



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera



División de Estudio de Posgrado

Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera

Tesis

ESTUDIO TOMOGRÁFICO Y MAQUINADO DE MADERA

TERMOTRATADA DE *Acrocarpus fraxinifolius*

PRESENTA

Ing. Isaac Reginaldo Coss Manzur

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias y Tecnología de la Madera

Asesor:

Dr. Raúl Espinoza Herrera

Co-asesor:

Dr. Luis Rafael Olmos Navarrete

Sinodales

Dr. José Cruz de León

M.C. Abril Munro Rojas

M.C. Isaac Alfaro Trujillo

Morelia, Michoacán, enero de 2025

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Plantaciones Forestales Comerciales.....	7
2.1.1. Madera proveniente de plantaciones forestales comerciales.....	8
2.2. Generalidades sobre la especie <i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	8
2.2.1. Descripción de la madera de <i>A. fraxinifolius</i>	9
2.3. Termotratamiento en madera	10
2.4. Maquinado de la madera	15
2.5. Técnica de tomografía computarizada de rayos-X.....	18
2.5.1. Principios de la tomografía computarizada	18
3. ANTECEDENTES.....	20
3.1. Termotratamiento en madera de <i>A. fraxinifolius</i>	20
3.2. Maquinado en madera de <i>A. fraxinifolius</i>	21
3.3. Maquinado de madera termotratada	22
3.4. Inspección de madera con tomografía de rayos-X	23
4. HIPÓTESIS	26
5. OBJETIVOS	26
5.1 Objetivo general	26
5.2 Objetivos específicos.....	26
6. JUSTIFICACIÓN	27
7. METODOLOGÍA	28
7.1. Procedencia y características del material utilizado	28
7.2. Aplicación de termotratamiento	29
7.3. Cepillado	31
7.4. Lijado	32
7.5. Taladrado.....	32
7.6. Moldurado	33
7.7. Evaluación de los defectos	35
7.8. Preparación de probetas para análisis tomográfico	36
7.9. Adquisición y análisis de imágenes por tomografía de rayos x	36
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
8.1. Cepillado de madera.....	38

8.2. Resultados de Lijado	40
8.3. Taladrado.....	41
8.4. Moldurado de madera con y sin tratamiento térmico.....	44
8.5. Tomografía de la madera <i>A. fraxinifolius</i> con y sin tratamiento térmico	46
9. CONCLUSIONES	56
10. BIBLIOGRAFÍA.....	58

RESUMEN

El tratamiento térmico es una alternativa eficaz para la modificación de la madera. Este proceso consiste en aplicar temperaturas cercanas o superiores a 200°C durante varias horas. En este estudio, se trabajó con la especie maderable *Acrocarpus fraxinifolius*, analizando el efecto del tratamiento térmico en la madera expuesta a temperaturas de 180 y 200°C durante 2 horas y su comportamiento al ser maquinada. Para dicho análisis se empleó tomografía de rayos X. El maquinado de la madera tratada térmicamente se evaluó conforme a la norma ASTM D 1666-22, utilizando el software. Se aplicó tratamiento térmico a madera de *A. fraxinifolius* a 180 y 200°C durante 2 horas, y se estudió su comportamiento en el maquinado, tanto sin tratar como tratada térmicamente. Además, se realizaron ensayos de maquinado (cepillado, lijado, taladrado, moldurado) con el fin de analizar los cambios en la madera de *A. fraxinifolius* mediante tomografía computarizada. Los resultados obtenidos mostraron una mejora en el acabado de las superficies evaluadas en todos los ensayos de maquinado. Asimismo, la tomografía permitió analizar los cambios estructurales en la madera tratada térmicamente. Los datos cualitativos y cuantitativos obtenidos mediante la tomografía de rayos X explicaron el efecto y la mejora en el maquinado de la madera de *A. fraxinifolius*.

Palabras clave: cedro rosado, microtomografía, plantaciones forestales, trabajabilidad de la madera.

ABSTRACT

Heat treatment is an effective alternative for wood modification. This process consists of applying temperatures close to or above 200°C for several hours. In this study, we worked with the timber species *Acrocarpus fraxinifolius*, analyzing the effect of heat treatment on wood exposed to temperatures of 180 and 200°C for 2 hours and its behavior when machined. X-ray tomography was used for this analysis. The machining of heat-treated wood was evaluated according to ASTM D 1666-22 using the software. Heat treatment was applied to *A. fraxinifolius* wood at 180 and 200°C for 2 hours, and its machining behavior was studied, both untreated and heat-treated. In addition, machining tests (planing, sanding, drilling, molding) were carried out to analyze the changes in *A. fraxinifolius* wood by means of computed tomography. The results obtained showed an improvement in the finish of the surfaces evaluated in all the machining tests. Also, tomography allowed the analysis of structural changes in the heat-treated wood. The qualitative and quantitative data obtained by X-ray tomography explained the effect and improvement in the machining of *A. fraxinifolius* wood.

1. INTRODUCCIÓN

La madera como recurso natural renovable, ha sido un pilar fundamental en el desarrollo de la civilización humana. Desde la construcción de las primeras herramientas hasta los modernos avances en ingeniería y arquitectura, la madera ha demostrado ser un material versátil y sostenible. Su capacidad para capturar carbono la convierte en una opción ecológica frente a materiales como el plástico o el metal, que requieren procesos de producción intensivos en energía y emiten una cantidad significativa de gases de efecto invernadero. Además, la madera tiene propiedades únicas que la hacen ideal para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo su resistencia, aislamiento térmico y acústico, y su belleza estética. El manejo sostenible de los bosques y la madera es crucial para preservar estos ecosistemas y asegurar que puedan seguir proporcionando sus valiosos recursos.

Las Plantaciones Forestales Comerciales (PFC) representan una estrategia prometedora en este sentido, ya que permiten satisfacer la demanda de madera sin ejercer una presión excesiva sobre los bosques naturales. Estas plantaciones se gestionan de manera que se maximiza la producción de madera mientras se minimiza el impacto ambiental, a través de prácticas como la reforestación y la gestión de la biodiversidad. Sin embargo, es fundamental que las PFC se implementen con cuidado y responsabilidad, teniendo en cuenta no solo la rentabilidad económica sino también la conservación del medio ambiente y el bienestar social. Esto implica, respetar los derechos de las comunidades locales, proteger la biodiversidad y evitar la deforestación (Kranitz, 2016).

El cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius*) es una especie maderable de rápido crecimiento, es una especie de árbol perteneciente a la familia *Fabaceae*. Originario de la región tropical de Asia, especialmente en India, se caracteriza por su rápido crecimiento y su uso en reforestación y como sombra en áreas urbanas. Este árbol, puede alcanzar alturas de hasta 30 metros y de 80 a 120 cm de diámetro. Es valorado no solo por su madera, sino también por su capacidad para fijar nitrógeno en el suelo, lo que mejora la calidad del mismo, lo que la hace ideal para plantaciones forestales y para la industria maderera.

Las maderas de rápido crecimiento generalmente presentan altos porcentajes de madera juvenil con altos porcentajes de hemicelulosas, lo que conduce a que estas maderas presenten

defectos de secado, torceduras, rajaduras y posteriormente su maquinado es un poco complicado ya que presenta tensiones estructurales en el material.

El tratamiento térmico de la madera, es un proceso que busca mejorar sus propiedades modificando su estructura. Este método, se aplica especialmente en maderas de rápido crecimiento. El proceso se lleva a cabo en tres fases: secado, tratamiento térmico propiamente dicho y enfriamiento con restablecimiento de la humedad. Durante el secado, se elimina la humedad de la madera, lo cual es crucial para prepararla para el tratamiento térmico. Luego, se aplica calor a temperaturas que oscilan entre 90 y 250°, lo que provoca la degradación térmica de las hemicelulosas y modifica permanentemente las propiedades químico-físicas de la madera, como su color, densidad y estabilidad dimensional, aumentando así su durabilidad biológica (Yonggun, 2024). Las tensiones estructurales se pueden reducir en la madera, mejorando así su maquinabilidad y estabilidad. Sin embargo, es crucial emplear las temperaturas y tiempos correctos para evitar la degradación térmica del material. Un estudio cuidadoso de los parámetros de tratamiento térmico permitirá optimizar el procesamiento, asegurando que el tratamiento mejore sus propiedades sin comprometer su integridad estructural.

La microtomografía de rayos X se presenta como una técnica avanzada y no destructiva que permite analizar la microestructura de la madera en dos y tres dimensiones, proporcionando una visión detallada de su anatomía interna sin alterar la muestra.

En este trabajo, se analizó la microestructura en 2D y 3D de la especie, utilizando la microtomografía de rayos X, para conocer los efectos del tratamiento térmico. Así mismo, se analizó los cambios en la microestructura antes y después de un termotratamiento con la finalidad de conocer los posibles efectos que repercuten en la trabajabilidad de la madera. Se analizó de forma puntual las pruebas de maquinado de cepillado, lijado, taladrado y moldurado, ya que estas operaciones son importantes para la transformación y aprovechamiento de la madera proveniente de PFC.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Plantaciones Forestales Comerciales

En los últimos años, se ha observado a nivel mundial un marcado aumento en la reforestación y la reconversión de tierras previamente destinadas a otros usos, con una estimación anual de cinco millones de hectáreas. Como resultado, las plantaciones forestales ahora abarcan aproximadamente 131 millones de hectáreas, lo que representa el 3 % de la superficie forestal mundial y el 45% de la superficie total de bosques plantados. La región con la mayor proporción de plantaciones forestales se encuentra en América del Sur, donde estas representan el 99% del área total de bosques plantados y el 2% de la superficie forestal total. Por otro lado, en Europa la proporción de plantaciones forestales es considerablemente menor, representando el 6% del área forestal plantada y solo el 0,4% de la superficie forestal total (FAO, 2020).

En México, el gobierno ha implementado medidas para fomentar el establecimiento de plantaciones forestales comerciales con el fin de mitigar la presión sobre los ecosistemas forestales y aumentar la producción forestal, tanto maderable como no maderable. En este contexto, se creó en 1997 el Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN), con el objetivo de apoyar el establecimiento de 875 mil hectáreas de estas plantaciones en un plazo máximo de 25 años. Este programa busca reducir las importaciones de productos forestales, fomentar el desarrollo sustentable y promover la diversificación productiva en el país (SEMARNAT, 2005).

En México, las plantaciones forestales comerciales abarcan alrededor de 359 mil hectáreas y son de vital importancia a nivel nacional e internacional (Gerencia de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales, 2020). Las especies más utilizadas en estas plantaciones incluyen pino, cedro, melina, teca y caoba, siendo las especies maderables las más predominantes, representando el 85.2% del total. Estas plantaciones se encuentran principalmente en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche, destacándose el cedro rojo y el eucalipto como las especies más comunes. Además, existen otras especies de latifoliadas con potencial para la agroforestería, como el cedro rosado, conocido por su rápido crecimiento y su capacidad para mejorar la calidad del suelo (Elékou, 2019). Sin embargo,

es importante destacar que el estado de Michoacán cuenta con solo 8,389 de hectáreas plantadas con especies maderables (Semarnat, 2014).

2.1.1. Madera proveniente de plantaciones forestales comerciales

Las plantaciones han sido gestionadas mediante prácticas silvícolas que promueven un rápido crecimiento en comparación con los bosques naturales. Sin embargo, este crecimiento acelerado las hace más susceptibles a los ataques de microorganismos y provoca cambios en sus propiedades físicas y mecánicas. En este sentido, se observa una diferencia significativa con la madera proveniente de bosques naturales, especialmente en lo que respecta a la presencia de madera tardía o aquella con fines estructurales. Esta disparidad evidencia la necesidad de considerar cuidadosamente las implicaciones de utilizar madera proveniente de PFC en comparación con la madera de origen natural, tanto en términos de resistencia como de durabilidad. Es crucial desarrollar estrategias que permitan mitigar estos efectos y garantizar la calidad y sostenibilidad de los recursos forestales a largo plazo (Elékou, 2019).

El rápido crecimiento es determinante en la formación de madera juvenil, en muchos casos deficiente para uso estructural (Flórez et al., 2014). La madera juvenil, en comparación con la de bosques nativos, es menos densa hasta un 30%, con traqueidas o fibras más cortas, paredes celulares más delgadas, alto contenido de hemicelulosa, mayor desviación de la fibra y tendencia a presentar mayor tensión estructural (Vignote & Martínez, 2006).

2.2. Generalidades sobre la especie *Acrocarpus fraxinifolius*

La especie de *A. fraxinifolius* es un árbol caducifolio de rápido crecimiento que puede alcanzar alturas de hasta 30-50 metros, tiene un tronco recto y cilíndrico con diámetros de hasta 2 metros, con una corteza lisa y de color gris claro, con hojas son compuestas, alternas y pinnadas, con folíolos de forma elíptica a ovada. Es nativa del sur y sudeste de Asia, incluyendo países como India, Bangladesh, Myanmar, Tailandia y Laos (Orwa, 2009). Este árbol crece principalmente en bosques tropicales y subtropicales húmedos, a altitudes que varían desde el nivel del mar hasta alrededor de 1500 metros. Prefiere suelos bien drenados y puede prosperar en una variedad de tipos de suelo, incluidos los lateríticos y aluviales. El

A. fraxinifolius juega un papel importante en la ecología de los bosques donde se encuentra, proporcionando hábitat y alimento a una variedad de fauna. Sus flores son atractivas para insectos polinizadores y su capacidad de fijación de nitrógeno mejora la fertilidad del suelo (Kondas, 1981).

2.2.1. Descripción de la madera de *A. fraxinifolius*

La albura es de color beige o grisáceo blanco y el duramen es de color rosado o rojizo-castaño. El hilo es recto, aunque en ocasiones puede ser entrecruzado, textura gruesa y brillo alto. Es una madera con porosidad difusa. Los poros son de grandes a moderadamente pequeños, pocos, solitarios y en múltiplos radiales de 2 a 3, ocasionalmente llenados con depósitos blanquecinos. El parénquima leñoso es visible a simple vista como envolturas delgadas u ojillos que rodean los poros, a veces con extensiones laterales cortas. Los rayos son finos (Purkayastha, 1999).

