



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

Posgrado en Ciencias y Tecnología de la Madera

**Análisis microestructural de madera de *Picea abies*
basado en su comportamiento vibratorio**

**Tesis que para obtener el grado de Maestría en Ciencias y
Tecnología de la Madera**

presenta:

Lic. Dana Sofía Limón Cordero

Director: Dr. Salomón Ramiro Vásquez García

Co-Director: Dr. Jesús Alejandro Torres Torres

Morelia, Michoacán.

Agosto 2025

*“Si quieres encontrar los secretos del universo, piensa en términos de energía,
frecuencia y vibración”.
Nicola Tesla.*

Agradecimientos♡

Agradezco especialmente a mi familia. Gracias a mi mamá por su amor y apoyo incondicional, por ser el vínculo más seguro que tengo; a mis hermanos Nemo, Tesy y Teco, y a mi padrastro Bob, por estar presentes en mi vida y hacerme sentir su cariño sin importar la distancia. Gracias porque hemos evolucionado, juntos e individualmente, me enorgullece lo feliz que soy cuando estoy con ustedes. Verlos en las vacaciones es una recarga de energía y amor que me ayuda a sobrellevar los momentos difíciles, incluso cuando no los tengo cerca.

A mis amigos y compañeros Jatziri, Dani, Wendy, Oli, Wendy Lizeth, Diana, Alejandro, Amaury, Elizabeth, Óscar, Carlos y Brian: gracias por brindarme su amistad, por escucharme y por acompañarme especialmente durante esta etapa de mi vida.

A mis asesores, les agradezco el apoyo y el compromiso que dedicaron al trabajo que mi proyecto les requirió. Gracias al Dr. Salomón Vásquez por confiar en mí y brindarme su completo apoyo para desarrollar mi proyecto de tesis.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la UMSNH por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría. Asimismo, agradezco a la Escuela de Landería del INBAL y a la Facultad de Ingeniería Química de la UMSNH por facilitarme la realización de estos estudios dentro de sus instalaciones. Agradezco también a la SECIHTI por haberme brindado la beca de maestría.

Gracias a Ansys, Inc. por ofrecer la versión gratuita ANSYS® Student, la cual fue utilizada para realizar las simulaciones presentadas en esta tesis.

Resumen

La madera de *Picea abies* se utiliza ampliamente en la fabricación de instrumentos musicales por sus propiedades físico-mecánicas, determinadas en parte por su microestructura anisotrópica compuesta por madera temprana y tardía. Esta investigación analiza cómo estas variaciones microestructurales afectan su comportamiento vibratorio, mediante un modelo computacional calibrado experimentalmente. El modelo genera propiedades elásticas representativas que se integran en simulaciones por elementos finitos en ANSYS, permitiendo evaluar placas de madera con diferentes configuraciones microestructurales. La caracterización experimental incluyó mediciones de ancho de anillos, SEM, DRX, TGA/DTG y medición de ángulo de contacto, con el fin de obtener parámetros estructurales y térmicos utilizados para ajustar el modelo. A partir de las simulaciones, se determinaron frecuencias naturales y modos de vibración, observándose discrepancias asociadas a las propiedades diferenciadas de cada tipo de madera. Este enfoque permite vincular la microestructura con el desempeño vibratorio.

Palabras clave: madera temprana, madera tardía, microestructura, simulaciones, propiedades elásticas.

Abstract

Picea abies wood is widely used in the construction of musical instruments due to its physical and mechanical properties, which are partly determined by its anisotropic microstructure composed of earlywood and latewood. This study analyzes how these microstructural variations influence its vibrational behavior through a computational model calibrated with experimental data. The model generates representative elastic properties that are integrated into finite element simulations in ANSYS, allowing the evaluation of wood plates with different microstructural configurations. Experimental characterization included ring width measurements, SEM, XRD, TGA/DTG, and contact angle analysis to obtain structural and thermal parameters used to adjust the model. From the simulations, natural frequencies and vibration modes were determined, revealing discrepancies associated with the distinct properties of each wood type. This approach enables the correlation between microstructure and vibrational performance.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	IV
Lista de figuras	IX
1. Introducción	XIII
1.1. Justificación	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Objetivo	4
1.3.1. Objetivos específicos	4
1.4. Hipótesis	4
2. Marco Teórico	6
2.1. La madera como material para el violín	6
2.1.1. Anatomía del pinabete	8
2.1.2. Crecimiento del árbol: desarrollo de anillos de crecimiento	8
2.2. Técnicas de caracterización	9
2.3. Fundamentos del análisis modal	11
2.3.1. Valores y vectores propios	13
2.3.2. Propiedades de la madera involucradas en la ecuación de movimiento estructural	13
2.3.3. Criterio MAC (Modal Assurance Criterion)	15
3. Metodología	17
3.1. Maderas analizadas	17
3.2. Caracterización de madera de <i>Picea abies</i>	19
3.2.1. Sobre propiedades superficiales y químicas	19
3.2.2. Características de la madera requeridas para una análisis vibratorio	22
3.3. Modelo de generación de maderas y cálculo de sus vibraciones	30
3.3.1. Generación de los datos de las maderas: algoritmo de Scilab	30
3.3.2. Análisis Modal: algoritmo de ANSYS	38
3.4. Calibración del modelo	53
3.5. Modal Assurance Criterion como herramienta de análisis	62

4. Resultados y discusiones	64
4.1. Análisis superficial y químico	64
4.2. Características de las maderas creadas por el modelo de simulación .	67
4.3. Interpretación y análisis de gráficos MAC	71
4.4. Vibraciones de maderas con diferente diferencial de densidad	75
4.4.1. Análisis MAC diferencial 140	75
4.4.2. Análisis MAC diferencial 410	75
4.5. Vibraciones de maderas con diferente ancho de anillos	78
4.5.1. Análisis MAC anillos abiertos	78
4.5.2. Análisis MAC anillos estrechos	78
4.6. Discusión	82
5. Conclusiones	85

Índice de figuras

2.1. Estructura jerárquica de la madera [Bucur, 2017].	6
2.2. Direcciones de la madera.	7
2.3. Formas modales de seis modos de un violín. C_1 (185 Hz): flexión uni- dimensional; A_0 (275 Hz): el aire entra y sale por las efes; C_2 (405 Hz): flexión bidimensional; T_1 (460 Hz): movimiento principalmente de la tapa; C_3 (530 Hz), C_4 (700 Hz): flexión bidimensional. [Fletcher and Rossing, 2012]	11
2.4. Primeros tres modos de vibración de una placa de madera de corte ra- dial. Cada modo está asociado principalmente a una propiedad elásti- ca: módulo de elasticidad longitudinal, módulo de elasticidad radial y módulo de corte longitudinal-radial. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS®</i> <i>Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	14
2.5. Ejemplo de gráfico MAC 2D [Pastor et al., 2012]	15
3.1. Probetas obtenidas del Laboratorio de acústica de la Escuela de Lau- dería del INBAL. A la izquierda probeta radial, a la derecha probeta longitudinal.	18
3.2. Microscópio electrónico de barrido.	19
3.3. Medición de ángulo de contacto sobre muestra de <i>Picea abies</i> con ayuda de un goniómetro.	20
3.4. Espectrofotómetro Perkin Elmer Spectrum 400.	20
3.5. Equipo STA 449, F3 Júpiter.	21
3.6. Difractómetro de Rayos X Bruker D8 Advance.	22
3.7. Fotografía del corte transversal de la probeta radial, obtenida me- diante el objetivo del microscopio estereoscópico.	23
3.8. Ajuste de escala del Software ImageJ para medición de anillos de crecimiento	24
3.9. Trazo sobre madera temprana de un anillo de crecimiento para reali- zar una medición	25
3.10. Esquema que muestra donde cada probeta fue sujeta y golpeada, y su posición respecto a la posición del microfono y el equipo de computo para la obtención de su frecuencia de resonancia.	27
3.11. Esquema de la vista superior del acomodo de la estructura en el arre- glo experimental utilizado para la visualización de un modo de vibra- ción.	28

