se parte de un diseño CAD, en la mayoría de los casos hace falta considerar otros parámetros del maquinado, como la sujeción del material de trabajo, las herramientas de corte, la optimización del material, calidad requerida, tolerancias, tiempos y costos. Parte del problema es que se vuelve un proceso secuencial, lo que incrementa los tiempos y cambios al diseño. Entre estas herramientas se encuentran sistemas CAE, que permiten realizar simulaciones de resistencia y seguridad en el mueble, comúnmente estas pruebas son de forma destructiva por lo que requieren mayor tiempo y costo, un ejemplo claro y sencillo de la aplicación de estos sistemas lo cual indica Ntintakis *et al.*, (2013), en donde determina los puntos de mayor esfuerzo por medio de una simulación de un mueble de madera, con lo que se concluye el potencial que tiene el uso de estas herramientas tecnológicas para acortar el puente entre diseño y producción.

En el Anexo 3, presenta el resumen de la ponencia “El diseño de mobiliario de madera fabricado por router CNC, que indica el contexto de la industria en México y como intervienen las tecnologías CAD/CAM/CNC y los tableros a base de madera en el diseño de

mobiliario. La industria ha integrado estas tecnologías y también el diseño modular por las ventajas que le representan. Un sistema modular se caracteriza por: la división funcional en módulos escalables y reutilizables; el uso de interfaces modulares bien definidas; y el uso de los estándares de la industria para dichas interfaces (Asión-Suñer & López-Forniés, 2021; Asión, 2017). Algunas de las ventajas que presenta el diseño modular es que permite trabajar la complejidad del producto y que es adaptable (Smith, 2009), creando muebles que el consumidor pueda adaptar a sus necesidades, también tiene la ventaja de que el usuario pueda personalizar el producto debido a la variabilidad de los módulos en forma, materiales, colores o tamaños (Marshall, 1998). El usuario puede reemplazar o modificar una parte del mueble, al cambiar la función e incrementar la durabilidad del mueble (Smith, 2009). La industria tiene la ventaja de evolucionar sus muebles modulares al mejorar un elemento, pieza o un módulo. El mobiliario modular se integra fácilmente en mobiliario multifuncional y tiene ventaja en el uso del espacio al poder ser apilable o plegable, ensamblable o desmontable (Asión, 2017). Los muebles modulares se integran al diseño de muebles de empaque plano o también cocidos como muebles listos para ensamblar. Al tener las ventajas de ser práctico y fácil de transportar e instalar, ser transportable en el maletero de un coche, dando solución a las necesidades de la sociedad en esta era moderna (Agustiano et al., 2018), y que permite proponer muebles sustentables dentro del proceso de diseño y producción. Este tipo de diseño de muebles se integra fácilmente a las tecnologías CAD/CAM/CNC, los procesos de producción y el comercio electrónico del producto.

Los ensambles y sistemas de unión son de gran importancia en su función, rigidez, estabilidad estructural y durabilidad del mueble. El uso de tableros a base de madera, la aplicación del CAD, CAM y CNC, ha generado una adaptación y modificación en los ensambles convencionales para unir dos o más piezas del mueble, con frecuencia se integran elementos metálicos, pernos, conectores plásticos o adhesivos. Una primera investigación la presenta Gros, (2001), indicando el rediseño de ensambles tradicionales, de manera que se puedan generar en CAD/CAM y fabricar por medio de equipos CNC (Figura 5). El tipo de ensambles se define por la unión de las dos piezas y la forma del corte, rebaje o vaciado que se une. Por ejemplo un ensamble esquinado puede unirse, a hueso, con espiga (Figura 5.a), con espiga oculta o con espiga y llave. Un ensamble en T, puede unirse a través de la espiga

(Figura 5b), con mortaja con pasador o espiga pasante. Un ensamble de marco puede ser a media madera ovalado (Figura 5.c), cola de milano o junta de inglete transversal. Mientras que un empalme, puede integrar la cola de milano (Figura 5.d) o el empalme con llave (Figura 5.e).

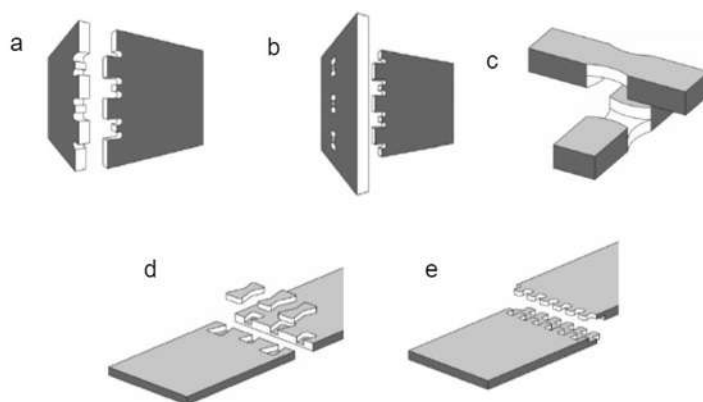


Figura 5. Ensamblajes de madera con aplicación CAD/CAM y CNC, a) esquinado, b) en T, c) de marco, d) empalme con llave y e) empalme; (Gros, 2001)

A partir de los ensamblajes convencionales y la tecnología con la que se cuenta, se pueden generar diferentes formas de ensamblajes, tanto como los que sean requeridos o que la imaginación permita, las variedades de formas en los ensamblajes tienen una intención de resistencia, estabilidad y expresión visual (Yao et al., 2017).

La innovación en los muebles de madera, ha iniciado desde el diseño del producto, el proceso de producción, la tecnología CAD, CAM y CNC y los tableros a base de madera, esto se refleja en diferentes patentes, en donde se definen formas y funciones de muebles de empaque planos. A continuación se resumen invenciones registradas como patentes:

- La patente US7818939B2, es un sistema de ensamblaje que permite el bloqueo a presión entre los paneles (Brubacher & Street, 2010).
- La patente US 7.856,772B1, aplica diferentes configuraciones a partir de un ensamblaje modular con una sujeción entre los elementos a partir de un ranurado que forma el ensamblaje hembra-hembra, siendo escalable, de características estándar, paneles intercambiables sin el uso de herramientas o dispositivos de sujeción (Culp & Terry W. Gentle, 2010).

- La patente US 8,590,976B2, presenta un ensamble que define sistemas de unión entre los diferentes elementos que permiten un bloqueo entre las piezas, permitiendo una unión rígida, eliminando el uso de herramientas o conectores (Clark Davis, 2013).
- La invención de integrar piezas intercambiables y reemplazables en el mueble por medio de ensambles sencillos que permite el almacenaje con paneles desmontables (Brock Brandenberg, 2016).

Siendo lo anterior un reflejo de la importancia de la tecnología en la manufactura de mobiliario y los cambios que está teniendo la industria del mueble de madera al integrar el mobiliario de empaque plano.

### **2.3. Tableros de madera**

Dentro de la variedad de tableros a base de madera, se agrupan en cuatro grupos: tableros de madera sólida (listonados o laminados), tableros de chapa, tableros de partículas y tableros de fibra (Thoemen et al., 2010). Se definen con una importancia comercial los tableros de Fibras de Densidad Media (MDF) y los tableros de Partículas (PB) en la producción Nacional y mundial (FAO, 2006).

Los tableros de partículas y de fibras son usados para la fabricación de muebles “listos para montaje” y muebles de empaque plano, por su calidad superficial y resistencia, comúnmente se sobrepone otro material en sus caras con propósitos decorativos. Hay una gran variedad de tablero de partículas debido a los diferentes tamaño y geometría de partículas, tipos de madera, cantidad y tipo de adhesivo, presión de prensado y uso del tablero.

La fabricación de los tableros de partículas depende de un proceso en seco en donde se prepara la partícula, se clasifica y seca, se aplica el adhesivo, se forma la estera (colchón), y se prensa para finalmente realizar el acabado. La estera está formada por varias capas; las partículas de las capas intermedias son largas y delgadas, lo que permite una sujeción de las partículas pequeñas de los extremos, esto da una mejor resistencia a la flexión y rigidez, también mejora la superficie del tablero, lo que lo hace competitivo con los tableros de fibras de madera.

Las resinas usadas frecuentemente para tableros de partículas incluyen urea-formaldehído UF, en mucha menor medida fenol formaldehído PF, melamina formaldehído MF e isocianatos. La cantidad de adhesivos en tableros de partículas, se determina con base al peso de los sólidos secos de resina y al peso total de las partículas. El contenido total de resina puede oscilar entre 4% y 10%, pero generalmente oscila entre 6% y 9% para las resinas UF. El contenido de resina de las capas externas suele ser más alto (aproximadamente 8% a 15%) que el del núcleo (aproximadamente 4% a 8%). La resina UF generalmente se introduce en soluciones acuosas que contienen aproximadamente de 50% a 65% de sólidos. Adicionalmente se agrega cera para mejorar la resistencia a la humedad a corto plazo, la cantidad de cera varía de 0.3% a 1% basado en el peso total de las partículas (Stark et al., 2010).

La densidad de los tableros de partículas son cerca de 50% más densos que la materia prima utilizada, lo que indica que una materia prima de aproximadamente  $400 \text{ kg/m}^3$  una vez conformado el tablero tendrá una densidad de  $600 \text{ kg/m}^3$  logrando un contacto total entre partícula y partícula (Thoemen et al., 2010). El tablero MDF tiene una variación en su densidad en relación con su espesor, observándose un gradiente de densidad, en donde es mayor en las superficies y presenta una densidad más baja y homogénea en el centro, esto debido a las capas, el adhesivo y el tipo de fibra, como se muestra en la Figura 6 (Thoemen et al., 2010).

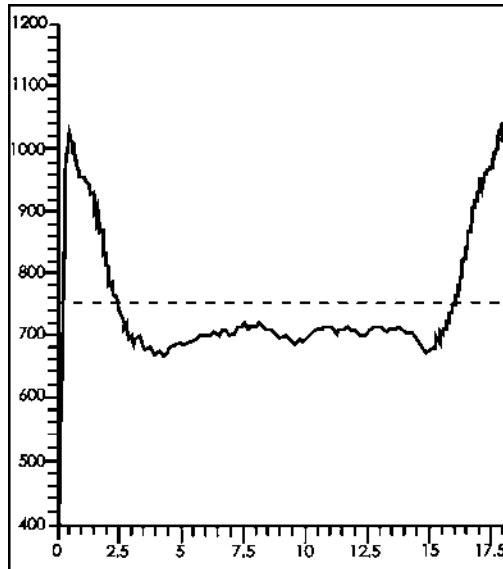


Figura 6. Perfil de densidad de un tablero MDF de 18 mm de espesor, (Thoemen et al., 2010)

Los tableros de fibras pueden ser de densidad alta (HDF), densidad media (MDF) y de baja densidad. El proceso de fabricación puede ser húmedo o seco, en el proceso húmedo, se requiere una gran cantidad de agua que sirve como un medio de transporte y distribución para la fibra (pulpa) y promueve una unión natural, es decir, la activación de componentes de madera similares al de los adhesivos, con lo que se logra la formación de los enlaces de hidrógeno lo que reduce o elimina la necesidad de agregar adhesivos de resina. En el proceso seco, el aire es el medio de transporte y distribución, sin agua no se desarrollan las condiciones para la unión natural. Por lo que el adhesivo y sus cantidades son de gran importancia para las propiedades del tablero. Es importante mencionar el proceso de obtención de fibra puede ser completamente mecánico, por medio de un proceso termomecánico o con tratamientos químicos, comúnmente alcalinos, estos procesos son partiendo las astillas de madera (Suchsland & Woodson, 1986).

Los tableros de fibras de densidad media están entre 500 y 1000 kg/m<sup>3</sup> (ANIS.A208.2-2002, 2002). La cantidad de adhesivos utilizados en la fabricación de los tableros de fibras puede ser de 6 a 14% en UF, de 8 a 12% melamina-urea-formaldehido (MUF) y de 4 a 10% cuando el adhesivo es Diisocianato de difenilmetano (MDI), (Thoemen et al., 2010). Como se ha mencionado, el tipo de adhesivo, las capas y las fibras utilizadas, así como sus proporciones influyen en las propiedades del tablero MDF, en una investigación

donde se comparan tableros de una sola capa y tableros de tres capas, se logra definir que las propiedades de resistencia de los MDF de tres capas no disminuyeron significativamente, ya que la cantidad de resina UF en la capa intermedia oscila entre 10.5 y 8.5% en peso. De manera similar, la estabilidad dimensional del MDF no fue influenciada significativamente por la cantidad disminuida de la resina (10.5 a 9.5% en peso), lo que indica que la cantidad de resina en la capa intermedia de MDF de tres capas, a diferencia del MDF de una capa, podría reducirse sin una disminución significativa en las propiedades físicas y mecánicas (Akbulut & Ayrilmis, 2019)

El adhesivo más utilizado en los tableros partículas, fibras y de chapa es el UF, los tableros de partículas y MDF consumen el 68% de UF producido en el mundo (Hemmilä et al., 2017). Esto implica un impacto ambiental con problemas de salud, ya que en el 2004 la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) reclasificó el formaldehído de "Probable carcinógeno humano" a "carcinógeno humano conocido" que ya se están controlando por medio de normas y restricciones para su uso. Uno de los primeros controles lo indica *California Code of Regulations*, (California Air Resources Board, 2009); para tableros de partículas es de 0.09 ppm, para los tableros de fibras de 0.11 ppm y para tableros de fibras delgadas de 0.13 ppm.

En México, se presenta la norma que establece los límites máximos permisibles de emisión y contenido de formaldehído en tableros de partículas de madera y tableros de fibras de madera fabricados con urea formaldehído y en los productos fabricados con este tipo de tableros en el 2016. En los tableros de partículas la norma permite emisiones máximas de 0.18 ppm, y contenidos de 9.08 mm/100 g; para tableros de fibras con espesores mayores a 8 mm permite emisiones máximas de 0.21 ppm, y contenidos de 10.64 mm/100 g; y para tableros de fibras con espesores menores o igual a 8 mm permite emisiones máximas de 0.22 ppm, y contenidos de 11.15 mm/100 g (PROY-NOM-203-SCFI-2015, 2015).

Se hace evidente una necesidad para el desarrollo y aplicación de materias primas que no afecten la salud, es por eso la importancia de utilizar adhesivos que sean amigables con el medio ambiente, para esto se desarrollan adhesivos con base a lignina despolimerizada y se generan diferentes tipos de tableros.

### **3. Antecedentes**

Las investigaciones reportadas sobre rugosidad superficial y su incidencia en los diferentes procesos de manufactura, se reportaron primeramente en el área metal mecánica, en donde se cuenta con estándares definidos como las Normas ASTM D7127-13, (2013); B46.1-2002, (2002); DIN 4766-1, (1981), que definen los rangos de rugosidad aceptables o recomendados en diferentes procesos, así como la medición y el manejo de los datos obtenidos a partir del perfil de rugosidad, en México se cuenta con la NOM-Z-83-1987, (1987), que presenta definiciones en metrología dimensional, estados de superficies, parámetros de rugosidad y especificaciones. En los últimos años, la rugosidad superficial ha tenido relevancia en la madera, sus procesos y su incidencia en otros procesos. A continuación, se dividen los antecedentes en cuatro secciones que muestran la importancia de este tema, primero se presentan en la sección 3.1, investigaciones de la rugosidad superficial en madera sólida; en la sección 3.2, se encuentran investigaciones en procesos de maquinado por router CNC y en tableros MDF; en la sección 3.3. Se integran otras investigaciones sobre rugosidad superficial en tableros MDF, con otros procesos de corte, lijado o la elaboración de tableros; finalmente la sección 3.4, presenta un resumen de los parámetros de corte y rugosidades superficiales en tres industrias de muebles.

#### **3.1. Rugosidad superficial y procesos en la madera**

Investigaciones sobre la rugosidad superficial y su impacto en los procesos de fabricación de un mueble comenzaron con experimentos sobre diferentes tipos de madera, reportaron resultados de su incidencia en procesos como el corte, el lijado, la adhesión y los recubrimientos, en esta sección se describen algunos trabajos

En investigaciones del área en ciencias y tecnología de la madera, la rugosidad superficial en especies de madera sólida ha sido abordado desde los métodos de medición (Gurau et al., 2012), los procesos y el efecto de la anatomía, indicando el efecto que tiene la anatomía de la madera en los cortes tangencial y radial con su medición (Laina et al., 2017), otras investigaciones se centran en definir los parámetros de las mediciones de la rugosidad superficial con diferentes métodos (Gurau & Irle, 2017). Investigación de medición de la



rugosidad de la superficie en tableros a base de madera de la Republica de Singapur, utilizados en la fabricación de muebles, con cubiertas de madera sólida, después del proceso de lijado documenta la diferencia de la rugosidad entre las maderas de las cubiertas y la dirección de medición (Zhong et al., 2013). La rugosidad superficial y su relación con las operaciones de maquinado como cepillado (Alfredo Aguilera & Muñoz, 2011; Malkoçoğlu, 2007), fresado (Pinkowski et al., 2012), y lijado (Ispas et al., 2011), ha tenido relevancia en los últimos años, Thoma et al., (2015), indica la relación entre la operación de cepillado y lijado en cinco especies de madera solida de Europa, indicando que los parámetros de corte no tienen influencia en la rugosidad superficial obtenida, Vitosyté et al., (2015), también indican que la rugosidad superficial es directamente dependiente del tamaño del grano de la lija, las características anatómicas de la especie de madera y la dirección de la fibra de la madera. Dentro del proceso de lijado, se encuentra una importante aportación en los métodos, evaluaciones y resultados de la rugosidad superficial. Según (Gurau et al., 2006; Hazir & Hiziroglu, 2017; Ispas et al., 2011; Klaus et al., 1995; Laina et al., 2017; Malkoçoğlu & Özdemir, 2006; Sofuoğlu & Kurtoğlu, 2015; Taylor et al., 1999; Vitosyté et al., 2015), se indica la importancia de la dirección de medición de la rugosidad superficial y la orientación del lijado, por medio de la rugosidad se ha optimizado el proceso de lijado; su orientación, el tipo de abrasivo y el tamaño del grano, son factores que intervienen dentro del proceso(Taylor et al., 1999). Por otra parte, la anatomía de la madera es un factor importante en las diferentes especies, la diferencia anatómica de la madera ha permitido investigar sobre métodos y filtros, para el proceso de medición de la rugosidad y en las irregularidades anatómicas de las piezas.(Gurau et al., 2012). La calidad de la superficie se ve influenciada positivamente por el ángulo de corte y la velocidad de alimentación (Alfredo Aguilera & Vega, 2004; Malkoçoğlu & Özdemir, 2006).

El proceso de adhesión es de gran importancia en de fabricación de muebles, investigaciones sobre los efectos de la rugosidad superficial y otras variables para incrementar la fuerza de adhesión entre elementos, identifican que la rugosidad no es un factor importante al comprarlo con la presión del prensado y la viscosidad del adhesivo, aunque la rugosidad superficial es un factor que afecta la penetración del adhesivo, rugosidades altas (150  $\mu\text{m}$ ) favorecen la penetración del adhesivo menos viscoso y rugosidades bajas (30  $\mu\text{m}$ ) favorecen

la penetración del adhesivo más viscoso (Cheng & Sun, 2006). Otro reporte en donde las piezas de madera no fueron lijadas, solo cepilladas, reporta que las uniones con valores bajos (20  $\mu\text{m}$ ) de rugosidad superficial, tenían alta resistencia en su unión (Söğütlü, 2017). Es importante diferenciar los tipos de adhesivos, especie de madera y procesos de adhesión, lo que puede contradecir la influencia de la rugosidad superficial en el proceso de adhesión de diferentes investigaciones.

La aplicación de recubrimientos es uno de los procesos más importantes en la fabricación de mobiliario. Söğütlü et al., (2016), presenta los efectos de la rugosidad de la superficie sobre la fuerza de adhesión de tres tipos de recubrimientos en madera, el análisis de regresión de la fuerza de adhesión y la rugosidad de la superficie mostraron fuertes relaciones entre la fuerza de adhesión y la rugosidad de la superficie en el barniz a base de agua, y relaciones más débiles para el barniz de poliuretano, señalando que la fuerza de adhesión del recubrimiento se puede incrementar al aumentar la rugosidad superficial en la madera.

Las investigaciones sobre la rugosidad superficial en la madera sólida, son una referencia que impulsa a resolver nuevas incógnitas en los tableros a base de madera y la rugosidad superficial, con el objetivo de conocer su efecto en los diferentes procesos de fabricación de un mueble.

### **3.2. La rugosidad superficial en tableros MDF y operaciones en router CNC**

Los estudios sobre los aspectos de la rugosidad superficial en los tableros MDF se han realizado en diferentes procesos y variables, estos se destacan en los últimos años. Se encontró que uno de las primeras investigaciones sobre operaciones del fresado en tableros MDF es de A. Aguilera et al., (2000) en la investigación define la relación entre la densidad, las fuerzas de corte y la potencia del corte, midiendo la rugosidad superficial en diferentes zonas de densidad –capas o layers- y para un grosor de viruta variable, la medición de la rugosidad superficial la hace por medio de visión láser. Identifico las diferentes zonas de densidad que permiten obtener niveles variables de fuerzas de corte. Las zonas de densidad se obtuvieron a cada 5 mm de espesor teniendo 890  $\text{kg/m}^3$  para la primera capa, 770  $\text{kg/m}^3$  para la segunda capa y 670  $\text{kg/m}^3$  para la tercera capa. Los factores más determinantes en cuanto a

la rugosidad de la superficie son el grosor de la viruta y densidad; alta densidad y bajo espesor de viruta permite obtener los niveles óptimos de rugosidad de la superficie, indica que en la zona media del tablero –menor densidad- da como resultado una baja calidad, Los valores de la rugosidad superficial se determinaron por medio de la desviación estándar de las alturas de los picos y la distancia entre estos, así como la relación entre ambos, obtenido valores de 0.08 a 0.32 mm para la capa de densidad 890 kg/m<sup>3</sup>. Se concluyó que es difícil identificar la constante de especie –en este caso el tablero MDF- en la ecuación de fuerzas de corte debido al diferente comportamiento por capas, pero se logra definir el constante de la especie de cada zona del tablero a través del perfil de densidad, de aquí que es deseable aplicar el mecanizado de densidad alta, para todo el perfil, evitando una mala calidad superficial.

Los parámetros de corte como son la velocidad de rotación de rotación, la velocidad de corte y la velocidad de avance, influyen en el fresado de los tableros MDF indican una correlación con la rugosidad superficial, esto lo indica Davim et al., (2009), en su investigación maneja la velocidad de rotación en 3000, 10500 y 18000 rpm, la velocidad de corte en 75, 264 y 452 m/min y la velocidad de alimentación en 0.50, 2.75, 3.88 y 5 m/min. , para una herramienta de corte de 8 mm de diámetro y un tablero MDF de 16 mm de espesor. Reporta rugosidad superficial ( $Ra$ ) de 8.96 y 18.14  $\mu\text{m}$  en 18000 rpm y 3000 rpm respectivamente, a una velocidad alimentación de 0.5 m/min. Concluye que a partir de los parámetros de corte apropiados se puede obtener una rugosidad superficial de  $Ra < 10 \mu\text{m}$  que indican una calidad en la presión dimensional de las piezas maquinadas; También se presenta la rugosidad superficial en relación con la tasa de remoción de material (MRR, por sus siglas en inglés), lo que indica que una alta velocidad de rotación reduce la rugosidad superficial, a partir de los parámetros de corte apropiados se puede obtener una rugosidad superficial de  $Ra < 10 \mu\text{m}$ , que indican una calidad en la precisión dimensional de las piezas maquinadas.

En las investigaciones anteriores se mide la rugosidad resultado del ranurado, el canal que deja la herramienta de corte. Sütçü & Karagöz, (2012), investigaron los parámetros de corte evaluando la rugosidad superficial con los valores de  $Ra$ ,  $Rz$  y  $Rq$ , en velocidades de rotación de 12000, 15000 y 18000 rpm, velocidades de alimentación en 0.50, 2.5, y 5 m/min., a profundidades: 2, 4 y 6 mm, en un tablero MDF de 18 mm de espesor con densidad de 736

kg/m<sup>3</sup> y 6.6% de contenido de humedad, la medición se hizo sobre el vaciado maquinado con un traslape de 1 y 3 mm, del diámetro de la herramienta de 6 mm, lo que equivale al 15 y 50%, en una trayectoria de zig-zag, midiendo a través del traslape, reportan la media de *Ra*, *Rz* y *Rq* en 8.48, 51.58 y 10.75 μm respectivamente, el análisis estadístico indica que la rugosidad superficial disminuye al aumentar la velocidad de rotación y aumenta al incrementar la velocidad de avance y la profundidad del corte. Wilkowski et al., (2015) concuerda indicando que el aumento de la alimentación por diente a una velocidad de rotación constante, provoca un aumento en la rugosidad de la superficie durante el fresado, la rugosidad es medida por medio de un perfilómetro de contacto, tanto en el proceso de fresado, como de lijado, el fresado se realizó por medio de dos experimentos, uno variando solamente la velocidad de avance (5, 10 y 15 m/min) y el segundo con dos variables; la velocidad de avance (3.6, 7.2, 10.8 m/min) y las velocidades de rotación (6000, 12000 y 18000 rpm), esto con una herramienta de dos filos, 12 mm de diámetro y de HW.

En las investigaciones se incrementan el número de niveles dentro de las variables con el objetivo de definir la calidad óptima en el proceso de mecanizado, teniendo presentes la velocidad de corte, la velocidad de avance y la profundidad del corte. De Deus et al., (2015), presentan la calidad del mecanizado por medio del fresado en tableros comerciales MDF, con densidad de 736.22 kg/m<sup>3</sup>, los maquinados se realizaron en dirección tangencial con una profundidad de corte de 0.5, 1 y 1.5 mm, tres velocidades de alimentación 2, 4 y 6 m / min y una velocidad de rotación de 16,000, 12,000, 8000 y 4000 rpm, teniendo velocidad de corte 201, 402, 603 y 804 m/min, respectivamente, para una herramienta de metal duro de tipo "superior" de 16 mm de diámetro, con tres dientes de corte helicoidal. Las mediciones de la rugosidad superficial se hicieron con un perfilómetro de contacto y el parámetro *Ra*, indicando que la tendencia de valores más bajos de rugosidad promedio (*Ra*) ocurre a velocidades de corte más altas para todas las profundidades. Los valores de rugosidad más pequeños ocurren en velocidades de corte de 603 m / min (12,000 rpm) y 804 m / min (16,000 rpm); Se investigaron las superficies mecanizadas de MDF mediante fresado y se señaló que una menor rugosidad está relacionada con 904, 5 m / min (18,000 rpm) y 527.6 m / min (10,500 rpm) para pruebas de profundidad de corte de 5 mm, en las gráficas presentadas se puede ver un valor promedio de 15 μm de *Ra*, con una dispersión dentro de las mediciones,

relativamente grande.

Las propiedades de maquinado del tablero MDF, se han identificado en distintos experimentos y con distintos parámetros de corte, por ejemplo, con el objetivo de analizar la deformación de viruta, eliminar el efecto del desgaste de la herramienta, simular el perfilado del espesor del tablero y facilitar la observación, Lin et al., (2006), presenta a velocidades de corte de 0.096 m/min la rugosidad superficial en el corte del perfil de tableros de 18 mm de espesor, con densidad de 740 y 1000 kg/m<sup>3</sup>, en tableros con condiciones comerciales y tableros de fibras de alta densidad (HDF, por sus siglas en inglés) respectivamente, la rugosidad superficial se midió por un perfilómetro de contacto y se observó por un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), los tableros con menor densidad, requieren menos fuerza de mecanizado y generan un menor desgaste de la herramienta, pero no tiene un buen acabado en la rugosidad superficial comparado con los tableros de alta densidad, las mediciones de la rugosidad superficial se llevaron a cabo en tres direcciones; en la rotación del corte, en contra de la rotación del corte y del espesor del tablero, aunque el valor promedio reportado es de  $Ra \approx 14 \mu\text{m}$  se identifica que las mediciones por medio del perfilómetro podrían no indicar la rugosidad superficial del tablero, al arrastrar parte de las fibras al momento de la medición, lo que se logra observar a partir de las imágenes SEM, en donde la diferencia entre tableros es clara y el valor de la rugosidad superficial es similar.

Una comparación entre el tablero MDF y dos maderas sólidas, de los parámetros de corte y sus efectos en la calidad superficial lo presenta Koc et al., (2017), el maquinado se realizó con una herramienta de corte de 12 mm de diámetro, tres filos, de carburo sólido, con dos milímetros de profundidad de cada corte, el tablero MDF fue de 18 mm de espesor, una densidad de 650 kg/m<sup>3</sup> y con contenido de humedad de  $10 \pm 1\%$ , con una combinación de velocidades de rotación de 15000 y 18000 rpm, con 2 y 8 m/min en la velocidad de avance, realizando las mediciones de la rugosidad superficial con un perfilómetro de contacto y con una medición láser, reportando velocidades medias  $Ra$  desde 7.55 a 24.96  $\mu\text{m}$  en la medición láser, y  $Ra$  desde 4.53 a 11.41  $\mu\text{m}$ ,  $Rz$  desde 6.810 a 33.647  $\mu\text{m}$  en la medición con el perfilómetro, se define que los valores de rugosidad de la superficie disminuyeron con una

mayor velocidad de rotación y una menor velocidad de avance, teniendo la mejor calidad superficial a 18,000 rpm y una velocidad de alimentación de 2 m/min.