La densidad de la madera de *A. fraxinifolius* varía de 500 a 650 kg/m³, lo que la clasifica como una madera de densidad media. Esta característica le confiere una buena relación entre peso y resistencia, siendo útil para estructuras que requieren estabilidad sin agregar demasiado peso (Orwa, 2009).

La madera tiene buenas propiedades mecánicas, con una resistencia a la compresión y flexión adecuadas para la construcción de estructuras ligeras y muebles. La resistencia a la flexión está alrededor de 70 MPa, y el módulo de elasticidad es de aproximadamente 9.500 MPa (Dhamodaran, 1980).

El secado de la madera de *A. fraxinifolius* debe realizarse con cuidado para evitar deformaciones y grietas. Se recomienda un secado lento y controlado, preferentemente realizar un presecado al aire libre antes del secado en estufa (Simpson, 1999).

La madera de *A. fraxinifolius* se utiliza en la fabricación de muebles, ebanistería, paneles, construcción ligera y carpintería en general, dada su buena combinación de propiedades. También es apreciada en la industria del contrachapado y la fabricación de chapas decorativas, (Orwa, 2009).

Estas características hacen de la madera de *A. fraxinifolius* una opción versátil y valiosa para diversas aplicaciones, destacándose por su equilibrio entre facilidad de maquinado y estética.

2.3. Termotratamiento en madera

La madera es un material de origen biológico, cuya composición química es de índole orgánica. Debido a esto, es susceptible al ataque de agentes bióticos como hongos e insectos. Otros agentes de origen abiótico, como la exposición a la luz solar y el fuego, también pueden degradar este material, lo que puede considerarse como un material poco durable (López de Roma, 1981). No obstante, la madera es prácticamente inalterable por agentes físicos ambientales. En cuanto a los agentes bióticos, no es susceptible a ser atacada en todas las condiciones, y existen soluciones para evitar estos ataques. Además, hay especies que, por sus características, resisten dichas acciones (Vignote, 2000).

El termotratamiento en madera consiste en calentar la madera a temperaturas entre 160°C y 230°C en ausencia de oxígeno para evitar la combustión. Este proceso modifica la estructura química de la madera, reduciendo su capacidad para absorber agua y haciéndola menos atractiva para insectos y hongos. Como resultado, la madera termotratada es más estable dimensionalmente y tiene una mayor resistencia a la humedad, insectos y hongos (Manh Tuong, 2011).

El proceso de termotratamiento de madera utiliza varias tecnologías y métodos para aplicar calor de manera controlada, asegurando que la madera adquiera las propiedades deseadas sin sufrir daños (Tjeerdsma, 1998). A continuación, se describen las principales tecnologías y métodos empleados en este proceso:

1. Horno de convección

- Descripción: Utiliza aire caliente o vapor para calentar la madera en un ambiente cerrado.
- Ventajas: Control preciso de la temperatura y la humedad.
- Aplicación: Común en la industria debido a su eficiencia y capacidad de tratar grandes volúmenes de madera.

2. Horno de vacío

- Descripción: Utiliza vacío para reducir la presión alrededor de la madera, permitiendo una transferencia de calor más eficiente a temperaturas más bajas.
- Ventajas: Menor riesgo de quemado superficial y permite tratar maderas más sensibles.

- Aplicación: Ideal para maderas con alta sensibilidad al calor.

3. Horno de gas inerte

- Descripción: Utiliza gases inertes, como nitrógeno o dióxido de carbono, para crear un ambiente libre de oxígeno y evitar la combustión.
- Ventajas: Mayor seguridad y control del proceso, minimiza el riesgo de oxidación.
- Aplicación: Utilizado en situaciones donde es crucial evitar cualquier riesgo de combustión.

4. Autoclave

- Descripción: Combina calor y presión en un ambiente cerrado, utilizando vapor o gas inerte.
- Ventajas: Permite un control muy preciso del ambiente de tratamiento y puede reducir el tiempo necesario para completar el proceso.
- Aplicación: Usado para tratamientos intensivos y cuando se necesita un control riguroso del proceso.

5. Horno de radiación infrarroja

- Descripción: Utiliza lámparas infrarrojas para calentar la madera directamente.
- Ventajas: Calentamiento rápido y controlable, adecuado para piezas pequeñas o tratamientos superficiales.
- Aplicación: Ideal para aplicaciones específicas y tratamientos superficiales.

6. Microondas

- Descripción: Utiliza microondas para calentar la madera internamente.
- Ventajas: Calentamiento uniforme y rápido, puede penetrar profundamente en la madera.
- Aplicación: Utilizado en investigaciones y aplicaciones especializadas donde se necesita un tratamiento rápido y profundo.

El proceso de termotratamiento de madera utiliza diversas tecnologías y métodos para aplicar calor de manera controlada y segura, mejorando las propiedades de la madera. Estas tecnologías incluyen hornos de convección, hornos de vacío, hornos de gas inerte, autoclaves,

hornos de radiación infrarroja y microondas. Cada método tiene sus ventajas y aplicaciones específicas, permitiendo el tratamiento eficiente de diferentes tipos de madera y para diversas aplicaciones (Boonstra, 2007).

Cambios en la madera durante el termotratamiento

El termotratamiento en madera ofrece varios beneficios en comparación con la madera no tratada, mejorando significativamente sus propiedades físicas y químicas. A continuación, se detallan los principales beneficios:

1. Mayor durabilidad

- Resistencia a hongos y moho: La madera termotratada es menos susceptible a ataques de hongos y moho debido a la reducción de los polisacáridos, que son una fuente de alimento para estos organismos.
- Protección contra insectos: El proceso de termotratamiento también hace que la madera sea menos atractiva para insectos, como termitas y escarabajos.

2. Mejor estabilidad dimensional

- Menor absorción de humedad: La madera tratada térmicamente tiene una menor capacidad de absorber agua, lo que reduce el riesgo de hinchamiento, contracción y deformación.
- Reducción de grietas y torceduras: La estabilidad dimensional mejorada significa que la madera es menos propensa a desarrollar grietas y torceduras con el tiempo.

3. Sostenibilidad y ecología

- Sin productos químicos: El termotratamiento no utiliza productos químicos, lo que hace que la madera sea más ecológica y segura para el medio ambiente y la salud humana.
- Uso de madera local: Al mejorar las propiedades de la madera, el termotratamiento permite utilizar especies de madera locales en aplicaciones donde tradicionalmente se usaban maderas tropicales, reduciendo la necesidad de importar madera exótica y contribuyendo a la sostenibilidad forestal.

4. Mejora estética

- Color más oscuro: El tratamiento térmico oscurece la madera, dándole un aspecto más rico y atractivo, similar al de algunas maderas tropicales.
- Uniformidad en el color: El proceso ayuda a lograr una apariencia más uniforme en términos de color, lo cual es apreciado en aplicaciones decorativas.

5. Mayor resistencia a condiciones climáticas

- Uso en exteriores: La madera termotratada es ideal para aplicaciones exteriores, como terrazas, fachadas y muebles de jardín, debido a su resistencia a la intemperie y a los cambios climáticos.
- Menor mantenimiento: Requiere menos mantenimiento en comparación con la madera no tratada, ya que es más resistente a los efectos del agua y el sol.

6. Mejor rendimiento térmico

- Aislamiento térmico: La madera termotratada tiene mejores propiedades de aislamiento térmico en comparación con la madera no tratada, lo que la hace útil en construcciones donde se requiere un buen aislamiento.

Desventajas y limitaciones

- Fragilidad: Puede volverse más quebradiza y susceptible a fracturas.
- Degradación: El proceso puede ser muy severo y así comprometer su estructura.
- Propiedades mecánicas: Algunas propiedades mecánicas, como la resistencia a la flexión, pueden disminuir.

Ejemplos de aplicaciones

- Construcción de exteriores: Terrazas, fachadas, paneles exteriores, pérgolas y mobiliario de jardín (Figura 1).



Figura 1. Mobiliario para exteriores fabricado con madera termotratada, muebles de jardín y pérgola.

- Interiores con alta humedad: Baños, saunas y cocinas (Figura 2).



Figura 2. Sauna de madera termotratada.

- Decoración y muebles: Mesas, sillas, estanterías y revestimientos decorativos, (Figura 3).



Figura 3. Fachada con madera termotratada utilizada en la construcción del edificio de madera “Mjøstårnet” en Noruega.

En resumen, el termotratamiento en madera ofrece una combinación de durabilidad, estabilidad y estética, haciendo que la madera tratada térmicamente sea una opción excelente para diversas aplicaciones tanto en interiores como en exteriores (Hill, 2021)

2.4. Maquinado de la madera

El maquinado de la madera es un proceso de transformación en el cual se da forma, tamaño y acabado a las piezas de madera utilizando herramientas y maquinaria especializadas. Este proceso puede incluir corte, fresado, cepillado, torneado, taladrado y lijado, y se utiliza en la fabricación de muebles, pisos, puertas, y otros productos de madera.

La determinación de las características de maquinado de la madera constituye un aspecto fundamental para definir su aplicación en diversos procesos industriales. Estas características se refieren al comportamiento de la madera al ser sometida a operaciones de cepillado, lijado, barrenado, moldurado y torneado (Zavala, 1976).

El cepillado y el lijado son operaciones de maquinado de suma importancia, ya que son necesarias para proporcionar el acabado final a la madera. El cepillado, considerado la segunda operación más crucial después del aserrío, es esencial para calibrar las piezas a

dimensiones precisas en grosor y superficie antes de su uso final. Por otro lado, el lijado se realiza con el propósito de preparar la superficie de la madera para aplicaciones de recubrimientos o para reducir su grosor (Zavala, 1976).

Las operaciones de barrenado, moldurado y torneado también son relevantes en el procesamiento de la madera. El barrenado implica la perforación de la madera con brocas de diversos diámetros, siendo crucial para la realización de uniones como espigas y muescas (Zavala, 1976). El moldurado, por su parte, busca estilizar el perfil de la madera para mejorar su estética, utilizando trompos o molduradoras diseñadas para esculpir contornos específicos.

Estas características de maquinado son de gran importancia en las propiedades tecnológicas de la madera, ya que determinan la facilidad o dificultad de su procesamiento durante las distintas operaciones. A pesar de ello, en México existen escasas investigaciones sobre este tema, particularmente en especies de madera con potencial para plantaciones forestales.

En el cepillado de la madera, la velocidad de alimentación influye en la calidad de la superficie resultante. Se ha observado que, al reducir la velocidad de alimentación, se mejora la calidad del cepillado, ya que se incrementa el número de marcas de cuchilla por unidad de superficie, lo que implica una menor cantidad de madera removida por cada cuchilla. Por consiguiente, la combinación óptima de un ángulo de corte reducido y una velocidad de alimentación moderada conduce a la mejor calidad de cepillado en la madera.

El maquinado de madera puede presentar varios defectos que afectan la calidad final del producto. Los principales defectos son: grano astillado, grano apelmusado, grano levantado y rayones.

El defecto de "**grano astillado**" en el maquinado de la madera ocurre cuando las fibras o vetas de la madera se rompen o desprenden en forma de astillas en lugar de ser cortadas limpiamente. Esto resulta en una superficie rugosa y dañada, especialmente en áreas donde el grano cambia de dirección, lo que afecta tanto la estética como la calidad estructural de la pieza, como se ve en la figura 4.



Figura 4. Ejemplo visual de grano astillado

El grano apelmusado es un defecto en la superficie de la madera que se produce durante el maquinado, especialmente en operaciones como cepillado o lijado. Este defecto se caracteriza por una superficie que presenta fibras levantadas o deshilachadas en lugar de quedar lisa y uniforme. Esto afecta tanto la apariencia como el tacto de la madera, dificultando su posterior acabado, como se ve en la figura 5.



Figura 5. Ejemplo visual de grano apelmusado

El grano levantado es un defecto que ocurre en la superficie de la madera cuando las fibras se levantan y sobresalen después del maquinado o tratamiento superficial, como el lijado, cepillado o la aplicación de productos líquidos como tintes, selladores o barnices. Este defecto crea una textura áspera y rugosa, lo que puede comprometer el acabado final de la pieza de madera, como se ve en la figura 6.



Figura 6. Ejemplo visual de grano levantado

2.5. Técnica de tomografía computarizada de rayos-X

La tomografía computarizada (TC), es una técnica de diagnóstico por imagen basada en rayos X que permite obtener imágenes bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) de diferentes tipos de estructuras, tejidos mineralizados, biomateriales, etc. Esta técnica, no es destructiva y no necesita de pretratamientos de la muestra (Caeiro, 2015). Utiliza para ello un diodo al vacío, en el cátodo (tungsteno o molibdeno) se forma la nube de electrones los cuales son acelerados por diferencia de potencial en el diodo (máximo 600 kV) e impactados en el cátodo para generar los fotones de rayos-X (1 %) (Herrer, 2011) por radiación de frenamiento. El espectro de rayos-X generado es dirigido hacia un detector de rayos-X y dentro de esta trayectoria es colocado el objeto de estudio. Los fotones inciden sobre el detector comúnmente CCD (charge coupled device) dispositivo de carga acoplada con propiedades fotoeléctricas (capta fotones y libera electrones), el cual está recubierto por una red de electrodos microscópicos cargados positivamente, los electrones liberados en el CCD cargados negativamente son atraídos y congregados alrededor de los electrodos; cada electrodo corresponde a un elemento del mosaico digital o imagen, conocidos como pixel (Moretón Fernandez, 2016). Posteriormente se lleva a cabo la operación de traspaso de electrones a un canal de lectura (hilera de electrodos sin electrones acumulados) y de ahí a un amplificador de salida donde se hace el recuento de electrones para que la imagen quede codificada numéricamente. Finalmente se divide la cantidad de electrones en cada píxel entre un número asignado por la ganancia en la cámara (depende del tamaño del píxel y tamaño de sensor CCD), como resultado se obtiene el rango dinámico o escala de grises de la imagen.