3.12. A la izquierda, número total de volúmenes en los bloques antes de ser unidos. A la derecha, número total de volúmenes en los bloques después de ser unidos. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	47
3.13. Relación entre densidad y propiedades mecánicas de diferentes especies de maderas [Woodhouse, 2024].	54
3.14. Relación entre densidad y propiedades mecánicas en madera de <i>Picea abies</i> obtenida experimentalmente.	56
3.15. Mediciones de ancho de anillos para madera temprana y madera tardía de la probeta longitudinal.	57
3.16. Valores de relación: madera temprana/tardía, probeta longitudinal.	57
3.17. Mediciones de ancho de anillos para madera temprana y madera tardía de la probeta radial.	58
3.18. Valores de relación: madera temprana/tardía, probeta radial.	58
3.19. Datos de entrada del algoritmo para crear maderas siendo guardados y ejecutados en el programa Scilab.	60
3.20. Variable ordenada que contiene los datos de las maderas creadas por el algoritmo de Scilab.	60
4.1. Imágenes de SEM de la vista transversal de las probetas de madera de <i>Picea abies</i> . A la izquierda, probeta radial. A la derecha, probeta longitudinal.	65
4.2. Análisis FTIR de la madera de <i>Picea abies</i> .	65
4.3. Ángulo de contacto. a) madera tardía, ángulo promedio 81o b) madera temprana, ángulo promedio 74o	66
4.4. TGA y DTG de la madera de <i>Picea abies</i> en secciones temprana y tardía.	66
4.5. DRX de la madera de <i>Picea abies</i> .	67
4.6. Características microestructurales compartidas entre las maderas creadas utilizando el modelo de simulación calibrado.	69
4.7. A la izquierda, vista general de una madera creada por el modelo de simulación. A la derecha, acercamiento a cada una de las maderas creadas por el modelo de simulación. <i>Figura generada con ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	69
4.8. Ejemplo de gráfico MAC con datos que revelan comportamiento similar entre maderas analizadas.	72
4.9. Ejemplo de gráfico MAC con datos que muestran comportamiento similar y modos invertidos entre maderas analizadas.	72
4.10. (a) Modos de vibración con interferencia en ambas maderas. (b) Modos de vibración con interferencia en una sola madera. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	73
4.11. Ejemplo de gráfico MAC con datos que muestran comportamiento similar y modos con interferencia en las líneas nodales entre maderas analizadas.	74

4.12. Ejemplo de gráfico MAC con datos que muestran comportamiento contrastante y modos con interferencia en las líneas nodales entre maderas analizadas.	75
4.13. Análisis MAC dif 140	76
4.14. Análisis MAC dif 140	77
4.15. Análisis MAC dif 140	79
4.16. Análisis MAC dif 140	80
4.17. Modos con interferencia entre maderas con anillos estrechos. (a) Modo 274 de la madera anillos estrechos dif 140. (b) Modo 274 de la madera anillos estrechos dif 410. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	81
4.18. Zonas con mayor disparidad de comportamiento entre las maderas analizadas. a) A la izquierda: análisis MAC diferencial 140, a la derecha: frecuencias de resonancia respectivas. b) A la izquierda: análisis MAC diferencial 410, a la derecha: frecuencias de resonancia respectivas.	83
4.19. Zonas con mayor disparidad de comportamiento entre las maderas analizadas. c) A la izquierda: Análisis MAC anillos abiertos. A la derecha: frecuencias de resonancia respectivas d) A la izquierda: Análisis MAC anillos estrechos. A la derecha: frecuencias de resonancia respectivas.	84
5.1. Comparación entre la madera anillos estrechos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 140. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	97
5.2. Comparación entre la madera anillos estrechos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 140. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	98
5.3. Comparación entre la madera anillos estrechos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 140. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	99
5.4. Comparación entre la anillos abiertos dif 140 y madera anillos abiertos dif 410. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	100
5.5. Comparación entre la madera anillos estrechos dif 410 y la madera anillos abiertos dif 410. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	101
5.6. Comparación entre la madera anillos estrechos dif 410 y la madera anillos abiertos dif 410. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	102
5.7. Comparación entre la madera anillos estrechos dif 410 y la madera anillos abiertos dif 410. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	103
5.8. Comparación entre la madera anillos estrechos dif 410 y la madera anillos abiertos dif 410. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	104

5.9. Comparación entre la madera anillos estrechos dif 410 y la madera anillos abiertos dif 410. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	105
5.10. Comparación entre la madera anillos abiertos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 410. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	106
5.11. Comparación entre la madera anillos abiertos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 410. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	107
5.12. Comparación entre la madera anillos abiertos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 410. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	108
5.13. Comparación entre la madera anillos abiertos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 410. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	109
5.14. Comparación entre la madera anillos abiertos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 410. <i>Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.</i>	110

Capítulo 1

Introducción

El violín es uno de los instrumentos musicales más estudiados y apreciados en todo el mundo. Los instrumentos de la familia del violín se desarrollaron en Italia durante los siglos XVI y XVII, a partir de diversos instrumentos de cuerda frotada utilizados en Europa durante la Edad Media. En la actualidad, los lauderos continúan empleando los principios de construcción y las técnicas tradicionales establecidas por los antiguos constructores italianos.

Además de su valor artístico e histórico, la construcción del violín requiere un enfoque interdisciplinario que combina conocimientos empíricos y científicos. Este instrumento, más allá de su belleza estética, debe ser capaz de producir un sonido potente y de alta calidad tonal [Bucur, 2016]. Algunos autores dedicados al estudio del violín han señalado la necesidad de abordarlo desde una perspectiva multidisciplinaria, tanto por su impacto cultural y científico como por la complejidad de su análisis [Fritz and Dubois, 2014].

A lo largo de la historia, el funcionamiento del violín ha sido objeto de interpretaciones tanto desde el saber empírico de músicos y lauderos como desde la perspectiva científica. Sin embargo, debido a la complejidad de los fenómenos involucrados en la radiación sonora de los instrumentos, no siempre es sencillo comprender en profundidad su funcionamiento. El estudio acústico del violín requiere conocimientos sobre la dinámica de estructuras, así como sobre las propiedades de los materiales que lo componen.

Un factor clave que determina la calidad sonora de un violín es el comportamiento vibratorio del cuerpo o caja de resonancia, que consta de una placa superior (tapa), placa inferior (fondo). Este comportamiento está determinado principalmente por los movimientos acoplados de la tapa, el fondo y el aire contenido en su interior [Fletcher and Rossing, 2012]. De esta manera, las vibraciones provocadas a la caja de resonancia, al ejecutar el instrumento, provocan ondas que se propagan a través del aire hasta nuestros oídos.

Las propiedades acústicas de los instrumentos musicales están estrechamente ligadas a las propiedades mecánicas de los materiales con los que se construyen, ya que el sonido se genera a partir de las vibraciones del propio material. En el caso de la madera, las constantes elásticas como el módulo de Young, el módulo de corte y los coeficientes de Poisson están directamente relacionadas con la calidad sonora de un instrumento.

El violín, como la mayoría de los instrumentos musicales, es fabricado con materiales naturales, principalmente madera. Gracias a sus características físico-mecánicas particulares, la madera es el material preferido para una multitud de aplicaciones [Wegst, 2006]. Los antiguos lauderos, mediante ensayo y error, definieron qué especies eran más adecuadas para la construcción de instrumentos musicales. En el caso del violín, las maderas utilizadas para su construcción están estandarizadas, y se emplean especies específicas en cada parte del instrumento.

La madera es una estructura biológica compleja, compuesta por sustancias químicas y varios tipos de células que actúan en conjunto para satisfacer las necesidades de una planta viva. Las paredes celulares están formadas por microfibrillas de celulosa incrustadas en una matriz de lignina y hemicelulosa [Bucur, 2017]. Las variaciones en la composición y disposición de estos elementos determinan la estructura interna de la madera y, en consecuencia, su densidad y propiedades mecánicas. Estas son, precisamente, las propiedades más relevantes para la construcción de instrumentos de la familia del violín.

En particular, la madera de *Picea abies* es esencial para la fabricación de la tapa. Esta pieza, al formar parte de la caja de resonancia, influye directamente en la calidad tonal del instrumento. La *Picea abies* se ha establecido como la más óptima para la construcción de instrumentos debido a su alto coeficiente de radiación. Sin embargo, no todas las piezas de esta misma especie presentan las propiedades adecuadas para la construcción de instrumentos de alta calidad. Existe una gran variabilidad microestructural entre diferentes piezas de la misma especie, lo que provoca diferencias en el comportamiento vibratorio de cada instrumento y en consecuencia, en su calidad tonal.

En este trabajo, el estudio de la madera de *Picea abies* como un material de ingeniería resulta fundamental. Analizar su microestructura en relación con sus propiedades mecánicas permitirá comprender el comportamiento vibratorio característico del propio material. Este conocimiento no sólo es relevante para la selección de maderas y procesos de construcción en la laudería, sino que también contribuye a una comprensión más profunda del material, especialmente significativa en el estudio acústico del violín.

1.1. Justificación

Los estudios sobre la acústica del violín han demostrado que su calidad tonal depende tanto de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados como de la geometría del instrumento. Entre estos materiales, la madera de *Picea abies* ha sido ampliamente empleada debido a su favorable relación rigidez-densidad. Estas propiedades están estrechamente ligadas a su microestructura. Esta se caracteriza por un patrón alternante de madera temprana y tardía en anillos de crecimiento milimétricos, cuyas diferencias en densidad y módulo elástico generan un comportamiento vibratorio particular para cada pieza de madera. Comprender cómo esta microestructura influye en la respuesta vibratoria de la madera puede proporcionar criterios objetivos para la selección de maderas. La metodología innovadora de este análisis incorpora propiedades diferenciadas para madera temprana y tardía

en simulaciones por elementos finitos (FEM), lo que permite modelar con mayor precisión el comportamiento del material.