Investigaciones más recientes definen la rugosidad superficial en el proceso de fresado por medio de router CNC en tableros MDF, Priscila R. Deus et al., (2018), presenta dentro de los tableros MDF la calidad del fresado en dirección frontal con una profundidad de corte mecanizada de 3, 6 y 9 mm con seis réplicas, cuatro velocidades de corte de 804, 603, 402 y 201 m/min, y una velocidad de avance de 4 m/min. Se analizó el parámetro de rugosidad promedio ( $Ra$ ). Los resultados mostraron que la rugosidad de la superficie presenta valores más bajos para las velocidades de corte de 603 y 804 m/min, y profundidades de corte de 3 mm exhibieron resultados satisfactorios para la superficie frontal. El tablero MDF utilizado fue de 15 mm de espesor, densidad  $736 \text{ kg/m}^3$  y humedad de 8.33 %, y la rugosidad superficial se midió con un perfilómetro de contacto, incluyendo imágenes por medio de un microscopio electrónico de barrido, en donde se observa la diferencia entre las diferentes profundidades, observando las fibras y adhesivo con una textura más homogénea, en los cortes de 3 y 6 mm, a diferencia de los de cortes con 9 mm, siendo estas imágenes compatibles con los resultados estadísticos de la rugosidad superficial  $Ra$ . Mientras que Bal & Gündeş, (2019), mencionan la importancia de una superficie para poder integrar una cubierta de PVC, la investigación se hace en las superficies de las muestras de prueba de MDF con tres densidades diferentes (582, 707 y  $758 \text{ kg / m}^3$ ) y tres contenidos de humedad diferentes (6, 9 y 12%) se procesaron con máquinas CNC que utilizan tres profundidades de corte diferentes (1, 3 y 9 mm). Los valores de rugosidad  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$  de las superficies tratadas se determinaron de acuerdo con ISO 468 fue por medio de un perfilómetro de contacto. Con base en los datos obtenidos, se determinó que la rugosidad de la superficie aumentó a medida que disminuyó la densidad del MDF, y la rugosidad de la superficie aumenta con el contenido de humedad y profundidad de corte. La rugosidad superficial más baja se obtuvo con un contenido de humedad del 6%,  $758 \text{ kg/m}^3$  de densidad y 1 mm de profundidad de corte. Los parámetros de corte utilizados fueron: velocidad de rotación 8000 rpm, traslape al 40% y velocidad de avance a 4 m/min, con herramientas de corte de 6mm de diámetro y dos filos. Los valores de rugosidad de la superficie aumentaron con la profundidad de corte de las muestras de prueba, reportando para el tablero de mayor densidad y con mayor C.H,  $Ra$  de 8, 12.32 y  $14.38 \mu\text{m}$

para 1, 3 y 9 mm de profundidad respectivamente. El efecto de la profundidad de corte es mayor que el de la densidad y el contenido de humedad en la rugosidad de la superficie, mientras que los valores de rugosidad de la superficie disminuyeron a medida que aumentó la densidad del MDF.

También se ha examinado el efecto de los parámetros de mecanizado en la rugosidad de la superficie de tableros MDF de 18 mm de espesor, 752 kg/m<sup>3</sup> de densidad y 7% de contenido de humedad, mecanizados por un router CNC. Los parámetros de mecanizado, como la velocidad de rotación (18000 y 24000 rpm), la velocidad de avance (2.5, 5, 7.5 y 10 m/min), la profundidad de corte (4 y 6 mm) y el diámetro de la herramienta (4 y 6 mm) con un ángulo de inclinación de la herramienta de 7°. Los valores de rugosidad de la superficie de MDF con un perfilómetro de contacto. Reportan valores de rugosidad de la superficie ( $Ra = 5.82 \mu\text{m}$ ) a una velocidad de husillo de 18000 rpm que fue mayor a una velocidad de husillo de 24000 rpm ( $Ra = 5.565 \mu\text{m}$ ), mientras que el diámetro de la herramienta se reportan para un diámetro de herramienta de 6 mm  $Ra$  de  $5.795 \mu\text{m}$ , siendo mayor que la rugosidad de la superficie generada con un diámetro de herramienta de 4 mm ( $Ra = 5.589 \mu\text{m}$ ), el valor de la rugosidad de la superficie aumentó con el aumento de la velocidad de alimentación, la velocidad de avance a 10 m/min proporcionó la superficie más rugosa (İşleyen & Karamanoğlu, 2019).

Souza et al., (2019), investiga el efecto de los parámetros de corte, el ángulo de la hélice y el número de dientes de la herramienta de corte, para definir la calidad superficial por medio de un perfilómetro de contacto y el astillamiento del corte por medio de imágenes tomadas con un microscopio digital en tableros MDF con cubierta de melanina. Reporta que el ángulo de hélice ( $\delta$ ) de la fresa es un factor esencial cuando se considera la rugosidad de la superficie y el acabado del borde de las piezas mecanizadas, el número de dientes de la herramienta de corte ( $z$ ) no influyó significativamente en los valores de  $Ra$  de la superficie fresada. No hubo influencia significativa de la velocidad de corte en el acabado de la superficie de las superficies maquinadas para el rango evaluado (300 y 450 m/min).

La rugosidad superficial del tablero MDF, en el fresado también se ve afectada por la herramienta de corte, en herramientas de corte de carburo cementado –Carburo metálico o

HM- modificado con recubrimientos de nitruro de carbono y cromo / nitruro de cromo - CrCN/CrN- y nitruro de aluminio de titanio / nitruro de titanio -TiAlN/TiN- en su filo, se han comparado la calidad de la rugosidad superficial en cortes con y sin recubrimientos, a distancias maquinadas de 90 a 630 metros lineales, midiendo la rugosidad en tres diferentes zonas del perfil de densidad, la capa central con 730 kg/m<sup>3</sup> mientras que las capas exteriores con 900 kg/m<sup>3</sup>, en un tablero de 16 mm de espesor, 5.3% de contenido de humedad y 780 kg/m<sup>3</sup> de densidad media del tablero. Se definió que la rugosidad de la superficie aumentaba dos veces cuando la densidad de MDF cambiaba del valor de 900 kg/m<sup>3</sup> al valor de 730 kg/m<sup>3</sup>, los recubrimientos aplicados disminuyen la rugosidad superficial e incrementan la distancia del corte, dando los mejores resultados el recubrimiento de CrCN/CrN. También se reportan valores de la rugosidad superficial (*Ra*) de 7.5 μm en la capa central y 12.5 μm en las capas exteriores, a los 630 metros lineales de corte, medidas con un perfilómetro de contacto (Pinkowski et al., 2011). En otra investigación en donde se revisa el efecto de tres cuchillas de carburo de tungsteno, dos directo del fabricante (HW1 y HW2) y otro integrando un recubrimiento de Nitruro de titanio y cromo (HW1+CrTiN), en diferentes tipos de tableros entre ellos un tablero MDF con densidad de 750 kg/m<sup>3</sup>, el maquinado se realizó a 4, 8 y 11 m/min de velocidad de avance y 1200, 1800, 2400 y 3600 m/min de velocidad de corte correspondiente a 3000, 4500, 6000 y 9000 rpm para un cabezal de 125 mm de diámetro, las mediciones de la calidad del corte se realizaron con un perfilómetro de contacto, realizando a diez secciones a lo largo y tres en el espesor, realizando 10 mediciones en cada muestra. Los valores de rugosidad (*Ra*) reportados para la herramienta HW1 fue de 15.8 μm, y se encontró un aumento estadísticamente insignificante en la rugosidad cuando se usa HW1 CrTiN con 16.6 μm, finalmente los valores más altos de rugosidad de la superficie se lograron después de fresar con HW2, reportando *Ra* de 17.8 μm (Sedlecký, 2017), en una siguiente investigación con estas tres herramientas HW1 que está diseñada principalmente para el mecanizado de madera maciza, HW2 diseñada para materiales aglomerados y la fresa HW1 recubierta con CrTiN está diseñada para materiales aglomerados duro, con los mismos parámetros de corte y del tablero MDF, pero en donde la medición de la rugosidad superficial se realizó tanto por un perfilómetro óptico, con microscopio de medición láser y también un perfilómetro de contacto, midiendo *Ra* bajo la norma ČSN EN ISO 4287 (1999), a partir de la comparación de los métodos sin contacto y de contacto para medir la *Ra*, indican que el método sin contacto



muestra resultados más precisos,  $Ra$  medida por el método sin contacto fue 15.5% más alta que la del método de contacto, en tablero MDF reporta  $Ra$  24.49  $\mu\text{m}$  para el método de contacto y 28.00  $\mu\text{m}$  con el método sin contacto, siendo mejor usar un perfilómetro óptico para evaluar el  $Ra$ , las desventajas del perfilómetro óptico es su precio alto, mantenimiento costoso y operación complicada, como indica Sedlecký et al., (2018).

Un resumen de las investigaciones anteriores se muestra en Cuadro 4, en donde se identifica las variables de los experimentos como es la velocidad de avance y la velocidad de rotación y la variable de respuesta que se resume en  $Ra$  de la rugosidad superficial. (A. Aguilera et al., 2000; Bal & Gündeş, 2019; J. Paulo Davim et al., 2009; Priscila Roel De Deus et al., 2015; İşleyen & Karamanoğlu, 2019; Kminiak et al., 2016; Kminiak & Banski, 2017; Koc et al., 2017; Prakash et al., 2011; Sütcü & Karagöz, 2012b).

**Cuadro 4.** Variables y rugosidad superficial en investigaciones previas sobre maquinados en tableros MDF

Tipo de material	Equipo de medición	Velocidad rotación (rpm)	Velocidad de avance (m/min)	Rugosidad superficial $Ra$ ( $\mu\text{m}$ )
MDF	Stylus	18000	4	7.53-24.72
MDF	Stylus	18000, 24000	2.5-10	6.05
MDF	Stylus	3000, 10500, 18000	0.5 - 3.88	8.75 - 13.57
MDF	Stylus	12000, 15000, 18000	0.5 – 5	4.42 - 19.88
MDF	Stylus	4000, 8000, 12000, 16000	2 – 6	13.55 - 20.12
MDF y Madera sólida	Laser	15000, 18000	2 – 8	2.72 - 11.71
MDF	Laser	20000	1 – 5	12.26 - 22.62
MDF	Laser	20000	1 – 2	15.00 – 23.00
MDF	Stylus	1000, 2000, 5000	0.1 - 0.2	11.12

### 3.3. La rugosidad superficial en tableros MDF y otros procesos

Investigaciones relacionadas con las propiedades de los maquinados en los tableros MDF, no en relación con el proceso de maquinado por fresado, pero si en relación con la

composición del tablero MDF, el proceso de lijado y el corte con sierra circulares se presentan a continuación:

- La evaluación de la rugosidad superficial en cortes longitudinales por sierra circular también es de interés. Una de las primeras investigaciones en tableros MDF la presenta A. Aguilera, (2008), con la intención de evaluar y cuantificar las fuerzas de corte requeridas y estudiar la relación con la rugosidad obtenida dentro del perfil en donde hay variación de densidad, por la misma fabricación del tablero MDF, midiendo la rugosidad superficial por medio de un perfilómetro de contacto. En otra investigación se presenta por medición del sonido, siendo posible predecir la rugosidad superficial y reportando valores de la rugosidad superficial media ( $Rz$ ) 89.6  $\mu\text{m}$ , como promedio del perfil del espesor del tablero a una velocidad de corte de 44.5 m/s, velocidad de alimentación de 4.2 m/min (A. Aguilera y Barros, 2010), la estimación del desgaste por medio de la metodología Cupla Herramienta de Corte-Material (COM), en donde determina la longitud máxima de maquinado que se define de tres mil metros, en donde se mantiene las condiciones correctas del estado superficial de las piezas (A. Aguilera et al., 2000).
- La rugosidad después de un proceso de lijado, se investigó en tableros comerciales de Tailandia y su característica, donde se midió la rugosidad superficial por medio de un perfilómetro de contacto a lo largo de la marca del lijado y a través de ella, se identificó que no hay diferencia significativa entre la dirección de medición, se reportan valores promedio de 3.44 y 2.62  $\mu\text{m}$  para  $Ra$ , mientras que  $Rz$  tiene 27.23 y 22.04  $\mu\text{m}$  entre diferentes especies maderables de los tableros MDF, donde tampoco se identifica una diferencia significativa, en esta investigación también se revisa la superficie de tableros de partículas (Hiziroglu et al., 2004), por otra parte también se define que la medición de la rugosidad superficial por medio de un perfilómetro de contacto, estadísticamente puede definir la calidad entre diferentes tipos de tableros MDF, en donde la rugosidad superficial es un parámetro que ayuda a definir la estabilidad de las diferentes cubiertas que se aplican en sus caras (Hiziroglu, 2004). En otra investigación Hiziroglu y Kosonkorn, (2006) reporta medidas de rugosidad de ambos lados de las muestras lijadas a lo largo de las marcas de arena en un trazo de

15,2  $\mu\text{m}$ . El tablero con la superficie más lisa dio valores promedio de 2.39, 21.03 y 26.93  $\mu\text{m}$  para  $Ra$ ,  $Rz$  y  $Rmax$ , respectivamente. Reporta que no existía una diferencia estadísticamente significativa entre los valores de los tres parámetros tomados en ambas direcciones de marcas de arena de todos los tipos de paneles.

- Respecto a la adhesión de cubiertas de PVC sobre tableros MDF; la rugosidad de la superficie influye en la resistencia a la tracción perpendicular a la superficie, se encontró que el proceso de lijado disminuye la rugosidad de la superficie del MDF y, a medida que aumenta el tamaño de grano de los abrasivos, la rugosidad de la superficie disminuye. La rugosidad de la superficie influye en la resistencia a la tracción perpendicular a la superficie de las muestras. El tipo de superficie más adecuado para un menor costo y la mayor resistencia a la tracción es el lijado con un abrasivo de grano 240. en el proceso de lijado realizado con los abrasivos de grano 220, 240, 280 y 320, a medida que el tamaño del grano del abrasivo disminuye (a medida que aumenta el número de grano), la rugosidad de la superficie de los paneles de MDF disminuye. Sin embargo, este aumento no es lineal. A medida que disminuye la rugosidad, el aumento de la resistencia a la tracción es relativamente menor, debido a la composición, geometría, dimensiones y la homogeneidad dimensional de las fibras utilizadas en la producción son variables importantes que afectan las características superficiales del MDF y, en consecuencia, sus características de resistencia a la tracción. Además, los tipos de adhesivo, las condiciones de prensado y las características estructurales de los materiales de laminación utilizados, también influyen en las características de resistencia a la tracción de los materiales laminados (Kiliç et al., 2009).
- Otras investigaciones han relacionado el proceso de fresado y el lijado, la influencia de los parámetros de corte en la rugosidad de la superficie del tablero de MDF después del fresado y lijado. Se reporta que el aumento del avance por diente, a una velocidad de rotación constante del husillo (12000 rpm) provoca un aumento de la rugosidad de la superficie durante el fresado, mientras que en el proceso de lijado a velocidad de rotación constante del husillo (8000 rpm) mostró tendencia a aumentar la rugosidad de la superficie con el aumento de avance por revolución (Wilkowski et al., 2015).
- Las características y propiedades físicas del material de trabajo, se define por sus

materias primas, se ha investigado el uso de diferentes materias primas y adhesivos en las capas superficiales de tableros MDF, para identificar sus características de la rugosidad superficial, la lignocelulósica es el factor más importante que afecta la rugosidad superficial de los tableros MDF encolados con adhesivos MUF (Melamina-urea formaldehído) y TF (Tanino formaldehído). La rugosidad superficial se midió tanto por un método de no contacto por análisis de imagen, como por un método de contacto con un perfilometro, ambas técnicas tiene diferentes sensibilidades a cambios en las condiciones climáticas, se observa un incremento de la rugosidad superficial ( $Ra$ ) a mayor contenido de humedad valores de 5.7, 6.5 y 6.9  $\mu\text{m}$  en 3, 7.5 y 9.5 de contenido de humedad (%), para tableros no recubiertos con resina MUF, fibras secas y un proceso de lijado con grano 120 (Rolleri & Roffael, 2006).

La calidad del lijado determina la calidad final del acabado e influye en el nivel de costos de acabado. Además, la tendencia hacia recubrimientos más delgados para muchos procesos de acabado requiere una mejor comprensión de cómo lograr y evaluar superficies lisas y sólidas (Gurau & Irle, 2017). En otra investigación (Hiziroglu & Kosonkorn, 2006) reporta medidas de rugosidad de ambos lados de las muestras lijadas a lo largo de las marcas de arena. También se define que la medición de la rugosidad superficial por medio de un perfilómetro de contacto estadísticamente puede definir la calidad entre diferentes tipos de tableros MDF, en donde la rugosidad superficial es un parámetro que ayuda a definir la estabilidad de las diferentes cubiertas de papel que se aplican en sus caras (Hiziroglu, 2004).

Las diferentes proporciones de materia prima lignocelulósica identifican también una influencia en la rugosidad superficial y la humectabilidad del tablero. Akbulut y Ayrilmis, (2006), investigaron la influencia de la madera de compresión en los tableros MDF y su estabilidad dimensional al medir la rugosidad superficial. Obtiene valores medios  $Ra$ ,  $Rz$  y  $Rq$  de 4.15, 31.68 y 40.20  $\mu\text{m}$ , para el tablero de 810  $\text{kg}/\text{m}^3$  densidad, compuesto con 75% madera de compresión y 25% madera normal, mientras que los valores reportados con 10% madera de compresión y 90% madera normal, son de valores  $Ra$ ,  $Rz$  y  $Rq$  de 3.96, 29.91 y 38.14  $\mu\text{m}$  respectivamente y una densidad de 790  $\text{kg}/\text{m}^3$ , en los dos casos los tableros se

lijaron después del enfriamiento del prensado, para realizar la medición de la rugosidad superficial por medio de un perfilómetro de contacto. Por otra parte, se reportan valores promedios de  $R_a$ ,  $R_z$  y  $R_q$  de 9.8, 66.0 y 12.4  $\mu\text{m}$  respectivamente, para los tableros de fibras de *Pinus sylvestris* L y *Quercus robur* L –utilizados en la industria del mueble-, encolado con adhesivos UF, después del proceso de prensado y el enfriamiento, se lijaron con grano 50, 80 y 120, para acondicionarlos a un 12% de contenido de humedad. En estas mismas condiciones se reportan resultados para diferentes proporciones de mezclas las utilizadas en la industria con Rhododendron a 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 y 100:0; a medida que se incrementa la proporción de Rhododendron, la rugosidad superficial disminuye  $R_a$ ,  $R_z$  y  $R_q$  de 7.0, 46.3 y 8.8  $\mu\text{m}$  respectivamente para la mezcla 25:75, lo que señala la influencia de la materia prima en la humectabilidad y rugosidad superficial en los tableros MDF (Akgül et al., 2012).

La calidad superficial de los tableros MDF, en específico la rugosidad superficial como se ha mencionado está influenciada por las propiedades de la pulpa de fibra de madera, la rugosidad superficial es importante para la calidad de la unión, por ejemplo, pegar chapa a madera maciza. Wenderdel et al., (2013), reporta la rugosidad de las superficies de fibra de madera, así como la influencia de la rugosidad de la superficie en las propiedades de los tableros MDF. La medición de la rugosidad superficial se llevó a cabo con una microscopía de escaneo láser confocal (CLSM, por sus siglas en inglés) y se determinó la influencia de la fibra de madera en las propiedades de los tableros MDF que se fabricaron. Las especies comparadas fueron pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), las fibras de madera de haya (*Fagus Sylvatica*) (desfibradas a la misma temperatura) tienen una superficie más lisa. La rugosidad de la superficie de las pulpas de fibra de madera inducida por la temperatura de desfibración se correlaciona con las propiedades de MDF. La rugosidad superficial en las fibras de la pulpa fue mayor a 0.45  $\mu\text{m}$  y menor a 15  $\mu\text{m}$ .

Las condiciones ambientales influyen en la rugosidad superficial como es el contenido de humedad de equilibrio, que en el caso de los tableros MDF es una compleja función de interacciones entre muchas variables –tipo de fibras, adhesivos, ciclo de prensado, temperatura, contenido de humedad-, Rolleri y Roffael, (2007) definen que tanto el adhesivo como las materias primas tiene un papel relevante en el contenido de humedad en equilibrio

del tablero MDF, que el adhesivo TF logra superficies más suaves que los tableros MDF encolados con MUF independiente de la materia prima usada de 3.9 y 6.9  $\mu\text{m}$  respectivamente, para tableros MDF en condiciones climáticas de 30°C, 85% humedad relativa, con fibras secas y lijados con grano #120.

Al ser el barrenado un proceso requerido en la fabricación de mobiliario, tanto en tableros de partículas como tableros de fibras, se han realizado trabajos en donde se investigan los defectos de astillamiento, las fracturas que se generan en el proceso de barrenado y como los parámetros de corte pueden minimizar los defectos, estos defectos se miden por medio de imágenes, indicando que el factor del astillamiento disminuye con un aumento de la velocidad de corte (J P Davim et al., 2008; J P Davim, Clemente, et al., 2007; J P Davim, Rubio, et al., 2007), en donde se define que la combinación de parámetros de corte, pueden mejorar la calidad superficial del barrenado, Gaitonde et al., (2008), indica que a una velocidad de corte (en rango alto) y velocidad de avance (en rango bajo) se logra reducir la tendencia de astillamiento en la perforación de MDF. Por otra parte y en relación con la medición de la rugosidad superficial se tiene la investigación de Prakash & Palanikumar, (2010), en donde se evalúa y predice la rugosidad superficial a partir de los parámetros de corte y las herramientas de corte, el parámetro de perforación en el tablero MDF más significativo es la velocidad de avance seguida de la velocidad de corte, obteniendo valores promedio ( $Ra$ ) de 9.38, 10.01 y 10.55  $\mu\text{m}$  para 4, 8 y 12 mm de diámetro de la broca respectivamente, a 500 mm/min velocidad de avance y 1000 rpm. Se identifica que la rugosidad de la superficie aumenta al aumentar la velocidad de avance, pero disminuye al aumentar la velocidad de rotación, siendo la velocidad de avance el factor dominante. Otra investigación sobre la rugosidad superficial en el barrenado y su predicción, reporta mediciones de  $Ra$  de 14.57  $\mu\text{m}$  y  $Rz$  de 77.35  $\mu\text{m}$ , para 500 mm/min de velocidad de avance y 1000 rpm, dentro de un diseños de Box-Behnken (Prakash et al., 2011).

### **3.4. La rugosidad superficial en router CNC, en la industria del mueble**

La rugosidad superficial en maquinados de corte en el sector industrial dentro del país no se encuentra definida y aun no se aplica como un requisito en una pieza a maquinar o parte del control de calidad del proceso de maquinado, como parte de la vinculación con empresas

del sector del mueble del municipio de Tijuana, en el estado de Baja California, se realizaron visitas industriales y entrevistas, de donde se conocieron los parámetros de corte en sus equipos CNC (Cuadro 5), de aquí se identifica que las velocidades de avance van de 5 a 15 m/min, y que manejan 12000 o 18000 rpm, en la rotación del husillo, y no se tiene variación de los parámetros en relación con los diferentes tipos de tableros que maquinan.

Cuadro 5. Parámetros de corte en empresas de fabricación de muebles, en el municipio de Tijuana, B.C.

Empresa	Velocidad de avance (m/min)	Velocidad de rotación (rpm)	Diámetro (mm)	Número de dientes
RedWorks	7.5	12000	6.35	1
	5		12.7	2
			19	4
Noble Millwork	15	18000	6.35	1
			12.7	2
				4

Con el objetivo de tener el antecedente de la rugosidad superficial en la industria del mueble, se solicitó a las empresas proporcionar probetas de los siete diferentes materiales que manejan, siendo de interés para este proyecto de investigación los tableros a base madera; listonado, contrachapado, MDF, y de partículas. Los cuales se maquinaron a una velocidad de avance de 15 m/min. Y una velocidad de rotación de 18000 rpm. Un primer punto importante es que las investigaciones sobre rugosidad superficial y parámetros de maquinado se hacen a velocidades relativamente bajas en comparación con los parámetros usados en la industria. En la Figura 7, se muestran las diferentes probetas proporcionadas por las empresas, en las que se tienen tanto productos maderables como materiales compuestos.

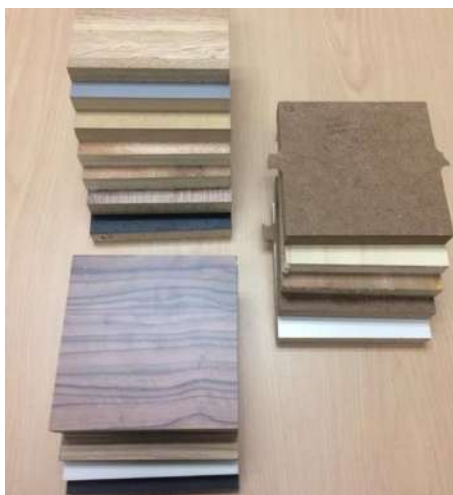


Figura 7. Probetas de corte proporcionadas por Noble Millwork y Redworks Industries

Los resultados obtenidos de rugosidad superficial se encuentran por debajo de los experimentos anteriores con excepción del MDF (Cuadro 6), lo que indica una mejor calidad de maquinado, para el análisis de los diferentes factores se realizara una estancia en la empresa. La rugosidad superficial en el MDF se encuentra dentro del rango manejado en los experimentos, pero es importante identificar que la velocidad de avance dentro de las empresas se realiza a 15 m/min.

Cuadro 6. Rugosidad superficial en maquinados de corte del sector industrial

Tipo de tablero	Redworks		Noble Millwork	
	Rugosidad superficial media	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	Rugosidad superficial media	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )
Tablero listonado	-		5.7505	
Tablero contrachapado	13.155		7.810	
Tablero de fibras de densidad media	13.410		8.899	
Tablero de partículas	11.531		7.208	

Al revisar los resultados de rugosidad superficial de los maquinados realizados en las dos empresas, la calidad de la superficie es mejor que la que se generó a nivel laboratorio, para definir y realizar nuevamente el experimento se realizó una estancia corta en la empresa, logrando generar nuevamente las probetas y los maquinados. Siendo necesario definir la aceleración y desaceleración de cada maquinado identificando la zona en donde se cumple



con la velocidad de corte a estudiar.

Las investigaciones anteriores sobre la rugosidad superficial en los tableros MDF, indican que es de gran interés conocer los parámetros del proceso que garanticen una calidad adecuada de la superficie del tablero, por una parte en las proporciones de las materias primas y procesos para fabricar el tablero MDF, así como los parámetros dentro del proceso de manufactura del mueble, el proceso de lijado, el proceso de corte tanto por sierra circular y principalmente el fresado por router CNC en donde se pueden controlar los diferentes parámetros de corte. Se observa una variación entre las diferentes variables independientes de los experimentos, lo que hace difícil su comparación, pero indica la importancia de seguir investigando sobre este tema. También se define que el perfilómetro de contacto es uno de los métodos más utilizados y que los métodos de no contacto han permitido un mejor entendimiento de la interpretación de la rugosidad superficial. El anexo 3, presenta un resumen de la importancia de la rugosidad superficial en el maquinado de tableros MDF.

#### **4. Justificación**

La rugosidad superficial define la calidad en las operaciones de maquinado, es importante identificar los parámetros del proceso en los tableros MDF, que influyen en calidad, precisión y diseño de los muebles. De manera que el diseño de muebles de madera y los implicados en el diseño estén conscientes de las características tecnológicas del material de trabajo, en este caso en particular de los tableros de fibras y por ser un material higroscópico, anisótropo y orgánico, con una multitud de aspectos que varían por origen natural del material. Esto se refleja en procesos de manufactura eficientes, reducción de tiempos, menor costo, rendimiento de materia prima, calidad, estética y función. Para ello es importante conocer parámetros de maquinado, los cuales pueden vincularse a la rugosidad superficial, para cuantificar la calidad del proceso de maquinado y del resultado requerido en las operaciones de maquinado, para procesos posteriores como un lijado, pegado, ensamble o terminado. Los alcances en el proceso de diseño de muebles dan una propuesta de técnica y de procesos con base a las tecnologías CAD, CAM y procesos CNC, para la obtención de objetos-productos óptimos. Con esto se pretende crear una línea de investigación del uso de tecnologías para el diseño, producción y calidad de mobiliario de madera fundamentado en las características tecnológicas de paneles de madera sustentables.



## **5. Objetivo general**

Evaluar la rugosidad superficial de los tableros MDF en las operaciones de maquinado por router CNC, como indicador en los procesos de diseño de muebles innovadores de empaque plano.

### **5.1. Objetivos específicos**

Caracterizar los procesos de corte, vaciado y grabado en tableros MDF.

Establecer los parámetros de maquinados para los tableros MDF por medio de la rugosidad superficial.

Aplicar un proceso de diseño en donde se integre la rugosidad superficial del proceso por router CNC, en la generación un modelo de utilidad, con un mueble de empaque plano.



## **6. Hipótesis**

Se identificará a la rugosidad superficial como el índice de calidad en las operaciones de maquinado por router CNC, a partir de los parámetros de corte, los tableros MDF y de los procesos subsecuentes, que incidirá en el diseño y fabricación de mobiliario.

### **6.1. Hipótesis específicas**

La rugosidad superficial puede ser controlada a partir de los parámetros de maquinado.

La rugosidad superficial influye en el diseño para la fabricación de muebles de empaque plano.



## 7. Materiales y métodos

El material por evaluar se compone de seis sujetos de estudio, una primera clasificación se hace en el tipo de tablero, a base de partículas y a base de fibras, de los cuales se estudian tableros comerciales y tableros a base de lignina despolimerizada y son tableros tricapa y monocapa.