2.5.1. Principios de la tomografía computarizada

La TC se basa en la atenuación que sufre un haz de fotones de rayos-X al atravesar un espesor de materia. Cuando un haz de fotones atraviesa un material, sufren interacciones que dependen de su energía y las propiedades del material (densidad y número atómico) que está siendo irradiado (Juanes, 2010). Los fotones de rayos-X se absorben y dispersan en la materia a través de los mecanismos físicos de absorción fotoeléctrica, dispersión de Rayleigh y Thomson, dispersión de Compton entre otros; para pequeñas energías debajo de 100 keV, la absorción fotoeléctrica es el efecto dominante; para energías arriba 100 keV, la atenuación

total es causada casi en su totalidad por la dispersión de Compton. Estos mecanismos se pueden definir con un solo coeficiente de atenuación lineal (Herrer, 2011). El coeficiente de atenuación lineal es específico de cada sustancia o materia. Para un rayo-X monoenergético (compuesto por una sola longitud de onda) que atraviesa un trozo uniforme de material, la atenuación que sufre se expresa de la siguiente manera:

$$I_{out} = I_{in} - (\mu L) \quad (1)$$

Dónde: I_{out} es la intensidad del rayo X luego de atravesar el material, I_{in} es la intensidad del rayo-X incidente, μ es el coeficiente de atenuación lineal del material, L es la distancia recorrida por el rayo-X en el material, como el haz de rayos-X pasa a través de materiales de distintos coeficientes, podemos considerarlo como un material compuesto por un gran número de elementos de igual tamaño, de largo w , cada uno de los cuales posee un coeficiente de absorción constante. Estos coeficientes de atenuación están indicados como $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$.

$$\text{Entonces: } (\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n) = \ln [I_{in} / I_{out}] \quad (2)$$

Para determinar la atenuación de cada elemento, debe obtenerse un gran número de mediciones desde distintas direcciones generando un sistema de ecuaciones múltiples, este es el principio de Hounsfield (Pereira, 2004). Debido a que la fuente de radiación en la TC es poli energética, para determinar los coeficientes de atenuación lineal se considera el número de fotones en lugar de la intensidad y la ecuación queda:

$$N = N_{oe} - \mu x \dots \quad (3)$$

Dónde: N = Número de fotones receptados N_o = Número de fotones de incidencia μ = Coeficiente de atenuación lineal de un tejido Para el tejido con distintas sustancias la ecuación queda:

$$N = N_{oe} - (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots + \mu_n) \dots \quad (4)$$

3. ANTECEDENTES

3.1. Termotratamiento en madera de *A. fraxinifolius*

En el estudio realizado por Elékou (2019), se investigó el efecto del tratamiento térmico en la madera de *A. fraxinifolius*, evaluando tres diferentes temperaturas (180, 200 y 220°C) con un medio de transferencia de calor basado en aceite durante un intervalo de 2.5 horas. La madera termotratada, se caracterizó por su estabilidad dimensional y cambio de coloración. Sin embargo, presentó una disminución en sus propiedades mecánicas en ciertos casos. Las propiedades físicas y mecánicas de la madera tratada fueron evaluadas según normas ISO (International Organization of Standardization). Abarcando parámetros, como densidad, absorción de agua, flexión estática, compresión y dureza. Se encontró que, a una temperatura de tratamiento de 200°C, la madera experimentó un incremento significativo del 4.5% en densidad en comparación con el testigo. La absorción de agua mostró un incremento general, aunque se observó una reducción conforme aumentaba la temperatura de tratamiento, alcanzando mejores resultados a 200°C. En términos de propiedades mecánicas, la dureza longitudinal disminuyó en un 6.8%, 0.3% y 2.4% a 180, 200 y 220°C respectivamente, mientras que la dureza lateral aumentó un 15.5% a 200°C. El módulo de elasticidad (MOE) en flexión incrementó un 11.4% a 200°C y el módulo de rotura (MOR) en flexión mostró un incremento del 24.2%. Además, la resistencia a la compresión (MOR) aumentó en un 39.4%, 31.7% y 35.1% a temperaturas de 180, 200 y 220°C respectivamente. Estos resultados destacan el potencial del tratamiento para mejorar diversas propiedades físicas y mecánicas de la madera, lo cual puede contribuir significativamente a su uso y aplicaciones en diferentes industrias (Elékou, 2019).

Según Oliveira (2022), se llevó a cabo un estudio sobre madera termotratada con el propósito de destacar la especie *A. fraxinifolius*, investigando específicamente la influencia del tratamiento térmico a escala industrial aplicado a esta madera. El tratamiento se realizó en autoclave con control riguroso de temperatura y presión, utilizando inyección de vapor saturado a temperaturas de 155, 165, 175 y 185°C. El estudio incluyó análisis físicos, químicos y mecánicos de la madera tratada. Los resultados indicaron que el contenido de holocelulosa y lignina total disminuyó con el tratamiento térmico, mientras que los extractivos mostraron un aumento significativo. La densidad de la madera incrementó tras el

tratamiento, aunque se observaron grietas en la madera tratada, las cuales resultaron en una pérdida notable de propiedades mecánicas en compresión, tensión y flexión. En cuanto a la resistencia, se observó que el tratamiento a 155°C mejoró la resistencia al corte, mientras que la madera tratada a 165°C no mostró diferencias significativas en comparación con la madera sin tratar. Sin embargo, las muestras tratadas a 175 y 185°C experimentaron una reducción en la resistencia. Este estudio demuestra que el tratamiento térmico investigado puede mejorar la estética, utilidad y valor comercial de la madera de *A. fraxinifolius* (Oliveira, 2022)

Dutt (2024) ha demostrado que el tratamiento térmico de la madera constituye un método eficaz y respetuoso con el medio ambiente para incrementar su durabilidad y estabilidad dimensional. Este proceso implica exponer la madera a altas temperaturas bajo condiciones controladas. En el estudio, se aplicaron temperaturas de 80, 120, 160 y 200°C durante períodos de 2, 4 y 6 horas a muestras de madera de *A. fraxinifolius* en un horno de estabilidad con condiciones de vacío. Los resultados revelaron variaciones significativas en las propiedades físicas de la madera sometida a tratamiento térmico. La mayor densidad específica registrada fue de 0.538 a 200°C durante 6 horas, con un contenido de humedad máximo del 181.1%. En contraste, la menor densidad específica fue de 0,400 con un contenido de humedad máximo del 120.9% a la misma temperatura y duración. El color de la madera se oscureció, aunque no se observaron diferencias notables en su textura. Además, los coeficientes de contracción e hinchamiento disminuyeron a medida que aumentaron las temperaturas de tratamiento, lo cual mejora en última instancia la estabilidad dimensional de la madera. Este estudio subraya la efectividad del tratamiento térmico como una estrategia para mejorar las propiedades físicas y la estabilidad dimensional de la madera de *A. fraxinifolius* (Dutt, 2024).

3.2. Maquinado en madera de *A. fraxinifolius*

Rawat et al. (1974) publicaron un estudio sobre la calidad del maquinado de seis especies maderables de la India, utilizando la norma ASTM D 1666-64. En esta investigación, la madera de duramen de *A. fraxinifolius* mostró un comportamiento superior en el ensayo de cepillado con un ángulo de 20° en comparación con los ángulos de 15, 25 y 30°, con un 16%

de probetas clasificadas como excelentes. Los defectos más comunes observados fueron el grano apelmusado, el grano astillado y el grano levantado, con igual frecuencia. En el proceso de torneado, la madera de cedro rosado presentó un 42% de piezas clasificadas como excelentes. Los defectos más frecuentes en esta fase fueron el grano astillado, seguido por el grano levantado, con una incidencia de solo un tercio en comparación con el grano astillado. En el barrenado, el defecto predominante fue el grano apelmusado, reportando un 89% de piezas clasificadas entre excelentes y buenas. En el escopleado, el cedro rosado presentó un 53% de probetas clasificadas entre buenas y excelentes, siendo el defecto más común el grano rasgado, seguido por algunas asperezas debido al maquinado. En general, el índice de calidad de maquinado del cedro rosado, tomando como referencia (100%) la calidad de trabajabilidad de *Tectona grandis*, es del 74% (Rawat, Rajput, & Pant, 1974).

Según Aguilar, (2007) determinó las características de cepillado, lijado, barrenado, moldurado y torneado de la madera de *A. fraxinifolius*, proveniente de plantaciones de 7 y 13.5 años de edad ubicadas en la Sierra Norte del estado de Puebla, México. Los procedimientos de maquinado y su evaluación se realizaron de acuerdo con la norma ASTM D 1666-64 (reaprobada en 1987), con ajustes adecuados según las especificaciones de la maquinaria disponible. Además, se probaron dos contenidos de humedad diferentes: 9.9 % y 9.5 %. La madera proveniente de plantaciones de 7 años exhibió excelentes resultados en el cepillado cuando se trabajó con ángulos de corte de 30° y 20°, a una velocidad de alimentación de 7.5 m/min. En contraste, la madera de 13.5 años mostró un desempeño excelente solo con un ángulo de corte de 30° y la misma velocidad de alimentación. Durante los ensayos de cepillado, lijado y barrenado, se observó que el defecto más común fue el grano apelmusado, mientras que en los ensayos de moldurado y torneado predominaron el grano levantado y el grano astillado como defectos principales. En términos generales, se concluye que las propiedades de maquinado fueron de buenas a excelentes en las distintas operaciones evaluadas, con la excepción del moldurado, donde la calidad del maquinado fue catalogada como muy pobre a regular (Aguilar, 2007).

3.3. Maquinado de madera termotratada

De acuerdo con Moura, (2011), la madera tratada térmicamente adquiere colores similares a los observados en maderas tropicales, además de presentar una resistencia mejorada a hongos

y a la intemperie, mayor estabilidad dimensional y menor higroscopicidad. Sin embargo, existe poca información disponible sobre el efecto de los tratamientos térmicos en las propiedades de mecanizado de la madera. En este estudio, se sometieron maderas de valor relativamente bajo, como *Eucalyptus grandis* y *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, a una variedad de tratamientos térmicos de 140, 160 180 y 200°C, realizados en presencia o ausencia de oxígeno. La madera tratada térmicamente se sometió a cepillado a ángulos de 15, 20, y 25° y a pruebas de lijado con granos de 60, 80, 100 y 120. La calidad de la superficie se evaluó en función de la incidencia de defectos de mecanizado y la uniformidad de la textura (superficies cepilladas), así como la rugosidad y humectabilidad (superficies lijadas). Las muestras tratadas térmicamente proporcionaron una mejor calidad de la superficie después del cepillado y una mayor rugosidad de la superficie después del lijado, en comparación con las muestras de control. El incremento de la temperatura del tratamiento provocó un aumento en el tiempo de humedecimiento, lo que indica una reducción de la higroscopicidad (Moura, Brito, Nolasco, & Uliana, 2011).

3.4. Inspección de madera con tomografía de rayos-X

El empleo de la tomografía computarizada (TC) para el análisis de la estructura de la madera es relativamente reciente. Esta técnica ofrece varias ventajas: permite obtener una visión tridimensional de la estructura interna y posibilita la realización de análisis no destructivos de las muestras. Las imágenes obtenidas mediante TC representan valores de la atenuación de los rayos X, lo cual es proporcional a la cantidad de energía absorbida y, en consecuencia, a la densidad media del material. Esto proporciona una estimación precisa de las características anatómicas de la estructura (Ballesteros-Cánovas, 2013).

La resolución de la imagen o el tamaño del voxel son fundamentales para analizar la estructura de la madera. La elección de un tamaño adecuado depende de los detalles que se desean observar. No obstante, al aumentar la resolución, se reduce el campo de visión; es decir, habrá más voxels por unidad de volumen definiendo una estructura, pero la cobertura total será menor (Brodersen, 2013). Cuando el tubo emisor genera un haz cónico, se proyecta una imagen magnificada. La reducción de la distancia entre el tubo emisor de rayos X y la muestra mejora la resolución, pero disminuye el campo de visión. Para mitigar esta

limitación, se han implementado técnicas como la de contraste de fases, que requieren detectores de alta resolución (Mayo, Chen, & Evans, 2010). En la tomografía clásica, es posible explorar zonas contiguas con distinta resolución mediante el uso de software especializado (Brodersen, 2013). Estos factores son decisivos al considerar que elementos estructurales de la madera, como las puntuaciones, son del orden de 1.5 μm o más, y que las fibras pueden tener longitudes mayores a 2 mm.

La tomografía de rayos X ha sido utilizada en diversos estudios científicos para inspeccionar la estructura interna de la madera, debido a su capacidad para proporcionar imágenes detalladas sin la necesidad de destruir la muestra.

Lesar, B. et al. (2005) estudiaron cómo la tomografía computarizada (CT) de rayos X se ha utilizado para analizar la densidad interna de la madera y las características de sus fibras. Se subraya el potencial de la tomografía de rayos X para evaluar las características de la madera sin dañarla, lo que es útil en la industria maderera para clasificar la calidad y la resistencia de los materiales (Lesar, 2005).

Kubojima, Y. et al. (2007) estudiaron cómo la tomografía de rayos X puede ser utilizada para estudiar la distribución de la humedad en la madera, lo que es crucial para la fabricación de productos de madera de alta calidad. La investigación concluye que la tomografía permite identificar áreas con diferentes niveles de humedad, lo que puede ayudar a prevenir defectos durante el proceso de secado (Kubojima, 2007).

Hori, N. et al. (2009), analizaron las variaciones internas en la densidad de la madera y su relación con las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión y la flexión. Se concluye que la tomografía de rayos X puede ofrecer un mapa detallado de la heterogeneidad estructural de la madera, lo que es esencial para mejorar las predicciones de su comportamiento mecánico (Hori, 2009).

Ryynänen, J. et al. (2010) Realizaron un estudio donde utiliza la tomografía de rayos X para identificar defectos internos como nudos, grietas, y variaciones de densidad en la madera, aspectos cruciales para determinar la calidad estructural de la madera. La investigación muestra cómo la tomografía permite una inspección más precisa en comparación con técnicas tradicionales como el ultrasonido (Ryynänen, 2010).

De acuerdo con McGovern (2010) quien realizó un estudio de madera en descomposición empleado tomografía de rayos x, con la finalidad de hacer mediciones de densidad y pérdida de masa. La evaluación que se realizó es la siguiente: Se expusieron especímenes de cubos de madera de *Pinus taeda* al hongo *Gloeophyllum trabeum* durante períodos de tiempo que oscilaron entre una y doce semanas. La masa de cada uno de estos ejemplares se registró antes y después de ser sometidos a la descomposición controlada. Posteriormente, se realizó una TC de rayos X. A partir de las tomografías y los datos de masa registrados, se calcularon los volúmenes y densidades correspondientes de las muestras. Estos resultados indican que la TC de rayos X puede detectar la descomposición en especímenes de madera expuestos a descomposición utilizando mediciones de densidad (McGovern, Senalik, Chen, Beal, & Rei, 2010).