1.2. Antecedentes

Los violines han sido ampliamente estudiados desde enfoques históricos, culturales y científicos. Existe la creencia de que los antiguos violines italianos son los únicos capaces de producir el sonido perfecto y potente que caracteriza a estos instrumentos. Bajo la hipótesis de que el sonido de los violines antiguos es mejor que el de los contemporáneos debido a los años de secado de su madera y al tiempo de uso acumulado, [Fritz and Dubois, 2014] discute la presunta superioridad tonal de los violines italianos antiguos. En su análisis, examina diversos estudios que comparan violines antiguos y modernos, aplicando metodologías propias de la psicología contemporánea. La autora concluye que comprender mejor cómo los músicos evalúan la calidad de un instrumento es esencial para establecer parámetros físicos de calidad y proponer mejoras en el diseño y fabricación de instrumentos. Para ello, propone una colaboración multidisciplinaria entre ingenieros, psicólogos, lauderos y músicos.

Desde el punto de vista científico, un referente fundamental es el libro *The Physics of Musical Instruments* [Fletcher and Rossing, 2012], que explica el funcionamiento de diversos instrumentos musicales y los fenómenos físicos implicados en la producción del sonido. Entre los conceptos explicados destacan la calidad del sonido, la proyección, la respuesta en frecuencia y los modos normales de vibración..

Una característica notable de los violines es que, hasta la fecha, continúan construyéndose con los mismos tipos de materiales, en particular, la madera. Diversos textos especializados abordan en profundidad las características anatómicas de las distintas especies maderables. La constitución anatómica y estructural de la madera le confiere una amplia variedad de aplicaciones, en función de sus propiedades físicas y mecánicas. Por ello, el estudio de su anatomía constituye un punto de partida fundamental cuando se pretende analizar este tipo de material biológico. [Fengel et al., 1989], [Parham and Gray, 1984], [Diéguez Aranda et al., 2003],

[Harada and Côté, 1985], [Richter et al., 2004] Existen en el mundo cientos de especies maderables empleadas en la construcción de instrumentos musicales. [Wegst, 2006] sistematiza esta selección mediante gráficos de propiedades materiales, relacionando parámetros acústicos y usos musicales.

En las obras *Acoustics of Wood* [Bucur, 2017] y *Handbook of Materials for String Musical Instruments* [Bucur, 2016], son explicadas las características físicas, mecánicas y estructurales que influyen en las propiedades acústicas de los materiales lignocelulósicos. El libro "Handbook of Wood as an Engineering Material" [Ross, 2010] complementa esta perspectiva explicando en profundidad las propiedades elásticas de la madera. Aunque su enfoque principal no es la acústica, aporta los conceptos fundamentales necesarios para comprender el comportamiento de la madera como un material elástico y anisotrópico.

Jim Woodhouse, investigador del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cambridge, ha centrado su trabajo en la modelización, medición y predicción de la vibración en estructuras complejas, incluidos los instrumentos musicales. En

enero de 2024, impartió una conferencia titulada "Understanding the Properties of Wood" [Woodhouse, 2024], en la que abordó la anatomía y propiedades de la madera, incluyendo su densidad y comportamiento mecánico, apoyado en datos experimentales.

En el trabajo de [Stoel and Borman, 2008], se compararon las densidades de cinco violines clásicos y ocho modernos mediante tomografía computarizada y software de procesamiento de imagen. No encontraron diferencias significativas en la densidad media, pero se encontró que la diferencia entre las densidades de la madera temprana y tardía era menor en los violines clásicos de Cremona. Este hallazgo sugiere que dicha diferencia podría influir en el comportamiento vibratorio del instrumento.

Por otro lado, [Zhang et al., 2015] destacan la importancia de la composición y organización de las paredes celulares para comprender el comportamiento de la madera a nivel microestructural. Estudios como: [Jia et al., 2007], [Stuart, 2004], [Bracco and Holst, 2013], [Menczel and Prime, 2009], [Welzel et al., 2005] emplean técnicas de caracterización pueden ser empleadas para estudios microestructurales y caracterización de materiales .

Uno de los estudios más completos sobre la madera de *Picea abies* es el de [Torres-Torres et al., 2019], que examina las diferencias entre madera temprana y tardía mediante técnicas de alta resolución como microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía de fuerza atómica (AFM) y difracción de rayos X (XRD). Este trabajo se complementa con simulación por elementos finitos de un modelo representativo del arreglo lamelar de traqueidas, revelando la contribución de cada componente estructural al módulo de elasticidad y la capacidad de deformación. Los avances recientes en la investigación del comportamiento mecánico de los instrumentos musicales permiten estudiar el efecto de su geometría y de las propiedades del material.

En el estudio de [Torres et al., 2020], se desarrolló un modelo paramétrico por elementos finitos de la caja de resonancia del violín "Titian" de Stradivarius, capaz de comparar variaciones antes y después en el dominio del tiempo y frecuencia. Este enfoque permite modelar estructuras de geometría compleja, como el violín, con un nivel de precisión alto. La simulación por elementos finitos (FE) es una técnica numérica que resuelve ecuaciones diferenciales asociadas a geometrías, cargas o propiedades complejas que no pueden resolverse analíticamente. Resulta particularmente útil para modelar estructuras que experimentan vibraciones, como barras, vigas y placas, así como para estudiar la microestructura y comportamiento vibratorio de la madera. El análisis modal es una herramienta clave para estudiar el comportamiento vibratorio de materiales y estructuras. Permite identificar las frecuencias naturales y modos de vibración, fundamentales en el análisis de un material como la *Picea abies*, utilizado en la construcción de instrumentos musicales. Para sustentar estos conceptos, se consultaron textos como Física General [Bueche et al., 1991] (para ecuaciones de movimiento estructural) y Álgebra Lineal y sus Aplicaciones [David, 2000], que introduce los conceptos de valores y vectores propios empleados en el análisis modal.

1.3. Objetivo

Establecer una relación entre la microestructura de la madera de *Picea abies* y su comportamiento vibratorio, mediante una caracterización detallada de sus propiedades superficiales y químicas, con el objetivo de desarrollar modelos predictivos que permitan comprender mejor el comportamiento vibratorio de este material.

1.3.1. Objetivos específicos

1. Estudiar la microestructura de la madera de *Picea abies* a partir de sus anillos de crecimiento, mediante medición con microscopía electrónica de barrido (SEM), con el fin de conocer sus características microscópicas
2. Asociar los valores experimentales obtenidos de la madera de *Picea abies* con los resultados generados por simulación por el Método del Elemento Finito, empleando el software ANSYS, para relacionar el comportamiento vibratorio con las características específicas de las muestras estudiadas.
3. Conocer las características de la madera temprana y tardía de *Picea abies*, relacionado a sus propiedades térmicas, como consecuencia de un análisis detallado por TGA/DTG, DRX y ángulo de contacto, de la resistencia térmica, calores de reacción, cristalinidad y grado de afinidad hidrofílico/tensión superficial.

1.4. Hipótesis

En el ámbito de la laudería, se han desarrollado de manera empírica métodos para la selección óptima de maderas destinadas a la construcción de instrumentos musicales. En la práctica, es común que los constructores prefieran piezas de madera con anillos de crecimiento estrechos, a menudo sin considerar propiedades específicas como la relación entre el tamaño y las propiedades de los anillos de la madera. Esta investigación, por ende, introduce nuevos datos cuantitativos que posibilitarán obtener resultados a priori en el proceso de construcción de instrumentos musicales. Estos hallazgos fortalecerán la selección apropiada de la madera, contribuyendo así a la creación de instrumentos de la más alta calidad artesanal.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. La madera como material para el violín

Una característica que resalta del violín es que a la fecha se sigue construyendo con los mismos tipos de materiales con los que fue concebido. Así sucede con la mayoría de los instrumentos musicales, que, a pesar del desarrollo de aleaciones, polímeros y compuestos sofisticados, siguen siendo construidos en su mayoría de materiales naturales y principalmente de madera [Wegst, 2006].

La madera es un compuesto biológico cuya estructura presenta una organización jerárquica, observable en diferentes niveles de escala, desde lo molecular hasta lo macroscópico. La Figura 2.1 muestra una visión general de los componentes de la madera. El presente trabajo se centra en el arreglo estructural referente a los anillos de crecimiento.

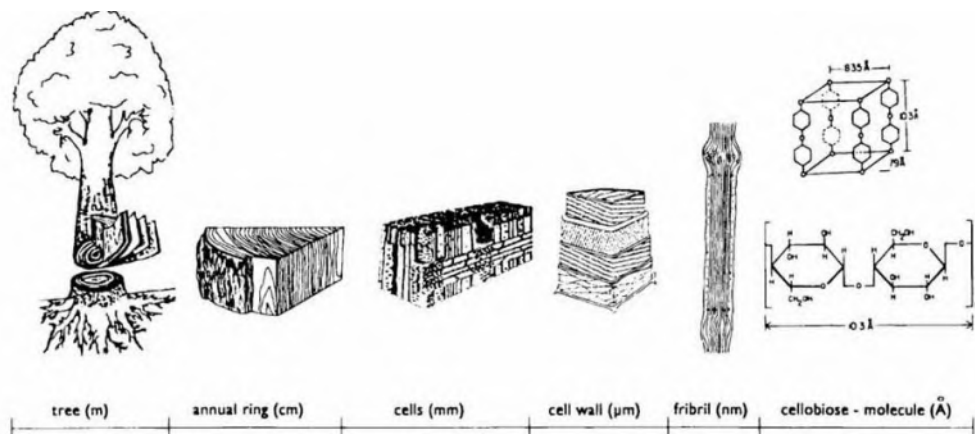


Figura 2.1: Estructura jerárquica de la madera [Bucur, 2017].