Los tableros comerciales son producidos por la marca *Roseburg* que cumplen con las certificaciones C: P: A MIII 045 y *Eco-Certified* #047, lo que indica que sus adhesivos son a base de *polymeric methylene diphenol diisocyanate* (pMDI). También se tienen los tableros comerciales nacionales que son fabricados por marca MASISA y que su adhesivo es principal es el melanina-urea-formaldehído (MUF), en los dos casos se están manejando tableros tricapa. Y un tablero marca Arauco.

Los tableros a base de lignina despolimerizada fueron producidos a nivel laboratorio, en la Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en dimensiones de 300 mm por 300 mm, con un espesor de 3.175 mm, y densidad de 737 kg/m<sup>3</sup>. Se tiene la especificación del proceso de fabricación y las características de los tableros, resultado de la investigación del Dr. Serafín Colin-Urieta.

Los tableros utilizados se describen en el Cuadro 7, definiendo los diferentes espesores estudiados.

Cuadro 7. Condiciones de los tableros a maquinar

Tablero	Marca	Tipo de tablero	Densidad kg/m <sup>3</sup> .	Espesor mm	C.H.	Adhesivo
a	Roseburg	MDF	759	12.87	10%	pMDI
b	Comercial	MDF	652	12.70	10%	MUF
c	Comercial	MDF	540	9.24	10%	MUF
d	Roseburg	Particulas	696	9.64	10%	pMDI
e	FITECMA	Partículas	737	5.35	9%	Lignina despolimerizada
f	Arauco	MDF	611	19.00	10%	-



El tablero MDF se define como un material homogéneo, esto es parcialmente cierto, ya que, al ser conformado por capas, cada capa puede tener una densidad diferente por lo que se identifica un gradiente dentro del espesor del tablero, esta característica permite identificar diferentes propiedades de calidad superficial dentro del área de un mismo maquinado. En la Figura 8, se definen los gradientes de densidad de los tres tableros MDF.

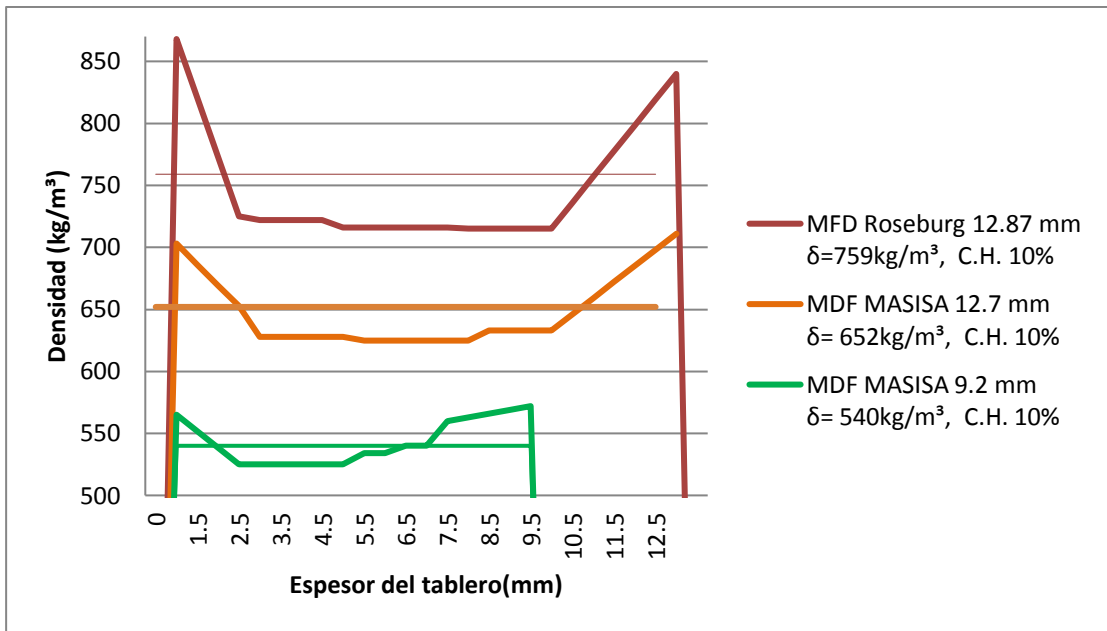


Figura 8. Gráfica de los perfiles de densidad de los tableros, en el espesor de los MDF

Las herramientas de corte aplicadas a los diferentes maquinados se indican en el cuadro 5, se clasifican por medio de su geometría, número de filos, diámetro, largo del corte y tipo de material.

Cuadro 8. Características generales de las herramientas de corte

Geometría	Diámetro corte (mm)	Longitud de corte (mm)	No. De filos
Recto	6.35	12.7	2
	6.35	12.7	1
Punta V 90°	12.7	12.7	2

Las herramientas a utilizar son de carburo de tungsteno WC, marca Amana tool. Para esta investigación se utilizaron tres tipos de geometría y se manejan herramientas de corte de uno y dos filos, ya que los tableros de MDF se clasifican como un material blando para maquinar, por lo que un mayor número de filos puede obstruir el desalojo de la viruta (ver Figura 9).



Figura 9. Herramientas de corte utilizadas en la investigación: a) cortador de punta V90, b) cortador recto 2 filos y c) cortador recto un filo

El proceso de maquinado se realiza por medio de un *router* CNC, marca *Techno LS Series 4896* que se encuentra en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California, el cual permite controlar las velocidades de rotación de la herramienta y la velocidad de corte, en el Cuadro 9, se describen las características del equipo, que cuenta con intercambiador de herramienta, sujeción mecánica del material de trabajo y calibrador de altura (Figura 10.a).

Cuadro 9. Características de *Router Techno CNC LS Series 4896*

Área de trabajo	Repetibilidad	Resolución	Velocidad máxima	Grados de libertad
1.22 x 2.44 m	0.00254 mm	0.00508 mm	105 a 338 mm/s	3

La rugosidad superficial es medida por medio de un perfilómetro marca Mitutoyo modelo SJ-210. Utilizado para el control de calidad y metrología en metales y plásticos. Dentro del rango de medición se tiene en el eje Z de -200  $\mu\text{m}$  a +160  $\mu\text{m}$ , 5.6 mm en el eje X,

y una resolución de 25  $\mu\text{m}$  a 0.0002  $\mu\text{m}$ . Otras características de la medición es la velocidad de medición y el número de mediciones. Con un radio de aguja de 5  $\mu\text{m}$  Las mediciones se realizaron con base en el estándar ISO 469 (1997), filtro Gaussiano, longitud total de medición  $L_m = 12 \text{ mm}$ , con un módulo de medición  $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$  (Cut-off) y  $\lambda_s = 2.5 \mu\text{m}$  (Figura 10.b).

Para la medición de la fuerza de agarre en los ensambles se utilizó un medidor de fuerza SHIMPO FG-3005, resolución 0.01N, capacidad 50N, sobre un banco de pruebas mecánicas marca Chantillon serie MT 500H, con mordazas lisas de aluminio, para medir la resistencia del ensamble a una velocidad de 8 mm/min (Figura 10.c).

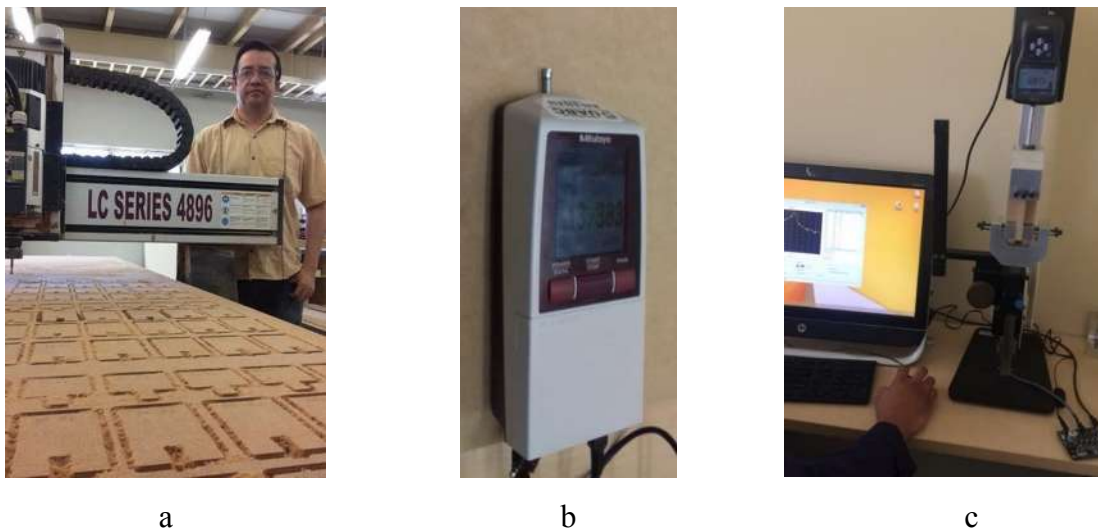


Figura 10. Equipos utilizados: a) router CNC, b) Rugosímetro y c) Banco de pruebas

En la Figura 11, se indica el esquema de los diferentes maquinados a realizar, en una primera etapa se trabajará el experimento con cortes de vaciado, conocidos como cajeras, que tienen una profundidad vertical y que no traspasan el material, un vaciado también puede definir un relieve como se observa en el inciso a), para ello es importante precisar que la medición de la rugosidad superficial se realizará sobre la superficie del corte y no en los costados. En una segunda etapa se realizará el experimento con maquinados de corte, en donde la medición de la rugosidad superficial es en los costados, para concluir con un experimento que defina la calidad de la superficie en el proceso de grabado de la madera.

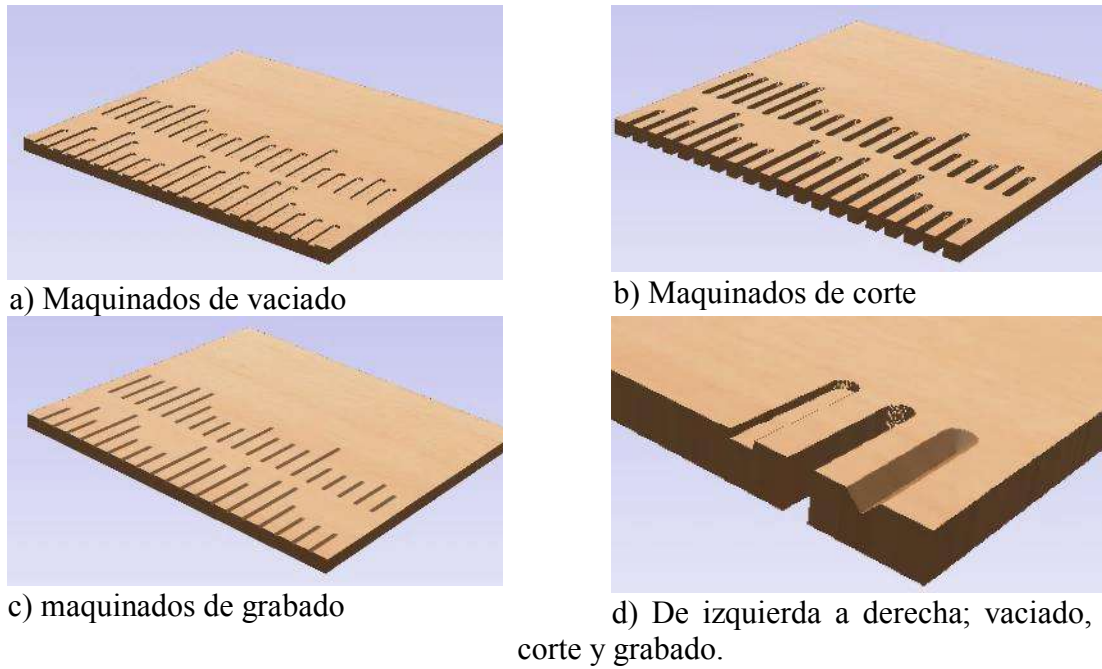


Figura 11. Esquema de tipos de maquinados a realizar en las probetas

En la Figura 12, se identifican las zonas de medición de la rugosidad superficial recomendadas. Primero se observa la medición en la parte media del espesor del tablero, teniendo en cuenta que en esta sección la densidad del tablero es menor, por lo que la rugosidad superficial es mayor que en los extremos (Figura 12.a). En la operación de vaciado, la cual es representativa de un vaciado, ranurado o grabado, se mide la superficie axial (Figura 12.c). Por ultimo en la operación de barrenado se mide la longitud del orificio (Figura 12.b).

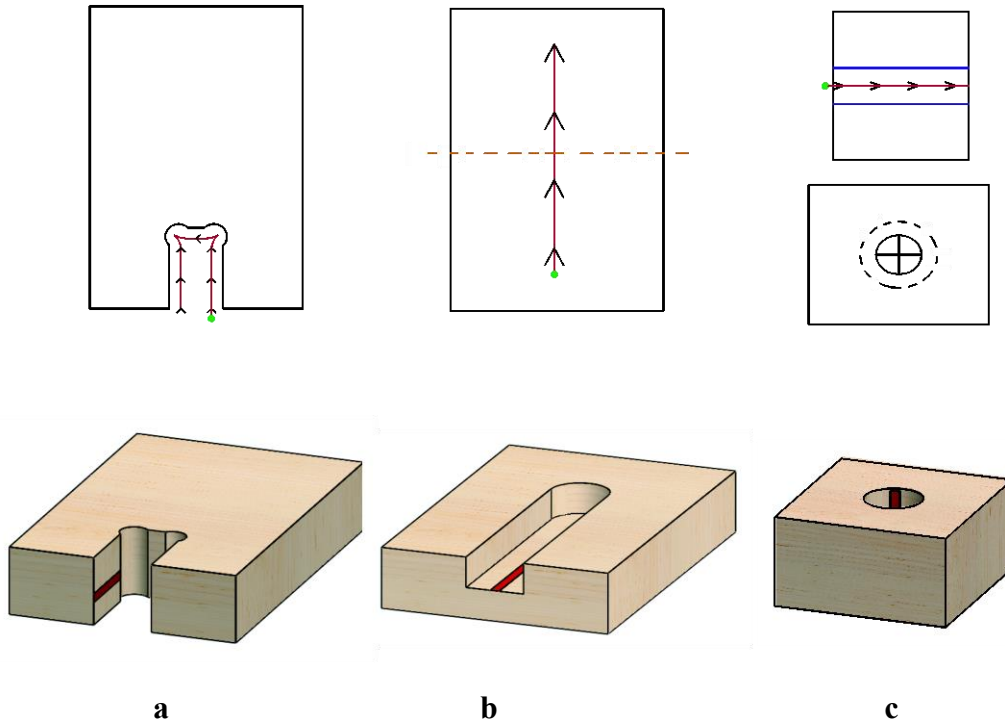


Figura 12. Zona de medición de la rugosidad superficial en las operaciones de maquinado y trayectoria del maquinado, a) operación de corte, b) operación de vaciado, y c) operación de barrenado

Dentro del control de calidad o monitoreo de los procesos de maquinado, es de gran importancia definir las zonas de medición de la rugosidad superficial para reducir el error en las mediciones.

Debido al gradiente de densidad del tablero MDF, es necesario definir los puntos de medición, es importante mencionar que se consideró la aceleración y desaceleración en la velocidad de avance, por lo que las mediciones de la rugosidad se realizaron en la zona intermedia de la longitud del maquinado, garantizando la velocidad de avance. Por otra parte, la medición dentro del ancho del corte en el caso del vaciado se definió a 2 mm, mientras que, con relación al corte se midió a 2, 4 y 6 mm de profundidad y se relacionó con la densidad de cada sección. El número de repeticiones y mediciones dependió del experimento. El análisis estadístico se realizará en los diferentes software, Matlab para procesamiento de los perfiles de rugosidad superficial, y para procesar los resultados del diseño experimental por una parte se generaron las gráficas en COPAD, Common Online Data Analysis Platform, por sus siglas en Ingles (Finzer et al., 2018), en Rstudio y en Minitab se realizaron los

análisis de varianza (RStudio Team , 2020).

Los diseños de experimentos se realizaron en diferentes etapas, con el objetivo de conocer el impacto de las variables independientes en la calidad del maquinado. El primer experimento se hace con tres variables independientes: Dirección del maquinado, profundidad de corte y velocidad de avance, en dos tableros MDF a tres niveles, midiendo la calidad superficial sobre el plano horizontal del maquinado. El segundo experimento se tienen las variables independientes de velocidad de avance, velocidad de rotación y tipo de tablero, se analiza la calidad superficial en el plano horizontal del corte. El tercer experimento se nombra “Diseño experimental en corte periférico y axial, para tablero MDF”, este experimento se lleva a cabo solo en el tablero MDF, a cuatro niveles de velocidad de avance, con tres herramientas de corte y tres velocidades de rotación, midiendo la calidad superficial en las dos caras laterales del corte del tablero correspondientes al espesor. Finalmente se diseña el experimento en donde se mide la calidad superficial tanto en la cara horizontal como en las laterales del mismo maquinado, y el proceso de barrenado, las variables independientes son: la velocidad de rotación y la velocidad de avance, en un mismo tipo de tablero MDF, con una herramienta de corte recta. Lo que permite hacer el experimento en donde se aplica el efecto de la rugosidad superficial en el diseño de un mobiliario definiendo la incidencia de la rugosidad superficial en los ensamblajes del mueble.

### **7.1. Diseño experimental: variables del corte para el maquinado de vaciado**

Para el diseño del experimento se inicia con una prueba preliminar para definir los alcances de las mediciones del rugosímetro, Estableciendo como variables independientes la velocidad de alimentación (V), la profundidad de corte (P) y la trayectoria a maquinar dentro de un vaciado (T), con la herramienta de corte de dos filos recta (figura 6.b). Los parámetros del experimento se indican en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Condiciones para el experimento preliminar de maquinado por vaciado en MDF

VARIABLES INDEPENDIENTES	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Velocidad de avance (V) m/min	0.5	1.5	2.5
Profundidad del corte (P) mm	2	4	6
Trayectoria de Maquinado (T)	Vertical	Diagonal	Transversal

El experimento cuenta con tres factores (V, P y T) de tres niveles, manteniendo constante la velocidad de rotación a 9000 rpm y realizando el mismo experimento en dos bloques completos al azar. Se define un bloque para cada tablero A y B por su densidad 759 y 652 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Para revisar la variabilidad de los factores de tratamiento y de bloques, así como el error aleatorio.

El análisis estadístico es por medio de un diseño factorial completo, con tres réplicas revisando la significancia de cada Factor y los efectos de interacción por medio de un análisis de la varianza que se definen por medio de la comparación de las medias aritméticas  $\bar{x}$ , entre los niveles. Se utiliza el coeficiente de correlación y la prueba de Tukey, en busca de que los resultados del experimento permitan definir los parámetros de corte a utilizar en los siguientes experimentos, también se tomarán en cuenta los parámetros utilizados en la industria de la región y los utilizados en otras investigaciones.

## 7.2. Diseño experimental: maquinado de vaciado para tableros de partículas y MDF

Para el experimento se obtiene 32 secciones de cada tablero comercial en dimensiones de 300 x 300 mm, se determinó el Contenido de humedad y la densidad por cada sección. El maquinado consta de trayectorias de 35 mm de largo, 2 mm de profundidad, 6 repeticiones y 3 mediciones por maquinado.

Los parámetros del diseño del experimento se indican en Cuadro 11, por una parte, se tienen los tableros comerciales de partículas, tableros MDF y tableros a base de lignina despolimerizada.

Cuadro 11. Parámetros del diseño del experimento de maquinados de vaciado en tableros de partículas y MDF

Variables independientes	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Velocidad de avance (m/min)	2	4	6	8
Velocidad de rotación (rpm)	6000	9000	12000	
Tipo de Tablero	MDF comercial	Aglomerado comercial	Aglomerado lignina despolimerizada	

Con el objetivo de interpretar los resultados se realizó una medición por 3D por medio de un perfilómetro Contour Elite I, el área a observar es de 1.2 mm x 0.90 mm con el objetivo 5x.

### 7.3. Diseño experimental en corte periférico y axial, para tablero MDF

El proceso de maquinado de corte es más complejo que el maquinado de vaciado debido a que en el primero se obtienen dos secciones mientras que en el vaciado el material permanece en una sola pieza. Por lo que fenómenos como la vibración del material, la dirección del corte y los factores dinámicos afectan directamente el resultado de la rugosidad superficial (Kminiak y Banski, 2017).

El proceso de maquinado se realiza por medio de un router CNC, marca Techno modelo SL4896. Las probetas experimentales son obtenidas de MDF comercial en México y Estados Unidos, con densidad 668 kg/m<sup>3</sup> y 759 kg/m<sup>3</sup> respectivamente, los tableros se seccionaron en probetas de 300 x 300 x 12.7 mm, los cortes se realizaron a una profundidad de 2 mm, con una velocidad de rotación de 6000, 9000 y 12000 rpm, con velocidades de avance de 2, 4, 6 y 8 m/min (Cuadro 12).



Cuadro 12. Parámetros del diseño experimental, para evaluar el corte periférico y axial

VARIABLES INDEPENDIENTES	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Velocidad de avance (m/min)	2	4	6	8
Velocidad de rotación (rpm)	6000	9000	12000	
Tablero MDF comercial	MDF a	MDF b		
Herramienta de corte	a	b	c	

Las herramientas de corte utilizadas fueron de geometría recta, de carburo de tungsteno WC. helicoidales de dos filos, de 6.35 mm de diámetro.

#### 7.4. Rugosidad superficial en las operaciones por router CNC para MDF

Se presenta el diseño experimental para identificar las tres operaciones principales que se realizan en el router CNC: Corte, barrenado y vaciado, este último que permite identificar si el material es adecuado para generar grabados y ranurados. Por un diseño factorial, con seis réplicas se revisó la significancia de cada factor y los efectos de interacción por medio del ANOVA. El primer factor corresponde a velocidad de avance con tres niveles a 0.5, 1 y 2 m/min, el segundo factor es la velocidad de rotación a 6000 a 12000 rpm (Cuadro 13).

**Cuadro 13.** Parámetros del diseño experimental, para evaluar la operación de corte y barrenado

VARIABLES INDEPENDIENTES	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Velocidad de avance (m/min)	0.5	1	2
Velocidad de rotación (R) rpm	6000	12000	

Para el vaciado se integran otros dos factores: la dirección de la trayectoria de corte, siendo paralela, perpendicular y diagonal en referencia al largo del tablero. Y el factor de la profundidad de corte que corresponde a 2 y 4 mm (Cuadro 14).

Cuadro 14. Parámetros del diseño experimental, para evaluar la operación del vaciado

Variables independientes	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Velocidad de avance (V) m/min	0.5	1	2
Velocidad de rotación (R) rpm	6000	12000	
Profundidad del corte (P) mm	2	4	
Trayectoria de Maquinado (T)	Perpendicular	Diagonal	Paralela

La zona de medición de la rugosidad superficial corresponde a la parte media del maquinado. Se aplica la prueba de Tukey, como parte del análisis estadístico de las variables de respuesta  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$  que identifican la rugosidad superficial en la investigación. El modelo de regresión  $R^2$  ajustado, definido por la fórmula 4, indica el grado de intensidad que tienen las variables independientes en explicar la rugosidad superficial.

$$R_{ajustada}^2 = 1 - \left[ \left( \frac{n-1}{n-k-1} \right) * (1 - R^2) \right] \dots\dots\dots(4)$$

Donde  $R^2$  es  $R$  cuadrada, coeficiente de determinación  
 n es número de observaciones de la muestra.  
 k es el número de variables independientes.

### 7.5. Rugosidad superficial, muebles y ensambles

A partir de los resultados de la rugosidad superficial y el efecto de los parámetros de maquinado se identifica la influencia de las variables independientes que generan diferente rugosidad superficial. La combinación de los parámetros de velocidad de corte y velocidad de rotación permitió 6 grupos que corresponden a los parámetros de maquinado, con seis replicas cada uno, los parámetros del diseño de experimentos se presentan en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Parámetros del diseño experimental, de la rugosidad para el ensamble suave

Variables independientes	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Velocidad de avance (V) m/min	0.5	1	2
Velocidad de rotación (R) rpm	6000	12000	

Las dimensiones de las probetas que corresponden a la capacidad de las mordazas del banco de pruebas, se representan en la Figura 13. La rugosidad superficial de cada grupo cambia la interferencia entre los elementos. El contacto del ensamble corresponde a dos superficies: la superficie de la cara del tablero MDF comercial marca AURAUCO, con  $Ra$  media de  $3.08 \mu\text{m}$ , que fue lijada en el proceso de fabricación del tablero y se considera constante en el experimento, mientras que la superficie maquinada en el proceso de corte es la variable independiente.

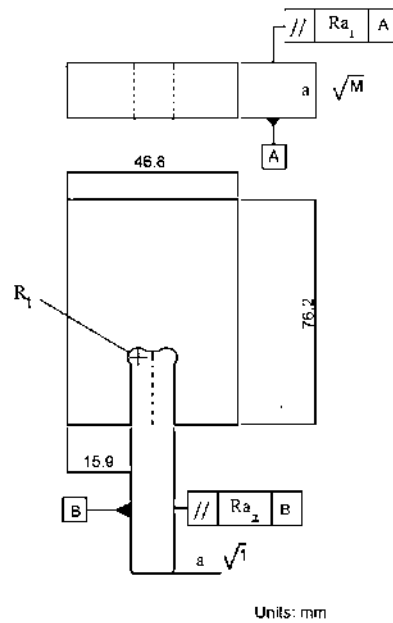


Figura 13. Plano de las dimensiones de probetas para el ensamble suave

El ensamble implementado en el mobiliario, se basa en un ensamble donde la pieza tiene en una cara la hembra y del otro costado se une a hueso, como el sistema implementado en los trojes purépechas de Michoacán México, teniendo la particularidad de poder ser desarmados y trasladados a otros lugares (Arreguín Pérez, 2020), en esta propuesta de mobiliario se integra el concepto de los rompecabezas de nudo gregoriano, permitiendo que al unir las diferentes elementos del mueble, logran un mobiliario en donde la última pieza es el candado que mantendrá unidas a las piezas anteriores para que el mueble no se desarme al ser manipulado.

Se realizaron 12 probetas de cada grupo para obtener 6 ensambles que corresponden a seis réplicas. Se midió la rugosidad superficial antes del ensamble entre las dos piezas, el ensamble de las piezas fue manual, después en el banco de pruebas mecánicas se determinó la resistencia. Detectando el valor de resistencia al agarre con pico más alto. El análisis estadístico y evaluación fue de forma cualitativa para presentar los resultados.



## 8. Resultados y discusiones

### 8.1. Resultados del maquinado, dirección, velocidad y profundidad para el maquinado de vaciado

Los resultados del experimento preliminar de vaciado, definidos en el Cuadro 10, permitieron definir factores de sujeción del material y ajustes a las probetas para lograr la medición de la rugosidad superficial, en la Figura 14 se muestran el maquinado y un resultado de la probeta de cada corte.



Figura 14. Maquinado de la probeta de MDF con los maquinados del diseño experimental preliminar

El análisis estadístico de las mediciones se define en el Cuadro 16, es importante resaltar los rangos de la rugosidad superficial  $Ra$  que oscilan de 5.29 a 13.03  $\mu\text{m}$  y que se encuentran dentro de los resultados de las investigaciones previas (J. Paulo Davim et al., 2009; Koc et al., 2017). El coeficiente de variación nos indica la diferencia entre la rugosidad superficial donde las variables con mayor dispersión; 14.59, 6.4 y 7.59 corresponden a la mayor profundidad. También nos indica que la velocidad de avance de 2.5 m/min representa la menor desviación estándar.

Cuadro 16. Rugosidad superficial con las variables de velocidad de avance, profundidad de corte y dirección del corte

Vel. Avance (m/min)	Profundidad (mm)	Análisis estadístico				
		Max. $Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	Min. $Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	Promedio $Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	Desv. Est. $\mu\text{m}$	% C.V.
0.5	2	6.52	5.29	5.86	0.51	8.64
0.5	4	8.97	7.80	8.48	0.49	5.81
0.5	6	13.03	9.06	11.09	1.62	14.59
1.5	2	7.23	6.61	6.88	0.26	3.79
1.5	4	6.90	6.18	6.52	0.29	4.48
1.5	6	10.24	8.75	9.52	0.61	6.40
2.5	2	7.58	7.16	7.35	0.17	2.36
2.5	4	9.49	8.88	9.12	0.26	2.86
2.5	6	10.21	8.51	9.51	0.72	7.59

Es claro que hay un incremento de la rugosidad superficial conforme se incrementa la profundidad del corte como se indica en la Figura 15. La variable de velocidad de corte, también tiene una relación directa con la rugosidad superficial (Figura 16), mientras que la dirección del corte no es significativa para el estudio, esto se entiende porque el tablero MDF se considera un material homogéneo (Figura 17).