Teramoto, M. et al. (2012) Realizaron un estudio que investiga cómo la tomografía de rayos X puede ser utilizada para observar cómo la estructura interna de la madera responde a diferentes tipos de esfuerzos mecánicos, como la compresión y la flexión. Se muestra que la tomografía permite identificar la propagación de fisuras internas que son invisibles mediante métodos convencionales de inspección (Teramoto, 2012).

Kawai, S. et al. (2014). Publicaron un artículo en el que presentan un enfoque innovador para estudiar la microestructura de la madera utilizando tomografía de rayos X en 3D. La técnica permite observar detalles del arreglo celular de las fibras de la madera, lo que ayuda a comprender mejor cómo la estructura celular influye en las propiedades físicas y mecánicas de la madera (Kawai, 2014).

La tomografía de rayos X se ha utilizado como una herramienta eficaz para estudiar la madera en detalle sin causarle daño. Esta técnica ha demostrado ser útil en diversos ámbitos de la ciencia de la madera, desde la identificación de defectos internos hasta la evaluación de la distribución de humedad y las propiedades mecánicas. Estos estudios proporcionan una base sólida para mejorar la calidad y la clasificación de la madera en aplicaciones industriales.

4. HIPÓTESIS

Al aplicar un termotratamiento a la madera de *A. fraxinifolius* su estructura se modificará y su maquinado se verá afectado positivamente en comparación con la madera no tratada.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Estudiar el efecto del termotratamiento en la estructura y el maquinado de la madera de *A. fraxinifolius* mediante tomografía computarizada.

5.2 Objetivos específicos

- Aplicar termotratamiento a madera de *A. fraxinifolius* a 180 y 200°C, durante 2 horas.
- Estudiar el comportamiento de la madera en el maquinado, sin tratamiento y tratada térmicamente.
- Realizar ensayos de maquinado (cepillado, lijado, taladrado, moldurado)
- Estudiar cambios en la madera de *A. fraxinifolius* por efecto del termotratamiento mediante tomografía computarizada.

6. JUSTIFICACIÓN

El aprovechamiento sostenible del recurso maderable requiere la implementación de estrategias de manejo forestales y silvícolas que garanticen el abastecimiento de recursos forestales. Estas estrategias se desarrollaron para aumentar la superficie boscosa, aunque en algunos casos, la calidad de la madera obtenida de plantaciones puede ser inferior a la de los bosques nativos, afectando a ciertas industrias de transformación. El impulso de la creación de plantaciones forestales tiene como objetivo acelerar la obtención de recursos maderables y no maderables. En este contexto, se utilizan especies de rápido crecimiento, como el *A. fraxinifolius*, introducida con fines comerciales. Esta especie, conocida como cedro rosado, es de crecimiento acelerado y, cuando se somete a métodos silvícolas, sus plantaciones se desarrollan aún más rápido, lo que resulta en una mayor proporción de madera juvenil. La madera juvenil de esta especie tiene baja densidad, fibras cortas y desviadas, paredes celulares delgadas y alta concentración de hemicelulosa, lo que le confiere propiedades menos competitivas en comparación con otras maderas de bosque natural. La finalidad de este estudio es aplicar un tratamiento térmico a la madera de cedro rosado y estudiar el efecto de dicho tratamiento sobre su estructura anatómica y comportamiento al ser trabajada con herramientas de corte. Para este análisis, se utilizará la tomografía computarizada de rayos X, una técnica empleada para la descripción y análisis de materiales, que permite inferir comportamientos en los procesos de maquinado y en el uso final de la madera. Al comprender mejor los efectos del tratamiento térmico y utilizando técnicas avanzadas de análisis como la tomografía de rayos X, este estudio busca contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles y eficaces para el manejo y aprovechamiento de recursos forestales.

7. METODOLOGÍA

7.1. Procedencia y características del material utilizado

En la figura 7, se presenta el material de estudio que fue recolectado en un antiguo vivero perteneciente a la CONAFOR en el pueblo Dr. Miguel Silva Macías situado en el municipio de Ario de Rosales en el estado de Michoacán. El árbol tenía una altura de aproximativamente 16 metros y un diámetro a altura de pecho (DAP) de 45 cm con una edad de aproximadamente 15 años. En la figura 8, se presentan adicionalmente algunos aspectos botánicos para la identificación de la especie.



a) Árbol de *A. fraxinifolius*



b) Corteza y hojas de *A. fraxinifolius*

Figura 7. Material de estudio



Figura 8. Hojas e inflorescencia de la especie *A. fraxinifolius*

7.2. Aplicación de termotratamiento

Las probetas fueron sometidas a tratamiento térmico con temperaturas de 180 y 200°C durante 2 horas, fueron tratadas térmicamente en un horno de convección marca Felisa de 600 x 600 x 700 mm equipada con un controlador de temperatura y tiempo (Figura 9).



Figura 9: Horno de convección FELISA.

Las probetas del termo tratamiento, se realizó un tratamiento de esterilización en la madera, para evitar posible deterioro por el insecto *lyctus sp.* Debido a que se observaron algunos de estos insectos como se muestra en la figura 10. La esterilización consistió en aplicar temperatura de 80°C durante un tiempo de 3 horas.

7.3. Cepillado

El cepillado, se evaluó de acuerdo con la norma ASTM D 1666-22. Se utilizaron 21 probetas con medidas de 600 x 110 x 21 mm. Las cuales 7 fueron sin tratamiento, 7 con tratamiento a 180°C y 7 con 200°C durante 2 horas. Para este ensayo se trabajó con un ángulo de cuchillas de 30°. Debido a que, este es el más común en el proceso de cepillado en la industria de transformación de la madera. También es importante señalar que se trabajó con una velocidad de avance de 7.5 m/min para obtener una superficie más lisa. En este ensayo se evaluaron las probetas a favor y en contra del hilo como se muestra en la figura 12.

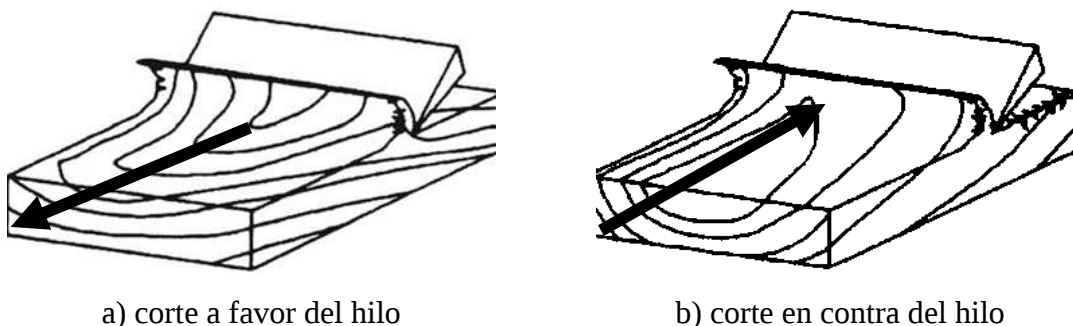


Figura 12. Representación de cortes en el proceso del cepillado

Para calcular el número de marcas de cuchilla por centímetro se usó la siguiente fórmula:

$$Nm = \frac{Vc \times Nc}{Va \times 100} \quad (5)$$

Dónde:

Nm= Número de marcas de cuchillas por centímetro.

Vc= Velocidad del cabezal portacuchillas (revoluciones por minuto).

Nc= Número de cuchillas en el cabezal.

Va= velocidad de alimentación (m/min).

7.4. Lijado

La evaluación de los ensayos se realizó como lo establece la Norma ASTM D 1666-22 en la cual se consideran los siguientes defectos: grano astillado, grano apelusado, grano levantado, marcas de astilla, grano rasgado, grano comprimido y rayones.

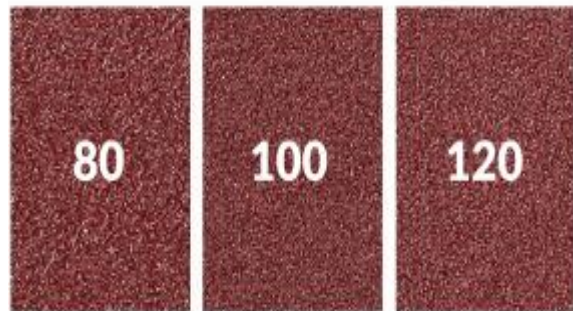
El lijado se realizó en una lijadora de banda ancha de marca Castaly WS-A2560 de 16 ¼ hp como se muestra en la figura 13. Las probetas a utilizar son las provenientes del proceso de cepillado. Se utilizó lijas de grano 80, 100 y 120 de oxido de aluminio.



a) Lijadora



b) Mecanismo de sujeción de la lija



c) Lijas para madera con abrasividad 80, 100 y 120.

Figura 13. Equipo y herramienta de corte utilizada en los ensayos de lijado

7.5. Taladrado

En la evaluación del taladrado se utilizó una broca de carburo de tungsteno tipo forstner como se muestra en la figura 14. En las probetas se realizaron dos perforaciones y se tomaron la lectura de alimentación en segundos con un cronometro. Las medidas de las probetas fueron de 30.5 cm de largo por 7.6 cm de ancho y 2 cm de espesor. Para este ensayo se utilizó un taladro columnar de la marca Emerson de ¾ hp que se muestra en la figura 14 con revoluciones ajustables de 3630 – 200 RPM.



a) Broca para maquinado de madera tipo Forstner.



b) Taladro columnar EMERSON ¾ hp.

Figura 14. Equipo y herramienta de corte utilizada en los ensayos de taladrado.

La velocidad de alimentación se calculó de acuerdo con la siguiente formula:

$$VA = \frac{E}{TEC/60} \quad (6)$$

Dónde: VA= Velocidad de alimentación. E= Espesor de la pieza en metros. TEC= Tiempo efectivo de corte en segundos

En el proceso se evaluaron los siguientes defectos: probetas sin defectos, grano arrancado, grano velloso y grano apelmusado.

7.6. Moldurado

En la figura 15, se muestra la fresa de carburo de tungsteno, la plantilla sujetadora y el trompo utilizado para realizar el proceso de moldurado. Las probetas fueron las provenientes del taladrado, pues las perforaciones realizadas en el anterior proceso (taladrado) coincidieron con los tornillos de la nueva plantilla sujetadora a utilizarse. El tiempo de deslizamiento de las probetas sobre el filo de la fresa se tomó con un cronometro.



a) Perfil de la fresa



b) Fresa con pastilla de carburo de tungsteno



c) Plantilla sujetadora



d) Trompo INVICTA TI-14 5 HP

Figura 15. Equipo y herramientas de corte utilizada en los ensayos de moldurado.

Para calcular la velocidad de alimentación en el moldurado se utilizará la fórmula.

$$VA = \frac{l}{TEC \div 60} \quad (7)$$

Dónde: VA= Velocidad de alimentación. L= Longitud de la pieza en metros. TEC= Tiempo efectivo de corte en segundos.

$$Vp = \frac{D \times \pi \times Vr}{60} \quad (8)$$

Dónde: Vp= Velocidad periférica. D= Diámetro de la fresa. π = Constante 3.1416. Vr= Velocidad de rotación. Los defectos evaluados en esta prueba serán: probetas sin defectos, grano arrancado, grano velloso, grano astillado y grano levantado.

7.7. Evaluación de los defectos

La evaluación de los ensayos se realizó como lo establece la Norma ASTM D 1666-22, como se muestra en la tabla 1. Para la evaluación se consideraron los siguientes defectos: grano astillado, grano apelmusado, grano levantado, marcas de astilla, grano rasgado, grano comprimido y rayones.

Tabla 1: Clasificación y evaluación de defectos de maquinado.

Grado	Condición	Descripción
1	Excelente	Libre de defectos
2	Bueno	Con defectos superficiales que se pueden eliminar con lija del número 100
3	Regular	Con defectos marcados que se pueden eliminar con lija del 60 y después con lija número 100
4	Pobre	Con defectos severos que para eliminarse se necesita cepillar nuevamente
5	Muy pobre	Con defectos severos que para eliminarse se necesita sanear la pieza de madera

La evaluación se basa en la presencia y severidad de los defectos antes señalados, examinando las probetas visualmente y clasificándolas en cinco categorías que son: excelente, buena, regular, pobre y muy pobre. La clasificación final de cada uno de los ensayos se basa en la suma del porcentaje de probetas excelentes (E), buenas (B), regulares (R), pobres (P) y muy pobres (MP) presentes después de cada ensayo, otorgados por la Norma.

Tabla 2: Porcentaje en cantidad de defectos presentes en las probetas, aportado por la Norma ASTM D 1666-22.

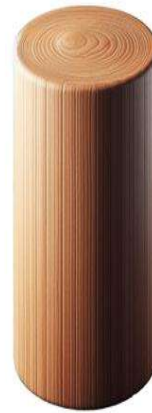
% E+B	Clasificación
100-90	Excelente
89-80	Bueno
79-60	Regular
59-40	Pobre
39-0	Muy pobre

7.8. Preparación de probetas para análisis tomográfico

Las probetas se hicieron de forma cilíndrica de 1 mm de diámetro por 10 mm de largo, con los diferentes tratamientos, para observar los cambios estructurales en la madera a estudiar. La habilitación se realizó utilizando una sierra cinta para cortar pequeñas piezas de madera de 5 x 5 x 50 mm. Después, se utilizó un taladro para sujetar las pequeñas piezas de madera, utilizando una lija de grano 60 se redujo la dimensión de la pieza hasta dejarla al diámetro requerido. En la figura 16, se muestra las pequeñas piezas de madera en el proceso anterior mencionado.



a) Reducción de diámetro de la pieza de madera



b) Probeta resultante para el análisis tomográfico

Figura 16. Elaboración de probetas para análisis en tomografía de rayos X

7.9. Adquisición y análisis de imágenes por tomografía de rayos x

En el análisis microestructural, se utilizó un equipo de tomografía Xradia Zeiss Versa 510 propiedad del Laboratorio Universitario de Microtomografía de Rayos X (LUMIR), Centro de Geociencias UNAM, (figura 17). Para el análisis tridimensional de los datos se utilizó el programa Avizo en su versión 8.1.