La madera es una sustancia biológicamente renovable y uno de los materiales más fascinantes debido a su compleja estructura y sus amplios usos. Puede considerarse como un compuesto biológico producido por los organismos vivos de los árboles. Su arreglo estructural se puede observar en diferentes niveles de escala, desde lo molecular hasta lo macroscópico. El tronco del árbol está compuesto por millones de células individuales. Los principales constituyentes de la pared celular

son la celulosa (40-50 %), hemicelulosa (20-30 %), lignina (20-30 %) y extractivos (5 % aproximadamente). [Bucur, 2017].

Las células de la madera están específicamente orientadas en dos sistemas separados de células: el sistema axial y el sistema radial. En el tronco de un árbol, el sistema axial está formado en el eje longitudinal del árbol, transporta el agua a larga distancia a lo largo del tronco, y proporciona la mayor parte de la resistencia mecánica del árbol. El sistema radial corre en dirección de la médula a la corteza, proporciona transporte lateral de bioquímicos y en muchos casos desempeña una función de almacenamiento en la madera. La coexistencia de estos dos sistemas es una característica definitoria de la madera como tejido estructural, y da lugar a los tres ejes principales de la madera determinados por las direcciones de crecimiento del árbol: longitudinal, radial y tangencial. Las propiedades microscópicas de las células individuales, como su composición y estructura, sus propiedades físicas y mecánicas, su forma y conectividad, determinan el comportamiento global de la madera [Fengel et al., 1989].

Una característica que distingue a la madera de la mayoría de los materiales sintéticos es que es un material ortotrópico, lo que significa que posee propiedades mecánicas únicas e independientes en diferentes direcciones, ligadas a las tres direcciones de crecimiento del árbol. El eje longitudinal (L) se define como paralelo a las fibras (vetas), es decir, a lo largo del tronco del árbol; el eje radial (R) es perpendicular a los anillos de crecimiento; y el eje tangencial (T) es perpendicular a la fibra pero tangente a los anillos. Ver Figura 2.2

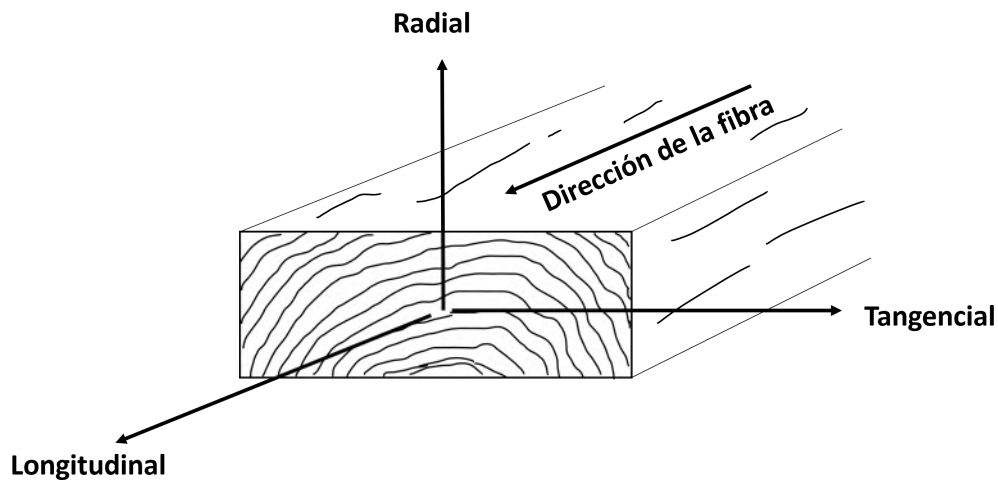


Figura 2.2: Direcciones de la madera.

Esta ortotropía se debe a la estructura celular de la madera, derivada de la naturaleza del crecimiento del árbol. Además, la madera presenta características anisotrópicas, lo que significa que incluso dentro de una misma dirección pueden presentarse variaciones en las propiedades mecánicas del material, derivadas de las diferencias en el arreglo estructural. Estudios sobre materiales lignocelulósicos han demostrado que pequeñas variaciones en su microestructura pueden provocar cambios significativos en sus propiedades mecánicas [Zhang et al., 2015], lo cual es espe-

cialmente relevante en aplicaciones acústicas, como la construcción de instrumentos musicales [Bucur, 2016].

Por esta razón, aunque las propiedades de una misma especie se mantengan dentro de ciertos rangos, las diferencias dentro de cada especie pueden ser considerables [Wegst, 2006]. En términos de rendimiento acústico, incluso dos piezas de madera extraídas del mismo árbol pueden considerarse materiales distintos, al presentar variaciones microestructurales que derivan en propiedades mecánicas diferenciadas.

2.1.1. Anatomía del pinabete

Las maderas suaves, como la *Picea abies* tienen una estructura relativamente simple, dominada por pocos tipos de células. El tipo de célula predominante es la traqueida longitudinal orientada verticalmente (a lo largo del eje del tallo). Estas células son huecas, cuadradas o rectangulares en sección transversal, tienen extremos cerrados y cónicos, y están dispuestas de manera que sus extremos se superponen con las fibras adyacentes. También están dispuestas en filas radiales bien alineadas. Estas células cumplen un doble papel al proporcionar resistencia y soporte mecánico, así como ser el camino por el cual se transporta el agua y los minerales disueltos desde el sistema radicular del árbol hacia la copa del árbol [Parham and Gray, 1984].

Una característica particular de las maderas suaves, es el arreglo estructural de las traqueidas longitudinales. Debido al patrón de crecimiento del árbol, las traqueidas forman anillos concéntricos alrededor del tronco del árbol, llamados anillos de crecimiento, parte fundamental para la estructura de la madera. Por esa razón, las traqueidas longitudinales son el elemento anatómico más importante a tomar en cuenta en esta investigación.

2.1.2. Crecimiento del árbol: desarrollo de anillos de crecimiento

El crecimiento de un árbol tiene lugar de forma simultánea e independiente en diferentes direcciones (altura y grosor del tronco). El crecimiento del grosor del tronco da lugar a los anillos de crecimiento [Diéguez Aranda et al., 2003]. El responsable de este tipo de crecimiento es el cambium, un meristemo secundario formado por células con capacidad de división activa, es decir, capaces de generar nuevas células. El cambium se encuentra entre la corteza y la madera, generando nuevas células hacia el interior (madera) y hacia el exterior (corteza). Este proceso da origen a los anillos de crecimiento, donde cada anillo representa un ciclo anual. Durante la primavera y el verano, el cambium genera células de madera temprana, mientras que en otoño e invierno las células de madera tardía son formadas. La distinción entre madera temprana y madera tardía es generalmente evidente en maderas suaves, principalmente en las direcciones transversal y radial [Harada and Côté, 1985].

Las traqueidas de la madera temprana se caracterizan por tener paredes celulares delgadas y un amplio diámetro radial. A medida que la estación avanza del verano al otoño, estas células desarrollan paredes más gruesas y su diámetro radial disminuye. Estos cambios estructurales dan lugar a la madera tardía, un tejido considerablemente más denso y duro que la madera temprana correspondiente al mismo

anillo de crecimiento. La zona de madera tardía aparece más oscura que la madera temprana en la sección transversal del árbol, así como en las superficies radiales y tangenciales. Esta diferencia de apariencia entre la madera temprana y la tardía, junto con el tipo de corte, contribuye a la formación del veteado característico de las maderas suaves [Parham and Gray, 1984].

La madera de *Picea abies* presenta anillos de crecimiento con un cambio estructural abrupto en los límites entre ellos, generalmente incluyendo un cambio en el grosor de la pared de traqueida y en el diámetro radial de la traqueida. Esta característica es visualmente presentada como una transición muy marcada entre la madera temprana y la madera tardía dentro de un mismo anillo [Richter et al., 2004].

A diferencia de otras maderas suaves, la madera de *Picea abies* produce anillos de crecimiento estrechos, de aproximadamente 1 mm de grosor [Sacconi, 1979]. No obstante, existen variaciones significativas en las dimensiones de estos anillos entre distintas piezas de madera. La heterogeneidad estructural de esta especie permite considerarla como un material compuesto, ya que las diferencias entre la madera temprana y la tardía le confieren propiedades físicas y mecánicas diferenciadas. A esto se suman las variaciones observadas entre muestras de la misma especie, reforzando la complejidad anisotrópica del material. Por ello, el presente trabajo se centra en el análisis microestructural de la madera. Las diferencias anatómicas, físicas y mecánicas tanto dentro de un mismo anillo de crecimiento (entre madera temprana y tardía) en una pieza de madera son consideradas. Así como las variaciones en el tamaño de anillos de crecimiento que se presentan entre diferentes muestras de madera.