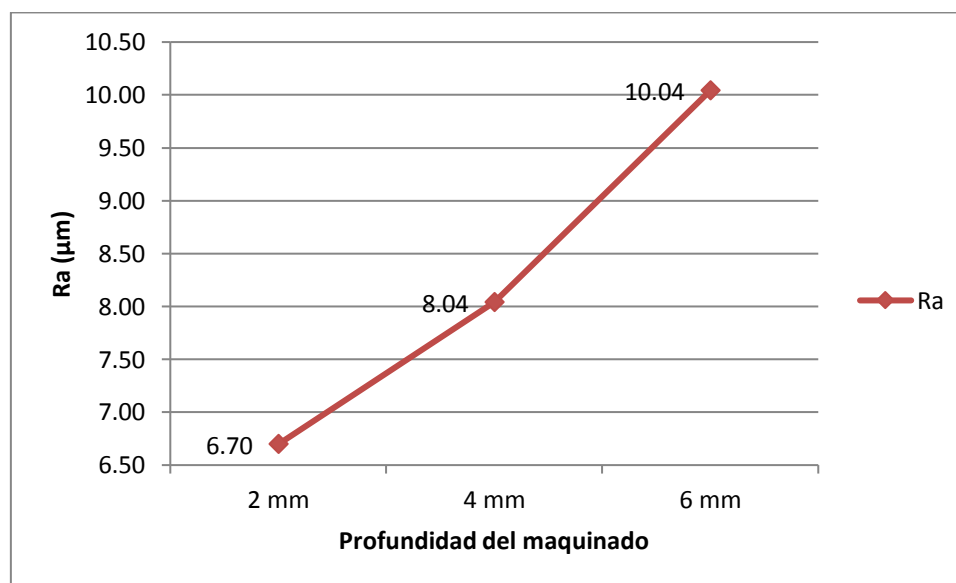


Figura 15. Gráfica de la rugosidad superficial en relación con la profundidad

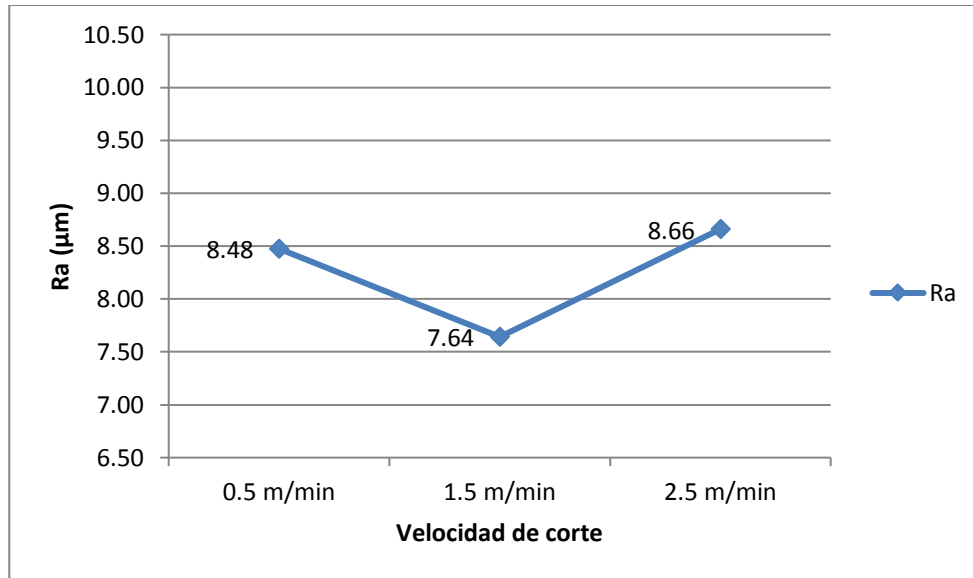


Figura 16. Gráfica de la rugosidad superficial en relación con la velocidad de corte

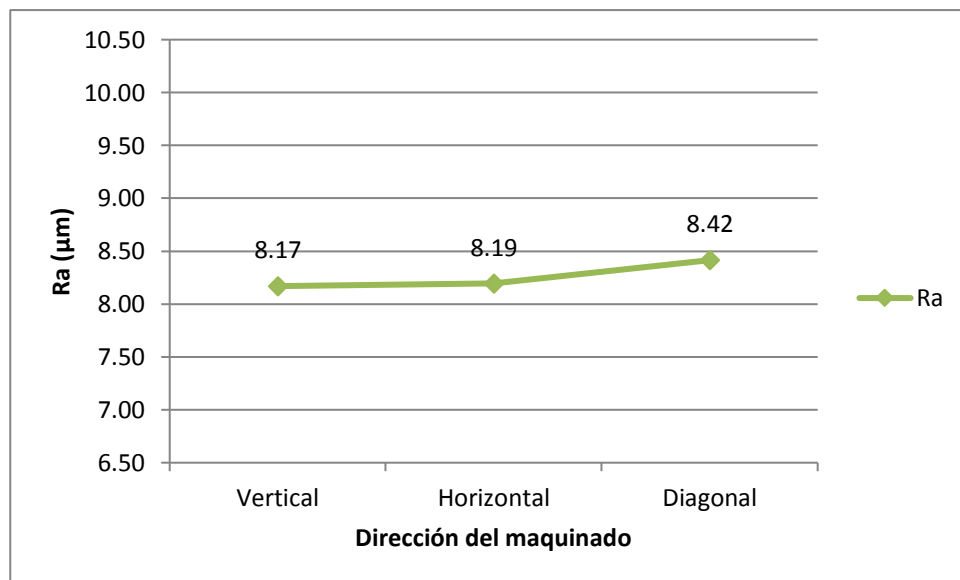


Figura 17. Gráfica de la rugosidad superficial en función de la dirección de corte

Al realizarse el diagrama de caja para el análisis por bloques, se identifica que no hay diferencia significativa entre cada tipo de tablero, ya que la media de  $Ra$ , es de 8.26 y 8.49  $\mu\text{m}$  para el tablero A y B respectivamente, mientras que en la gráfica se indica la media que corresponde al segundo (Figura 18) y que se corrobora más adelante con el análisis de la varianza.



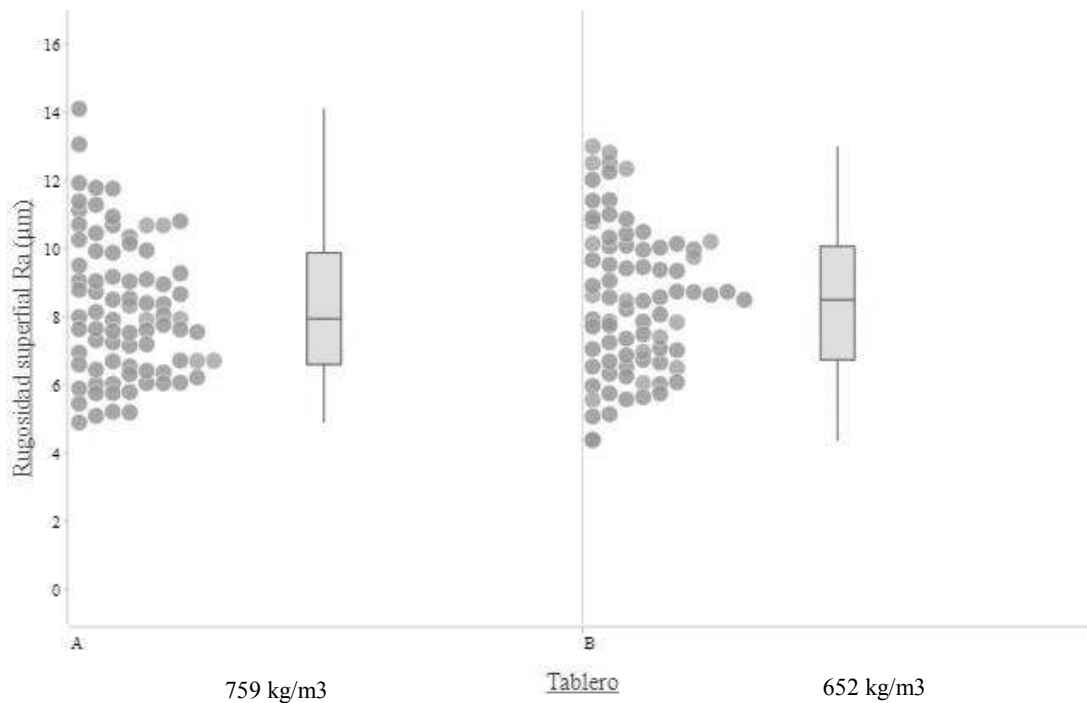


Figura 18. Gráfica del análisis por bloques, tablero A de densidad 759 kg/m<sup>3</sup> y tablero B de densidad 652 kg/m<sup>3</sup>

La diferencia entre los tableros A y B, es su densidad de 759 y 652 kg/m<sup>3</sup>, así como el tipo de resina utilizado, pMDI y MUF respectivamente. Pero en investigaciones sobre la calidad del maquinado se ha identificado que la densidad del material de trabajo es un factor que influye en la rugosidad superficial, esto se puede observar al graficar los resultados de la rugosidad superficial respecto a las diferentes profundidades y en donde la densidad varía para el tablero A en 625, 628 y 669 kg/m<sup>3</sup>, para el tablero B en 716, 722, y 773 kg/m<sup>3</sup>, en lo que se refiere a la profundidad del maquinado que son 6, 4 y 2 mm del espesor respectivamente. En la Figura 19, se identifica el diagrama de caja, y la dispersión de los resultados de la rugosidad superficial en donde el coeficiente de variación disminuye en los maquinados superficiales y con densidad más alta (2mm), y el coeficiente de variación se incrementa en la densidad más baja a mayor profundidad (6mm).

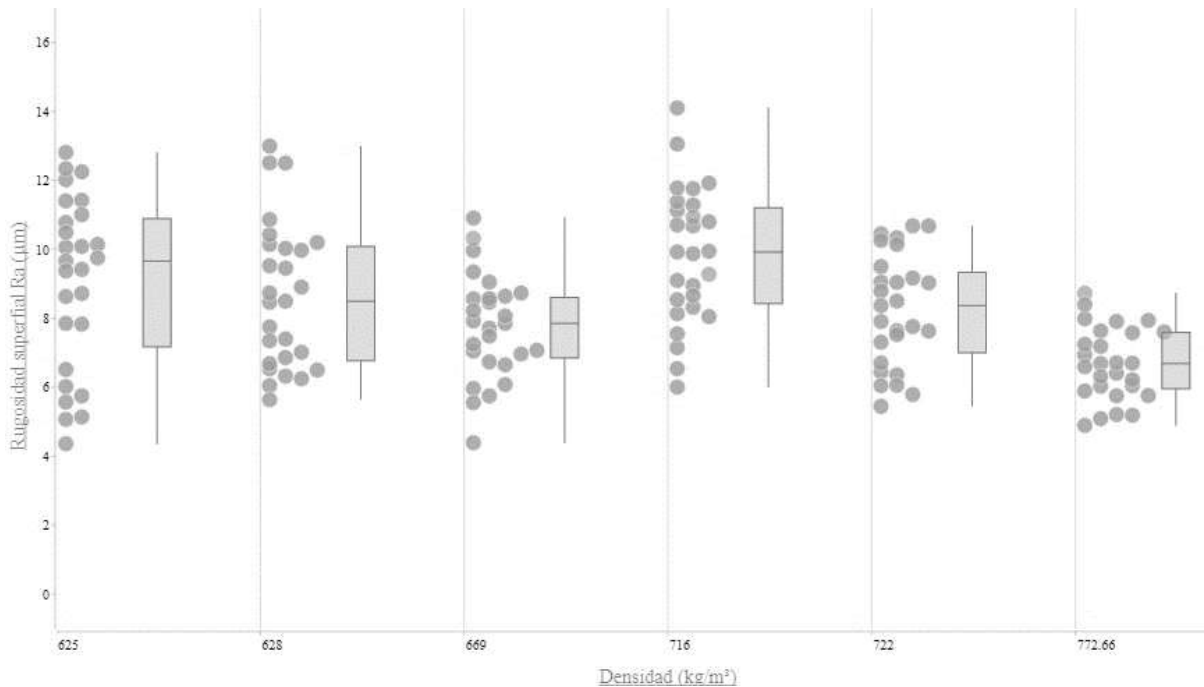


Figura 19. Gráfica de la rugosidad superficial en función de la densidad del tablero en cada capa

A partir de estos resultados se define que la profundidad de corte se debe considerar constante, ya que tienen una influencia directa en la rugosidad superficial obtenida, esto se puede explicar, porque los maquinados se realizaron en un tablero formado por tres capas. La dirección del corte no influye de manera significativa en la calidad de la superficie, por lo que todos los cortes se realizaran de manera longitudinal al largo del tablero. Finalmente, los parámetros de corte: velocidad de avance y velocidad de rotación son las variables a estudiar.

Al comparar los resultados en el tablero MDF A: de densidad de  $759\text{kg/m}^3$ , C.H. 10%, realizo el mismo experimento en el tablero MDF B: de densidad  $652\text{kg/m}^3$ , C.H. 10%, los resultados de la estadística de la rugosidad superficial en sus tres parámetros,  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$ , se presentan en el cuadro 17, En donde se observa un incremento de la rugosidad superficial al aumentar la profundidad de corte, también se tienen valores mayores en el tablero de densidad menor. Sütçü & Karagöz, (2012), reportan la media de  $Ra$ ,  $Rz$  y  $Rq$  en  $8.48$ ,  $51.58$  y  $10.75\ \mu\text{m}$  respectivamente, el análisis estadístico indica que la rugosidad superficial disminuye al aumentar la velocidad de rotación y aumenta al incrementar la velocidad de avance y la profundidad del corte. Resultados que coinciden con los obtenidos en esta investigación donde los valores de rugosidad de la superficie disminuyen con una mayor velocidad de

rotación y una menor velocidad de avance, así como que la densidad de la profundidad del corte también afecta la rugosidad superficial obtenida. En otras investigaciones como la de Wilkowski et al., (2015) y Koc et al., (2017), concuerdan con los resultados obtenidos en esta investigación, pero estos se realizaron a velocidades de avance más altas.

Cuadro 17. Resultados estadísticos de las variables de la rugosidad superficial  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$ , en tableros MDF

		Velocidad de avance	MDF densidad 759 kg/m <sup>3</sup> , C.H. 10%			MDF densidad 652 kg/m <sup>3</sup> , C.H. 10%		
			Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
Profundidad 2mm	0.5 m/min	5.76	7.01	29.31	5.74	6.84	31.78	
		<b>0.51</b>	<b>0.46</b>	1.22	1.82	<b>0.51</b>	5.94	
	1.5 m/min	6.80	8.48	40.42	6.8	8.38	48.16	
		<b>0.26</b>	<b>0.30</b>	1.98	1.18	<b>0.26</b>	2.89	
	2.5 m/min	7.32	9.27	42.16	7.14	7.32	45.40	
		<b>0.17</b>	<b>0.41</b>	3.15	0.64	<b>0.17</b>	0.92	
Profundidad 4mm	0.5 m/min	8.66	10.68	48.96	8.66	9.54	54.93	
		<b>0.49</b>	<b>0.45</b>	3.80	1.48	<b>0.49</b>	8.76	
	1.5 m/min	6.48	8.54	41.56	5.32	6.48	30.88	
		<b>0.29</b>	<b>1.38</b>	6.07	1.27	<b>0.29</b>	6.83	
	2.5 m/min	9.00	11.25	51.58	8.84	9.00	50.34	
		<b>0.26</b>	<b>0.40</b>	1.88	1.62	<b>0.26</b>	8.59	
Profundidad 6mm	0.5 m/min	11.20	14.56	62.24	9.83	11.20	54.54	
		<b>1.62</b>	<b>1.82</b>	8.51	0.75	<b>1.62</b>	1.62	
	1.5 m/min	9.58	12.14	54.20	6.51	9.58	44.96	
		<b>0.61</b>	<b>1.69</b>	7.18	2.13	<b>0.61</b>	7.89	
	2.5 m/min	9.79	12.15	52.27	10.34	9.79	61.63	
		<b>0.72</b>	<b>0.82</b>	4.40	1.12	<b>0.72</b>	10.88	

Números en negritas indican el valor de la desviación estándar **SD**

Se ha realizado el análisis de la varianza ANOVA, del modelo de bloques aleatorios, analizando de forma independiente cada factor y la interacción entre las variables independientes (Cuadro 15), se tiene que la velocidad de avance y la profundidad tienen un índice significativo en la rugosidad superficial, mientras que el tipo de tablero y la dirección de corte, indican no tener una influencia en la rugosidad superficial.

Cuadro 18. Tabla ANOVA de la operación de vaciado, corte axial en MDF

Factor	GL	SC	CM	F valor	Pr( >F)
Bloques	1	1.622	2.800	2.10	0.150
Trayectoria de maquinado	2	1.804	1.411	1.06	0.351
Profundidad	2	134.010	67.343	50.49	0.000 ***
Velocidad de avance	2	54.543	29.181	21.88	0.000 ***
Bloques*T	2	3.972	2.794	2.10	0.128
Bloques*P	2	23.379	12.041	9.03	0.000***
Bloques*V	2	3.000	2.144	1.61	0.205
T*P	4	12.913	3.87	2.90	0.025*
T*V	4	25.374	6.628	4.97	0.001**
P*V	4	83.591	21.247	15.93	0.000***
Bloques*T*P	4	5.937	1.609	1.21	0.312
Bloques*T*V	4	8.375	2.002	1.52	0.203
Bloques*P*V	4	40.114	9.929	7.44	0.000***
T*P*V	4	85.229	10.897	8.17	0.000***
Bloques*T*P*V	8	69.229	8.654	6.49	0.000***
Residual	108	114.052	1.334		

Código de significancia: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

S = 1.15491  $R^2 = 79.35\%$   $R^2_{ajustada} = 69.22\%$

A partir del Cuadro 18, el análisis ANOVA, define las hipótesis alternativas en al menos un par de medias son significativamente distintas, indicando que el factor o la interacción, tiene efecto en la rugosidad superficial, siendo altamente significativas la profundidad y la velocidad de avance, y en referente a las interacciones, son altamente significativas; Bloques\*P, T\*P, T\*V, P\*V, Bloques\*P\*V, T\*P\*V y Bloques\*T\*P\*V

En lo que se refiere a los datos analizados, se verifica si las variables cuentan con una distribución normal, esto por medio de la prueba de Shapiro-Wilks, en donde obtenemos  $W=0.9927$ , que al ser cercano de uno indica una distribución normal, y  $P\text{-value}=0.5961$  que al ser mayor a  $\alpha$  también nos indica una distribución normal. También es necesario verificar si las varianzas son similares en magnitud, esto por medio de la prueba de Bartlett's, donde nos indica que  $P\text{-value}= 0.6865$  es mayor a  $\alpha (0.05)$ , lo que nos indica que se cumple con la homogeneidad de la varianza. Esto se puede observar gráficamente en la Figura 20, en la

gráfica de probabilidad normal y el histograma de frecuencia. El modelo de regresión es moderadamente confiable al indicar una  $R^2$  ajustado de 69.22%. Definido por la ecuación 4, esto puede ser respecto a las tres réplicas del experimento y a los datos atípicos con relación a la velocidad de avance. Al explicar las variables, solo un 69.22% de la variabilidad estudiada, ya que el 30.78% pueden ser otras variables que no hemos considerado en el diseño experimental, o el efecto de variables que no tienen influencia en la rugosidad superficial como es el caso del factor Trayectoria del maquinado.

Es importante definir un dato atípico que es la rugosidad superficial media en los tres niveles de la velocidad de avance, en donde se tiene 8.48, 7.64 y 8.66  $\mu\text{m}$ , para una velocidad de avance de 0.5, 1.5 y 2.5 m/min, respectivamente, por lo que la rugosidad de 8.48  $\mu\text{m}$  se puede deber a vibraciones, ya que la alimentación por diente es baja  $f_z = 0.021 \text{ mm}$  la mitad de lo recomendado. Davim et al., (2009), reporta rugosidad superficial ( $Ra$ ) de 8.96 y 18.14  $\mu\text{m}$  en 18000 rpm y 3000 rpm respectivamente, a una velocidad alimentación de 0.5 m/min. Concluye que a partir de los parámetros de corte apropiados se puede obtener una rugosidad superficial de  $Ra < 10 \mu\text{m}$  que indican una calidad en la presión dimensional de las piezas maquinadas. Esto concuerda con los resultados en este experimento a velocidades de avance de 0.5 a 2.5 m/min y una velocidad de rotación de 9000 rpm.

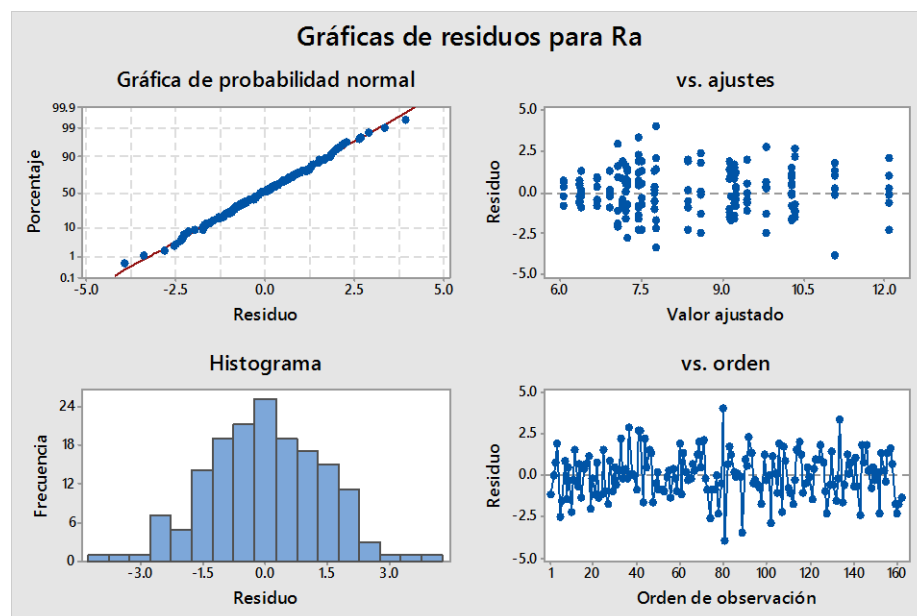


Figura 20. Gráficas de residuos para la rugosidad superficial Ra, corte axial en MDF

En la medición de la rugosidad superficial se realizó tanto la rugosidad media aritmética  $Ra$ , como las dos variables  $Rq$  y  $Rz$  que son la rugosidad media cuadrática y las alturas de las irregularidades respectivamente. Para esto se presenta el resumen del ANOVA, para las tres variables de respuesta  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$ , en donde se indican los factores con significancia en esta variable de respuesta en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Resumen del ANOVA para los factores de las variables dependientes de  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$ , en corte axial

Respuesta variable dependiente	Bloques	Trayectoria de maquinado (T)	Profundidad de corte (P)	Velocidad de avance (V)
Ra	No significativa	No significativa	<0.0001	0.0003
Rq	No significativa	No significativa	<0.0001	<0.0001
Rz	No significativa	No significativa	<0.0001	0.0003

0.05% de probabilidad como significativa y 0.01% de probabilidad como altamente significativa.

Las interacciones entre los factores de las variables independientes son no significantes en  $Rz$ , siendo el mejor indicador  $Ra$ , en donde se indica que existe efecto en la interacción de la velocidad de avance y la trayectoria de corte, en la rugosidad superficial. También entre el tablero y la profundidad de corte y finalmente hay interacción entre la entre la profundidad de corte y la velocidad de avance, como se resumen en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Resumen del ANOVA y las interacciones entre factores de las variables dependientes de  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$ , entre tableros MDF

Respuesta variable dependiente	Interacción entre factores de variables independientes					
	T*Bloques	T*P	T*V	Bloques*P	Bloques*V	P*V
Ra	No significativa	No significativa	0.002	<0.0001	No significativa	<0.0001
Rq	No significativa	No significativa	0.061	0.017	No significativa	<0.0001
Rz	No significativa	No significativa	No significativa	No significativa	No significativa	<0.0001

0.05% de probabilidad como significativa y 0.01% de probabilidad como altamente significativa.

Se logra definir que la variable independiente  $Ra$ , es el indicador de la rugosidad superficial que explica de mejor manera la incidencia de las variables independientes y las interacciones donde se involucran, siendo la profundidad de corte y la velocidad de avance los niveles a revisar de manera analítica para definir cuáles minimizan la rugosidad superficial, Esto se ha realizado por medio de comparaciones por parejas de Tukey (Cuadro 21). Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes, por lo que podemos definir que la menor profundidad de corte de 2mm y la velocidad de avance media de 1.5 m/min son las velocidades que nos permite minimizar la rugosidad superficial.

Cuadro 21. Comparación por parejas de Tukey, en un coeficiente de confianza de 95%, en tableros MDF

Profundidad de corte (P)	N	Media	Agrupación	Velocidad de avance (V)	N	Media	Agrupación
6	54	9.445	A	2.5	54	8.951	A
4	54	8.448	B	0.5	54	8.583	A
2	54	7.221	C	1.5	54	7.581	B

La Figura 21 muestra la gráfica de interacciones a partir de las medias ajustadas donde se identifica que el tipo de tablero no tiene interacción en relación con la dirección de corte, pero si hay una diferencia entre la profundidad de corte, mientras que la interacción significativa es la profundidad de corte en combinación con la velocidad de corte.

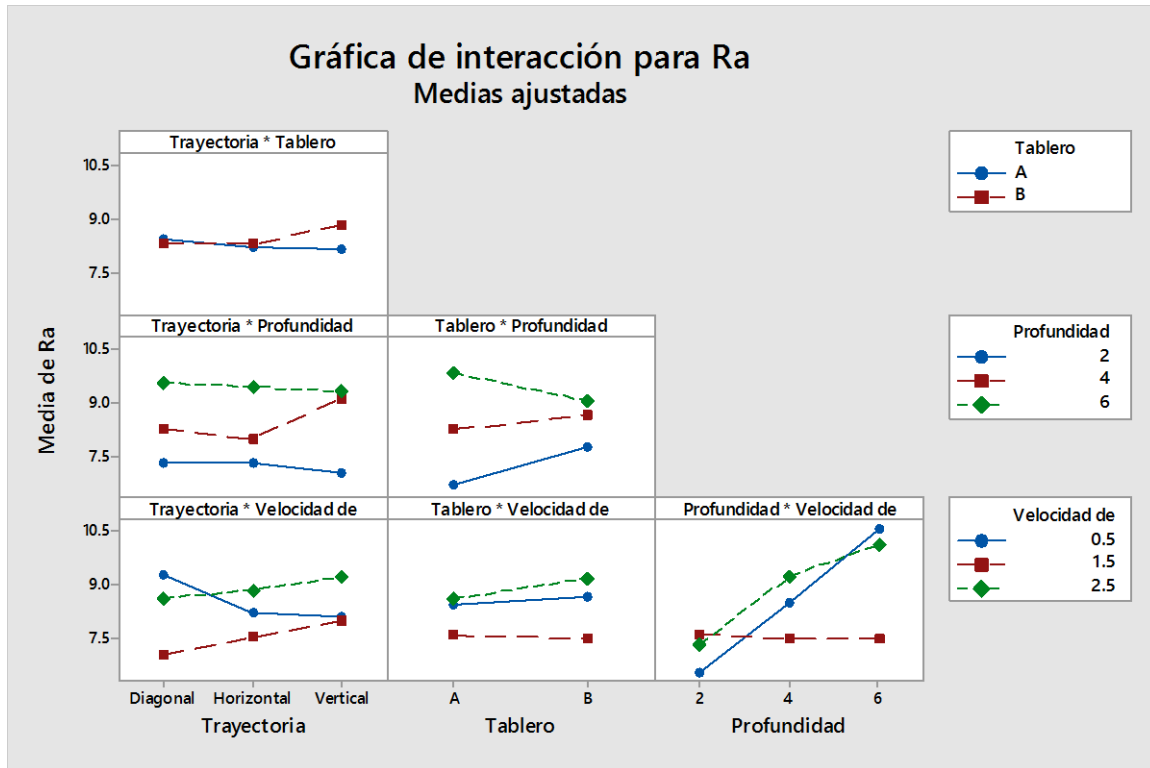


Figura 21. Gráfica de interacción entre factores y niveles para  $Ra$ , en tableros MDF

Los parámetros de corte dentro de los tableros comerciales que se integraron en el experimento coinciden con investigaciones de otros países, en donde uno de los elementos más importantes es la relación entre la velocidad de avance y la densidad interna del tablero.

Los tableros MDF, al ser formados por varias capas se identifica claramente que la capa superficial en donde la densidad es mayor, se obtiene una rugosidad superficial baja, indicando un rango la rugosidad media aritmética  $Ra$  de 7.32 a 5.76  $\mu\text{m}$ , la rugosidad media cuadrática  $Rq$  de 9.27 a 7.01  $\mu\text{m}$  y las alturas de las irregularidades  $Rz$  entre 42.16 y 40.42  $\mu\text{m}$ , resaltando que la velocidad de corte alta fue de 2.5m/min a 9000 rpm, También como se identifica la no significancia de las variables independientes y su interrelación en los tableros MDF, concuerda con lo descrito por Magoss, (2008), en donde no hay una correlación entre las diferentes maderas debido a que los picos pueden ser modificados por el palpador al ser aplastados en el momento de la medición.

La rugosidad superficial es un buen indicador de la calidad de un proceso de maquinado, en este caso es necesario trabajar el diseño de experimentos, logrando identificar



otros factores que tengan una mayor influencia en la variable independiente de la rugosidad superficial. Estos resultados se presentaron en la ponencia “Parámetros de maquinados para Tableros de Fibras de Densidad Media MDF” del 2do Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Tijuana Baja California, 2019 (Anexo 1).

## 8.2. Resultados del maquinado de vaciado para tableros de partículas y MDF.

Se realizaron un total de 114 maquinados en seis secciones de diferentes tableros y se realizaron tres mediciones de rugosidad superficial en cada una de las ranuras de vaciado. Las probetas y la medición del perfilómetro se muestran en la Figura 22.