Figura 17. Tomógrafo Xradia Zeiss Versa 510

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

8.1. Cepillado de madera

Las muestras tratadas térmicamente proporcionaron una mejor calidad de la superficie después del cepillado, en comparación con las muestras control. En la tabla 3, se presentan los resultados de los ensayos de cepillado. Las probetas termotratadas, dieron resultados iguales tanto como el tratamiento 180 como 200 °C. Los ensayos obtuvieron un porcentaje 71.4 % clasificando de acuerdo con la norma como superficie regular y el defecto más frecuente es el grano astillado. Estos resultados se obtuvieron en probetas a favor del hilo de la madera. El porcentaje más bajo corresponde a las probetas sin tratamiento térmico.

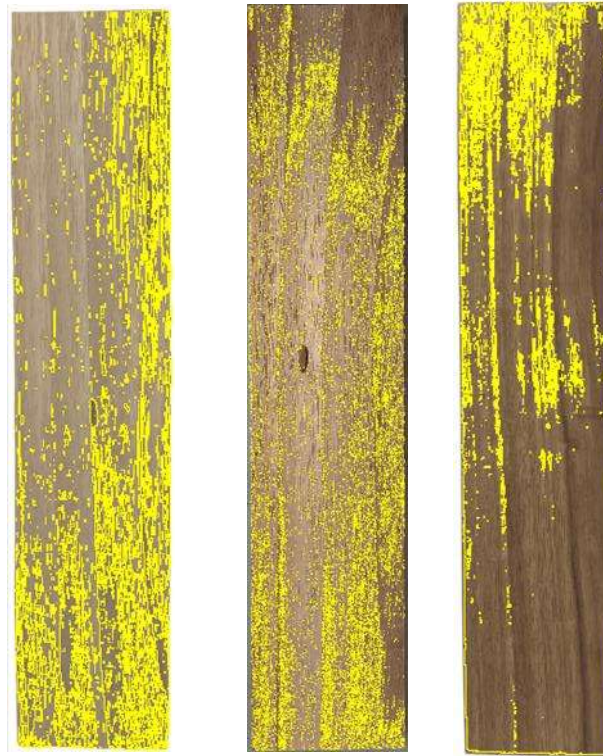
Tabla 3: Resultados de la evaluación con Norma ASTM D 1666-22 en ensayos de cepillado

Tratamiento	Excelentes + Buenas (%)		Clasificación ASTM D 1666-22		Defecto más frecuente
	Contra	A favor	Contra	A favor	Ambos
Sin Tratamiento	28.5	57.1	Muy Pobre	Pobre	Grano astillado
180°C a 2 h	71.4	71.4	Regular	Regular	Grano astillado
200°C a 2h	71.4	71.4	Regular	Regular	Grano astillado

Moura, (2011), presento resultados similares en el cepillado. La clasificación de la calidad de la superficie fue similar para *Pinus* (calificación de 75.5) y *Eucalyptus* (calificación de 74.6). Las muestras tratadas térmicamente proporcionaron una mejor calidad de la superficie después del cepillado en comparación con las muestras control.

En la evaluación de los ensayos de cepillado en contra hilo, se vio un aumento en la área con defecto de la madera sin tratamiento, esto debido a que, la acción mecánica del cepillado en contra del hilo, hace que exista desprendimiento de astillas de madera. En la madera termotratada se mantuvo en una clasificación regular.

En la figura 18, se muestran probetas resultantes, las cuales están marcadas las áreas con defectos, siendo más notables las que no tienen tratamiento, seguido de las tratadas a 180 y 200°C a 2h respectivamente. Lo anterior refleja un aumento de calidad en el cepillado en la madera tratada térmicamente.



a) sin tratamiento b) 180°C 2h c) 200°C 2h

Figura 18. Evaluación de áreas con defecto, en ensayo de cepillado, mediante software Imagej

En la tabla 4, se muestra la evaluación de los ensayos de cepillado, mediante la medición de áreas en el software ImageJ. La madera sin tratamiento dio una media de área de 85.4 %, la madera con 180°C a 2h obtuvo un 88.8% de área libre de defectos y en el tratamiento a 200°C 2h corresponde a 90%.

Tabla 4. Resultados de medición de áreas mediante software ImageJ

	Sin tratamiento		180°C 2h		200°C 2h	
Superficie	Área (cm ²)	%	Área (cm ²)	%	Área (cm ²)	%
Defecto	84.5	14.6	64.8	11.1	57.6	9.9
Libre de defecto	495.5	85.4	515.1	88.8	522.4	90
Total	580	100				

En la figura 19, se muestra el defecto más frecuente presentado en los ensayos de cepillado. El grano astillado se debe a que el hilo de la madera de cedro rosado es ligeramente entrecruzado como reporta Moura, (2011). Otro de los factores a considerar son los elementos constitutivos de la madera como las fibras cortas con paredes delgadas.

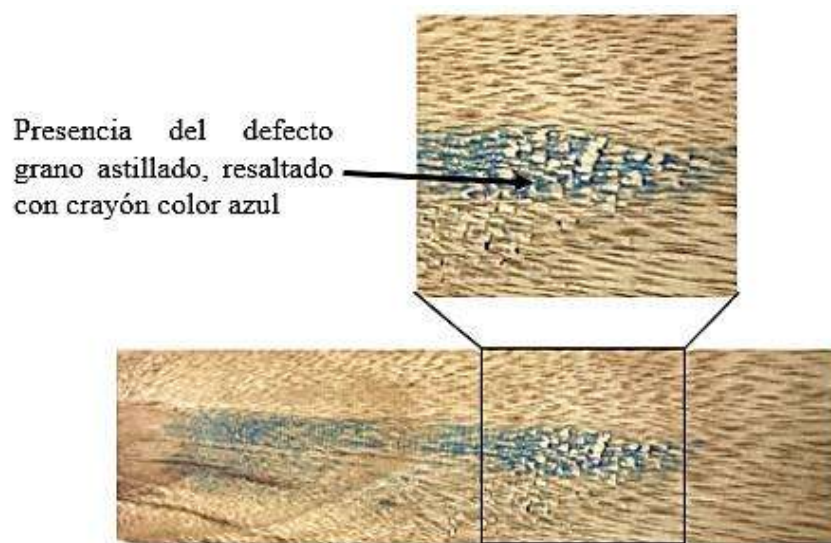


Figura 19. Probeta de *A. fraxinifolius*, con presencia de grano astillado

8.2. Resultados de Lijado

En la tabla 5, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de lijado, teniendo como defecto más frecuente en los ensayos el grano apelmusado. En los ensayos de lijado, se presentó una pequeña mejora en el acabado del lijado conforme en los granos 100 y 120. También se puede decir que los tratamientos térmicos no afectan negativamente el proceso. Teniendo en cuenta que en las probetas termotratadas aumento la calidad del acabado en las superficies lijadas.

Tabla 5: Resultados de lijado de probetas a favor del hilo.

Grano	Tratamiento	Excelentes + Buenas %
80	Sin tratamiento	85,7
	180 °C 2h	100
	200 °C 2h	85,7
100	Sin tratamiento	85,7
	180 °C 2h	100
	200 °C 2h	100
120	Sin tratamiento	100
	180 °C 2h	100
	200 °C 2h	100

En la figura 20 se muestran algunas de las probetas utilizadas en el proceso de lijado, se logra percibir el cambio de coloración en la madera termotratada, en 200°C se ve considerablemente la tonalidad más oscura. También las superficies de la madera termotratada resultaron ser más tersas al tacto, como las del tratamiento a 200 °C. Teniendo un resultado similar como el que se reporta en el trabajo realizado por Moura (2011).



Figura 20. Probetas de *A. fraxinifolius* sin y con tratamiento, utilizadas en el proceso de lijado.

8.3. Taladrado

La evaluación de los ensayos de taladrado se muestra en la tabla 6, teniendo como defecto más frecuente en los ensayos el grano arrancado. El defecto frecuente se presentó en la salida de la perforación, siendo más recurrente en las probetas con termotratamiento. En la superficie de entrada de la broca y al interior de la perforación se observa un buen acabado teniendo superficies lisas y tersas sin defectos. En los ensayos de taladrado se presentó una pequeña diferencia negativa en el acabado de las perforaciones conforme los tratamientos de 180 y 200°C respectivamente. También se puede decir que los tratamientos térmicos no afectan negativamente el proceso.

Tabla 6: Resultados de taladrado de probetas

Tratamiento	Tiempo de corte (s)	Velocidad de alimentación (m/min)	E +B (%)	Clasificación ASTM D 1666-22	DMF
Sin Tratamiento	18.5	0.72	85.7	Excelente	Grano arrancado
180°C 2h	25.1	0.57	71.4	Regular	Grano arrancado
200°C 2h	20.9	0.62	71.4	Regular	Grano arrancado

DMF: defecto más frecuente E + B %: porcentaje de piezas excelentes y buenas

En la figura 21, se muestran probetas tratadas y sin tratamiento, con el defecto más frecuente presente durante la realización de los ensayos de taladrado. En la superficie de salida de las perforaciones, se encuentra desprendimiento de madera, siendo más severos los defectos en la probeta sin tratamiento.

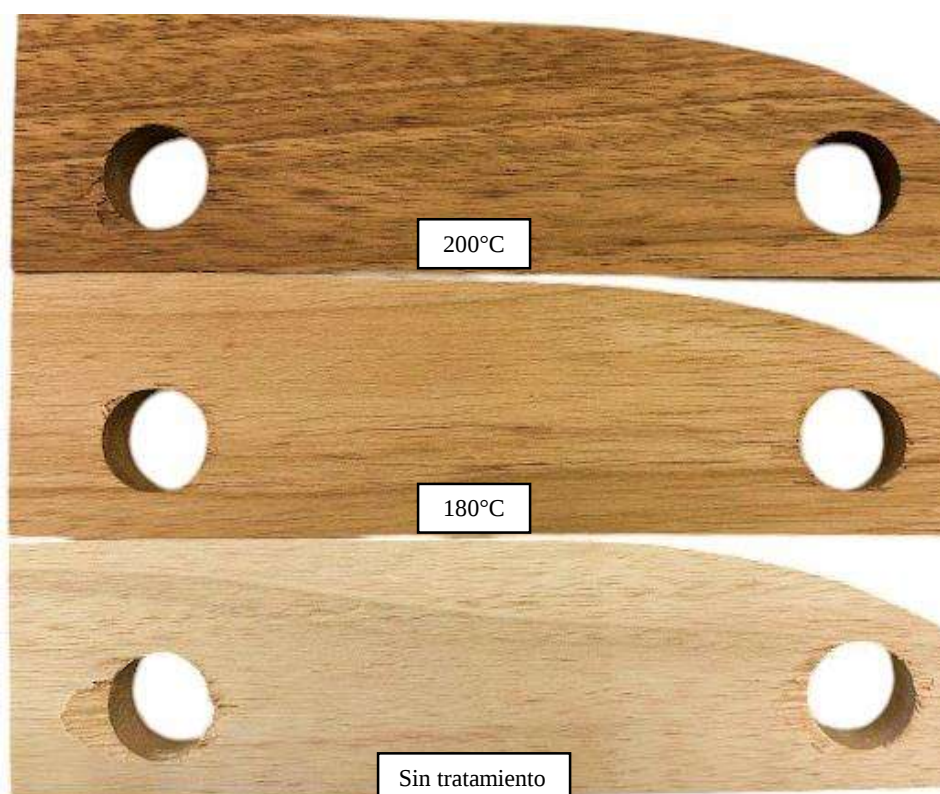


Figura 21. Probetas provenientes del ensayo de taladrado, muestran orificios de salida.

En la figura 22, se muestran los orificios de entrada con un perfil limpio, teniendo un excelente acabado en la perforación inicial y durante la perforación de las piezas de madera a excepción de la salida de la broca.

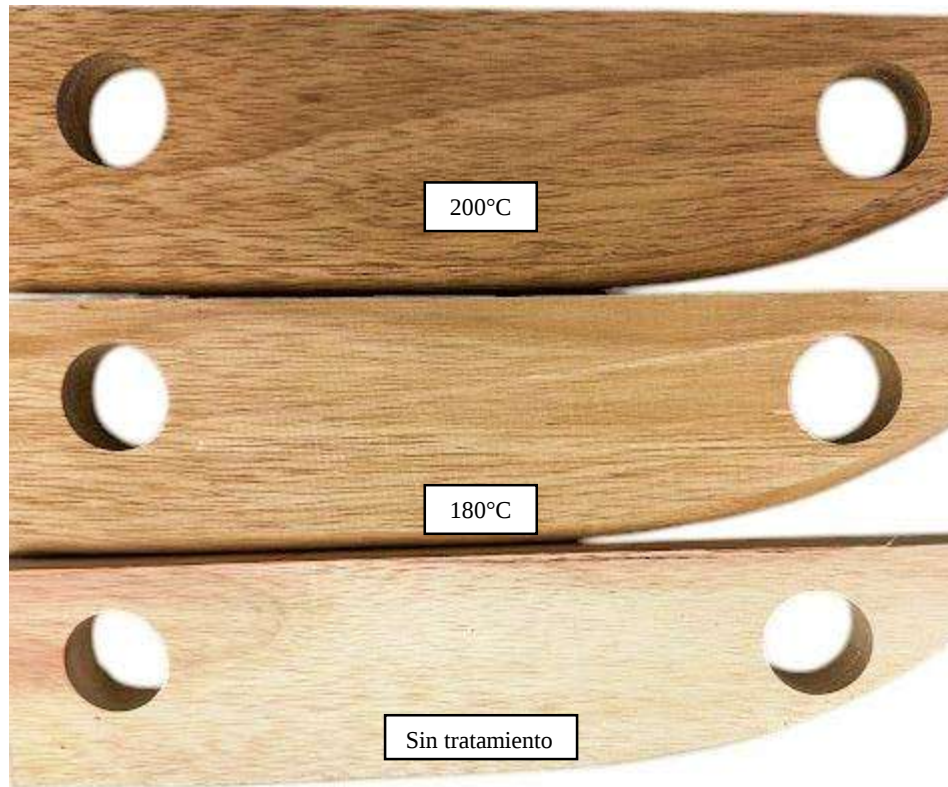


Figura 22. Probetas de ensayo de taladrado, muestran orificios de entrada.