2.2. Técnicas de caracterización

Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

La posibilidad de observar muestras íntegras y en sus tres dimensiones mediante la microscopía electrónica, fue hecha realidad con la aparición del microscopio electrónico de scanning (SEM) o de barrido, en el año 1965. Este equipo, puede ampliar los objetos hasta un millón de veces su tamaño original y puede resolver características de dimensiones inferiores a 1 nm y medir el tamaño de partícula. Asimismo, la interacción del haz de electrones con la muestra emite rayos X con una energía única que puede detectarse para determinar la composición del material examinado [Jia et al., 2007].

Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

La espectroscopía infrarroja es una técnica analítica basada en las vibraciones de los átomos dentro de una molécula. El espectro infrarrojo se obtiene al hacer pasar radiación infrarroja a través de una muestra y medir qué fracción de la radiación incidente es absorbida a diferentes niveles de energía. Cada pico en el espectro de absorción corresponde a la frecuencia de vibración de un determinado enlace químico presente en la muestra. Esta técnica permite obtener información muy valiosa sobre la estructura molecular y la composición química del material analizado, así como la

identificación de grupos funcionales y la determinación de los componentes químicos presente [Stuart, 2004]

Ángulo de contacto

El ángulo de contacto se define como el ángulo formado en la intersección entre las interfaces líquido-sólido y líquido-vapor, y se determina trazando una línea tangente desde el punto de contacto a lo largo del perfil de la interfaz líquido-vapor. Este ángulo proporciona información sobre la afinidad del sólido con el líquido, es decir, si el material es hidrofílico o hidrofóbico. La región en la que coexisten el sólido, el líquido y el vapor se conoce como línea de contacto trifásica. Un ángulo de contacto menor a 90° indica que la superficie presenta una buena humectación, por lo que el líquido tiende a extenderse sobre ella (comportamiento hidrofílico). En cambio, un ángulo mayor a 90° señala una humectación deficiente, lo que provoca que el líquido minimice su contacto con la superficie, adoptando una forma más esférica y compacta (comportamiento hidrofóbico) [Bracco and Holst, 2013].

Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico consiste en registrar la pérdida de masa de una muestra a medida que se incrementa la temperatura, bajo condiciones controladas de velocidad de calentamiento y atmósferas específicas de reacción. El equipo utilizado incluye una microbalanza de alta precisión conectada a un platillo que sostiene la muestra dentro de un horno, el cual cuenta con un programador de temperatura y un sistema de control para la termobalanza. El resultado de este análisis es un termograma, una representación gráfica del cambio de masa en función de la temperatura o el tiempo. Este gráfico permite obtener información relevante sobre la composición de la muestra, su grado de curado y su estabilidad térmica [Menczel and Prime, 2009].

Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica no destructiva empleada para la caracterización de materiales cristalinos [Welzel et al., 2005]. Esta técnica proporciona información detallada sobre la estructura interna del material, incluyendo la identificación de fases, la textura (orientaciones cristalinas preferenciales), así como parámetros estructurales como el tamaño promedio de los cristales, el grado de cristalinidad, la deformación y la presencia de defectos en la red cristalina. Los datos se obtienen a partir de los picos de difracción generados por la interferencia constructiva de un haz monocromático de rayos X, que es dispersado en ángulos específicos al interactuar con los diferentes planos de la red cristalina de la muestra.

2.3. Fundamentos del análisis modal

El uso de pruebas experimentales para obtener conocimiento sobre la respuesta dinámica de las estructuras es una práctica bien establecida. El comportamiento dinámico de una estructura puede describirse como una combinación de modos, los cuales están vinculados a sus resonancias naturales. Bajo ciertas condiciones, es posible excitar una estructura para que vibre a una frecuencia específica con una amplitud elevada y sostenida. Esta resonancia surge de la interacción entre las propiedades inerciales y elásticas del sistema. Cada modo se define por una frecuencia modal, amortiguación modal y una forma de modo [Richardson, 1997]. Estos parámetros dependen de la geometría, las propiedades del material y las condiciones de frontera. El análisis modal permite identificar estos parámetros a partir de mediciones de la fuerza de excitación y de la respuesta vibratoria. La identificación de las propiedades modales proporciona a los ingenieros una base sólida para comprender físicamente el comportamiento dinámico de las estructuras [Rainieri and Fabbrocino, 2014].

En el estudio del violín, por ejemplo, se han identificado modos de vibración para el cuerpo del instrumento, dados por la geometría y las propiedades mecánicas de la madera con la que son construidos. Algunos de éstos modos son mostrados en la Figura 2.3; la tapa y el fondo son mostrados para cada modo. Las líneas gruesas indican las líneas nodales; la dirección del movimiento se indica con un signo $+$ o $-$.

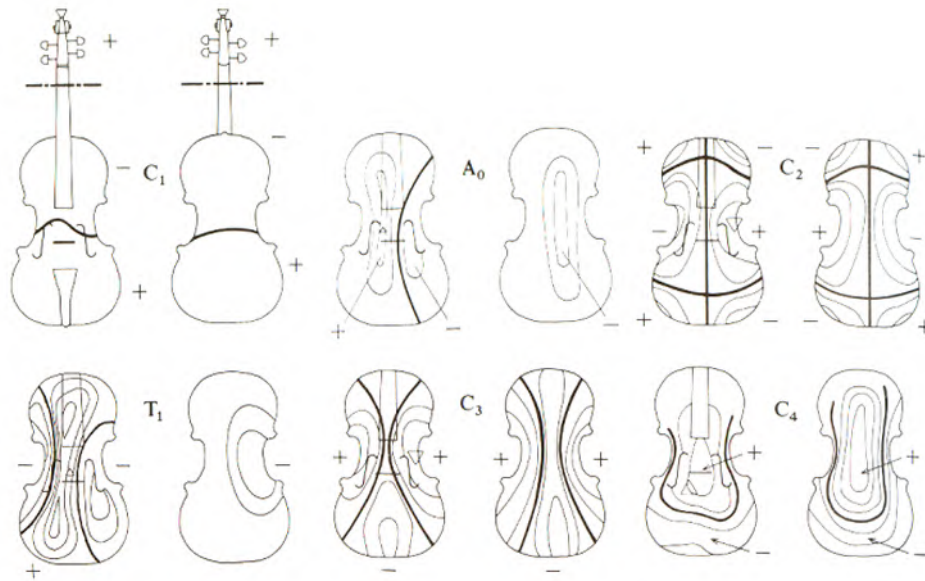


Figura 2.3: Formas modales de seis modos de un violín. C_1 (185 Hz): flexión unidimensional; A_0 (275 Hz): el aire entra y sale por las efes; C_2 (405 Hz): flexión bidimensional; T_1 (460 Hz): movimiento principalmente de la tapa; C_3 (530 Hz), C_4 (700 Hz): flexión bidimensional. [Fletcher and Rossing, 2012]

Para entender sobre el comportamiento dinámico de las estructuras es necesario analizar la ecuación de movimiento estructural:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (2.1)$$

Donde:

- $\mathbf{M}$ es la matriz de masa.
- $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ es el vector de aceleración.
- $\mathbf{C}$ es la matriz de amortiguamiento.
- $\dot{\mathbf{u}}(t)$ es el vector de velocidad.
- $\mathbf{K}$ es la matriz de rigidez.
- $\mathbf{u}(t)$ es el vector de desplazamientos.
- $\mathbf{F}(t)$ es el vector de fuerzas externas aplicadas.

Esta es una expresión matemática que describe cómo responde una estructura (como una viga, placa o edificio) cuando se le aplica una fuerza. La ecuación de movimiento estructural indica que la fuerza que se aplica a la estructura debe ser equilibrada por tres factores, descritos en tres términos de la ecuación: $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t)$, representa la inercia del sistema. Se llama inercia a la tendencia de un objeto en reposo a permanecer en ese estado, y de un objeto en movimiento a continuar su movimiento sin cambiar su velocidad. La matriz de masa representa cómo está distribuida la masa en la estructura. Al ser multiplicada por el vector de aceleración, se obtiene como resultado el vector de fuerzas inerciales del sistema. $\mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t)$ representa las fuerzas de amortiguamiento presentes en la estructura. La matriz de amortiguamiento describe cómo está distribuida esta capacidad de disipar energía a lo largo de la estructura. Al multiplicarla por el vector de velocidad, se obtiene un vector de fuerzas que se oponen al movimiento. $\mathbf{K}\mathbf{u}(t)$ representa las fuerzas elásticas internas del sistema, que se originan cuando la estructura se deforma. La matriz de rigidez contiene la información sobre cómo responde la estructura ante dichas deformaciones, en función de sus propiedades geométricas y de sus constantes elásticas. Al multiplicar la matriz de rigidez por el vector de desplazamientos, se obtiene un vector de fuerzas que tienden a devolver la estructura a su posición de equilibrio. Estas fuerzas siguen la ley de Hooke, que establece que la fuerza restauradora es proporcional a la deformación pero actúa en sentido opuesto. Por lo tanto, un cuerpo que ha sido deformado y luego liberado puede regresar a su configuración original, cuando se trata de un material elástico [Bueche et al., 1991].