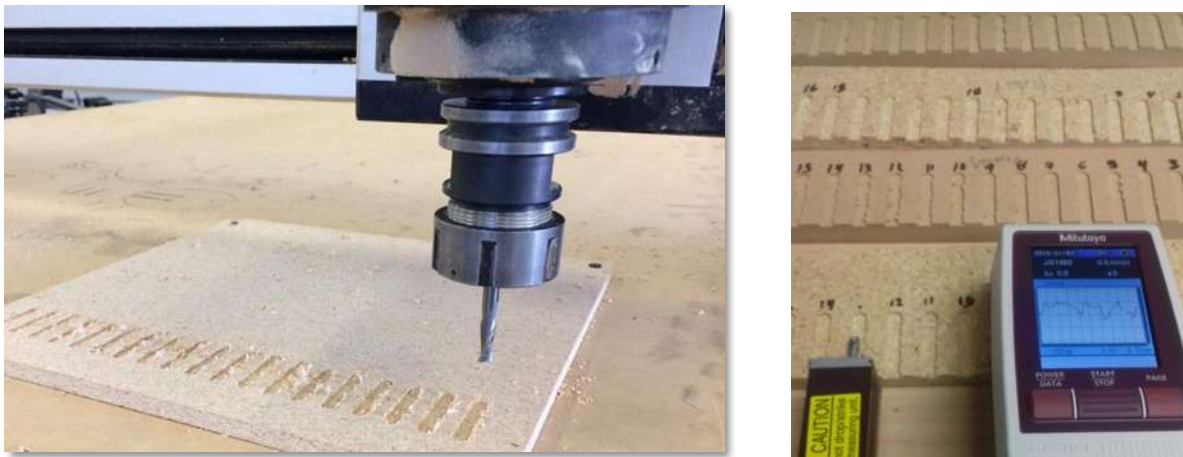


Figura 22. Probetas de maquinado de vaciado, en la medición de la rugosidad superficial

El resumen de las mediciones de la rugosidad superficial indica una influencia directa de la densidad del tablero, y nos indica valores muy altos de rugosidad superficial en los tableros de partículas, teniendo mediciones fuera de rango, por lo que no se logró medir la calidad superficial del tablero a base de lignina despolimerizada (Cuadro 22). Este resultado nos confirma que los tableros de partículas, por sus características de materia prima, es un material con una porosidad que queda fuera de rango del perfilómetro y confirma la ausencia en la literatura especializada sobre investigaciones de rugosidad superficial en tableros de partículas. A partir de este resultado se eliminará de la experimentación el análisis de tableros de partículas.

Cuadro 22. Resumen estadístico de la rugosidad superficial en maquinado de vaciado, para diferentes tipos de tableros

Marca	Tablero		Análisis estadístico				
	Tipo	Densidad Kg/m <sup>3</sup>	Max <i>Ra</i> (μm)	Min <i>Ra</i> (μm)	Promedio <i>Ra</i> (μm)	Desv. Est. μm	% C.V.
Comercial	MDF	652	10.90	6.60	8.88	1.13	12.67
Comercial	MDF	540	16.06	10.212	12.84	1.60	12.47
Roseburg	MDF	759	10.32	7.85	8.76	0.769	8.78
Roseburg	Partículas	696	30.62	11.79	20.96	5.01	23.88
Roseburg	Partículas	675	37.52	14.26	23.78	5.39	22.67
FITECMA	Partículas	737	-	43.70	-	-	-

La Figura 23 muestra el corte de vaciado en la probeta del tablero a base de lignina despolimerizada y se aprecia claramente los espacios que tiene entre partículas que son mayores a la resolución del perfilómetro de -200 μm a +160 μm.



Figura 23. Tablero de partículas a base de lignina despolimerizada, maquinado por medio de vaciado, no se logró medir la rugosidad de superficial debido a la porosidad

El análisis estadístico de los resultados se dividió al comparar las propiedades de cada tipo de tablero, por una parte, los tableros aglomerados y por otra parte los tableros MDF. Esto debido a la diferencia del rango de la rugosidad superficial, el promedio y la desviación estándar de las mediciones, en donde claramente son mayores en los tableros aglomerados, y

son más uniformes las mediciones en el tablero MDF.

### 8.3. Rugosidad superficial de operación de vaciado en tableros aglomerados.

Para realizar el análisis de la varianza, se verifico que las mediciones y los factores cumplieran con homogeneidad en la varianza y con una distribución normal. Las variables cuentan con una distribución normal, esto por medio de la prueba de Shapiro-Wilks, en donde obtenemos  $W=0.9942$ , que al ser cercano de uno indica una distribución normal, y  $P\text{-value}=0.8406$  que al ser mayor a  $\alpha$ , nos indica una distribución normal. También es necesario verificar si las varianzas son similares en magnitud, esto por medio de la prueba de Bartlett's, donde nos indica que  $P\text{-value}= 0.5318$  es mayor a  $\alpha$  (0.05), lo que nos indica que se cumple con la homogeneidad de las varianzas.

El análisis de la varianza de los dos tableros Aglomerados, se presentan en el

Cuadro 23, en donde se define que tanto el cambio de las rpm como la velocidad de avance tienen una influencia significativa en la calidad de la rugosidad superficial, como se indica en la Figura 24 de los efectos principales.

Cuadro 23. Tabla ANOVA del experimento en tableros aglomerados

Factor	GL	SC	CM	F valor	Pr(>F)
Tipo de tablero (B)	1	392.13	392.13	25.12	0.000***
Velocidad de avance (V)	3	778.15	259.38	16.61	0.000***
Velocidad de Rotación (R)	2	160.86	80.428	5.15	0.007**
B*V	3	200.66	66.885	4.28	0.007**
B*R	2	1.69	0.845	0.05	0.947
V*R	6	358.40	59.733	3.83	0.002**
B*V*R	6	171.05	28.508	1.83	0.100
Residual	137	2943.5	21.49		

Código de significancia: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

$S = 4.255$      $R^2 = 49.97\%$      $R^2_{ajustada} = 37.03\%$

Se observa que  $R^2$  es de 49.97%, lo que se identifica como un  $R^2$  bajo que representa la dispersión de la variable  $Ra$  alrededor de la línea de regresión, pero se identifican las

variables significativas del ANOVA. Por lo que los valores bajos de  $R^2$  y  $R^2$ ajustada, se deben a la variación de las mediciones tomadas, estas se encuentran dentro de un rango mayor, comparado con las mediciones en los tableros MDF, al tener mediciones de 12 mm de longitud en comparación con las partículas de madera que conforman el aglomerado, en algunas mediciones solo se mide una partícula.

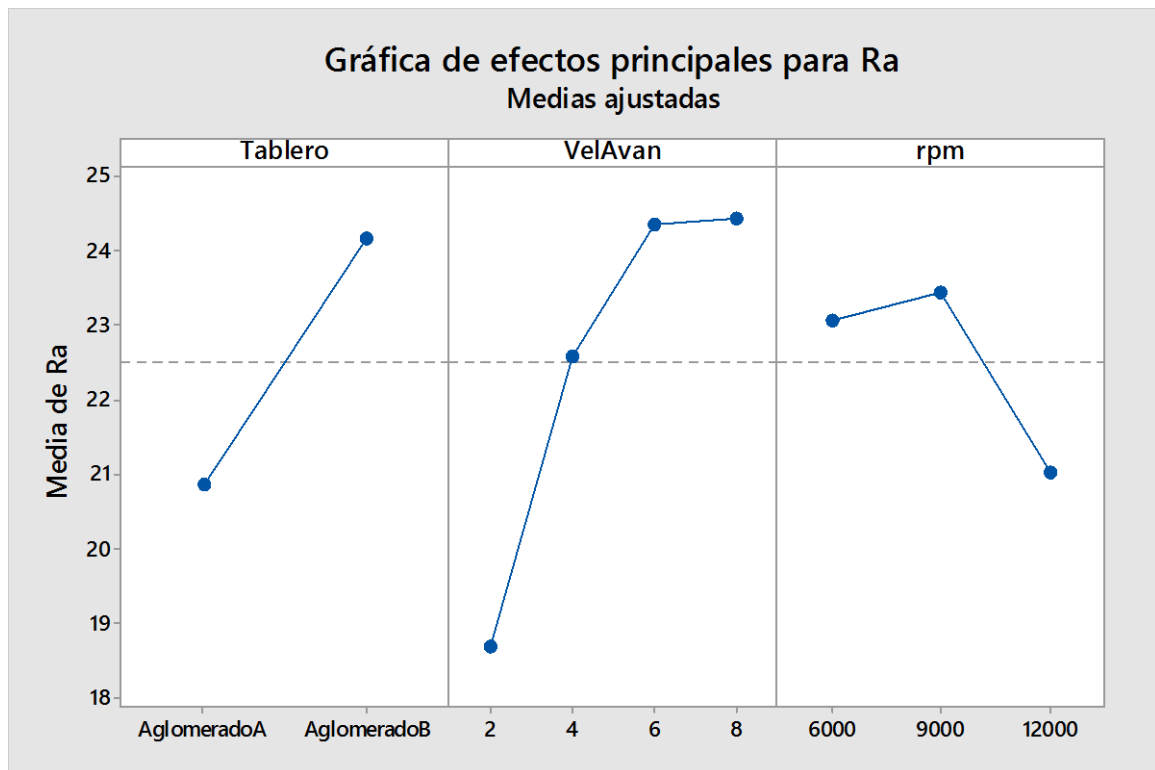


Figura 24. Grafica de efectos principales en los tableros aglomerados

Por medio de comparaciones por parejas de Tukey

Cuadro 24). Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes, por lo que podemos definir que no hay una diferencia significativa entre las velocidades de avance a 4, 6 y 8 m/min, mientras que la rugosidad superficial menor se obtiene a 2 m/min. También se define minimizar la rugosidad superficial con una velocidad de rotación de 12000 rpm, mientras que no hay una diferencia con 6000 y 9000 rpm. Finalmente, la densidad del tablero aglomerado es significativa indicando una relación que a mayor densidad menor rugosidad superficial y que se debe a que son de diferentes marcas los tableros.

Cuadro 24. Comparación por parejas de Tukey, para tableros aglomerados en maquinado de vaciado

Velocidad de avance (V)	N	Media	Agrupación	Tipo de tablero	N	Media	Agrupación
2	36	18.415	B	b	72	24.229	A
4	36	22.994	A	a	72	21.041	B
6	36	24.702	A				
8	36	24.430	A				

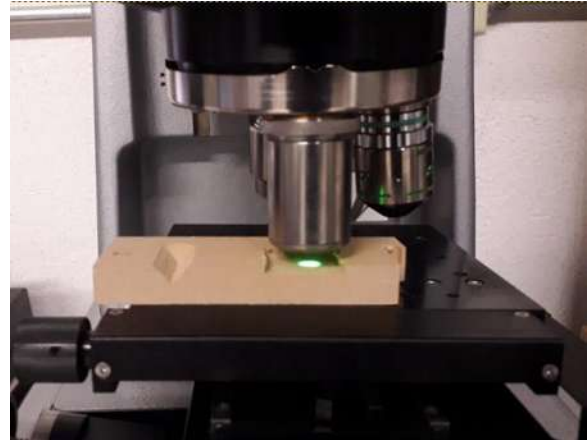
  

Velocidad de rotación (R)	N	Media	Agrupación
6000	48	23.443	A
9000	48	23.223	A
12000	48	21.239	B

Los parámetros de corte que permiten obtener una rugosidad más baja, son la velocidad de rotación a 12000 rpm, con una velocidad de avance de 2 m/min, logrando obtener una rugosidad superficial de 16 a 21  $\mu\text{m}$ .

#### 8.4. Rugosidad superficial de operación de vaciado en tableros MDF.

Los resultados del experimento del maquinado del vaciado, se midieron: la rugosidad media aritmética  $Ra$  y de manera adicional se realizó una medición por medio de un microscopio óptico Marca Bruker, Contour Elite, como se muestra en la Figura 25.



a) Perfilómetro de contacto

b) Microscopio óptico

Figura 25. Medición de la superficie maquinada en un corte axial, en el tablero MDF

Para realizar el análisis de la varianza, se verificó que las mediciones y los factores cumplieran con homogeneidad en la varianza y con una distribución normal. Las variables cuentan con una distribución normal, esto por medio de la prueba de Shapiro-Wilks, en donde obtenemos  $W=0.9937$ , que al ser cercano de uno indica una distribución normal, y  $P\text{-value}=0.5056$  que al ser mayor a  $\alpha$  también nos indica una distribución normal. Las varianzas son similares en magnitud, esto por medio de la prueba de Bartlett's, donde nos indica que  $P\text{-value}= 0.1.431e-08$  es menor a  $\alpha$  (0.05), lo que nos indica que no cumple con la homogeneidad de las varianzas, esto se puede observar en la Figura 26.

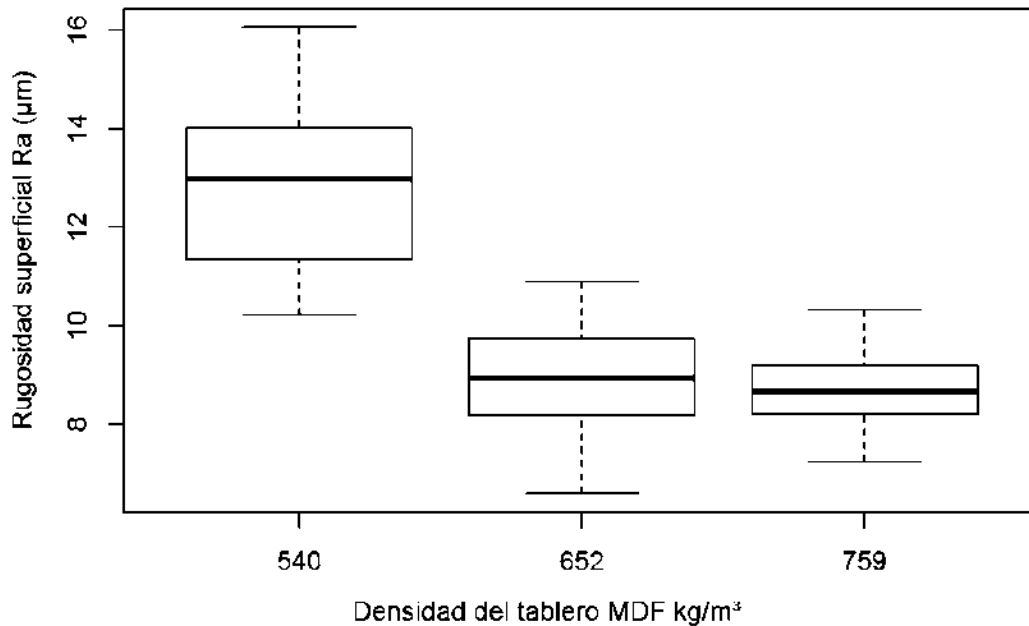


Figura 26. Gráfica de caja la rugosidad superficial en los diferentes tableros MDF

El análisis de la varianza de los tres tableros MDF, se presentan en el Cuadro 25, en donde se define que tanto el cambio de la velocidad de rotación, la velocidad de avance y el tipo de tablero tienen una influencia significativa en la calidad de la rugosidad superficial. Como parte de las interacciones se observa una influencia significativa en la relación del tipo de tablero y la velocidad de rotación.

Cuadro 25. Tabla ANOVA del experimento, tableros MDF

Factor	GL	SC	CM	F valor	Pr(>F)
Tipo de tablero (B)	2	776.68	388.338	280.88	0.000***
Velocidad de avance (V)	3	23.03	7.678	5.55	0.001***
Velocidad de Rotación (R)	2	8.93	4.465	3.23	0.042**
B*V	6	5.08	0.847	0.61	0.720
B*R	4	18.66	4.664	3.37	0.011**
V*R	6	7.93	1.322	0.96	0.456
B*V*R	12	6.21	0.517	0.37	0.971
Residual	180	248.86	1.383		

Código de significancia: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

S = 1.176  $R^2 = 77.28\%$   $R^2_{ajustada} = 72.86\%$

Se define que el tipo de tablero y la velocidad de avance son variables altamente

significativas en la variable independiente de la rugosidad superficial obtenida, al igual que la velocidad de rotación, en donde las hipótesis alternativas, en al menos un par de medias son significativamente distintas, indicando que el factor tiene efecto en la rugosidad superficial (Figura 27).

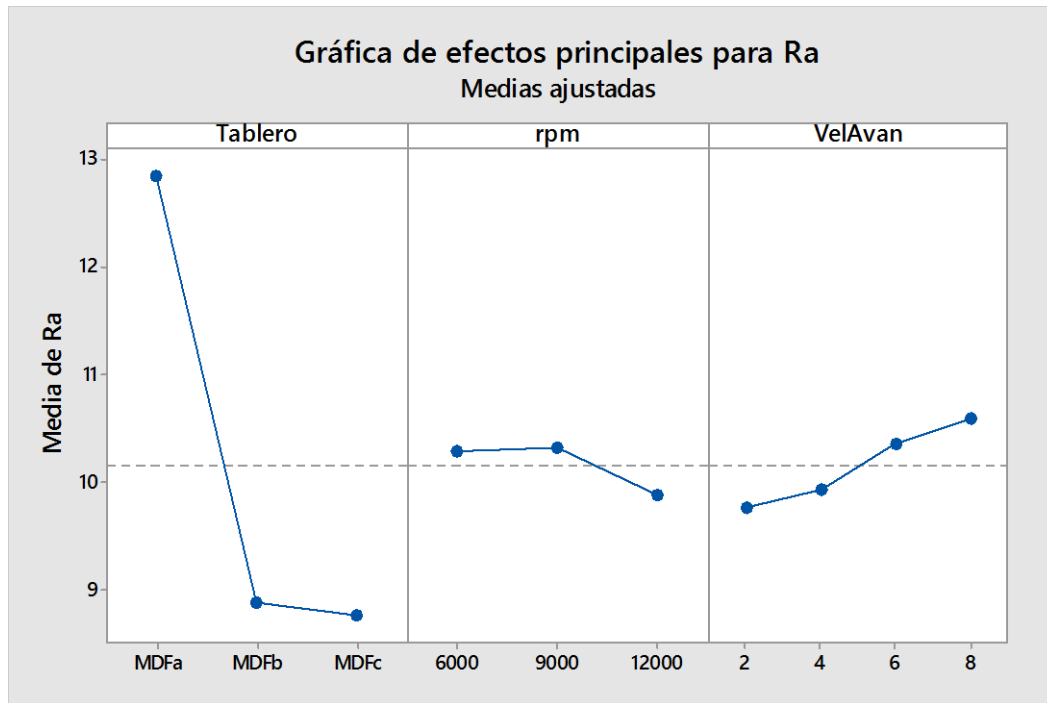


Figura 27. Gráfica de efectos principales en los tableros MDF

La prueba de Tukey nos indica que no hay diferencia significativa en la velocidad de rotación, en cambio la velocidad de avance incrementa la rugosidad superficial a 8 m/min, pero la influencia es mínima en 2, 4 y 6 m/min. Finalmente, la densidad del tablero MDF en la prueba se identifican dos grupos, por una parte la mayor rugosidad superficial se obtiene en el tablero con la menor densidad y de resina MUF, y en otro grupo se tienen el tablero de densidad de 652 y el de 759 kg/m<sup>3</sup> los cuales se fabricaron con una resina diferente, MUF y pMDI respectivamente, por lo que se define que la densidad tiene una mayor influencia que la resina, esto concuerda con investigaciones sobre las proporciones y tipos de resina en la formación de tableros MDF y la rugosidad superficial lograda después de un proceso de lijado lo que concuerda con investigaciones de Akbulut y Ayrimis, (2019) y Akgül et al., (2012).



Cuadro 26. Comparación por parejas de Tukey, para tableros MDF en maquinado de vaciado

Velocidad de avance (V)	N	Media	Agrupación	Tipo de tablero (B)	N	Media	Agrupación
2	54	9.766	B	a	72	12.843	A
4	54	9.941	B	b	72	8.883	B
6	54	10.348	A B	c	72	8.760	B
8	54	10.594	A				

Velocidad de rotación (R)	GL	Media	Agrupación
6000	72	10.321	A
9000	72	10.290	A
12000	72	9.8751	A

Estos resultados se encuentran por arriba de los parámetros reportados por Koc *et al.*, (2017) que indican rugosidad superficial en MDF de  $4.583 \mu\text{m}$  a una velocidad de avance de  $8\text{m/min}$  y una velocidad de rotación de  $12000 \text{rpm}$ . Pero coinciden con de los rangos recomendados para tener una buena calidad en el proceso de maquinado de  $16 \mu\text{m}$ . (Kminiak & Šustek, 2016). De aquí se tiene que es importante contribuir en investigaciones sobre la rugosidad superficial en los procesos de maquinado y su aplicación posterior, ya que al momento no se encuentra definida como una norma y un estándar. En la Figura 28, se presenta la medición obtenida por medio de perfilómetro de contacto en una medición a  $12 \text{mm}$  de longitud, de un maquinado de vaciado con una velocidad de avance de  $4 \text{m/min}$  y una velocidad de rotación de  $12000 \text{rpm}$ , en el tablero de MDF de  $759 \text{kg/m}^3$  de densidad, en donde se obtuvo una rugosidad superficial de  $Ra$  de  $17 \mu\text{m}$ .

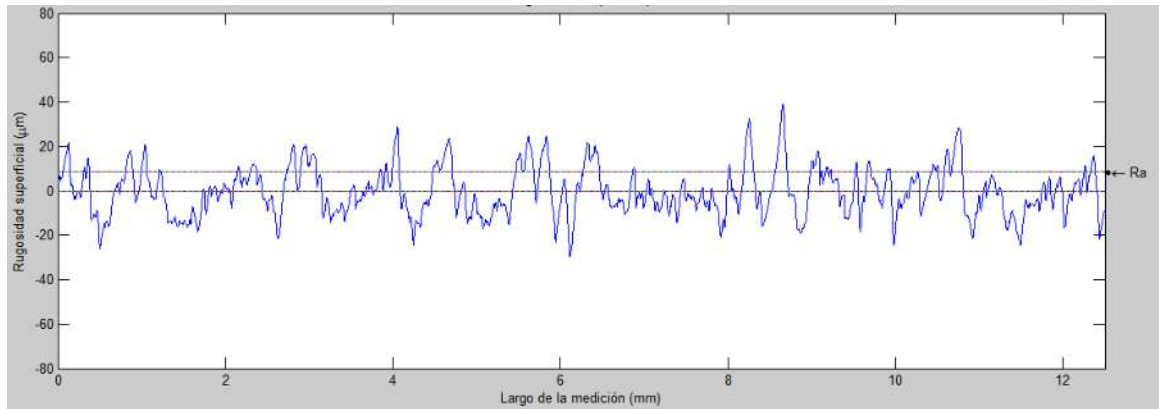


Figura 28. Perfiles de rugosidad superficial

Las imágenes obtenidas por el perfilómetro Contour Elite I, de probetas de MDF Nacional, se muestran en la Figura 29. En donde se muestra la rugosidad superficial del tablero MDF de  $759 \text{ kg/m}^3$  de densidad (a), y el tablero de  $540 \text{ kg/m}^3$  (b), y que indican una  $Ra$  de  $9.19 \text{ µm}$  y de  $16.06 \text{ µm}$ , respectivamente.

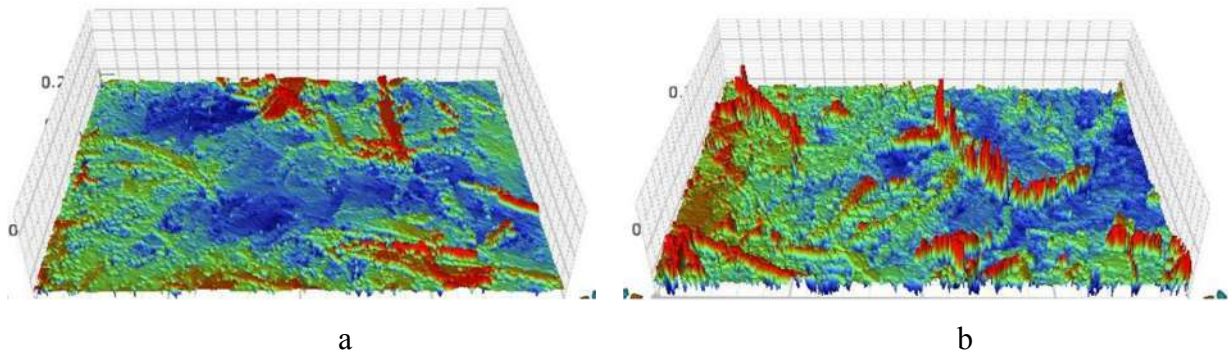


Figura 29. Rugosidad superficial 3D del maquinado por vaciado, a)  $Ra=9.19 \text{ µm}$ , y b)  $Ra=16.06 \text{ µm}$

Es importante que, aunque las gráficas 3D son de un área pequeña de  $1.23 \times 0.92 \text{ mm}$ , se logra identificar el desprendimiento de algunas fibras que en el perfil obtenido por el perfilómetro (Figura 28) se identifica en estos picos y valles.

Los resultados del experimento del proceso de maquinado de vaciado en tableros de partículas y tableros MDF, se presentaron en el 3do Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Tijuana Baja California, 2021 con la ponencia “Análisis de rugosidad superficial en maquinado por router CNC, comparando tableros de partículas y tableros MDF”, ver resumen en el anexo 4.

### 8.5. Rugosidad superficial en corte periférico y axial, para tablero MDF.

En la operación de vaciado, se genera una ranura en donde la sustracción del material a partir de la trayectoria de la herramienta se obtienen tres áreas, la superficie axial y las áreas laterales que corresponden al espesor del material (Figura 30), la calidad del maquinado en estas áreas es influenciada por el proceso de corte, la herramienta y las propiedades de material.

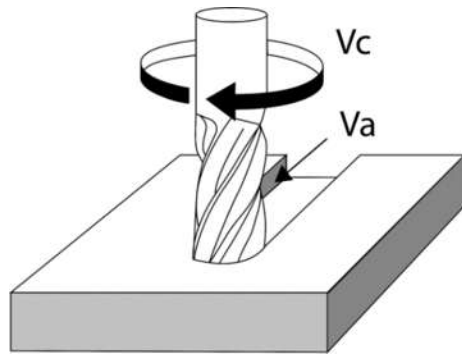


Figura 30. Ejemplo de la operación del vaciado

Las mediciones de la rugosidad superficial para herramienta de corte de un filo con una velocidad de rotación de 12000 r.p.m, y las cuatro velocidades de avance se resumen en el Cuadro 27. Dentro de los resultados se comprueba una diferencia en los lados de cada corte, debido a los parámetros dinámicos del fenómeno. El Cuadro 28, presenta la rugosidad superficial generada con una herramienta de corte de dos filos y los mismos parámetros aplicados a los dos tipos de MDF.

Cuadro 27. Rugosidad superficial del maquinado de corte periférico, herramienta de un filo

Tipo de tablero	Velocidad de avance (m/min)	Rugosidad superficial Ra( $\mu$ m)	
		Corte derecho	Corte izquierdo
MDF Nacional	2	20.479	30.584
	4	23.106	28.004
	6	17.886	24.72
	8	18.538	35.8
MDF Roseburg	2	18.16	25.218
	4	18.103	21.955
	6	20.481	24.614
	8	16.388	18.878

La rugosidad superficial de corte obtenida de la herramienta de dos filos, disminuye considerablemente, los valores más altos llegan a 16.374  $\mu$ m (Figura 31), como se muestra en el Cuadro 28.

Cuadro 28. Rugosidad superficial del maquinado de corte periférico, herramienta dos filos

Tipo de tablero	Velocidad de avance (m/min)	Rugosidad superficial Ra( $\mu$ m)	
		Corte derecho	Corte izquierdo
MDF Nacional	2	14.218	16.886
	4	12.364	14.864
	6	14.961	18.916
	8	12.284	13.617
MDF Roseburg	2	15.103	17.11
	4	16.374	21.054
	6	13.919	16.249
	8	14.676	16.361

Las mediciones obtenidas señalan una diferencia entre el corte derecho y el izquierdo respecto a la dirección de avance, este resultado es importante ya que esta investigación propone una diferenciación entre el proceso de vaciado, corte y grabado, en maquinados por router CNC, lo que permita evaluar la calidad en estos procesos en la industria del mueble.