8.4. Moldurado de madera con y sin tratamiento térmico

En la tabla 7, se muestra los resultados de la evaluación de los ensayos de moldurado. El defecto más frecuente fue, el grano astillado presente en los extremos de las piezas de madera, con la presencia de pequeñas astillas como se muestra en la figura 23. Las astillas resultantes pueden ser eliminadas con una lija. Así que, no es tan severo el defecto del moldurado ya que el contorno de la pieza está en excelente estado.

Tabla 7: Resultados de moldurado de probetas

R.P.M.	Tiempo de corte (s)	Velocidad de alimentación (m/min)	Tratamiento	E + B %	Grado	Clasificación ASTM D 1666-22	DMF
8000	8.5	2.5	Sin tratamiento	85.7	2	Buena	Astillado
			180°C 2h	100	1	Excelente	Astillado
			200°C 2h	100	1	Excelente	Astillado

DMF: defecto más frecuente E + B %: porcentaje de piezas excelentes y buenas R.P.M: Revoluciones por minuto.

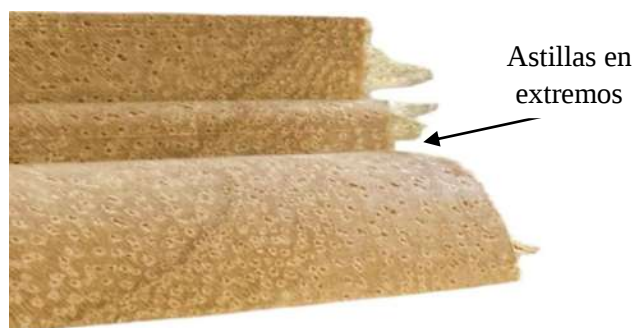


Figura 23. Probeta de moldurado con presencia del defecto más frecuente en este tipo de ensayo.

En la figura 24, se muestran algunas de las probetas resultantes en el proceso de moldurado. Al evaluar los ensayos, se observó que se presentó una pequeña mejora en el acabado de la madera termotratada, en comparación con la madera no tratada. Por lo que, los tratamientos térmicos no afectaron negativamente el proceso del moldurado de la madera.

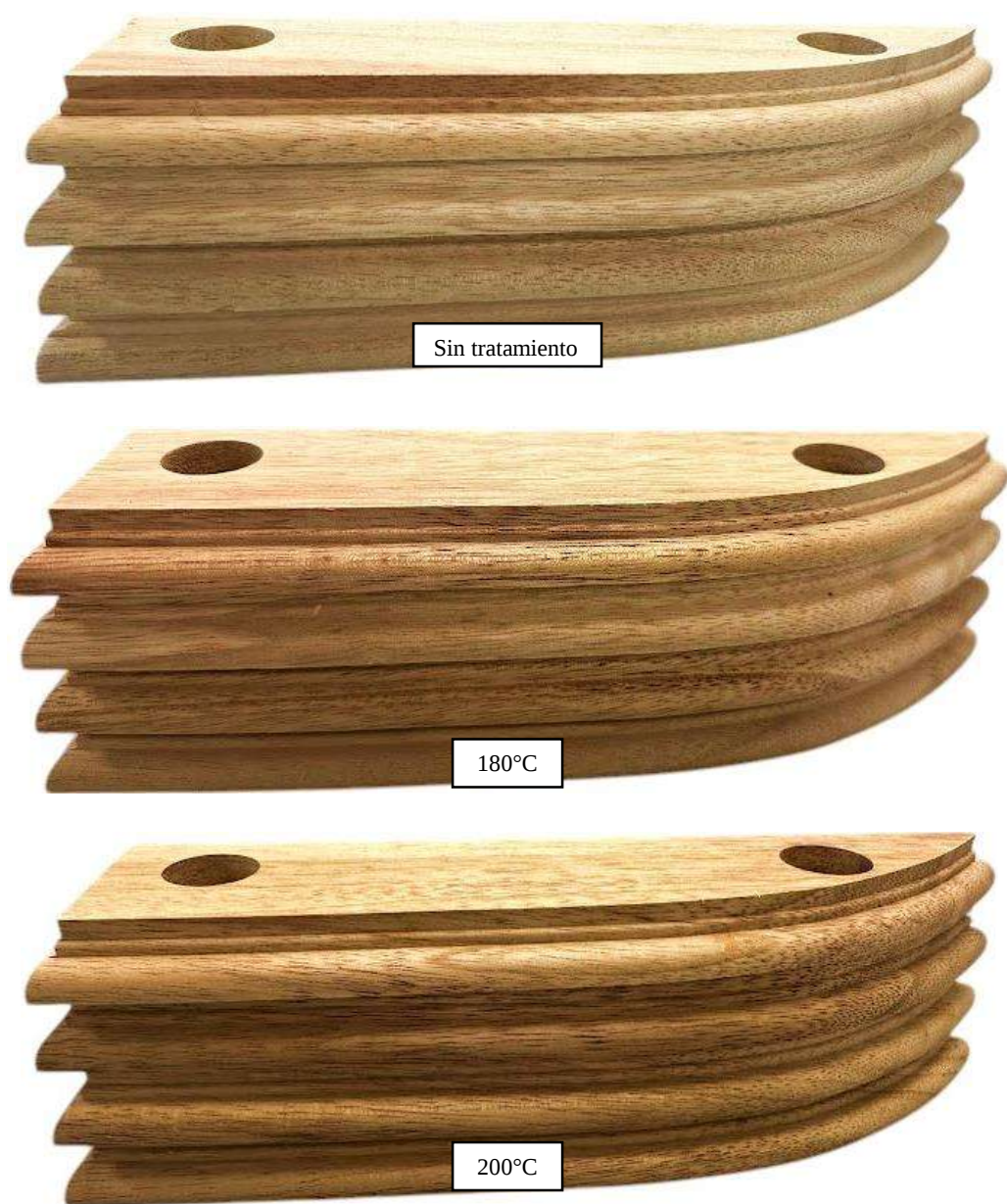


Figura 24. Probetas de *A. fraxinifolius*, resultantes del proceso de moldurado.

8.5. Tomografía de la madera *A. fraxinifolius* con y sin tratamiento térmico

En la figura 25, se presenta las imágenes en 2D obtenidas por tomografía de rayos X y tratadas mediante el software Avizo, de la madera *A. fraxinifolius*, sin tratamiento térmico. Se logra visualizar los principales elementos constitutivos del tejido leñoso. Se muestra el orificio de un elemento de vaso el cual en la periferia del elemento hay presencia de parénquima leñoso, en el interior hay pequeñas inclusiones de sustancias, las cuales son almidones similares a los reportados por Purkayastha (1999). (Purkayastha, 1999).

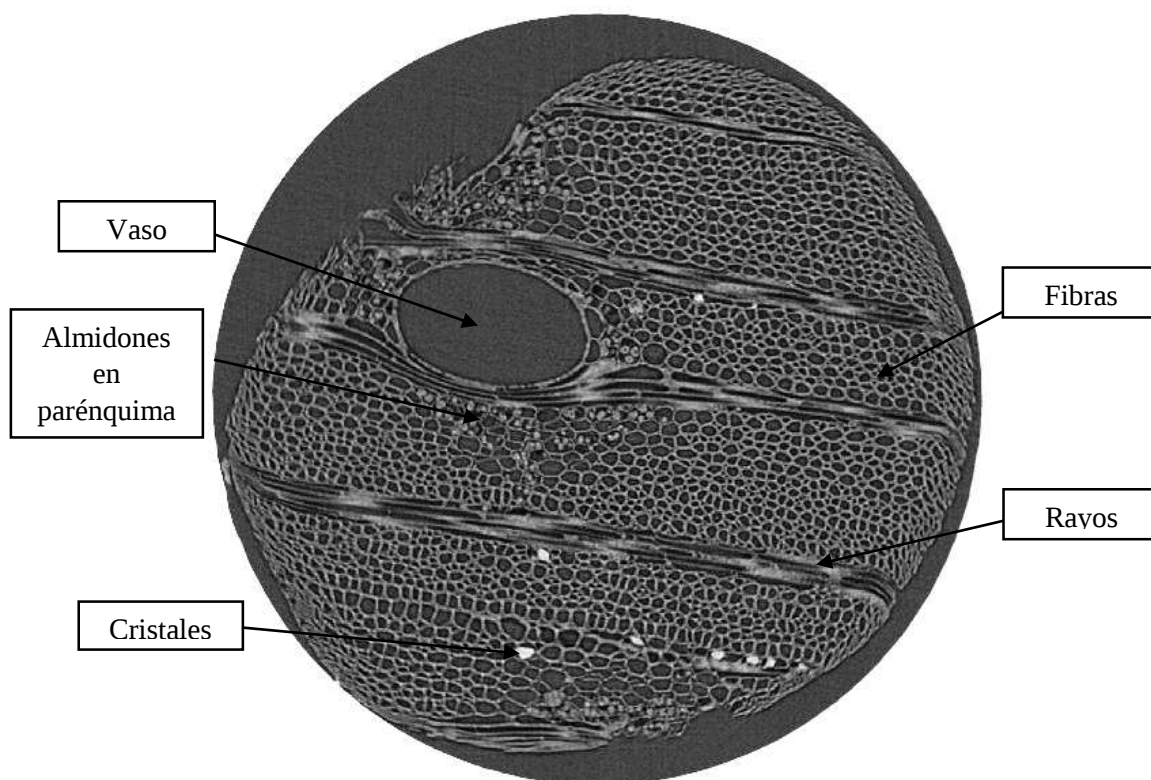


Figura 25. Corte transversal de la madera sin tratamiento, donde se observan fibras, rayos, un poro y también pequeñas inclusiones en el parénquima radial y axial.

En la figura 26, se muestran los cortes transversales de la madera de cedro rosado sin tratamiento, a 180 y 200°C a 2h en los que se destaca el tamaño de los lúmenes de las fibras, encontrándose de mayor amplitud las fibras de la madera sin tratamiento seguido de las de 180 y 200°C respectivamente, debido a la contracción de la madera por pérdida de humedad por la aplicación de temperatura.

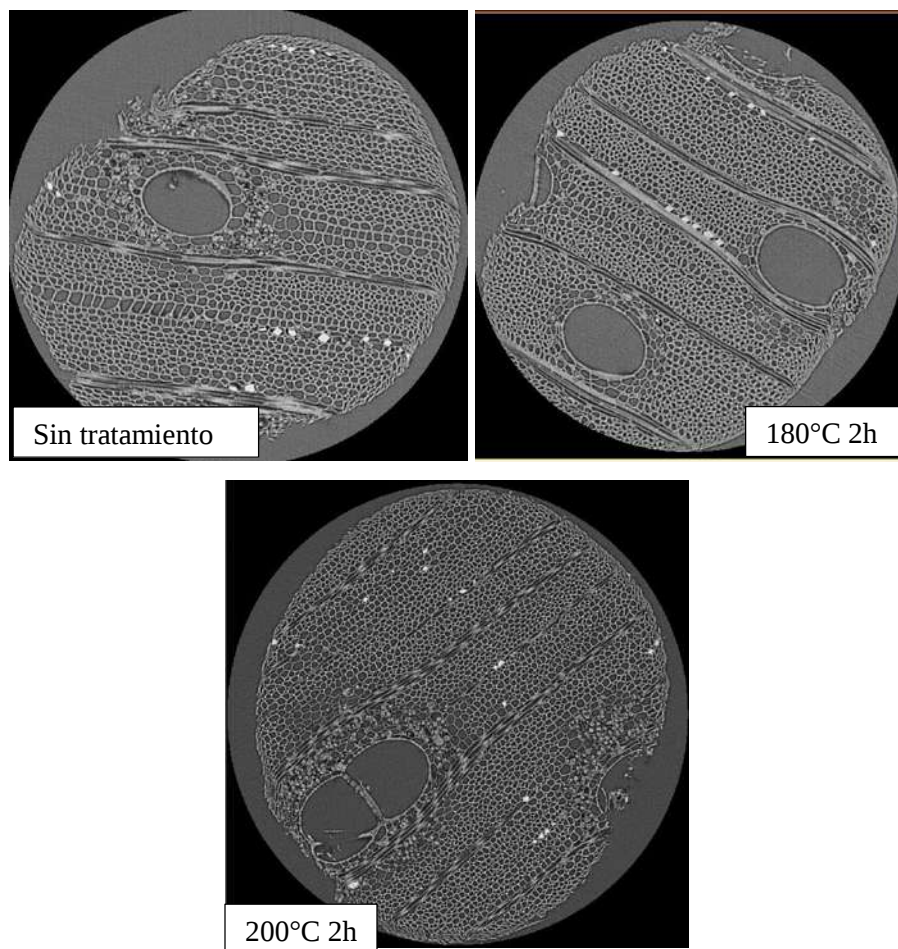


Figura 26. Vistas transversales de *A. fraxinifolius* mediante tomografía de rayos X, con y sin tratamiento térmico

La figura 27, presenta las imágenes en 2D obtenidas por tomografía de rayos X de la madera *A. fraxinifolius*, en corte radial y tangencial sin tratamiento térmico. Se logra visualizar los principales elementos constitutivos del tejido leñoso.