La ecuación 2.1 indica que la fuerza aplicada debe ser equilibrada por la inercia, el amortiguamiento y la rigidez de la estructura. Cuando no hay fuerzas externas, el sistema comienza a vibrar a sus frecuencias naturales. Un cuerpo capaz de realizar movimientos vibratorios sin fuerzas externas adoptará aquel que requiera menor energía, es decir, el que consiga mayores desplazamientos con el mínimo esfuerzo. La frecuencia de este movimiento se denomina frecuencia natural, y depende de la masa del cuerpo y su elasticidad [Manzano, 1991].

2.3.1. Valores y vectores propios

Cuando analizamos el movimiento libre sin amortiguamiento, encontramos las frecuencias naturales (valores propios) y las formas de vibración (vectores propios) de la estructura. Los valores propios nos dicen cuán rápido vibra la estructura, y los vectores propios nos dicen cómo se mueve (modo vibración).

Un vector propio de una matriz A de $n \times n$ es un vector $\mathbf{x}$ diferente de cero tal que $A\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x}$ para algún escalar λ . Un escalar λ se llama valor propio de A si existe una solución no trivial $\mathbf{x}$ de $A\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x}$; una $\mathbf{x}$ como ésta se denomina vector propio correspondiente a λ . [David, 2000].

Por lo tanto, un vector propio de una matriz A es un vector que, al ser multiplicado por A , sólo cambia en magnitud. El valor propio correspondiente es el escalar que representa cuánto se estira o comprime el vector propio cuando se aplica la matriz. En general, si tienes una matriz A y un vector cualquiera $\mathbf{x}$, multiplicar $A\mathbf{x}$ te da un vector nuevo, que cambia en dirección y tamaño. Pero si ese vector $\mathbf{x}$ es un vector propio, entonces:

$$A\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x} \quad (2.2)$$

Es decir, el efecto de toda la matriz A al actuar sobre ese vector se reduce a multiplicar el mismo vector por un número. Ese número (el valor propio) nos dice cómo se comporta la matriz cuando actúa sobre ciertos vectores especiales (los vectores propios).

En la Ecuación 2.2, la matriz A representa una combinación de las propiedades dinámicas de la estructura. Esto sucede mediante procedimientos matemáticos, al combinar las matrices de la Ecuación 2.1, para crear una matriz matemática que permite aplicar el álgebra lineal para encontrar los valores y vectores propios.

2.3.2. Propiedades de la madera involucradas en la ecuación de movimiento estructural

Si analizamos la ecuación de movimiento estructural, podemos entender cómo las propiedades de la madera influyen en su comportamiento vibratorio. En particular, las propiedades físicas y mecánicas del material se incorporan en las matrices de masa y rigidez, que son fundamentales en el análisis modal.

La matriz de rigidez está determinada por las propiedades elásticas del material. Para describir el comportamiento elástico de la madera se requieren doce constantes: tres módulos de elasticidad, tres módulos cortantes y seis coeficientes de Poisson.

La elasticidad implica que las deformaciones producidas por esfuerzos bajos son completamente recuperables una vez que se retiran las cargas. El módulo de elasticidad o módulo Young, denominado E , es la relación entre el esfuerzo y la deformación lineal. Los tres módulos de elasticidad que existen: E_L , E_R y E_T , corresponden respectivamente a los módulos elásticos a lo largo de los ejes longitudinal, radial y tangencial de la madera. El módulo de rigidez, también llamado módulo cortante, indica la resistencia de un material a la deformación provocada por esfuerzos cortantes. Los tres módulos de rigidez, denotados por G_{LR} , G_{LT} y G_{RT} , son las constantes

elásticas en los planos LR , LT y RT , respectivamente. Este módulo mide la respuesta ante esfuerzos de corte. Por ejemplo, G_{LR} relaciona los esfuerzos cortantes y la deformación por corte en el plano LR .

El coeficiente de Poisson es la razón entre la deformación en una dirección perpendicular a la carga aplicada (deformación transversal) y la deformación en la misma dirección de la carga (deformación axial), cuando un material es sometido a un esfuerzo axial. Por ejemplo, si un pedazo de madera es estirado a lo largo de la dirección de las fibras (longitudinal), este no solo se alarga, sino que también se contrae ligeramente en las direcciones radial y tangencial. Esa contracción, comparada con la elongación, es lo que describe el coeficiente de Poisson. Los coeficientes de Poisson se denotan como ν_{LR} , ν_{RL} , ν_{LT} , ν_{TL} , ν_{RT} y ν_{TR} . La primera letra del subíndice indica la dirección del esfuerzo aplicado, y la segunda letra indica la dirección de la deformación lateral. Por ejemplo, ν_{LR} es el coeficiente de Poisson para la deformación a lo largo del eje radial causada por un esfuerzo a lo largo del eje longitudinal [Ross, 2010].

En el caso particular de las tapas de violín, cuya estructura puede simplificarse y modelarse como una placa, las propiedades mecánicas más relevantes para su respuesta vibratoria son E_L , E_R y G_{LR} . La Figura 2.3.2 muestra los tres primeros modos de vibración obtenidos para una placa de madera de corte radial. El tipo de deflexión de cada modo está asociada con la propiedad mecánica que más influye en dicho comportamiento vibratorio.

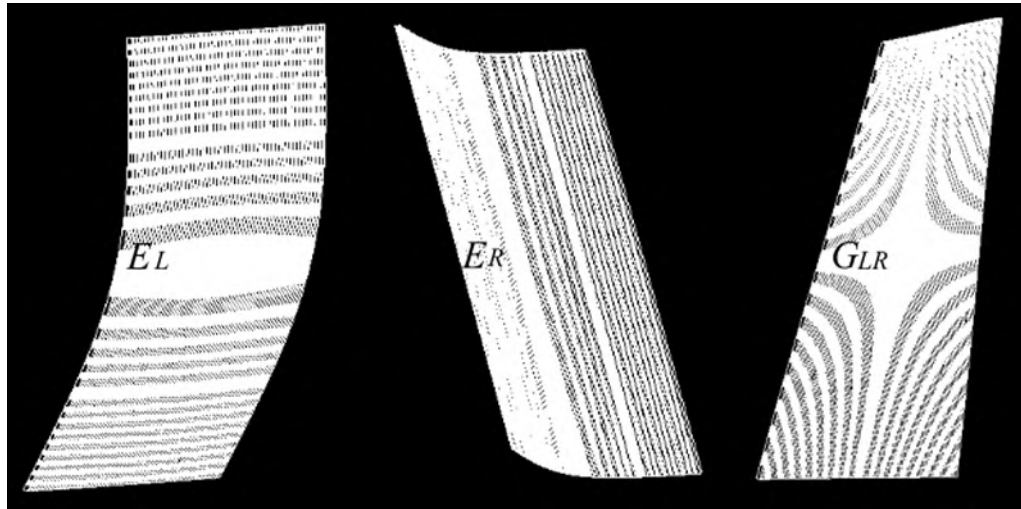


Figura 2.4: Primeros tres modos de vibración de una placa de madera de corte radial. Cada modo está asociado principalmente a una propiedad elástica: módulo de elasticidad longitudinal, módulo de elasticidad radial y módulo de corte longitudinal-radial. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

2.3.3. Criterio MAC (Modal Assurance Criterion)

Cuando se realiza un análisis modal de una estructura, generalmente se obtienen numerosos modos de vibración. Comparar el comportamiento vibratorio entre diferentes estructuras puede resultar complejo debido a la gran cantidad de datos involucrados. Entre las propiedades modales más comúnmente utilizadas para la comparación se encuentran las frecuencias naturales y los vectores de forma modal. Una de las herramientas más empleadas para la comparación cuantitativa entre vectores modales es el Criterio de Aseguramiento Modal (MAC, por sus siglas en inglés).

El MAC toma valores entre 0 y 1, donde un valor cercano a 0 indica una baja correspondencia entre los vectores modales comparados, y un valor cercano a 1 indica una alta similitud. En general, valores mayores a 0.9 se interpretan como una correspondencia consistente. La mayoría de los programas de análisis estructural representan el MAC mediante gráficos en color, ya sea en 2D o 3D. Es importante tener presente que el MAC se calcula de forma discreta, por lo que los mapas de contorno en color representan comparaciones puntuales entre pares de modos. La Figura 2.5 muestra un ejemplo de matriz MAC en el que se observa una correspondencia total entre los modos de vibración de un conjunto de datos A y un conjunto de datos B [Pastor et al., 2012].