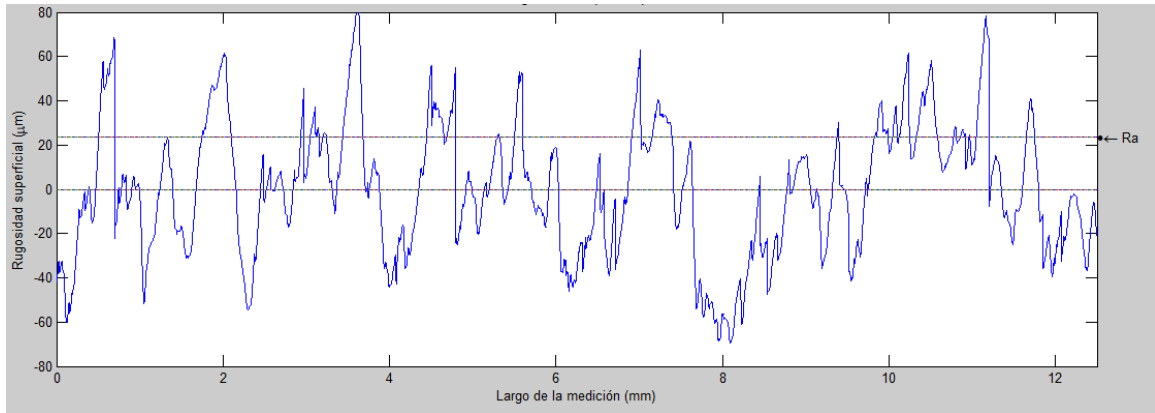


Figura 31. Perfil de rugosidad superficial, corte periférico de tablero MDF

Las imágenes obtenidas por el perfilómetro Contour Elite I, de probetas de corte en MDF Nacional, se muestran en la Figura 32

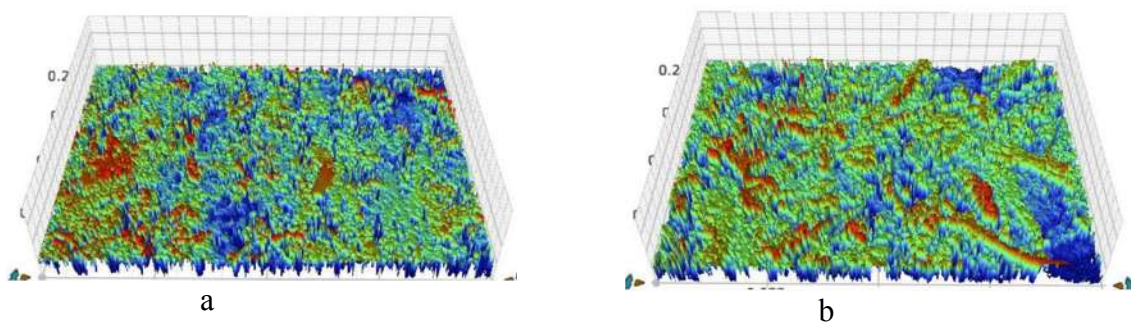


Figura 32. Rugosidad superficial 3D del maquinado por corte, lado izquierdo; a) Rugosidad Superficial mínima  $Ra=13.617 \mu\text{m}$ , b) Rugosidad superficial máxima  $Ra=18.16 \mu\text{m}$

A partir de las imágenes 3D de la rugosidad superficial se identifica una diferencia entre la medición de la superficie axial de la Figura 29 y la medición en el espesor del tablero presenta en la Figura 32.

Se analizan los resultados de la rugosidad superficial de los maquinados de corte y vaciado (Figura 33), se define una notable diferencia entre los resultados de rugosidad superficial en vaciado los cuales están muy por debajo a los maquinados en corte.

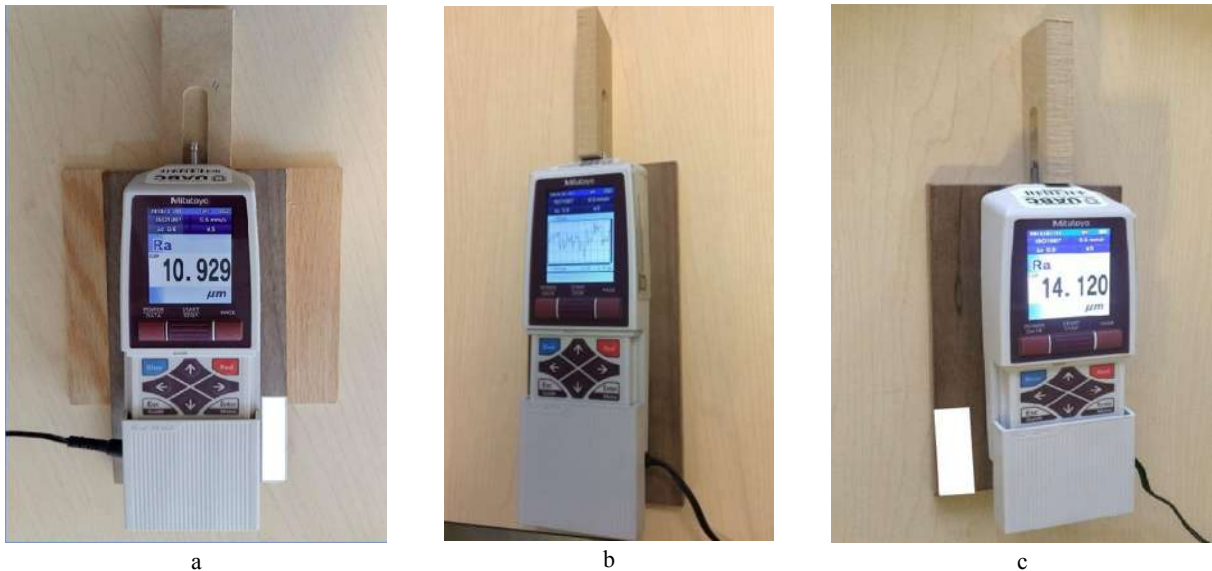


Figura 33. Mediciones de la rugosidad superficial, a) vaciado, b) corte izquierdo y c) corte derecho

El Cuadro 29 se presenta las diferentes rugosidades superficiales obtenidas a velocidades de rotación de 6000, 9000 y 12000 rpm., en las diferentes velocidades de corte.

Cuadro 29. Resultados de rugosidad superficial para el tablero MDF maquinado de vaciado

Vel. De rotación (rpm)	Vel. Avance (m/min)	Max Ra( $\mu\text{m}$ )	Min Ra( $\mu\text{m}$ )	Promedio Ra/Rz( $\mu\text{m}$ )	Desv. Est. Ra( $\mu\text{m}$ )	% C.V.
6000	2	13.256	11.087	11.815/75.401	0.604	5.414
	4	16.489	11.943	13.568/88.367	2.327	17.150
	6	16.657	12.967	14.199/82.384	2.623	18.476
	8	17.660	10.641	15.133/90.286	6.116	40.419
9000	2	12.386	11.003	11.356/75.036	2.178	12.386
	4	13.109	8.884	12.111/71.382	2.239	18.492
	6	13.987	11.147	13.430/77.646	1.274	9.484
	8	15.885	12.298	14.611/86.164	1.721	11.778
12000	2	12.009	9.957	10.468/63.931	0.704	6.726
	4	13.256	12.252	12.604/78.6955	0.157	1.246
	6	15.462	12.727	14.5355/86.403	1.232	8.875
	8	13.788	12.023	13.212/78.769	0.507	3.837

La rugosidad superficial del maquinado de corte se separa según el lado del corte en relación a la dirección del avance, por lo que en el

Cuadro 30 se presentan los resultados del corte del lado derecho. Y en el Cuadro 31 se presentan el corte del lado izquierdo.

Cuadro 30. Resultados de rugosidad superficial para el tablero MDF maquinado de corte lado derecho

Vel. De rotaci3n (rpm)	Vel. Avance (m/min)	Max $Ra(\mu\text{m})$	Min $Ra(\mu\text{m})$	Promedio $Ra/Rz(\mu\text{m})$	Desv. Est. $Ra(\mu\text{m})$	% C.V.
6000	2	22.351	17.512	18.786/111.165	3.038	16.172
	4	48.318	42.658	47.415/214.05	4.485	9.459
	6	23.589	21.521	22.450/123.515	0.651	2.898
	8	33.133	27.400	31.899/156.315	4.882	15.303
9000	2	27.546	21.487	23.807/146.215	6.975	29.297
	4	25.850	18.863	22.476/122.690	6.137	27.304
	6	29.038	26.243	27.633/148.185	1.083	3.920
	8	44.369	36.072	38.335/185.445	13.713	35.770
12000	2	17.568	13.647	15.998/85.441	1.727	10.796
	4	17.443	11.810	16.326/93.778	4.322	26.475
	6	20.266	16.834	18.670/94.807	1.322	7.08
	8	39.586	32.569	38.063/162.702	8.047	21.140

La rugosidad superficial obtenida en el corte del lado izquierdo es mayor hasta un 25% que, en el lado derecho debido a las fuerzas de corte por la rotaci3n de la herramienta, en el lado derecho se ejerce una compresi3n en el material por el filo de la herramienta, mientras que en el corte del lado izquierdo hay una fuerza de tensi3n y en ocasiones un desgarre de las fibras lo que incrementa el coeficiente de variaci3n en las mediciones de la rugosidad.

Cuadro 31. Resultados de rugosidad superficial para el tablero MDF maquinado de corte lado izquierdo

Vel. De rotaci3n (rpm)	Vel. Avance (m/min)	Max $Ra(\mu\text{m})$	Min $Ra(\mu\text{m})$	Promedio $Ra/Rz(\mu\text{m})$	Desv. Est. $Ra(\mu\text{m})$	% C.V.
6000	2	28.657	22.368	26.514/124.385	6.036	22.765
	4	32.646	21.578	27.984/133.885	13.184	47.113
	6	29.844	23.052	28.803/142.210	9.411	32.675
	8	30.256	22.578	25.720/129.295	8.811	34.257
9000	2	19.167	15.757	16.85/91.890	1.542	9.153
	4	23.549	16.719	17.936/104.945	45.376	43.238
	6	30.118	25.805	27.665/136.225	2.254	8.148
	8	38.198	28.596	34.643/165.025	12.134	35.026
12000	2	14.160	9.610	12.529/62.204	2.521	20.120
	4	19.659	12.118	14.560/72.030	6.953	47.755
	6	18.095	11.784	15.088/72.966	4.977	32.987
	8	18.076	11.699	16.204/79.291	5.616	34.565

La operación de vaciado permite identificar tres áreas con un fenómeno de corte diferente; el corte axial, el corte periférico del lado derecho y el corte periférico del lado izquierdo en relación a la dirección del avance de la herramienta. La rugosidad superficial obtenida es menor en el corte axial ( $Ra=13.08 \mu\text{m}$  y  $Rz=79.54 \mu\text{m}$ ) seguida del corte periférico del lado derecho ( $Ra=22.04 \mu\text{m}$  y  $Rz=109.53 \mu\text{m}$ ) y la mayor rugosidad se obtiene en el corte periférico del lado izquierdo ( $Ra=26.82 \mu\text{m}$  y  $Rz=137.03 \mu\text{m}$ ). Finalmente el parámetro de  $Ra$  presenta un menor coeficiente de variación entre las mediciones, lo que permite definir un rango de rugosidad para cada operación de maquinado, a diferencia de  $Rz$  que, al tomar en cuenta los picos más altos del perfil es un indicador del posible desgarre de material.

#### **8.6. Rugosidad superficial en las operaciones por router CNC para MDF**

Como una observación inicial de la medición de la rugosidad superficial a partir de  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$ , en las tres operaciones de maquinado se identifica una mayor dispersión en las mediciones de  $Rz$ , entre las seis réplicas de cada grupo, siendo menores la dispersión en  $Rq$  y  $Ra$ , la desviación estándar en  $Ra$  es menor y en  $Rz$  es mayor. En el análisis estadístico de las operaciones del maquinado se identifica una reducción en la rugosidad superficial para velocidad de rotación alta (12000 rpm). Los valores más bajos de la media en  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$  en la rugosidad superficial fueron 7.746, 9.989 y 63.121  $\mu\text{m}$ , respectivamente, generados en el vaciado a 2 mm de profundidad. Para el barrenado 10.988, 13.695, 63.121  $\mu\text{m}$  y el corte se logró 12.021, 15.132, 83.782  $\mu\text{m}$ , con una velocidad de avance de 0.5 m /min y velocidad de husillo de 12000 rpm. Se aprecia entre cada operación de maquinados una diferencia de la rugosidad superficial obtenida. Esto se presenta en el Cuadro 32 para la operación de corte, en el Cuadro 33 y Cuadro 34 para la operación de vaciado y en el Cuadro 35 para la operación de barrenado, presentando un resumiendo el análisis estadístico de  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$ .



Cuadro 32. Resumen estadístico de rugosidad superficial del proceso de corte

Velocidad de avance	Velocidad de rotación	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )		$Rq$ ( $\mu\text{m}$ )		$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	
0.5 m/min	6000	12.974	<b>0.952</b>	16.167	<b>1.321</b>	87.636	<b>10.169</b>
	12000	12.021	<b>0.491</b>	15.133	<b>1.022</b>	83.783	<b>9.837</b>
1 m/min	6000	15.942	<b>1.105</b>	20.175	<b>2.029</b>	119.099	<b>15.263</b>
	12000	12.442	<b>1.111</b>	15.654	<b>1.265</b>	112.898	<b>29.592</b>
2 m/min	6000	18.583	<b>1.258</b>	23.620	<b>1.888</b>	128.369	<b>20.615</b>
	12000	14.964	<b>1.341</b>	18.845	<b>1.903</b>	103.446	<b>13.196</b>

Números en negritas indican el valor de la desviación estándar **SD**

El proceso de vaciado indica diferencia entre la profundidad de corte debido a que en los tableros MDF la densidad es mayor en los extremos del espesor y se reduce la densidad al centro del espesor.

Cuadro 33. Resumen estadístico de rugosidad superficial del proceso del vaciado a 2mm de profundidad

Dirección del corte	Velocidad de avance	Velocidad de rotación	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )		$Rq$ ( $\mu\text{m}$ )		$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	
Paralela 	0.5 m/min	6000	11.050	<b>0.604</b>	14.009	<b>0.725</b>	92.725	<b>12.848</b>
		12000	8.005	<b>0.551</b>	10.358	<b>0.486</b>	68.332	<b>9.322</b>
	1 m/min	6000	12.259	<b>0.739</b>	15.474	<b>0.944</b>	91.564	<b>10.377</b>
		12000	10.619	<b>0.404</b>	14.043	<b>1.590</b>	89.545	<b>13.699</b>
	2 m/min	6000	12.583	<b>0.905</b>	16.382	<b>1.382</b>	115.215	<b>11.606</b>
		12000	12.424	<b>0.684</b>	15.547	<b>0.942</b>	102.745	<b>13.658</b>
Perpendicular ⊥	0.5 m/min	6000	11.464	<b>0.489</b>	14.685	<b>0.900</b>	93.099	<b>12.827</b>
		12000	7.746	<b>0.589</b>	9.990	<b>0.736</b>	65.423	<b>7.084</b>
	1 m/min	6000	12.544	<b>0.444</b>	16.214	<b>0.823</b>	110.172	<b>13.919</b>
		12000	11.164	<b>0.417</b>	14.186	<b>0.524</b>	90.033	<b>16.491</b>
	2 m/min	6000	13.245	<b>0.470</b>	16.928	<b>0.729</b>	114.854	<b>13.609</b>
		12000	12.658	<b>0.581</b>	16.481	<b>2.265</b>	90.799	<b>10.311</b>
Diagonal ∧	0.5 m/min	6000	10.704	<b>0.557</b>	13.415	<b>0.804</b>	80.633	<b>11.808</b>
		12000	7.921	<b>0.949</b>	10.076	<b>1.033</b>	63.380	<b>8.836</b>
	1 m/min	6000	12.472	<b>0.984</b>	16.131	<b>2.226</b>	99.250	<b>27.550</b>
		12000	11.029	<b>0.470</b>	13.973	<b>0.651</b>	92.690	<b>5.055</b>
	2 m/min	6000	13.022	<b>0.599</b>	16.738	<b>0.803</b>	108.732	<b>13.708</b>
		12000	12.958	<b>0.524</b>	16.237	<b>0.616</b>	94.104	<b>8.314</b>

Números en negritas indican el valor de la desviación estándar **SD**

El gradiente de densidad en los tableros MDF identifica una menor densidad en el centro del espesor del tablero, lo que incrementa la rugosidad superficial, que se compara en el siguiente Cuadro, en  $Rz$  la diferencia entre la profundidad de 2 a 4 mm es más clara que en  $Rq$ , mientras que  $Ra$  es el indicador con un menor coeficiente de variación.

Cuadro 34. Resumen estadístico de rugosidad superficial en el vaciado a 4mm de profundidad

Dirección del corte	Velocidad de avance	Velocidad de rotación	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )		$Rq$ ( $\mu\text{m}$ )		$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	
Paralela 	0.5 m/min	6000	12.570	<b>0.332</b>	15.555	0.646	90.607	<b>7.671</b>
		12000	11.047	<b>0.560</b>	14.043	0.557	93.684	<b>6.222</b>
	1 m/min	6000	13.737	<b>0.407</b>	17.285	<b>0.975</b>	102.169	<b>13.844</b>
		12000	12.950	<b>0.544</b>	16.458	<b>0.829</b>	103.153	<b>9.810</b>
	2 m/min	6000	14.008	<b>0.574</b>	17.302	<b>0.689</b>	100.354	<b>9.645</b>
		12000	13.696	<b>0.482</b>	17.115	<b>0.682</b>	101.063	<b>12.555</b>
Perpendicular ⊥	0.5 m/min	6000	12.839	<b>0.776</b>	16.137	1.004	101.009	<b>6.622</b>
		12000	11.231	<b>0.415</b>	14.320	0.594	90.591	<b>9.020</b>
	1 m/min	6000	13.679	<b>0.973</b>	17.205	<b>1.858</b>	116.622	<b>13.820</b>
		12000	12.579	<b>0.520</b>	15.605	<b>0.219</b>	86.931	<b>6.361</b>
	2 m/min	6000	14.451	<b>0.376</b>	18.226	<b>0.873</b>	114.196	<b>28.852</b>
		12000	13.620	<b>0.851</b>	17.789	<b>1.144</b>	118.250	<b>16.813</b>
Diagonal ∧	0.5 m/min	6000	12.817	<b>0.381</b>	15.419	0.925	97.099	<b>23.787</b>
		12000	11.801	<b>0.302</b>	14.811	0.206	86.251	<b>9.432</b>
	1 m/min	6000	13.472	<b>0.715</b>	17.279	<b>1.844</b>	110.898	<b>23.421</b>
		12000	12.700	<b>0.667</b>	15.982	<b>1.163</b>	95.246	<b>11.568</b>
	2 m/min	6000	14.274	<b>0.866</b>	18.827	<b>1.229</b>	114.421	<b>18.779</b>
		12000	13.790	<b>0.319</b>	17.509	<b>0.933</b>	111.767	<b>16.724</b>

Números en negritas indican el valor de la desviación estándar **SD**

La rugosidad superficial más baja obtenida fue a partir del proceso de barrenado, siendo menor que la generada en el proceso de corte, esto debido a que la tasa de remoción del material es mucho menor en el barrenado, y que en el proceso de barrenado la velocidad de avance es de vertical.

Cuadro 35. Resumen estadístico de rugosidad superficial del proceso de barrenado

Velocidad de avance	Velocidad de rotación	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )		$Rq$ ( $\mu\text{m}$ )		$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	
0.5 m/min	6000	12.424	<b>0.272</b>	15.539	<b>0.374</b>	68.610	<b>2.221</b>
	12000	10.989	<b>0.319</b>	13.695	<b>0.324</b>	63.121	<b>2.752</b>
1 m/min	6000	13.567	<b>0.777</b>	16.965	<b>0.879</b>	76.717	<b>4.709</b>
	12000	11.837	<b>0.172</b>	14.630	<b>0.355</b>	66.671	<b>3.815</b>
2 m/min	6000	16.482	<b>1.256</b>	20.891	<b>1.762</b>	96.734	<b>9.911</b>
	12000	14.556	<b>0.402</b>	18.045	<b>0.567</b>	80.145	<b>2.903</b>

Números en negritas indican el valor de la desviación estándar **SD**

La identificación de las operaciones de maquinado que inciden en las mediciones de la rugosidad superficial fue por medio del análisis de la varianza, con un nivel de significancia  $P < 0.05$ . Como una medida estadística que indica el porcentaje de la variación de rugosidad superficial que se puede explicar por un modelo lineal, se utilizó  $R^2$ . Cuando más cercano es  $R^2$  al 100%, mejor se ajusta el modelo a los datos observados.

La Cuadro 36 corresponde al ANOVA de la operación de corte, se identifica que la velocidad de avance y la velocidad de rotación son altamente significante para  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$ . La rugosidad definida por  $Rz$  no es confiable como indicador de la calidad del maquinado, esto debido a que los picos en el perfil de la rugosidad, en algunas mediciones pueden ser arrastrados por el palpador del rugosímetro, como lo indica Lin et al., (2006), el arrastre no sucede con métodos de medición sin contacto. En el caso de  $Rz$ , el  $R^2$  del modelo corresponde al 49.47%, lo que señala que el modelo lineal no se ajusta a los datos.  $R^2$  para  $Ra$  y  $Rq$  es de 84.47% y 80.42% respectivamente, indican un modelo confiable para definir la calidad en el proceso de corte. Esto se puede explicar por la densidad del MDF de 611 kg/m<sup>3</sup> y la variación de las fibras que lo forman.

Cuadro 36. ANOVA del proceso de corte, para  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$ 

Factor	GL			SC			CM			F valor			Pr(>F)		
	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Ra$	$Rq$	$Rz$
Vel. de avance (V)	2	2	2	111.26	189.23	7317.5	55.632	94.614	3658.8	47.79	36.18	11.51	0.000	0.000	0.000
Vel. de rotación (R)	1	1	1	65.14	106.68	1223.4	65.141	106.685	1223.4	55.96	40.80	3.85	0.000	0.000	0.059
V * R	2	2	2	13.61	26.22	799.9	6.803	13.109	399.9	5.84	5.01	1.26	0.007	0.013	0.229
Error	30	30	30	34.92	78.45	9539.7	1.164	2.615	318.0						
Total	35	35	35	224.93	400.58	18880.5									

Respecto a los resultados de la operación de maquinado de vaciado, los rangos de la desviación estándar y la parámetros significativos corresponden con los presentados por (Sutcu & Karagöz, 2012), pero contrasta en nuestra investigación al influir el factor de la dirección de la trayectoria, el cual no es significativo para la rugosidad superficial. Los valores obtenidos de  $R^2$  fueron 87.55%, 79.07%, 46.92%, para  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$  respectivamente. En el Cuadro 37 del ANOVA se define la velocidad de avance y la velocidad de rotación, así como la profundidad del corte como altamente significativas, mientras que la dirección de la trayectoria del corte no es significaba, debido a que los tableros MDF son homogéneos desde un corte axial, considerando su gradiente de densidad entre el espesor del tablero, que se presenta en la significancia de la interacción con la profundidad de corte ( $V * P$  y  $R * P$ ), esto debido a la diferencia entre la densidad a 2mm de espesor que es mayor a la densidad a 4 mm de profundidad. Indicando la importancia de los parámetros de corte de la velocidad de alimentación y la velocidad de rotación y su influencia en la rugosidad superficial.

Cuadro 37. ANOVA del proceso de vaciado, para  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$ 

Factor	GL			SC			CM			F valor			Pr( >F)		
	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Ra$	$Rq$	$Rz$
Vel. de avance (V)	2	2	2	254.365	458.06	17756.5	127.183	229.031	8878.23	307.27	188.84	43.03	0.000	0.000	0.000
Vel. de rotación (R)	1	1	1	89.526	137.19	7324.2	89.526	137.191	7324.19	216.29	113.12	35.5	0.000	0.000	0.000
Profundidad del corte (P)	1	1	1	163.438	216.01	4874.3	163.438	216.010	4874.34	394.87	178.1	23.62	0.000	0.000	0.000
Dirección del corte (T)	2	2	2	0.892	0.51	358.5	0.446	0.253	179.23	1.08	0.21	0.87	0.342	0.812	0.421
Interacciones															
V * R	2	2	2	32.027	35.42	377.6	16.014	17.712	188.8	38.69	14.6	0.92	0.000	0.000	0.402
V * P	2	2	2	19.568	25.27	1136.7	9.784	12.634	568.34	23.64	10.42	2.75	0.000	0.000	0.066
V * T	4	4	4	1.288	4.94	1873.4	0.322	1.234	468.35	0.78	1.02	2.27	0.541	0.399	0.063
R * P	1	1	1	6.962	14.98	1312.9	6.962	14.981	1312.91	16.82	12.35	6.36	0.000	0.000	0.012
R * T	2	2	2	1.015	0.09	19.3	0.638	0.045	9.63	1.23	0.04	0.05	0.296	0.964	0.954
d * T	2	2	2	1.277	5.58	713.3	0.414	2.790	356.64	1.54	2.3	1.73	0.216	0.103	0.180
Error	196	196	196	81.126	237.72	40440.4	0.415	1.213	206.33						
Total	215	215	215	651.485	1135.77	76187									

Para la operación del barrenado, la medición de la rugosidad superficial fue medida a lo largo del orificio. La velocidad de avance y la velocidad de rotación se indican como altamente significativas en el análisis ANOVA (Cuadro 38), al igual que la interacción entre V\*R, presentados en la tabla 4. En el caso de  $R^2$  del modelo corresponde al 90.41%, 89.95% y 85.28% para  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$  respectivamente, lo que señala que el modelo lineal se ajusta a los datos. Al igual que otros reportes se identifica que la rugosidad superficial se incrementa al reducir la velocidad de rotación o incrementar la velocidad de avance (Prakash & Palanikuma 2010, Prakash et., al. 2011).

Cuadro 38. ANOVA del proceso de barrenado, para  $Ra$ ,  $Rq$  y  $Rz$ 

Factor	GL			SC			CM			F valor			Pr( >F)		
	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Ra$	$Rq$	$Rz$
Vel. de avance (V)	2	2	2	93.862	153.585	3295.9	46.931	76.793	1647.94	110.45	100.83	63.43	0.000	0.000	0.000
Vel. de rotación (R)	1	1	1	25.908	49.351	1031.9	25.908	49.351	1031.90	60.97	64.80	39.72	0.000	0.000	0.000
V * R	2	2	2	0.366	1.505	186.8	0.183	0.753	93.38	0.43	0.99	3.59	0.654	0.384	0.040
Error	30	30	30	12.747	22.849	779.4	0.425	0.762	25.98						
Total	35	35	35	132.882	227.290	5294.0									

En el barrenado la medición se realiza a través del espesor del tablero y el proceso de

maquinado, se realiza con una tasa de remoción de material muy baja comparada con la operación de maquinado del corte y vaciado, como se identifica en la Figura 34, de los efectos principales de  $Ra$ , al ser el indicador de la rugosidad superficial con una desviación estándar menor entre las mediciones. También se observa que a mayor velocidad de avance se identifica un incremento de la rugosidad superficial y al incrementar la velocidad de rotación se disminuye la rugosidad superficial en las tres operaciones de maquinado, los valores más altos de rugosidad superficial en el corte, donde la medición es en el centro del espesor del tablero y en dirección de la trayectoria del corte. Mientras que el grabado a 2mm presenta la menor rugosidad superficial en donde la medición es en el área axial del vaciado y la densidad de la capa es mayor, debido al gradiente de densidad del tablero.

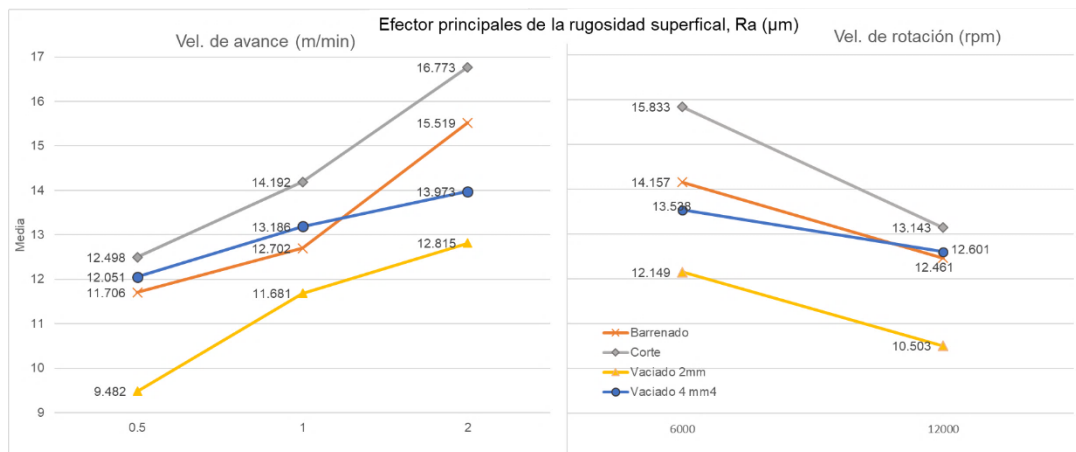


Figura 34. Gráfica de efectos principales de las operaciones de maquinado para  $Ra$

A partir de los resultados del ANOVA se aplicó el método de Tukey para identificar las diferencias entre las medias de  $Ra$ , de los niveles de la velocidad de avance y la velocidad de corte con un nivel de confianza simultáneo del 95% ( $P < 0.05$ ), en el Cuadro 39, se presentan los resultados de comparaciones múltiples por el método Tukey en las operaciones de maquinado, en donde la velocidad de rotación identifica una diferencia significativa entre 6000 y 12000 rpm, al reducir la rugosidad superficial en la mayor velocidad de rotación, en la velocidad de avance se tiene diferencia entre las operaciones de vaciado contra las operaciones de barrenado y corte, en el vaciado se identifica una diferencia entre cada nivel de la velocidad de avance mientras que en el barrenado y corte se agrupan la velocidad de avance de 0.5 y 1 m/min con una rugosidad baja y se incrementa la rugosidad superficial a la

velocidad de 2 m/min. Finalmente se confirma que no hay diferencia entre la dirección de la trayectoria del corte en la operación del vaciado.