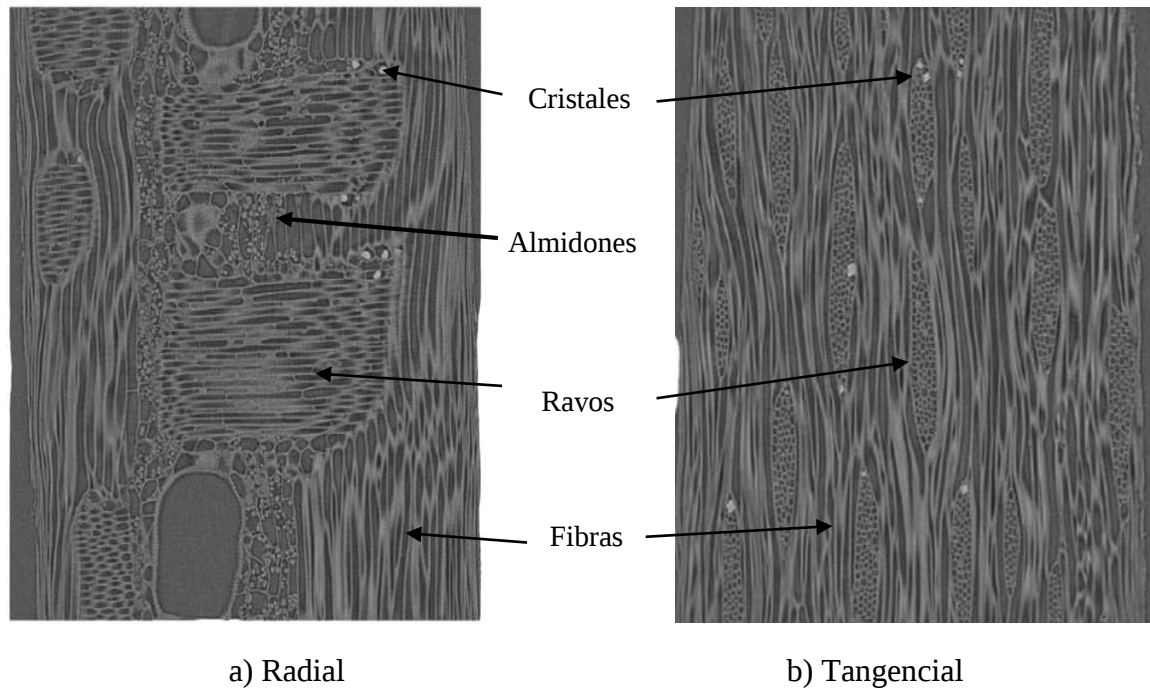
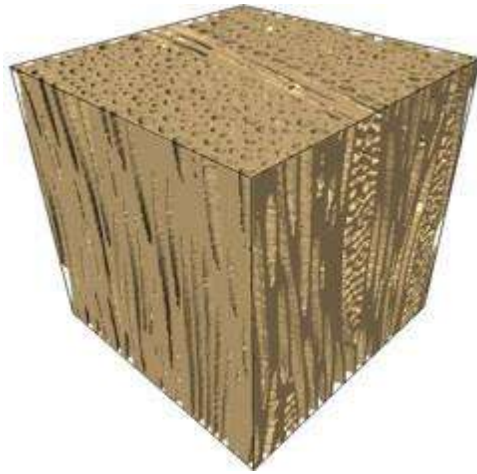


Figura 27. Cortes longitudinales de la madera de *A. fraxinifolius*.

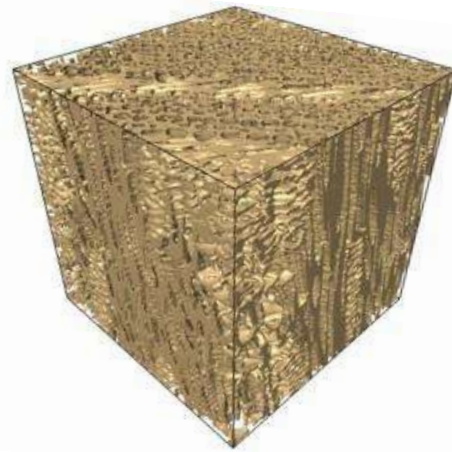
En la figura 28, se presenta la reconstrucción 3D de la madera *A. fraxinifolius*, sin tratamiento térmico y con tratamiento a 180 y 200°C durante dos horas de exposición. A 200°C se observa una clara disminución del tejido leñoso.



Sin tratamiento térmico



180°C 2h



200°C 2h

Figura 28. Reconstrucción 3D de la madera de *A. fraxinifolius*, sin tratamiento térmico y con tratamiento a 180 y 200°C durante dos horas de exposición.

En la figura 29, se observa la interconectividad de los elementos celulares, representado por colores. En la madera sin tratamiento, se observa una mayor variedad de colores, donde existe mayor aislamiento de elementos, por el contrario, a 200°C ya prácticamente existe un solo color, donde la madera está muy dañada, los elementos pierden su forma original y aumenta la interconectividad. Al utilizar los datos arrojados por la tomografía para obtener el volumen ocupado por las fibras, se encontró para la madera sin tratamiento un 57%, para el tratamiento a 180°C un 50% y para el tratamiento a 200°C un 41%. Se observa

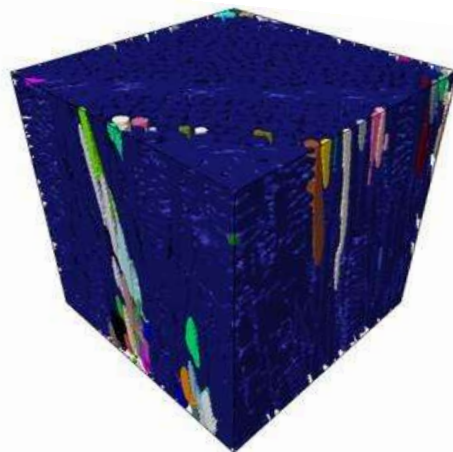
una disminución del volumen al aumentar la temperatura, lo que indica el efecto del tratamiento térmico.



Sin tratamiento térmico



180°C 2h



200°C 2h

Figura 29. Interconectividad de los elementos en la madera de *A. fraxinifolius*

En la figura 30, se presenta la reconstrucción 3D de la madera *A. fraxinifolius*, sin tratamiento térmico, se observa en el tejido leñoso la presencia de cristales resaltados con color rojo en la zona de los rayos. Estas inclusiones se observan de forma alineada con el sentido radial de los rayos, debido que la función de las células radiales es principalmente para el transporte de nutrientes del árbol. Probablemente estos cristales correspondan a algún mineral absorbido

por el árbol durante su desarrollo. Es por eso que, se encuentran mayormente en los extremos de forma axial en estas células.

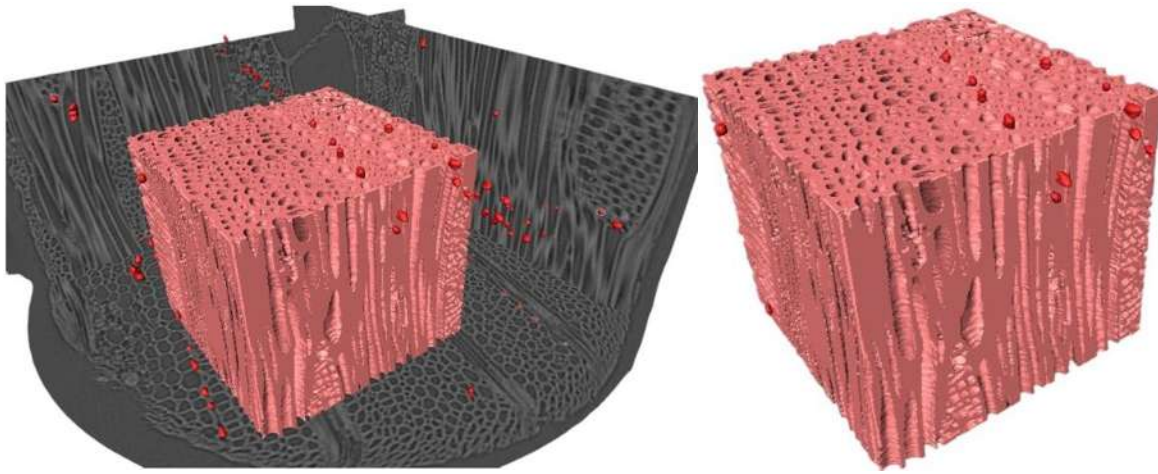
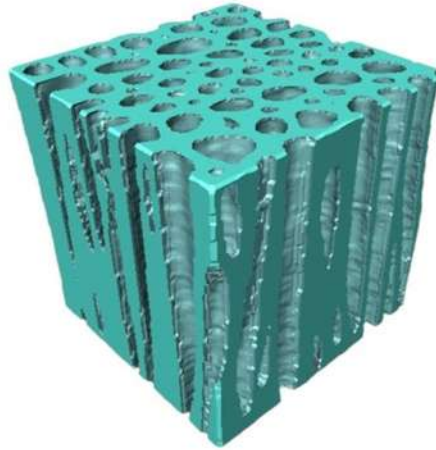
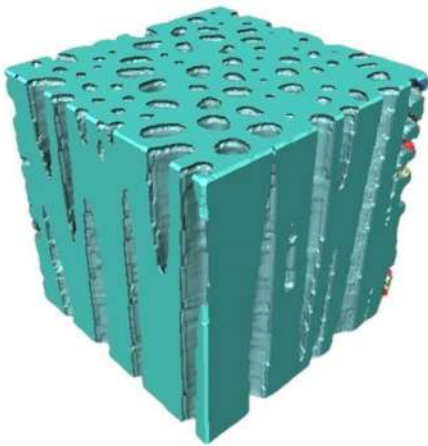


Figura 30. Reconstrucción 3D cristales en la madera de *A. fraxinifolius*.

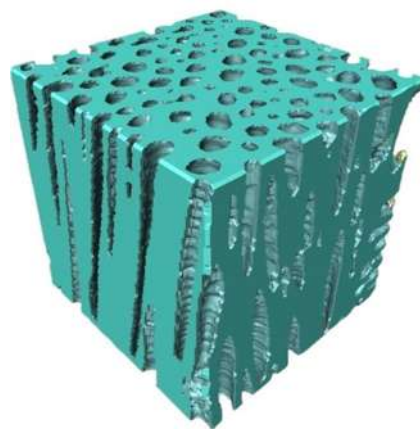
En la figura 31, se presenta la reconstrucción 3D de la madera *A. fraxinifolius*, sin tratamiento térmico y con tratamiento a 180 y 200°C durante dos horas de exposición. A 200°C se observa el aumento de densidad de fibras en el tejido leñoso debido a la compactación, derivado del termotratamiento. En 180°C hay una contracción de las fibras mostrando una reducción de los lúmenes, las paredes se observan de mayor grosor, ocasionado una densificación de la madera. La madera sin tratamiento tiene fibras con lúmenes grandes, también hay menos cantidad de fibras en la misma área, en comparación con la madera termotratada.



Sin tratamiento térmico



180°C 2h



200°C 2h

Figura 31. Reconstrucción 3D de la madera de *A. fraxinifolius*,

En la tabla 8, se presentan las mediciones obtenidas mediante el análisis de imágenes de tomografía de rayos X, por medio del software Avizo. Se tomó como referencia las mediciones obtenidas en un estudio anatómico de identificación de la madera de *A. fraxinifolius*. El espesor de pared en la madera sin tratamiento es muy similar a la media de 2.8 μm de referencia dando 2.6 μm en las medidas obtenidas mediante el análisis tomográfico. Las medidas obtenidas para la madera termotratada a 180°C dio una media de 3.8 μm en comparación con la madera sin tratamiento existe un engrosamiento de pared 1.2 μm . lo anterior se puede atribuir a la densificación de la madera por el efecto del

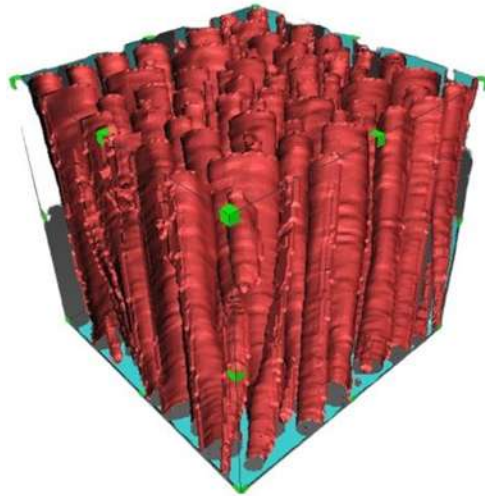
termotratamiento, como se reporta en estudios realizados por Oliveira, (2022) y Dutt, (2024).

En el espesor de las fibras de la madera termotratada a 200°C hay una contracción de la fibra, dando una media de 2.9 µm, comparada con la medición de referencia es muy similar teniendo muy poca variación 0.1 µm. En contra parte con la media del espesor de pared de la madera a 180°C, hay una diferencia de grosor en la pared de 0.9 µm. En cambio, la pared de la fibra de la madera sin tratamiento y la de 200°C tienen una diferencia de 0.3 µm.

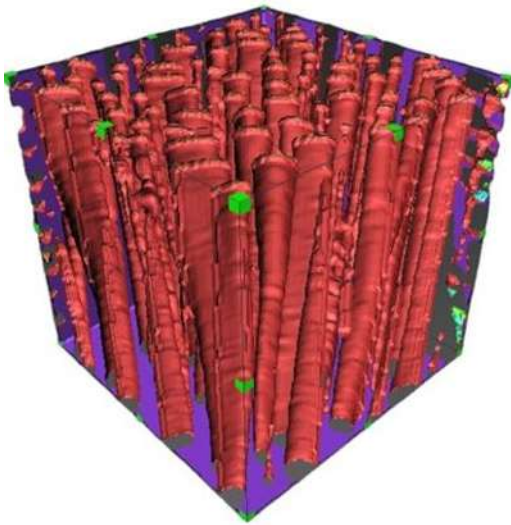
Tabla 8. Espesor de pared de las fibras en madera de *A. fraxinifolius*

	Referencia	Sin tratamiento	180 °C a 2h	200°C a 2h
	(µm)	(µm)	(µm)	(µm)
Media	2.84	2.62	3.78	2.86
Máximo	6.12	7	9	10
Mínimo	1.22	1	1	1
Moda	2.45	3	3	3

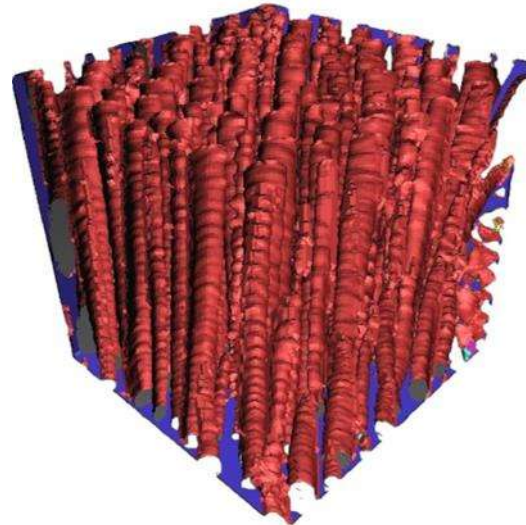
En la figura 32, se observa las cavidades de las fibras, para cada uno de los tratamientos, en las fibras sin tratamiento se nota que son más amplios los lúmenes y se observa menor cantidad de elementos. En los tratamientos a 180 y 200°C se observa una contracción de los lúmenes y mayor densidad de fibras, el aumento de la temperatura, de nota el efecto de contracción por la acción del tratamiento térmico. También, en las cavidades de las fibras de la madera a 200°C, se observa menor uniformidad en la superficie en el interior de las fibras. Lo anterior es ocasionado por la acción de la temperatura en la madera.