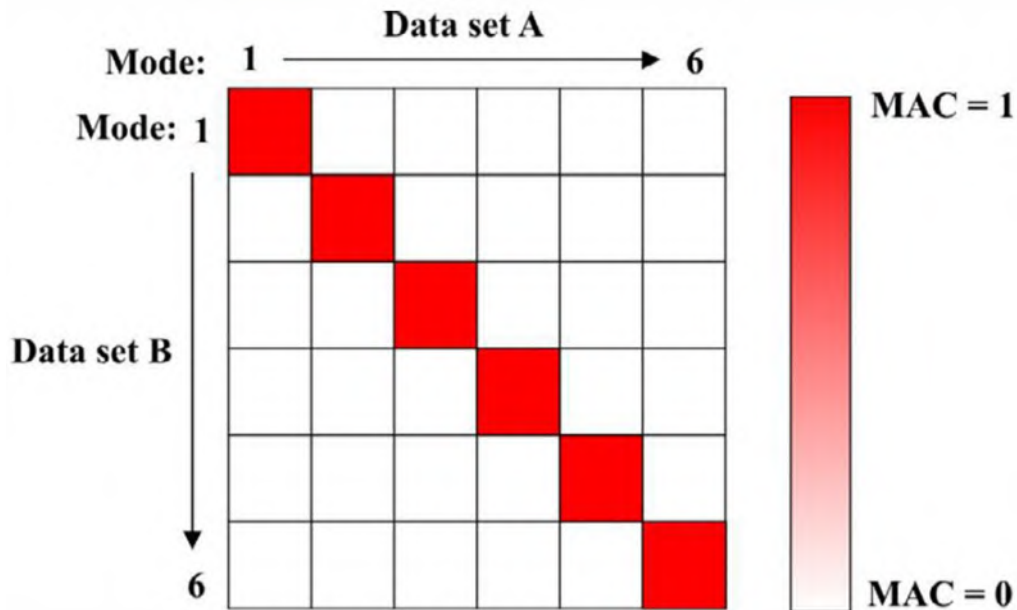


Figura 2.5: Ejemplo de gráfico MAC 2D [Pastor et al., 2012]

Capítulo 3

Metodología

Placas de madera de *Picea abies* fueron analizadas mediante distintas técnicas de medición, buscando establecer una relación estrecha entre su caracterización microestructural y sus propiedades mecánicas. Esta caracterización permitió generar información clave para la calibración de un modelo de simulación de maderas.

Dicho modelo se basa en un algoritmo que crea datos sobre propiedades mecánicas diferenciadas entre madera temprana y madera tardía. La información obtenida a partir del análisis del material fue utilizada para llenar los datos de entrada del algoritmo y generar placas simuladas acordes con las características observadas en la madera real.

3.1. Maderas analizadas

Las maderas de *Picea abies* analizadas en este trabajo fueron suministradas por el Laboratorio de Acústica de la Escuela de Laudería del INBAL. Esta institución emplea el abeto en la manufactura de instrumentos musicales pertenecientes a la familia del violín. Dado que en la construcción de dichos instrumentos se emplean piezas de madera cortadas en sentido radial, las muestras obtenidas fueron dos probetas de corte radial. Las probetas fueron diseñadas para estudios previos [Córdova et al., 2024], construidas con una geometría específica, utilizando la madera sobrante en la construcción de tapas de violines. Ambas probetas tienen una estructura aparentemente similar en forma de viga. Sin embargo, cada una presenta una dirección particular de vetas respecto al largo y ancho de su estructura. En la Figura 3.1, las probetas están acomodadas siguiendo el sentido longitudinal de las vetas. La probeta de la izquierda presenta anillos de crecimiento que se extienden en sentido radial por todo el largo de la estructura, por lo que esta probeta es denominada: probeta radial. La probeta de la derecha presenta anillos de crecimiento que se extienden en sentido longitudinal por todo el largo de la estructura, esta probeta es denominada: probeta longitudinal. A partir de estas maderas, se diseñaron muestras específicas para cada método de medición.

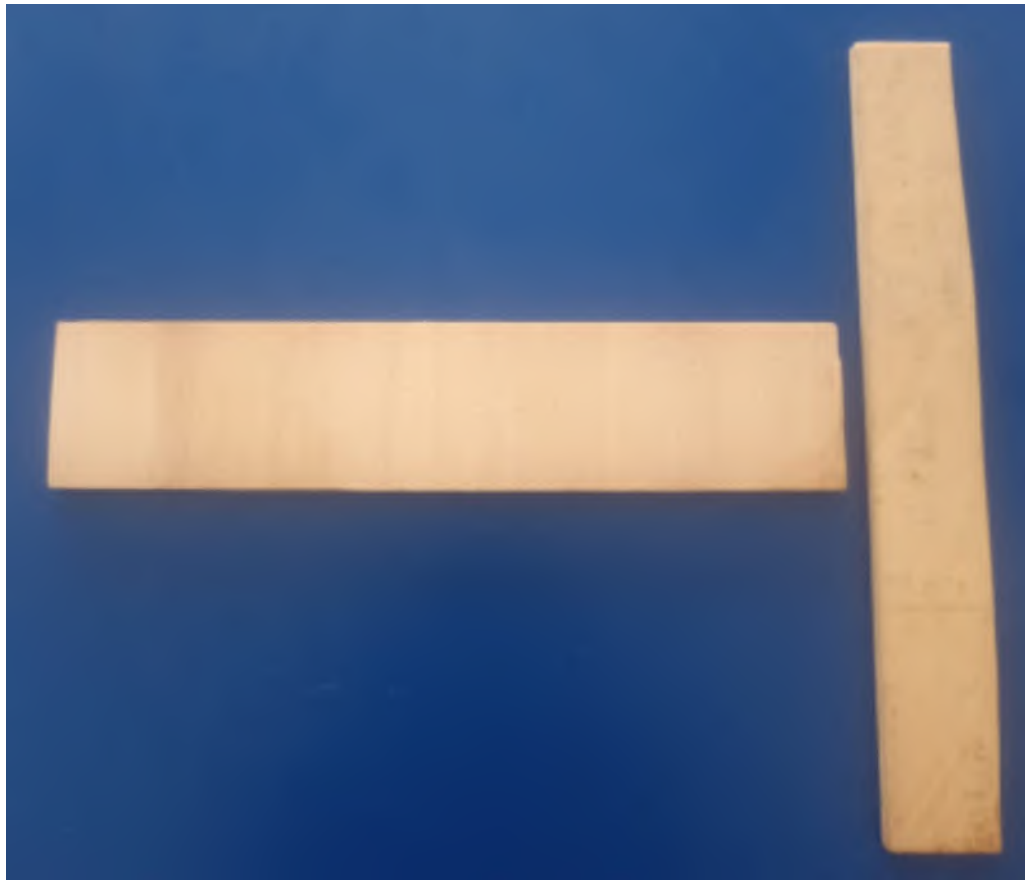


Figura 3.1: Probetas obtenidas del Laboratorio de acústica de la Escuela de Landería del INBAL. A la izquierda probeta radial, a la derecha probeta longitudinal.

3.2. Caracterización de madera de *Picea abies*

3.2.1. Sobre propiedades superficiales y químicas

Obtención de imágenes SEM

Las muestras fueron analizadas por un equipo SEM, Jeal JSM-7600F equipado con espectrómetro de rayos X por dispersión de energía (EDS) (ver Figura 3.2). Pequeñas muestras de madera fueron obtenidas de las probetas radial y longitudinal para ser analizadas. Las muestras fueron preparadas sumergiéndolas bajo agua hirviendo, posteriormente una navaja fue utilizada para limpiar los cortes longitudinal, radial y tangencial de las muestras.



Figura 3.2: Microscopio electrónico de barrido.

Ángulo de contacto

El ángulo de contacto en la superficie de la madera temprana y tardía fue medido. Se fabricaron pequeñas probetas en forma de viga con corte tangencial, ya que este tipo de corte permite una mejor visualización de la madera tardía, revela una mayor superficie de este tipo de madera. Las probetas fueron cuidadosamente cepilladas utilizando un cepillo para madera de la marca Veritas. Este proceso de cepillado retiró láminas milimétricas de madera en el corte tangencial, lo que permitió exponer la superficie de la madera tardía de manera más efectiva. El método utilizado para determinar el ángulo de contacto se basó en el método de la gota colocada, también conocido como gota sésil. El procedimiento experimental consistió en dejar caer una gota de agua destilada sobre la superficie de la madera de *Picea abies* y capturar una fotografía en el momento preciso en que la gota hizo contacto con la superficie (ver Figura 3.3). Posteriormente, la imagen obtenida fue analizada utilizando el programa ImageJ. Este software permitió medir con precisión el ángulo formado entre la superficie de la muestra de madera y la gota de agua, proporcionando así datos relevantes para el estudio de las propiedades de la superficie de la madera en relación con el ángulo de contacto.



Figura 3.3: Medición de ángulo de contacto sobre muestra de *Picea abies* con ayuda de un goniómetro.