Cuadro 39. Comparación por parejas de Tukey, de los parámetros de maquinado, en las operaciones de vaciado, barrenado y corte

Factor	Nivel	Vaciado 2 mm			Vaciado 4 mm			Barrenado			Corte		
		GL	Media	Grupo	GL	Media	Grupo	GL	Media	Grupo	GL	Media	Grupo
Velocidad de rotación	6000	54	12.149	A	54	13.536	A	18	14.157	A	18	15.833	A
	12000	54	10.503	B	54	12.601	B	18	12.46	B	18	13.143	B
Velocidad de avance	2	36	12.815	A	36	13.973	A	12	15.519	A	12	16.773	A
	1	36	11.681	B	36	13.172	B	12	12.702	B	12	14.192	B
	0.5	36	9.482	C	36	12.051	C	12	11.706	B	12	12.498	B
Trayectoria del corte	Perpendicular ⊥	36	11.470	A	36	13.142	A						
	Diagonal ∧	36	11.351	A	36	13.054	A						
	Paralela ∥	36	11.157	A	36	13.001	A						

Estos resultados indican que dentro de los parámetros de corte altas velocidades de rotación mejoran la rugosidad superficial en cualquiera de las operaciones del maquinado, mientras que la velocidad de avance se comparte de diferente la operación de vaciado, comparando con las operaciones de barrenado y corte, en estas últimas no hay diferencia significativa entre la velocidad de avance de 0.5 y 1 m/min. Finalmente, la dirección de la trayectoria de corte no es significativa, por lo que los patrones de trayectorias en los desbastes, grabados o ranurados, pueden ser indistintos, entre concéntricos, en zic-zac y las combinaciones que se generan dentro del software CAM.

En los resultados de las operaciones de maquinado se logra identificar diferencias entre los rangos de rugosidad superficial obtenidos, el proceso de barrenado presenta la menor rugosidad, seguido del proceso de vaciado, mientras que en el proceso de corte se generan valores más altos de la rugosidad superficial, como lo indica Davim et al., (2009) “es evidente que la rugosidad de la superficie está fuertemente influenciada por la base o la cara de la posición de corte,” lo que indica que hay una diferencia entre las operaciones del maquinado

CNC. Es de gran importancia definir las zonas de medición de la rugosidad superficial para reducir el error en las mediciones.

### **8.7. Aplicación de la rugosidad superficial en el diseño, fabricación y uso de un mueble**

Los muebles de empaque plano listos para ensamblar, son de interés para la industria del mueble, generalmente se utilizan tableros derivados de la madera y equipos de control numérico computarizado para su manufactura, estos muebles permiten reducir el volumen de su transporte y ser armados por el usuario, una ventaja para el comercio electrónico. A diferencia de investigaciones previas respecto a los ensambles de madera, en donde se busca aumentar y garantizar la resistencia de la unión, se analiza el efecto de la rugosidad superficial en un ensamble que permite armar y desarmar el mueble, al no usar herramientas y sin generar un riesgo en el usuario, pero cumpliendo con el ajuste adecuado y rigidez del mueble. El ensamble estudiado, es un ensamble en **T** del tipo machihembrado, con interferencia entre los elementos, para lograr un ensamble suave y una variación de la rugosidad superficial generada por los parámetros del proceso de corte, a velocidades de avance y velocidades de rotación presentados en la sección 8.6 . Los resultados presentados se integran dentro de un mobiliario modular, que permite ser armado y desarmado requiriendo fuerzas menores a 30N. Se presenta la rugosidad superficial y su efecto en la sujeción del ensamble, en donde el coeficiente de fricción se incrementa conforme el área de contacto y el incremento de la rugosidad superficial. Los parámetros de corte inciden en la sujeción del ensamble, al incrementar la velocidad de avance y reducir la velocidad de rotación la sujeción del ensamble de machihembrado es mayor. Rugosidad entre 13 y 16 $\mu$ m cumplen con la resistencia menor a la recomendada para el usuario que va a desarmar y armar el mobiliario, y permiten tener un mueble estable y rígido.

El mueble se generó a partir del diseño modular, logrando tres propuestas que se pueden integrar que a partir de un conjunto de muebles que forman un sistema con diferentes configuraciones, la Figura 35 presenta una de las configuraciones posibles a partir de cuatro muebles: uno modulo vertical, un módulo horizontal y un módulo individual.





Figura 35. Configuración con muebles modulares diseñados

El mueble modular se compone de 7 piezas que también son modulares y que intercambiar entre muebles, también es posible ajustar a las dimensiones que requiera el usuario. La Figura 36 muestra el explotado de las piezas del mueble, el orden de la unión de las diferentes piezas es importante, ya que la pieza posterior es la última pieza a ensamblar y esta es un candado para que todas las piezas queden unidas. Al identificar la novedad del diseño del mueble se encuentra en proceso de registro ante el Instituto Mexicano de Propiedad Intelectual (IMPI), que se presenta el resumen en el Anexo 6.

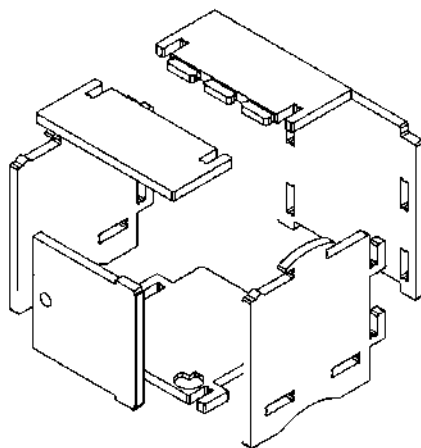


Figura 36. Vista de las piezas del mueble modular

Para evaluar el ensamble se modificó la sección que se sujeta por las mordazas del banco de prueba como se muestran en la Figura 10.c, las probetas tienen la misma área de contacto, el ensamble hembra-hembra, tiene cuatro áreas de sujeción (Figura 37).



Figura 37. Detalles de los ensambles del mueble modular y la adaptación de las probetas

Las dimensiones del ensamble que corresponden al tablero MDF y el diseño del mobiliario modular, así como las tolerancias de las probetas se representan en la Figura 13, la rugosidad superficial de cada grupo cambia la interferencia entre los elementos. El contacto del ensamble corresponde a dos superficies diferentes: la superficie de la cara del tablero comercial ( $Ra$  mean=  $3.08 \mu\text{m}$ ) que fue lijada por el fabricante del tablero y se indica en la tolerancia **A**, la rugosidad fue constante en todas las probetas, mientras que la superficie maquinada en el proceso de corte es la variable independiente y se indica en la tolerancia **B**, que es definida por la variación de los parámetros de corte, como se resume en el Cuadro 40.

Cuadro 40. Valores promedios de la rugosidad superficial y la fuerza de agarre en el ensamble

Velocidad de avance (m/min)	Velocidad de rotación (rpm)	Tolerancia <b>B</b> Ra( $\mu$ m)	Esfuerzo Max. (N)
2	6000	18.583	38.5
<b>2</b>	<b>12000</b>	<b>15.131</b>	<b>24.2</b>
1	6000	15.942	30.0
1	12000	12.442	12.1
<b>0.5</b>	<b>6000</b>	<b>12.974</b>	<b>17.9</b>
0.5	12000	12.021	8.9

El comportamiento de la gráfica del esfuerzo, para una rugosidad superficial en el área de corte que interactúa con la cara del tablero que tiene una rugosidad de  $Ra$  de  $3.08 \mu\text{m}$ . La gráfica se puede observar al inicio de la medición un comportamiento atípico, porque indica un incremento del área de contacto debido al acoplamiento de la rugosidad entre las superficies, al final se observa un máximo que indica el pico de esfuerzo cortante. Finalmente, la gráfica descendente puede explicarse en términos de una disminución en el área de contacto (Figura 38).

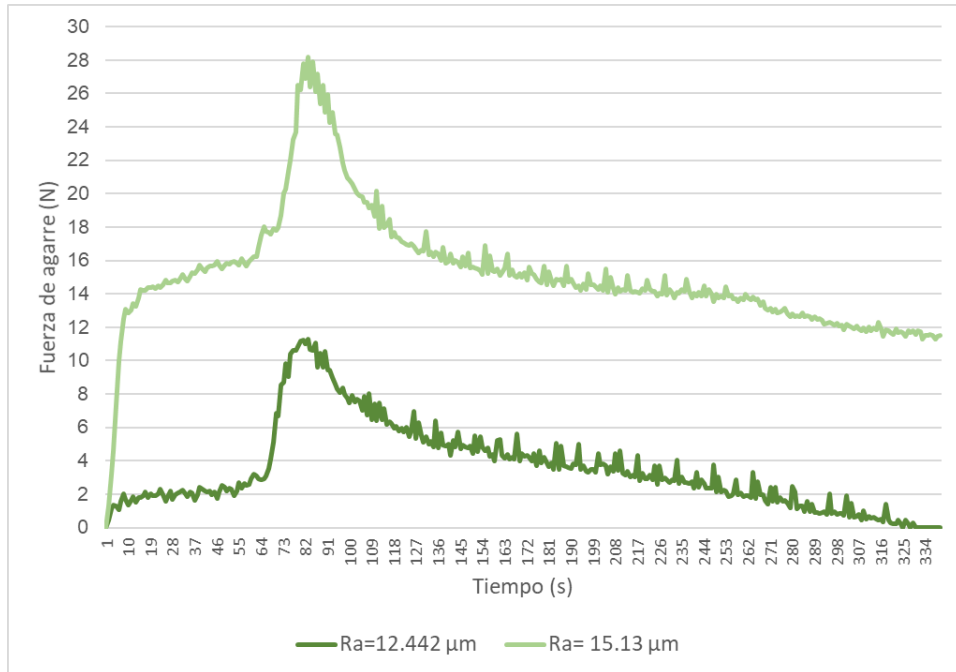


Figura 38. Gráfica del esfuerzo del ensamble, para  $Ra$  de 12.442 y 15.13  $\mu\text{m}$

La Figura 39 muestra el efecto de la rugosidad superficial en la fuerza máxima de agarre del ensamble esfuerzo, se observa que  $Ra$  es el parámetro de rugosidad confiable, mientras que  $Rz$  y  $Rq$  no mostraron un factor de correlación óptimo ( $R$ ). Esto está asociado al instrumento de medición, y con la disminución del área de contacto o la disminución del número de picos máximos de  $Rz$ .

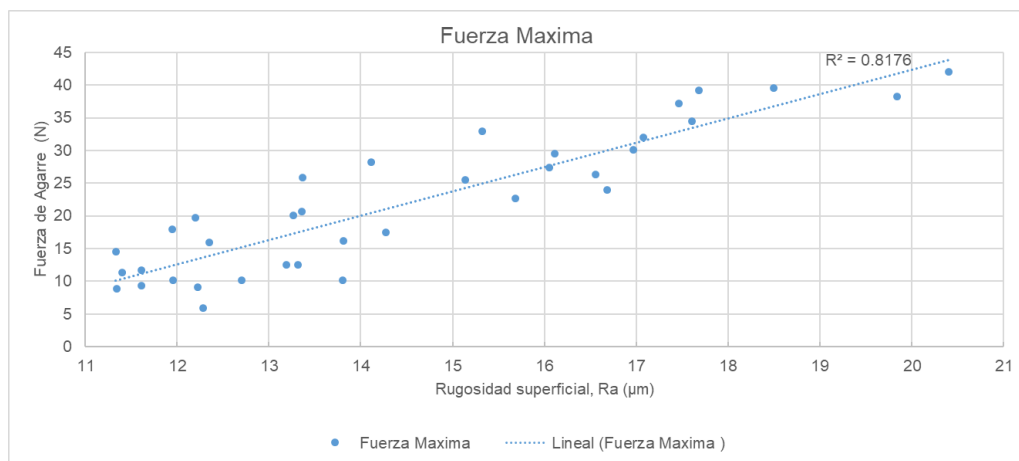


Figura 39. Grafica de dispersión de la rugosidad superficial y la fuerza de agarre

El punto establecido en la parte inferior de la línea de correlación indica algunos

conjuntos confiables. De lo contrario, los dos puntos en la parte superior de la línea de correlación pueden generar ensamblajes más difíciles por lo tanto, el conjunto de puntos en el medio puede producir ensamblajes ideales.

Como lo indica Gurau & Irle, (2017), las investigaciones sobre la rugosidad superficial en la madera se ha realizado con diferentes parámetros y variables, lo que dificulta su comparación entre investigaciones, pero esta investigación aporta conocimiento en diferentes procesos de maquinado y tableros comerciales en México, que definen la calidad a partir de la rugosidad de superficial obtenida, coincidiendo con la necesidad de definir los rangos de calidad en los diferentes procesos, tanto los generados con el router CNC; corte, vaciado, y barrenado, como procesos subsecuentes de lijado, ensambles, pegado y/o aplicación de recubrimientos.

## 9. Conclusiones

La rugosidad superficial es un buen indicador de la calidad de un proceso de maquinado, por lo que es necesario definir parámetros del experimento, como son número y localización de las mediciones, dentro de los diferentes métodos para su medición, es necesario proporcionar solución a las industrias del sector del mueble, por lo que es conveniente continuar con las investigaciones que incluyan instrumentos de medición que se encuentren al alcance de la industria: en costo, uso e interpretación.

En los últimos años se ha incrementado la investigación de la rugosidad superficial en tableros MDF, pero hay que recordar que estos productos de la madera se encuentran en un constante cambio y evolución, al modificar su composición: el tipo de fibras, resinas aglutinantes, capas que lo conforman y procesos de prensado. Por lo que el conocer la influencia de los parámetros de maquinado en la calidad superficial a obtener, es de gran importancia en la industria para los procesos subsecuente, de lijado, ensamble, pegado o recubrimientos, de manera que se garantice su calidad y durabilidad, generando investigaciones de su incidencia en los muebles a base de estos tableros.

Los parámetros de maquinado dentro de los tableros comerciales en México, coinciden con investigaciones de otros países, en donde uno de los elementos más importantes es la relación entre la velocidad de rotación y la densidad del tablero. Los procesos de maquinado se enfocaron en los que permite el router CNC, que son corte, barrenado y vaciado, siendo el vaciado representativo del ranurado y el grabado, debido a que la rugosidad superficial se mide en el corte axial, que es la superficie del tablero.

Se logró evaluar los tableros comerciales MDF, en los procesos de maquinado del router CNC, al considerar la rugosidad superficial como el indicador que permitió optimizar el proceso de diseño del mueble hacia productos innovadores, como fue el caso del diseño del mueble modular de empaque plano, listo para ensamblar, en donde se eliminaron utensilios y conectores, al integrar un ensamble de unión suave entre las piezas que lo forman.

La influencia de los parámetros de maquinado en la calidad superficial es de importancia en la industria para los procesos subsecuente, de manera que se garantice su

calidad, durabilidad y su incidencia en los muebles a base de tableros. A partir de esta investigación se genera una línea de generación y aplicación del conocimiento que sea un apoyo para el sector industrial en sus procesos de producción, para evaluar los tableros a base de manera y ajustar las diferentes variables que intervienen en la calidad de los maquinados, así como definir los rangos de rugosidad superficial necesarios para cumplir con los estándares de calidad en cada proceso.

## 10. Bibliografía

- Aguilera, A., & Barros, J. L. (2010). Sound pressure as a tool in the assessment of the surface roughness on medium density fibreboard rip sawing process. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 12(3), 159–169. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2010000300001>
- Aguilera, A., Meausoone, P. J., & Martin, P. (2000). Optimización de las condiciones de corte en el maquinado de madera: Estimación del desgaste del elemento de corte en fresado. *Bosque*, 21(2), 127–135. <https://doi.org/10.4206/bosque.2000.v21n2-10>
- Aguilera, A. (2008). Roughness profile and cutting energy in MDF rip sawing. *Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology*, 1–11.
- Aguilera, A., Meausoone, P. J., & Martin, P. (2000). Wood material influence in routing operations: The MDF case. *Holz Als Roh - Und Werkstoff*, 58(4), 278–283. <https://doi.org/10.1007/s001070050425>
- Aguilera, Alfredo, & Muñoz, H. (2011). Rugosidad superficial y potencia de corte en el cepillado de acacia melanoxylon y sequoia sempervirens. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 13(1), 19–28. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2011000100002>
- Aguilera, Alfredo, & Vega, M. (2004). Effect of a change in machining conditions on surface roughness of *Pinus radiata*, D. Don. *Bosque*, 25(3), 25–32. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002004000300003>
- Agustiano, E., Setiawan, A. P., Tanaya, F., Studi, P., Interior, D., Petra, U. K., & Siwalankerto, J. (2018). Perancangan Flat Pack Furniture. *INTRA*, 6(2), 519–524. <http://publication.petra.ac.id/index.php/desain-interior/article/view/7315/6630>
- Akbulut, T., & Ayrilmis, N. (2006). Effect of compression wood on dimensional stability of medium density fiberboard. *Silva Fennica*, 40(1), 161–167. <https://doi.org/10.14214/sf.257>



- Akbulut, T., & Ayrilmis, N. (2019). Some advantages of three □ layer medium □ density fibreboard as compared to the traditional single □ layer one. *Journal of Wood Science*. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1822-4>
- Akgül, M., Korkut, S., Çamlıbel, O., Candan, Z., & Akbulut, T. (2012). Wettability and surface roughness characteristics of medium density fiberboard panels from rhododendron (*Rhododendron Ponticum*) biomass. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, *14*(2), 185–193. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2012000200006>
- Álvarez-Buylla, E. (2020). *Más apoyos para la ciencia en 2020*. Conacyt.
- ANIS.A208.2-2002. (2002). *Medium Density Fiberboard (MDF) For Interior Applications*. <http://www.flakeboard.com/specs/ANSI A208.2-2002 MDF.pdf>
- Antal, M. R. (2016). Methods for Determining the Aesthetic Appeal of Furniture. *Pro Ligno*, *12*(1), 32–38.
- Arreguín Pérez, A. (2020). *Adaptación del Sistema Constructivo del Troje para su Preservación y uso Habitacional en Charapan, Mich*. UMSNH.
- Asión-Suñer, L., & López-Forniés, I. (2021). Adoption of modular design by makers and prosumers. A survey. *Proceedings of the Design Society*, *1*(August), 355–364. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.36>
- Asión, L. (2017). *Trabajo Fin de Máster: Estudio de los métodos de diseño modular y sus aplicaciones*.
- ASTM D7127-13. (2013). *Standard Test Method for Measurement of Surface Roughness of Abrasive Blast Cleaned Metal Surfaces Using a Portable Stylus Instrument 1*. <https://doi.org/10.1520/D7127-13>
- B46.1-2002, A. (2002). *SURFACE TEXTURE (SURFACE ROUGHNESS, WAVINESS, AND LAY)*.

- Bal, B. C., & Gündeş, Z. (2019). Surface Roughness of Medium-Density Fiberboard Processed with CNC Machine. *Measurement*, 107421. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107421>
- Brock Brandenburg, C. (2016). *FURNITURE ARTICLE WITH CONCEALED STORAGE AND REMOVABLE PANELS* (Patent No. US 0174700 A1).
- Brubacher, J., & Street, H. (2010). *SNAP LOCK JOINT* (Patent No. US 7818939 B2).
- California Air Resources Board. (2009). *Airborne toxic control measure to reduce formaldehyde emissions from composite wood products* (Issue Section 93120–93120.12).
- camdi. (2017). *Cifras a propósito de la industria del mueble*. [www.cemdi.org.mx](http://www.cemdi.org.mx)
- Chen, M., Li, S., & Lyu, J. (2019). Effects of Selected Joint Parameters on Tensile Strength of Steel Bolt-nut Connections in Cupressus funebris Wood. *BioResources*, 14(3), 5188–5211.
- Cheng, E., & Sun, X. (2006). Effects of wood-surface roughness, adhesive viscosity and processing pressure on adhesion strength. *J. Adhesion Sci. Technol*, 20(9), 997–1017.
- Choodoung, S., & Smutkupt, U. (2012). Factors of Successful Wooden Furniture Design Process. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 6(10), 2117–2121.
- Clark Davis. (2013). *KNOCK DOWN FURNITURE WITH LOCKING JONTS* (Patent No. US 8590976 B2).
- Conacyt. (2020). *Programa de trabajo 2020*. <https://www.siicyt.gob.mx/index.php/transparencia/informes-conacyt/programa-de-trabajo-1/4918-programa-de-trabajo-2020/file>
- Coşereanu, C., & Cismaru, I. (2014). Complex ornament machining process on a CNC router. *Pro Ligno*, 10(1), 22–30.

- Cristovao, L. (2013). *Machining properties of wood Tool wear, cutting force and tensioning of blades*. <http://swepub.kb.se/bib/swepub:oai:pure.atira.dk:publications/c98ad54d-9908-4da2-b762-0c0aaad0c240?tab2=abs&language=en>
- Cubillos Rodríguez, M. C., & Rozo Rodríguez, D. (2009). El concepto de calidad: Historia, evolución e importancia para la competitividad. *Revista Universidad de La Salle*, 0(48), 80–99. <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1170&context=ruls>
- Culp, S. A., & Terry W. Gentle. (2010). *MODULAR ASSEMBLY SYSTEM* (Patent No. US 7856772 B1).
- Davim, J. Paulo, Clemente, V. C., & Silva, S. (2009). Surface roughness aspects in milling MDF (medium density fibreboard). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(1), 49–55. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1318-z>
- Davim, J P, Clemente, V., & Silva, S. (2007). Evaluation of delamination in drilling medium density fibreboard. *Proc. IMechE*, 221, 655–658. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM781>
- Davim, J P, Gaitonde, V. N., & Karnik, S. R. (2008). An investigative study of delamination in drilling of medium density fibreboard (MDF) using response surface models. *Int J Adv Manuf Technol*, 37, 49–57. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-0937-8>
- Davim, J P, Rubio, J. C., & Abrao, A. M. (2007). Delamination assessment after drilling medium-density fibreboard (MDF) by digital image analysis. *Holzforschung*, 61, 294–300. <https://doi.org/10.1515/HF.2007.066>
- De Deus, Priscila Roel, Alves, M. C. de S., & Vieira, F. H. A. (2015). The quality of MDF workpieces machined in CNC milling machine in cutting speeds, feedrate, and depth of cut. *Meccanica*, 50(12), 2899–2906. <https://doi.org/10.1007/s11012-015-0187-z>
- De La Torre, R. (2017). *Seis claves y una paradoja para entender la industria del mueble en México*. Mas Madera. <http://masmadera.net/industria-del-mueble-en-mexico/>

- Demirel, S., & Kalayci, G. (2020). Measuring and estimating shear force of one stapled and one-row multi stapled wood joints. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 22(3), 395–404. <https://doi.org/dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000313>
- Deus, Priscila R., Alves, M. C. S., Vieira, F. H. A., & Bilesky, L. R. (2018). Analysis of the Cutting Parameters in Front Milling for Medium Density Fiberboard. *BioResources*, 13(2), 3404–3410. <https://doi.org/DOI:10.15376/biores.13.2.3404-3410>
- DIN 4766-1. (1981). *Surface roughnes associated with types of manufacturing methods; attainable arthmetical mean value of peak-to-valley height Rz according to DIN 4768 part 1.*
- Dovramadjiev, T., Bratanov, P., Cankova, K., & Jecheva, G. (2013). Design of Multifunctional Ergonomic Furniture Made in Computer Environment Trough Leading 3D Software Products. *Machines, Technologies, Materials Journal*, 11, 44–45.
- Espinosa, G. L. E. (2012). La industria y el comercio del mueble en México. *Revista Internacional de Investigacion En Mobiliario y Objetos Decorativos*, 1(1), 73–87.
- Eyma, F., Méausoone, P. J., & Martin, P. (2004). Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(2), 220–225. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00880-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00880-X)
- FAO. (2006). *Tendencias Y Perspectivas Del Sector Forestal En América Latina Y El Caribe.* <http://www.fao.org/docrep/009/a0470s/a0470s00.htm>
- FAO. (2014). *FAO - Noticias: La producción maderera mundial crece por cuarto año consecutivo.* Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura. <http://www.fao.org/news/story/es/item/273212/icode>
- Ficha Sectorial Cifras Empleo IMSS Trabajadores Asegurados.* (2018).

- Fiel, M., Kahles, J. F., & Koster, W. P. (1997). Surface Finish and Surface Integrity. In *ASM Handbook, Volume 16 Machining* (9th ed., p. 1089). ASM International Handbook Committee, ASM International, Electronic.
- Finzer, W., Busey, A., & Kochevar, R. (2018). Data-Driven Inquiry in the PBL Classroom: Linking Maps, Graphs, and Tables in Biology. *The Science Teacher*, 86(1), 28. <https://concord.org/wp-content/uploads/publications/data-driven-inquiry-pbl-classroom.pdf>
- Fregoso Jasso, G. S., Gaytán Cortés, J., & Jerónimo Niniz, J. C. (2018). Identificación de un clúster mueblero en la Meseta P'urhépecha como base para impulsar la mpyymes de la región. *Red Internacional de Investigadores En Competitividad*, 2, 854–867. <https://www.riico.net/index.php/riico/issue/view/21>
- Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., & Davim, J. P. (2008). *Taguchi multiple-performance characteristics optimization in drilling of medium density fibreboard ( MDF ) to minimize delamination using utility concept*. 6, 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.003>
- Gawroński, T. (2011). Optimization of furniture technology at design stage. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology*, 73, 30–35.
- González, E. A. C., Jacinto, S. B. A., Salas, M. G., & Tapia, F. V. A. (2016). Análisis y proyección financiera de la industria muebles en México [Instituto Politecnico Nacional]. In *Instituto Politecnico Nacional*. <https://doi.org/Tesis de Ingenieria Civil>
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna* (C. R. Cordero Pedraza, J. Enrique Brito, & J. E. Murrieta Murrieta (Eds.); 3ra.). McGraw-Hill Interamericana.
- Gros, J. (2001). Furniture industry has to reconsider all products—call it customization design. *World Congress on Mass Customization and Personalization, HKUST, Hong Kong University of Science and Technology*, 1, 1–8.
- Gurau, L., Hugh-Mansfield, W., & Mark, I. (2012). A quantitative method to measure the

- surface roughness of sanded wood products. In J. Paulo Davim (Ed.), *Wood and Wood Products* (Vol. 0, pp. 2–24). Nova Science Publishers, Inc.
- Gurau, L., & Irle, M. (2017). Surface roughness evaluation methods for wood products: a review. *Current Forestry Reports*, 3(2), 119–131.
- Gurau, L., Mansfield-Williams, H., & Irle, M. (2006). Filtering the roughness of a sanded wood surface. *Holz Als Roh - Und Werkstoff*, 64(5), 363–371. <https://doi.org/10.1007/s00107-005-0089-1>
- Gutiérrez Viggers, L. H. (2003). La integración de la microindustria de muebles de madera del estado de Durango en busca de la competitividad. *Congreso Anual de La Academia de Ciencias Administrativas*, 266.
- Gutiérrez Viggers, L. H. (2004). *La integración de la microindustria de muebles de madera del estado de Durango en busca de la competitividad*.
- Hazir, E., Erdinler, E. S., & Koc, K. (2018). Optimization of CNC cutting parameters using design of experiment ( DOE ) and desirability function. *Journal of Forestry Research*, 29, 1423–1434. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0555-8>
- Hazir, E., & Hiziroglu, S. (2017). *Optimization of Sanding Parameters Using*. 19(4), 407–416. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X20170050>
- Hemmilä, V., Adamopoulos, S., Karlsson, O., & Kumar, A. (2017). Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels-A Review. *RSC Advances*, 7, 38604–38630. <https://doi.org/10.1039/c7ra06598a>
- Hernández, S. (2017). La industria mueblera mexicana atraviesa una de sus peores crisis de los últimos años. *NotiMueble*, 28 (402). [www.notimueble.com.mx](http://www.notimueble.com.mx)
- Herrera, C. (2020). Sector de muebles de la UE particularmente afectado por la pandemia. *Forestal Maderero*, 1. <https://www.forestmaderero.com/articulos/item/sector-de-muebles-de-la-ue-particularmente-afectado-por-la-pandemia.html%0A?>

- Hiziroglu, S. (2004). Surface roughness evaluation of medium density fiberboard ( MDF ) using stylus and pneumatic methods. *Holz Als Roh - Und Werkstoff*, 63, 81–82. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0538-2>
- Hiziroglu, S., Jarusombuti, S., & Fueangvivat, V. (2004). Surface characteristics of wood composites manufactured in Thailand. *Building and Environment*, 39, 1359–1364. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.02.004>
- Hiziroglu, S., & Kosonkorn, P. (2006). Evaluation of surface roughness of Thai medium density fiberboard ( MDF ). *Building and Environment*, 41, 527–533. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.016>
- İşleyen, Ü. K., & Karamanoğlu, M. (2019). The influence of machining parameters on surface roughness of MDF in milling operation. *BioResources*, 14(2), 3266–3277. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.3266-3277>
- Ispas, M., Brenci, L., & Campean, M. (2011). Experimental studies on the roughness of sanded wooden surface. *Pro Ligno*, 7(4), 59–70.
- ITTO/UNCTAD/WTO. (2004). *International Wooden Furniture Markets: A review*.
- Jakub, S., & Martino, N. (2005). Wood surface roughness – what is it? *BOKU University of Natural Sources and Applied Life Sciences*, 1–10.
- Kasal, A., Kuskun, T., & Smardzewski, J. (2020). Experimental and Numerical Study on Withdrawal Strength of Different Types of Auxetic Dowels for. *Materials*, 13(4252), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ma13194252>
- Khorasani, A. M., & Yazdi, M. R. S. (2012). Analysis of machining parameters effects on surface roughness : a review. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 5(1), 68–84. <https://doi.org/10.1504/IJCMSSE.2012.049055>

- Kiliç, M., Burdurlu, E., Aslan, S., Altun, S., & Tümerdem, Ö. (2009). The effect of surface roughness on tensile strength of the medium density fiberboard (MDF) overlaid with polyvinyl chloride (PVC). *Materials and Design*, 30(10), 4580–4583. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.029>
- Klaus, R., Feist, W. C., & Knaebe, M. T. (1995). The effect of surface roughness on the performance of finishes. Part 1. Roughness characterization and stain performance. *Forest Products Journal*, 45(7), 91–97.
- Kminiak, R., & Banski, A. (2017). Variability of surface quality of mdf boards at nesting milling on CNC machining centers. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*, 59(1), 121–130. <https://doi.org/10.17423/afx.2017.59.1.12>
- Kminiak, R., Siklienka, M., & Šustek, J. (2016). Impact of tool wear on the quality of the surface in routing of mdf boards by milling machines with reversible blades. *Acta Facultatis Xylogiae*, 58(2), 89–100. <https://doi.org/10.17423/afx.2016.58.2.10>
- Kminiak, R., & Šustek, J. (2016). The suitability of repeated machining in nesting milling on cnc milling on cnc machining centers. *10th International Science Conference*, 10(1), 101–114.
- Koc, K. H., Erdinler, E. S., Hazir, E., & Öztürk, E. (2017). Effect of CNC application parameters on wooden surface quality. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 107, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.001>
- Laika, A. (1990). Innovationen in der Holzverarbeitung. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 48, 1–4.
- Laina, R., Sanz-Lobera, A., Villasanté, A., Pablo, L.-E., Martínez-Rojas, A. J., Alpuente, J., Sánchez-Monteri, R., & Vignote, S. (2017). Effect of the anatomical structure, wood properties and machining conditions on surface roughness of wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 19(2), 203–212.