Sin tratamiento térmico



180°C 2h



200°C 2h

Figura 32. Reconstrucción de las cavidades de las fibras de la madera de *A. fraxinifolius*

En la tabla 9, se presentan las mediciones obtenidas mediante el análisis de imágenes de tomografía de rayos X. El diámetro de los lúmenes en la madera sin tratamiento es muy similar a la media de referencia 16.2µm obteniendo 16.4 µm. la medida obtenida para la madera termotratada a 180°C dio una media de 15.1µm en comparación con la madera sin tratamiento hay una ligera contracción y reducción de lumen. Lo anterior, se puede atribuir a el efecto del termotratamiento, como se reporta en estudios realizados por Oliveira, 2022 y Dutt, 2024.

En el diametro de los lumenes de la madera termotratada a 200°C hay una contracción de la fibra, dando una media de 14.3 μm , comparada con la medición de referencia hay una diferencia de 1.93 μm . En contra parte con la media del espesor de pared de la madera a 180 °C, hay una diferencia de 0.8 μm . En cambio, el lumen de madera sin tratamiento y la de 200°C tienen una diferencia de 2.1 μm . Lo anterior confirma que debido a la aplicación de temperetarura en la madera reduce el tamaño de los lúmenes.

Tabla 9. Diámetros de lúmenes de las fibras en madera de *A. fraxinifolius*

Diámetro de lumen				
	Referencia (μm)	Sin tratamiento (μm)	180 °C 2h (μm)	200°C 2h (μm)
Media	16.23	16.4	15.1	14.3
Máximo	29.4	28	26	25
Mínimo	7.35	7	7	7
Moda	14.7	14	14	14

9. CONCLUSIONES

La madera de *A. fraxinifolius* es fácil de trabajar con herramientas mecánicas. Se reporta una buena capacidad para ser cortada, cepillada, lijada, taladrada y moldurada. Presenta una baja tendencia a astillarse por efecto de termotratamiento.

El maquinado de la madera de *A. fraxinifolius* con termotratamiento, se vio mejorado en comparación de la madera sin tratamiento, obteniendo mejores resultados, de acuerdo a las evaluaciones con los parámetros de norma ASTM D 1666 – 22 y a las mediciones de áreas con defectos presentes, evaluadas mediante el análisis de imágenes por el software ImageJ.

En el cepillado se obtuvo mejores acabados en las superficies de la madera termotratada. También hubo una disminución de área afectada con defectos en el maquinado.

El lijado de la madera termotratada presento, superficies más lisas y tersas en comparación con la madera no tratada, para los granos 80 100 120. Siendo en los granos 100 y 120 los que dieron mejor resultados en las superficies lijados dejando un buen acabado, tanto en madera a 180 y 200°C a 2h.

En el ensayo de taladrado los resultados fueron positivos ya que se lograron perforaciones limpias a la entrada y en el interior de la madera. Sin embargo en la salida hubo presencia de defectos con desprendimiento de astillas, siendo más severos los de madera sin tratamiento.

El moldurado en la madera de *A. fraxinifolius* presento excelentes resultados dando perfiles con buen acabado en las superficies, tanto madera tratada como madera sin tratamiento, pero presento pequeñas astillas en los extremos, con mayor presencia en madera sin tratamiento.

El termotratamiento modifico la coloración de la madera, siendo de tonos más oscuros al aumentar la temperatura en los tratamientos térmicos.

La tomografía computarizada de rayos X logro dar resultados tanto cualitativos como cuantitativos del comportamiento de la madera de *A. fraxinifolius* sin tratamiento y termotratada. Se logró visualizar los cambios en la estructura conforme a la aplicación de los termotratamientos establecidos en la investigación. También se midieron espesor de pared y diámetro de lúmenes en las fibras de la madera. Los datos obtenidos fueron comparables con un estudio anatómico de la madera tradicional.

El termotrataamiento modifico la estructura de la madera de *A. fraxinifolius*. Los elementos constitutivos como fibras, vasos, rayos y parénquima tuvieron variaciones en medidas, siendo más apreciables estos cambios en las fibras. Se presentó una contracción, lo cual provoco que los lúmenes se redujeran en diámetro. Las paredes aumentaron de espesor a 180°C a 2h, con poca variación de espesor entre la madera a 200°C a 2h en comparación con la madera sin tratamiento.

La investigación sobre el termotrataamiento de la madera de cedro rosado es importante no solo para la industria maderera, sino también para la conservación de los recursos forestales. Al mejorar las propiedades de la madera de rápido crecimiento, se puede fomentar su uso en una variedad de aplicaciones, reduciendo la presión sobre las especies de crecimiento más lento y contribuyendo a la gestión sostenible de los bosques. Además, el conocimiento generado por estos estudios puede aplicarse a otras especies de madera, ampliando el alcance de las prácticas de tratamiento térmico en la industria.

En el contexto de la transformación y aprovechamiento de la madera proveniente de PFC, es fundamental realizar un análisis exhaustivo que incluya la evaluación de la microestructura antes y después del termotrataamiento. Esto permitirá optimizar los procesos de maquinado para obtener productos de madera de alta calidad, manteniendo al mismo tiempo prácticas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. La investigación y el desarrollo en este campo contribuyen significativamente a la industria maderera, promoviendo el uso eficiente de recursos y la innovación en técnicas de procesamiento de la madera.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, R. M. (2007). *MAQUINADO DE LA MADERA DE Acrocarpus fraxinifolius Wigh & Arn, PROVENIENTE DE PLANTACIONES DE LA SIERRA NORTE DE PUEBLA*". Chapingo, Texcoco, Estado de México.: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES.
- Ávila Calderón, L. E., Herrera Ferreyra, M. A., & Raya González, D. (2012). *Preservación de la Madera en México*. Morelia, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Ballesteros-Cánovas, J. A., Guardiola-Albert, C., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., Rodríguez-Morata, C., & Hesse, S. (2013). Aplicación de la tomografía axial computerizada (TAC) para el análisis de la estructura interna de árboles afectados por avenidas torrenciales. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 2-10.
- Bhat, K. M. (2004). Influence of wood traits on machinability of *Acrocarpus fraxinifolius*. *Wood and Fiber Science*, 36 (2), 182-190.
- Boonstra, M. J. (2007). Chemical analysis of heat-treated softwoods. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 204-211.
- Brodersen, C. (2013). Visualizing wood anatomy in three dimensions with high-resolution X-ray micro-tomography (MCT) - A review. *IAWA Journal.*, 408-424.
- Caeiro, J. R.-C. (2015). *Caracterización no destructiva de biomateriales mediante microtomografía computarizada*. Rede Galega de Biomateriais.
- Dhamodaran, T. K. (1980). Physical and mechanical properties of *Acrocarpus fraxinifolius*. *Indian Academy of Wood Science*, 45-50.
- Dutt, B. &. (2024). Optimizing physical and mechanical attributes of *Acrocarpus fraxinifolius* wood via heat treatment. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 260-267.
- Elékou, E. A. (2019). *Efecto del termotratamiento en aceite en las propiedades físicas y mecánicas de la madera Acrocarpus fraxinifolius*. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México: División de Posgrado Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera. Recuperado el 28 de Mayo de 2022, de http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/1468/1/FITECM-A-M-2019-0600.pdf
- Esteves, B., & Pereira, H. (2009). Thermal Modification of Wood: Research and Development. *Wood Science and Technology*, 55-73.
- FAO. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 – Principales resultados*. ROMA: FAO.
- FAO. (2021). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 - Informe principal*. Roma: FAO.
- Franz F. P. Kollmann, W. A. (1968). *Principles of Wood Science and Technology*. Berlin: Springer
Berlín, Heidelberg.

- Gerencia de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales, C. (2020). *Superficie, beneficiarios y apoyos económicos para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales por especie utilizada*. México: Badesniarn, SEMARNAT.
- Herrer, B. &. (2011). X-ray microtomography: Characterisation of structures and defect analysis. In *Fabrication and Characterization in the Micro-Nano Range :New Trends for Two nd Three Dimensional Structures. (Advanced Structured Materials; Vol. 10)*, 119-149.
- Hill, C. &. (2021). Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science.*, 56.
- Hori, N. e. (2009). Application of X-ray tomography to evaluate the relationship between the internal structure and mechanical properties of wood. *Journal of Wood Science*, 417-423.
- Kawai, S. e. (2014). Three-dimensional X-ray tomography imaging of wood microstructure . *Wood Science and Technology*, 607-619.
- Kondas, S. (1981). *Acrocarpus fraxinifolius* Wight ex Arn. *Indian Forester*, 107 (1), 27-34.
- Kranitz, K. &.-T. (2016). Effects of aging on wood: a literature review. *Wood Science and Technology*, 7-22.
- Kubojima, Y. e. (2007). Investigation of moisture distribution in wood by X-ray tomography. *Wood Research*, 1-8.
- Lesar, B. e. (2005). X-ray computed tomography as a method to assess the internal structure of wood. *Wood and Fiber Science*, 639-649.
- Lopez de Roma, A. (1981). Protección de la madera. *Revista AITIM, Asociación de investigación técnica de las industrias de la madera*, 105, 11-27.
- Manh Tuong, V. &. (2011). Changes caused by heat treatment in chemical composition and some physical properties of acacia hybrid sapwood. *Holzforschung*, vol. 65 67-72.
- Mayo, S., Chen, F., & Evans, R. (2010). Micron-scale 3D imaging of wood and plant microstructure using high-resolution X-ray phase-contrast microtomography. *Journal of structural biology*, 182-8.
- McGovern, M., Senalik, A., Chen, G., Beal, F. C., & Rei, H. (2010). Detection and assessment of wood decay using X-ray computer tomography. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 7647 76474B.
- Moretón Fernandez, Á. (2016). *Estudio de la fotoluminiscencia en onleas y células solares de Silicio*. España: Universidad de Valladolid.
- Moura, L. F., Brito, . J., Nolasco, A. M., & Uliana, L. R. (2011). Effect of thermal rectification on machinability of *Eucalyptus grandis* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* woods. *European Journal of Wood and Wood Products*, 641-648.
- Oliveira, C. &. (2022). Characterization of *Acrocarpus fraxinifolius* wood submitted to heat treatment. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 24. 1-12.
- Orwa, C. M. (2009). *Agroforestree Database: A tree reference and selection guide version 4.0*. Kenya: Word Agroforestry Centre.

- Pereira, D. N. (2004). Tomografía Axial Computada. *XIII Seminario de Ingeniería biomédica*. (págs. 1-6). Universidad de la República Oriental del Uruguay.
- Purkayastha, S. K. (1999). *A manual of Indian Timbers*. Calcuta, India: Sribhumi Publishing Company.
- Rawat, Rajput, & Pant. (1974). *Studies on working qualities of Indian timbers - II* (Vol. 26). Dehra Dun, India: Holzforschung and Holzverwertung.
- Ryynänen, J. e. (2010). Detection of internal defects in wood using X-ray tomography. *European Journal of Wood and Wood Products*, 295-300.
- Semarnat, C. N. (2014). *SUPERFICIE PLANTADA, VERIFICADA Y PAGADA DE PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES*. México: Coordinación General de Producción y Productividad.
- Silva, M. F. (2023). Determination of Physical and Mechanical Properties of Toona Ciliata and Acrocarpus Fraxinifolius Woods from São Paulo State. *TreeDimensional*, 1-6.
- Simpson, W. T. (1999). *Wood handbook: Wood as an engineering material*. USDA Forest Service: Forest Products Laboratory.
- Teramoto, M. e. (2012). X-ray CT observation of wood deformation under mechanical loading. *Journal of Wood Science*, 459-466.
- Tjeerdsma, B. B. (1998). Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz als Roh-und Werkstoff*, Vol. 56, 149–153.
- Vignote Peña, S., Jiménez Peris, F. j., Morales Méndez, E., & Gómez Pérez, C. (2000). *Tecnología de la madera en la construcción arquitectónica*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Vignote, P. S., & Martinez, R. I. (2006). *Tecnología de la madera*. Madrid: Grupo Mundi-Prensa.
- Yonggun Park, Y. H.-S.-M.-M.-D. (2024). Correlation Analysis between Mass Loss of Wood due to Thermal Modification and Equilibrium Moisture Content of Thermally Modified Wood. *BioResources*, 1283-1294.
- Zavala Z., D. (1976). *Características de maquinado de seis especies maderables*. Chapingo, Texcoco, Estado de México: Unidad de Enseñanza e Investigación y Servicio en Departamento de Bosques.
- Zavala, Z., & Vázquez, R. D. (2001). Determinación de las características de maquinado de la madera de 34 especies tropicales. *Revista chapingo, serie ciencias forestales y del ambiente.*, 169-183.

Isaac Reginaldo Coss Manzur

ESTUDIO TOMOGRAGICO Y MAQUINIZADO DE MADERA TERMOTRATADA DE *Acrocarpus fraxinifolius*.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:420781572

Fecha de entrega

14 ene 2025, 8:42 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

14 ene 2025, 8:47 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

ESTUDIO TOMOGRAGICO Y MAQUINIZADO DE MADERA TERMOTRATADA DE *Acrocarpus fraxinifolius*....pdf

Tamaño de archivo

2.4 MB

59 Páginas

13,085 Palabras

72,775 Caracteres

22% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 22%  Fuentes de Internet
- 6%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en ciencias y tecnología de la madera	
Título del trabajo	ESTUDIO TOMOGRAFICO Y MAQUINADO DE MADERA TERMOTRATADA DE <i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Isaac Reginaldo Coss Manzur	1175678j@umich.mx
Director	Raúl Espinoza Herrera	raul.espinoza@umich.mx
Codirector	Luis Rafael Olmos Navarrete	luis.olmos@umich.mx
Coordinador del programa	Abril Munro Rojas	abril.munro@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Si	Búsqueda de sinónimos

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Si	Traducción de palabras
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	Si	Imagen de un cilíndrico de madera
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	
Lugar y fecha	Ciudad Hidalgo, Michoacán 13 de enero 2025