- Lin, R. J. T., Houts, J. Van, & Bhattacharyya, D. (2006). Machinability investigation of medium-density fibreboard. *Holzforschung*, 60(June 2014), 71–77. <https://doi.org/10.1515/HF.2006.013>
- Linares, O. (2010). *Generalidades de la Tribología Fundamentos de la Lubricación, Fricción y el Desgaste*. (Reporte Técnico (Ed.)).
- López Méndez, G., & Montes Reyes, S. A. (2001). Investigación y desarrollo, innovación y nuevas formas de comercialización ante la apertura comercial: el caso del sector mueblero de Jalisco. *Entorno Económico*, XXXIX, (235) 14-23.
- Magoss, E. (2008). General Regularities of Wood Surface Roughness. *Acta Silvatica Et Lignaria Hungarica*, 4(4), 81–93.
- Malkoçoğlu, A., & Özdemir, T. (2006). The machining properties of some hardwoods and softwoods naturally grown in Eastern Black Sea Region of Turkey. *Journal of Materials Processing Technology*, 173(3), 315–320. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.031>
- Malkoçoğlu, A. (2007). Machining properties and surface roughness of various wood species planed in different conditions. *Building and Environment*, 42(7), 2562–2567. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.08.028>
- Malkocoglu, A., Yerlikaya, N. Ç., & Çakiroğlu, F. L. (2013). EFFECTS OF NUMBER AND DISTANCE BETWEEN DOWELS OF READY-TO-ASSEMBLE FURNITURE ON BENDING MOMENT RESISTANCE. *Wood Research*, 58(4), 671–680.
- Manja, K. K., Milan, Š., & Mirko, K. (2013). Design and manufacturing of organic shape furniture. *Wood Is Good, User Oriented Material, Technology and Design*, 24, 564–569.
- Marshall, R. (1998). *Design modularisation: a systems engineering based methodology for enhanced product realisation* [Loughborough University]. <https://dspace.lboro.ac.uk/xmlui/handle/2134/2176>

- Mecelli, S. (2015). *Make in Italy. IL 1° Apporto sull'impatto delle tecnologie digitali nel sistema manifatturiero italiano.*
- Mercedes, A. S. (2018). *Sector mueblero de Jalisco.* Afamjal. <https://afamjal.com.mx/2019/01/07/resultados-2018-y-perspectivas-2019-del-sector-mueble/>
- México, G. de. (2015). *Industria del Mueble, situación macroeconómica* (Vol. 7, Issue 1). [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/129438/sector\\_Industria\\_Muebles.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/129438/sector_Industria_Muebles.pdf)
- Mueble equipo. (2019). La utilización de un Router CNC para madera automatiza tu proceso de producción. *Mueble Equipo*, 320, 34. <http://www.muebleequipo.com.mx/electronico/320/mobile.html>
- Muebleequipo. (2019). 27% de la madera consumida en México es de origen nacional, el resto es importada: Canaima. *Publicación Especializada En Maquinaria y Materiales Para La Fabricación de Muebles*, 23.
- NOM-Z-83-1987. (1987). *Norma Mexicana de Metrología dimensional, estados de superficies, parámetros de rugosidad y especificaciones.*
- NotiFix. (2020). Estado de la utilización de la capacidad de Norbord en el segundo trimestre. *El Newsletter Para La Industria Del Mueble de Tablero*, 893, 1–5.
- Ntintakis, I., Iakovakis, V., Ntalos, G., & Kechagias, J. (2013). Conference on Current Issues in Global Furniture Furniture Design Optimization with FEA Analysis. *Conference on Current Issues in Global Furniture*, 1–13.
- ONUDI. (2016). *Informe sobre el Desarrollo Industrial 2016. El rol de la tecnología y la innovación en el desarrollo industrial inclusivo y sostenible. Resumen.*
- Ozcelik, B., & Bayramoglu, M. (2006). The statistical modeling of surface roughness in high-speed flat end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12–13), 1395–1402. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.10.005>

- Pauliny, D., Sandak, J., Orłowski, K., & Wasielewski, R. (2012). Simulation of wood surface geometry after machining. *Ann. WULS-SGGW, Forestry and Wood Technology*, 79, 147–151.
- Peña, N. E. (2013). *Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018* (p. 184). Gobierno de la República.
- Pinkowski, G., Ski, W. S. N., & Nosowski, T. (2012). Analyses of surface roughness in selected wood species after machining on a CNC woodworking centre. *Ann. WULS-SGGW, Forestry and Wood Technology*, 79, 164–169.
- Pinkowski, G., Warcholinski, B., Gilewicz, Adam, & Warcholinski, B. (2011). Surface roughness aspects in machine cutting of medium density fibreboards (MDF) with modified cutters on a CNC woodworking machine. *Ann. WULS-SGGW, Forestry and Wood Technology*, 75, 202–209.
- PND. (2019). Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. *Gaceta Parlamentaria*, 5266–XXII(5266), 228. <http://gaceta.diputados.gob.mx/PDF/64/2019/abr/20190430-XVIII.pdf>
- PORTE. (2019a). Escenarios y pronósticos para el sector muebles 2020-2022. *Magazine PORTE*, 26–30.
- PORTE. (2019b). Industria del mueble en Jalisco ¿Qué RETOS hay en el horizonte? *Magazine PORTE*, 18–22.
- PORTE. (2019c, August). Ikea México invertirá 500 MDD en un año. *Magazine PORTE*, 14–16. <http://www.revistaporte.com/wp-content/uploads/2019/08/REVISTA-PORTE-192.pdf+&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=mx> 4/69
- Prakash, S., & Palanikumar, K. (2010). Modeling for prediction of surface roughness in drilling MDF panels using response surface methodology. *Journal of Composite Materials* 0, 0 (0), 1–8. <https://doi.org/10.1177/0021998310385026>

- Prakash, S., Palanikumar, K., Lilly, M. J., & Nithyalakshmi, S. (2011). Evaluation of surface roughness parameters (Ra, Rz) in drilling of MDF composite panel using Box Behnken experimental design (BBD). *International Journal on Design and Manufacturing Technologies*, 5(1), 52–62. <https://doi.org/10.18000/ijodam.70098>
- PROY-NOM-203-SCFI-2015. (2015). *Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-203-SCFI-2015, Que establece los límites máximos permisibles de emisión y contenido de formaldehído en tableros de partículas de madera y tableros de fibras de madera fabricados con urea formaldehído, y en los p.*
- Rizo, S. C. (1999). *Introducción al proyecto de producción. Ingeniería concurrente para el diseño del producto* (1ra ed.). Valencia, Universidad Politécnica de Valencia.
- Rodríguez, M. L. (2004). *Diseño: Estrategia y tácticas* (1ra ed.). SIGLO XXI.
- Rolleri, A., & Roffael, E. (2006). Rugosidad de tableros de fibra de densidad media (MDF) usando método de contacto y no contacto. *Bosque (Valdivia)*, 27(1), 72–77. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002006000100009>
- Rolleri, A., & Roffael, E. (2007). Efecto De La Humedad De Equilibrio En La Rugosidad De Tableros De Fibras De Densidad Media (Mdf). *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 9(2), 171–178. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2007000200007>
- Sedlecký, M. (2017). Surface Roughness of Medium-Density Fiberboard (MDF) and Edge-Glued Panel (EGP) After Edge Milling. *BioResources*, 12(4), 8119–8133.
- Sedlecký, M., Kvietková, M. S., & Kminiak, R. (2018). Medium-density Fiberboard (MDF) and Edge-glued Panels (EGP) after Edge Milling – Surface Roughness after Machining with Different Parameters. *BioResources*, 13(1), 2005–2021.
- Silvestre Ramírez, R. N., Malásquez, C., & Manuel, P. (2017). La industria mueblera y su contribución al desarrollo territorial. *Economía y Sociedad*, XXI(37), 15–34.

- Šimek, M., Kořený, A., Dlahý, Z., & Stefan, M. (2013). Possibilities of CNC manufacturing with regard to furniture design. *24th International Scientific Conference: Wood Is Good - User Oriented Material, Technology and Design, Proceedings*, 157–165.
- Smith, R. J. (2009). *The Impact of Modular Design on Product Use and Maintenance* (Issue May) [College of Architecture]. <http://hdl.handle.net/1853/28227>
- Sofuoğlu, S. D., & Kurtoğlu, A. (2015). Effects of Machining Conditions on Surface Roughness in Planing and Sanding of Solid Wood. *Drvna Industrija*, 66(4), 265–272. <https://doi.org/10.5552/drind.2015.1406>
- Söğütlü, C. (2017). Determination of the Effect of Surface Roughness on the Bonding Strength of Wooden Materials. *BioResources*, 12(1), 1417–1429. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.1417-1429>
- Söğütlü, C., Nzokou, P., Koc, I., Tutgun, R., & Döngel, N. (2016). The effects of surface roughness on varnish adhesion strength of wood materials. *J. Coat. Technol. Res.*, 13(5), 863–870. <https://doi.org/10.1007/s11998-016-9805-5>
- Souza, A. J., Jeremias, T. D., Gonzalez, A. R., & Amorim, H. J. (2019). Assessment of melamine □ coated MDF surface finish after peripheral milling under different cutting conditions. *European Journal of Wood and Wood Products*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01413-y>
- Stark, N. M., Cai, Z., & Carll, C. (2010). Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. In *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material* (Centennial, p. 509). USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report. [https://doi.org/General Technical Report FPL-GTR-190](https://doi.org/General%20Technical%20Report%20FPL-GTR-190)
- Su, W.-C., Hung-Yo, W., & An-Sheng, L. (2014). A case study of applying Computer Aided Design (CAD) to the design and manufacturing of KD chairs. *International Journal of Organizational Innovation (Online)*, 7(1), 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.intman.2012.10.002>

- Suchsland, O., & Woodson, G. E. (1986). *Fiberboard manufacturing Practices In the United States*. Agriculture handbook/United States. Dept. of Agriculture.
- Sutcu, A., & Karagöz, Ü. (2012). Effect of machining parameters on surface quality after face milling of MDF. *Wood Res*, 57(2), 231–240.
- Sütçü, A., & Karagöz, Ü. (2012a). Effect of machining parameters on surface quality after face milling of MDF. *Wood Research*, 57(2), 231–240.
- Sütçü, A., & Karagöz, Ü. (2012b). Effect of machining parameters on surface quality after face milling of MDF. *Wood Research*, 57(2), 231–240.
- Sütçü, A., & Karagöz, Ü. (2013). The influence of process parameters on the surface roughness in aesthetic machining of wooden edge-glued panels (EGPs). *BioResources*, 8(4), 5435–5448. <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.5435-5448>
- Taylor, J. B., Carrano, A. L., & Lemaster, R. L. (1999). Quantification of process parameters in a wood sanding operation. *Forest Products Journal Products*, 49(5), 41–46. <https://doi.org/10.1086/250095>
- Thoemen, H., Irle, M., & Sernek, M. (2010). *Wood-Based Panels An Introduction for Specialists* (1ra ed.). Press, Brunel University.
- Thoma, H., Peri, L., & Lato, E. (2015). Evaluation of wood surface roughness depending on species characteristics. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 17(2), 285–292. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000027>
- UIN. (2018). *Industria Mueblera en México*. <http://www.ethic.com.mx/docs/Infografias/sectores/Industria-mueblera-Mexico.pdf>
- UTZMG. (2009). *Encadenamiento productivo forestal – madera – mueble*.
- Vega, L. A., Flores, O. M., & Garcia, R. B. (2010). XIV Congreso Internacional de la Academia de Ciencias Administrativas. *Competitividad Del Sector Del Mueble y La Madera: El Caso de Tijuana-Rosarito, B. C., México*, 2–16.

- Visión. (2020). *¿ Que oportunidades de negocio abre un Router CNC ?* Visión Digital.
- Vitosytė, J., Ukvalbergienė, K., & Keturakis, G. (2015). Roughness of sanded wood surface: An impact of wood species, grain direction and grit size of abrasive material. *Materials Science (Medziagotyra)*, *21*(2), 255–259. <https://doi.org/10.5755/j01.mm.21.2.5882>
- Wenderdel, C., Hesse, E., Frug, D., Hänsel, A., & Niemz, P. (2013). Influence of surface roughness of wood fibres on properties of medium density fibreboards. *Pro Ligno*, *9*(4), 423–430.
- Wiedenbeck, J., & Parsons, J. (2010). Digital technology use by companies in the furniture, cabinet, architectural millwork, and related industries. *Forest Products Journal*, *60*(1), 78–85. <https://doi.org/10.13073/0015-7473-60.1.78>
- Wiedenbeck, J., Parsons, J., & Beeken, B. (2009). *What's Your Relationship with Computerized Manufacturing Technologies -- Functional, Dysfunctional or Non-Existent*. Industrial Strength Woodworking.
- Wilkowski, J., Czarniak, P., Górski, J., Jabłoński, M., Pacek, P., Podziewski, P., Szymanowski, K., & Szymona, K. (2015). Influence of cutting parameters on surface roughness of MDF board after milling and sanding. *Ann. WULS - SGGW, For. and Wood Technol*, *92*, 473–476.
- Yan, W., Zhao, D., & Mehta, A. (2013). Fabrication-aware Design for Furniture with Planar Pieces. *ArXiv E-Prints*, *2104.05052*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/cgf.12051>
- Yao, J., Kaufman, D. M., Gingold, Y., & Agrawala, M. (2017). Interactive design and stability analysis of decorative joinery for furniture. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *36*(2), 1–16.
- Zhong, Z. W., Hiziroglu, S., & Chan, C. T. M. (2013). Measurement of the surface roughness of wood based materials used in furniture manufacture. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *46*(4), 1482–1487. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.11.041>

## 11. Anexos.

Anexo1.

Resumen de ponencia “Parámetros de maquinados para Tableros de Fibras de Densidad Media MDF” presentada en el 2do Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Tijuana Baja California, 2019.



Clave: 2ODMyM1    Ciencia de los Materiales    Jueves 26 de Septiembre del 2019

### 2ODMyM1- Parámetros de Maquinado en Corte y Vaciado para Tableros de Fibras de Densidad Media MDF

Vladimir Becerril Mendoza<sup>1,2</sup>, Pablo López Albarrán<sup>3</sup>, Raúl Espinoza Herrera<sup>3</sup>, José Guadalupe Rutiaga Quiñones<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera, <sup>2</sup>Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California.

Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México.

vladimir.becerril@uabc.edu.mx

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. plopez@umich.mx

#### Resumen

Ante la necesidad de optimizar los tiempos y costos de la calidad en los maquinados de tableros de fibras de densidad media, el presente trabajo analiza los procesos de maquinado más comunes en la manufactura de muebles; el corte y el vaciado, definiendo los parámetros para maquinados por router CNC, a partir de la herramienta de corte, la velocidad de rotación y la velocidad de avance. El material en que se realizó el experimento fue en tableros de fibras de Densidad Media comerciales, en base a la rugosidad superficial, medida por un rugosímetro de contacto. Los resultados demuestran una influencia directa de las condiciones de corte y tipo de material, mostrando una mejor calidad en el vaciado y definiendo parámetros más específicos para el corte. Se identifican que las características del material influyen en el resultado de la calidad de la superficie dentro de los dos procesos de maquinado.

**Palabras clave:** Rugosidad superficial; parámetros de corte; MDF.





## Anexo 2.

Resumen de ponencia “El diseño de mobiliario de madera fabricado por router CNC”  
presentado en XI Congreso Virtual Latinoamericano de Enseñanza del Diseño, Buenos Aires  
Argentina, 2020.

### **El Diseño de mobiliario de madera fabricado por router CNC**

Vladimir Becerril Mendoza; Virginia  
Karina Rosas Burgos; Pablo López Albárran  
y Manuel Javier Rosel Solís (\*)

Actas de Diseño (2021, julio),  
Vol. 37, pp. 249-253. ISSN 1850-2032.  
Fecha de recepción: julio 2020  
Fecha de aceptación: enero 2021  
Versión final: diciembre 2021

---

**Resumen:** Dentro de la formación del Diseñador Industrial a nivel licenciatura, es importante fomentar una educación tecnológica con el propósito de construir capacidades que posibiliten a los estudiantes abordar sistemas tecnológicos para comprenderlos. En este trabajo, por tanto, se presenta una revisión de fuentes especializadas que se integran al proyecto de diseñar un mueble de madera, con una perspectiva del Diseño desde la complejidad dentro del proceso de enseñanza aprendizaje. El diseño de mobiliario al ser un ejercicio proyectual, de manera amable permite al alumno utilizar una metodología de diseño, explorar sus propuestas y llegar a una solución que puede materializar y evaluar. Al mismo tiempo, se requieren conocimientos sobre las propiedades del material, en este caso la madera y el dominio de las tecnologías CAD, CAM y CNC; Diseño Asistido por Computadora, Manufactura Asistida por Computadora y Control Numérico Computarizado, respectivamente.

**Palabras claves:** -Diseño de mobiliario -Diseño asistido por computadora -Diseño Industrial -Metodología, -Procesos -Educación tecnológica.

[Resúmenes en inglés y portugués y currículum en p. 252]

---



### Anexo 3.

Resumen de extenso “Importancia rugosidad superficial en el maquinado de tableros a base de fibras de densidad media MDF” presentado en el 15° Congreso Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, Morelia Michoacán, 2020.



## IMPORTANCIA DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN EL MAQUINADO DE TABLEROS DE FIBRAS DE DENSIDAD MEDIA, MDF.

Vladimir Becerra Mendoza<sup>1,2</sup>, Pablo López Albarrán<sup>1</sup>, Raúl Espinoza Herrera<sup>1</sup>, Alex Bernardo Pimentel Mendoza<sup>2</sup>.

### Resumen

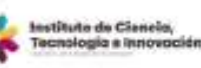
Se presenta una revisión de investigaciones previas sobre la rugosidad superficial en tableros de fibras de densidad media, MDF. La rugosidad superficial es un tema de interés para definir la calidad de un proceso de maquinado. Los tableros MDF, elaborados con material lignocelulósico, resinas y un proceso de prensado, en los últimos años se ha incrementado su oferta y su uso, siendo utilizados principalmente dentro de la industria del mueble. Por lo que este trabajo presenta la relevancia de la rugosidad superficial como indicador de calidad de la superficie de los tableros MDF en sus diferentes procesos de manufactura: corte, vaciado, barrenado, lijado y en específico los maquinados por medio de router de control numérico computarizado, CNC. Logrando identificar los métodos e instrumentos de medición, el análisis estadístico, los rangos de mediciones obtenidas en los diferentes procesos de manufactura, así como la influencia de la composición del tablero. También se recopilan los parámetros de corte que influyen en la calidad superficial de las piezas. Mostrando información importante que permite identificar y comparar de manera cuantitativa por medio de la rugosidad superficial la calidad requerida en los procesos de manufactura que se requieren en la fabricación de muebles con tableros MDF.

**Palabras claves:** Rugosidad, MDF, maquinado, CNC.

### Introducción

Los tableros de madera a base de fibras, partículas y chapas, son de los materiales más requeridos para la elaboración de mobiliario, productos de construcción y decoración, esto por sus dimensiones, características, propiedades y costo. Aunado a lo anterior, el procesado de los nuevos tableros (paneles) de madera requiere del conocimiento de su composición para promover el aprovechamiento de la infraestructura nacional, así como un escenario de desarrollo hacia su automatización y el control de calidad dentro de la industria que lo manufactura. La calidad se define por el proceso de desbaste, las características de la materia prima y de la herramienta. De manera microscópica la superficie presenta irregularidades e imperfecciones, con relación a la superficie nominal (Groover, 2007). La rugosidad superficial en la madera es una propiedad importante que influye en procesos, lijado y terminados (Taylor et al., 1999). Asimismo, es resultado de los diferentes procesos de corte: corte con sierra circular, sierra de banda, brocas y lijado. La rugosidad influye en el atractivo estético, generando una percepción visual y al tacto (Jakub & Martino, 2005) lo que resulta en calidad y un valor agregado al producto.

<sup>1</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, FITECMA, [vladimir.becerra@umich.mx](mailto:vladimir.becerra@umich.mx), [pablo.lopez@umich.mx](mailto:pablo.lopez@umich.mx), [raul.espinoza@umich.mx](mailto:raul.espinoza@umich.mx)  
<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Baja California, FCYTEC, [alex.pimentel@uabc.mx](mailto:alex.pimentel@uabc.mx)





Anexo 4.

Resumen de ponencia “Análisis de rugosidad superficial en maquinado por router CNC, comparando tableros de partículas y tableros MDF” aceptada en 3er Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Tijuana Baja California, 2021.

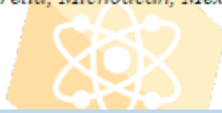
### **3ODMyM4-Análisis de rugosidad superficial en maquinado por router CNC, comparando tableros de partículas y tableros MDF**

*Vladimir Becerril Mendoza<sup>1,2</sup>, Pablo López Albarrán<sup>3</sup>, Raúl Espinoza Herrera<sup>3</sup>, José Guadalupe Rutiaga Quiñones<sup>3</sup>, Francisco Javier Castro Sánchez<sup>3</sup>, Alex Bernerdor Pimentel Mendoza<sup>2</sup>.*

<sup>1</sup>*Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera, Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México*

<sup>2</sup>*Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México.*

<sup>3</sup>*Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.*



#### **Resumen**

El sector industrial del mueble de madera utiliza tableros de partículas y tableros de fibras de densidad media (MDF), como insumos importantes para la fabricación de mobiliario, esto por sus dimensiones, características, propiedades y costo. Uno de los procesos de manufactura dentro de la fabricación de muebles, es el proceso de fresado en donde se realizan los procesos de barrenado, vaciado, grabado y corte. Todos estos procesos se pueden realizar en equipos de control numérico como el router CNC, que permiten un control en la calidad de las piezas maquinadas. Estos equipos a diferencia de los procesos convencionales permiten la variación de los parámetros del maquinado y dan como resultado una superficie: consecuencia del proceso de maquinado, el tipo de material y la herramienta de corte. La evaluación de la superficie puede ser cualitativa en relación a su apariencia y defectos, pero es necesario su definición cuantitativa por medio de la rugosidad superficial, lo que permite el análisis de la calidad del proceso. La densidad de los tableros de partículas está entre 680 a 800 kg/m<sup>3</sup> (ANSI A208.1, 2002), en donde las partículas de madera, al conformar el tablero incrementan su densidad en el proceso de prensado, logrando un contacto total entre partícula y partícula (Thoemen, Irle y Sernek, 2010). Los tableros MDF están entre 500 y 1000 kg/m<sup>3</sup> (ANSI A208.2, 2002). Ante las diferencias entre los tableros, es importante identificar la calidad del proceso de corte, en la superficie del tablero. De manera microscópica la superficie presenta irregularidades e imperfecciones, con relación a la superficie nominal (Groover, 2007). La rugosidad superficial en la madera es una propiedad importante que influye en el proceso posterior al maquinado: pegado, lijado, aplicación de los recubrimientos, terminados y la durabilidad (Klaus et al., 1995; Taylor et al., 1999). Los estudios sobre los aspectos de la rugosidad superficial en los tableros se han realizado en diferentes procesos y variables. Los parámetros de corte como son la velocidad del husillo, la velocidad de corte y la velocidad de avance, influyen en el fresado de los tableros, indican una correlación con la rugosidad superficial (Davim et al., 2009, Sütçü & Karagöz, 2012, Wilkowski et al., 2015, De Deus et al., 2015, Koc et al., 2017, Deus et al., 2018). El objetivo de esta investigación es evaluar la rugosidad superficial en el maquinado por router CNC comparando tableros de partículas y tableros MDF, caracterizando el proceso de vaciado en tableros comerciales en México, para establecer los parámetros de corte que generen el valor más bajo de rugosidad superficial. En los últimos años se ha incrementado la investigación de la rugosidad superficial en tableros, es importante mencionar que estos productos derivados de la madera se



encuentran en un constante cambio y evolución, al modificar su composición: el tipo de partículas o fibras, resinas aglutinantes, capas que lo conforman y procesos de prensado. Por lo que el conocer la influencia de los parámetros de maquinado en la calidad superficial a obtener, permite a la industria identificar la rugosidad ideal para los procesos subsecuentes; de lijado, ensamble, pegado o recubrimientos, de manera que se garantice la calidad y durabilidad de los productos fabricados. Se presenta el experimento en dos tipos de tableros comerciales, teniendo como indicador de la calidad del maquinado, la variable dependiente de la rugosidad superficial en el plano horizontal del corte, con la rugosidad media aritmética  $Ra$ . Las variables independientes son la velocidad de avance, velocidad del husillo y tipo de tablero. El análisis estadístico fue por medio de un diseño factorial completo, de tres niveles, con tres réplicas. Revisando la significancia de cada factor y los efectos de interacción por medio de un análisis de la varianza. La herramienta de corte utilizada es de geometría recta, de dos filos, de 6.35 mm de diámetro, 12.7 mm de largo del corte y de carburo sólido H. El proceso de maquinado se realizó por medio de un router CNC, marca Techno LS Series 4896. La rugosidad superficial fue medida por medio de un perfilómetro marca Mitutoyo modelo SJ-210. Con un rango de medición del eje Z de  $-200 \mu\text{m}$  a  $+160 \mu\text{m}$ , dentro del eje X  $5.6 \text{ mm}$  y una resolución de  $25 \mu\text{m}$  a  $0.0002 \mu\text{m}$ . Un radio de aguja de  $5 \mu\text{m}$ . Las mediciones fueron con base en el estándar ISO 469 (1997), filtro Gaussiano, longitud total de medición  $L_m = 12 \text{ mm}$ , con un módulo de medición  $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$  (Cut-off) y  $\lambda_s = 2.5 \mu\text{m}$ . Los resultados demostraron una influencia directa de las condiciones de corte y tipo de material, la diferencia entre los dos tipos de tableros, una mejor calidad en los tableros de fibras de densidad media y una mayor dificultad en la medición de la rugosidad superficial en los tableros de partículas, definiendo parámetros más específicos para el maquinado de un vaciado. Este resultado confirma que los tableros de partículas, por sus características de materia prima, es un material con una porosidad que queda fuera de rango del perfilómetro y confirma la ausencia en la literatura sobre investigaciones de rugosidad superficial en tableros de partículas. Los parámetros de corte que permiten obtener una rugosidad más baja en los tableros de partículas son la velocidad del husillo a 12000 rpm, con una velocidad de avance de  $2 \text{ m/min}$ , logrando obtener una rugosidad superficial de  $16$  a  $21 \mu\text{m}$ . Los resultados en los tableros MDF se encuentran por arriba de los parámetros reportados por Koc et al., (2017) que indican rugosidad superficial en MDF de  $4.6 \mu\text{m}$  a una velocidad de avance de  $8 \text{ m/min}$  y una velocidad de rotación de 12000 rpm. Pero coinciden con los rangos recomendados para tener una buena calidad en el proceso de maquinado de  $16 \mu\text{m}$ . (Kminiak & Šustek, 2016). La rugosidad superficial es un buen indicador de la calidad de un proceso de maquinado. Se identifica que el tipo de tablero y la velocidad de avance son variables altamente significativas en la variable independiente de la rugosidad superficial, al igual que la velocidad de rotación, que también presentó un efecto en la rugosidad superficial. Los parámetros de corte dentro de los tableros comerciales en México coinciden con investigaciones de otros países, en donde uno de los elementos más importantes es la relación entre la velocidad de avance y la densidad del tablero. Como trabajo a futuro, es necesario definir los diferentes niveles de rugosidad superficial que se requieren en los procesos subsecuentes para recubrimientos, uniones por adhesivos, ensambles, cubrecantos, proceso de lijado y de terminados. Esta información debe incidir en los procesos de manufactura de la industria del mueble.

**Palabras Clave:** Rugosidad superficial; Tablero de partículas; MDF; Parámetros de corte; Control numérico.

## Anexo 5.

Resumen de la patente “Mobiliario modular sustentable, multifuncional con uso de contenedor”, que se encuentra en proceso de registro ante el IMPI.

### RESUMEN

La invención se refiere a un nuevo sistema mobiliario modular, apilable, de empaque plano, armable y desarmable por el usuario sin utensilios adicionales o herramientas a partir de un entrelazado entre los paneles, con un panel como pieza llave que evita que las otras piezas se puedan desarmar, generando un mueble rígido y estable. Los muebles del sistema mobiliario pueden contar con una puerta, cajón o repisa, y en caso de usarse cuenta con un mecanismo de apertura para la puerta o el cajón que no requiere herrajes y que se integra dentro del mismo material rígido con el que se construye el mueble.