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros FTIR de las fibras de madera fueron adquiridos utilizando un espectrómetro Pekin Elmer Spectrum 400, (Waltham, MA, EE. UU.) (Figura 3.4). Este dispositivo estaba equipado con un accesorio de reflectancia total atenuada (ATR), el cual permite obtener espectros infrarrojos de alta calidad de muestras sólidas. Las muestras utilizadas para este análisis se obtuvieron a partir de las virutas remanentes del proceso de cepillado de la madera, la cual previamente había sido empleada en las mediciones del ángulo de contacto. Al examinar las virutas contra una fuente de luz, fue posible identificar las zonas que correspondían a la madera tardía. Estas áreas fueron marcadas para asegurar mediciones precisas de la madera temprana y tardía en los espectros FTIR. Este enfoque permitió una caracterización detallada de las fibras de madera en diferentes etapas de crecimiento, proporcionando valiosa información sobre su composición química y estructura molecular.



Figura 3.4: Espectrofotómetro Perkin Elmer Spectrum 400.

Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis térmico se realizó mediante TGA (Análisis Termogravimétrico) utilizando un equipo Netzsch STA 449-F3 Jupiter (Figura 3.5). El proceso de calentamiento se llevó a cabo con una rampa de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, desde 28 hasta 600°C , utilizando un flujo de 20 ml/min de nitrógeno. Las muestras analizadas por TGA fueron obtenidas a partir de virutas procedentes del corte radial de las maderas en estudio. Se seleccionaron virutas con un grosor aproximado de 0.03 mm. Posteriormente, se separaron las muestras correspondientes a la madera temprana y la madera tardía para su análisis individual. Este método permitió investigar las propiedades térmicas de las muestras de madera en diferentes etapas de crecimiento, proporcionando información valiosa sobre su comportamiento ante cambios de temperatura y descomposición térmica.



Figura 3.5: Equipo STA 449, F3 Júpiter.

Difracción por Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X se llevó a cabo en difractómetro Bruker D8 Advance con óptica primaria de espejo de Göbel y detector de centello. Operando con un generador de $\text{Cu-K} = 1.540 \text{ \AA}$; a 40 KV y 50 mA, rejilla de apertura de 1 mm, ángulo de incidencia $= 1^{\circ}$ y un barrido Locked Coupled en 2 en el intervalo de $[5^{\circ}-50^{\circ}]$ a un paso de $0.02^{\circ}/\text{s}$ (Figura 3.6).



Figura 3.6: Difractómetro de Rayos X Bruker D8 Advance.

3.2.2. Características de la madera requeridas para un análisis vibratorio

Mediciones experimentales de ancho de anillos

El ancho de la madera temprana y madera tardía fue medido en los anillos de crecimiento de las dos probetas de madera de *Picea abies*. Los anillos fueron contabilizados dividiendo las caras transversales de las probetas en secciones de 10 anillos. Un microscopio estereoscópico fue utilizado para observar con aumento cada sección de medición. Cada probeta fue colocada bajo el objetivo del microscopio junto con una regla con escala conocida, en dirección de los anillos de crecimiento. El aumento del microscopio fue ajustado para que el campo de visión permitiera observar una sección completa de 10 anillos. Una vez enfocada la imagen observada, cada sección de anillos de cada placa fue fotografiada a través del ocular del microscopio con un teléfono celular. Las imágenes obtenidas fueron etiquetadas con el tipo de muestra y número de anillos que representan. La Figura 3.7 muestra el tipo de imágenes obtenidas mediante este método.

Las mediciones de ancho de anillos se realizaron analizando las fotografías tomadas utilizando el programa ImageJ. Para esto fue necesario abrir en el programa ImageJ la imagen que se deseaba analizar. Posteriormente, la escala de medición fue establecida, tomando como referencia la regla que aparece en cada fotografía. Para esto, de la barra de controles del programa es seleccionado el botón “straight” (representado con una línea), éste permite trazar una línea sobre la regla de la imagen, desde el centro de una línea de medición a otra. Después, de la barra de controles se da clic en “Analyze”, que despliega un submenú del cual se selecciona la opción “Set scale...”. Se abrirá una ventana, donde se llenará el campo “Known distance” con el valor de la distancia conocida entre las líneas de medición de la regla en la imagen. En el campo “Unit of length” se escribe la unidad de medición para el valor de la distancia conocida. Así estamos indicando que la línea trazada sobre la regla

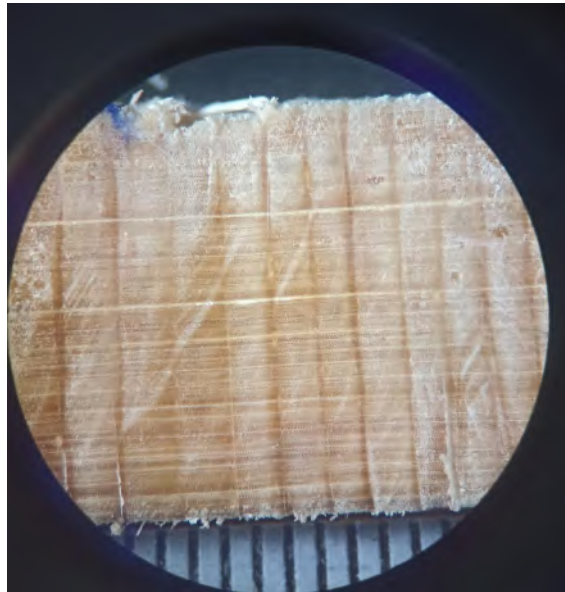


Figura 3.7: Fotografía del corte transversal de la probeta radial, obtenida mediante el objetivo del microscopio estereoscópico.

mide el valor de la distancia conocida. Estos pasos se muestran en la figura, donde es posible observar que la escala de medición utilizada es expresada en metros. La Figura 3.8 muestra el ajuste de escala utilizado para las mediciones del ancho de los anillos.

Después de establecer la escala de medición las secciones de madera temprana y madera tardía de cada anillo fueron medidas. Las mediciones se realizaron utilizando el botón “straight”, trazando líneas sobre las zonas que se deseaban medir (ver Figura 3.9), para posteriormente pulsar en el teclado las teclas: ctrl + m. Así aparece una ventana con la información resultante de esa línea trazada, donde en la fila “length” se encuentra la medida de la longitud del trazo, expresada según la escala de medición establecida.

Es importante establecer un aumento adecuado de la imagen antes de indicar la escala de medición. El programa realiza las mediciones comparando la distancia en píxeles del trazo con el que se establece la escala de medición, con los nuevos trazos realizados en la imagen. El nivel de zoom debe permitir que los anillos de crecimiento se observen claramente y sea posible trazar una línea sobre cada una de las secciones de madera temprana y tardía.

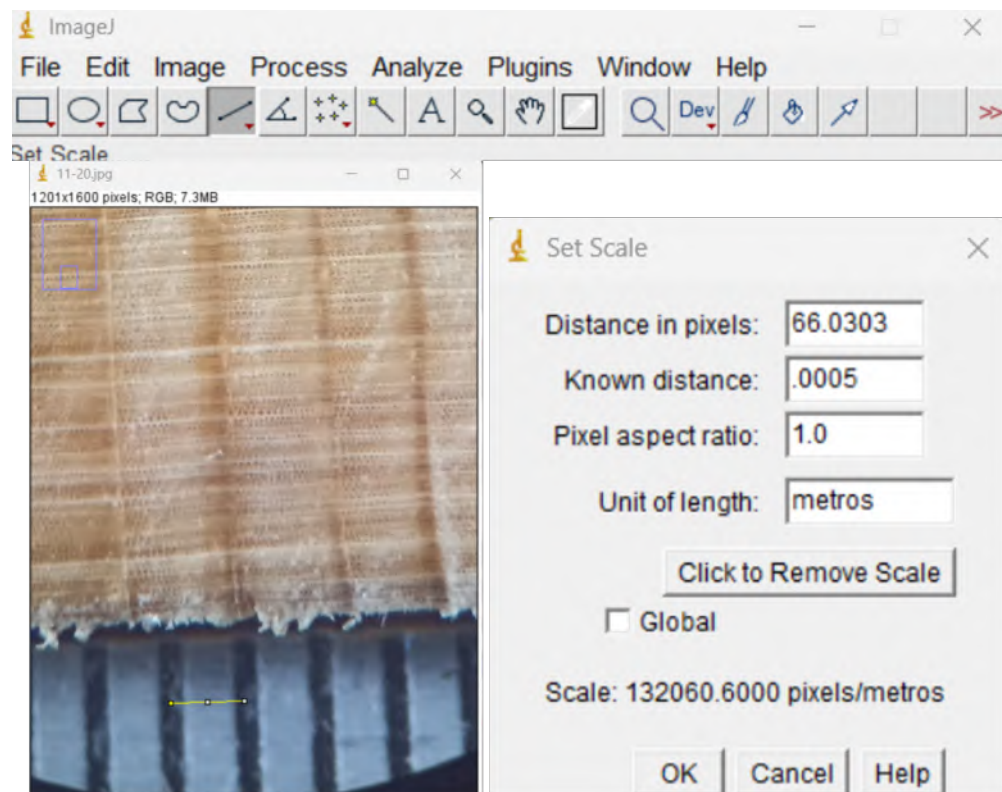
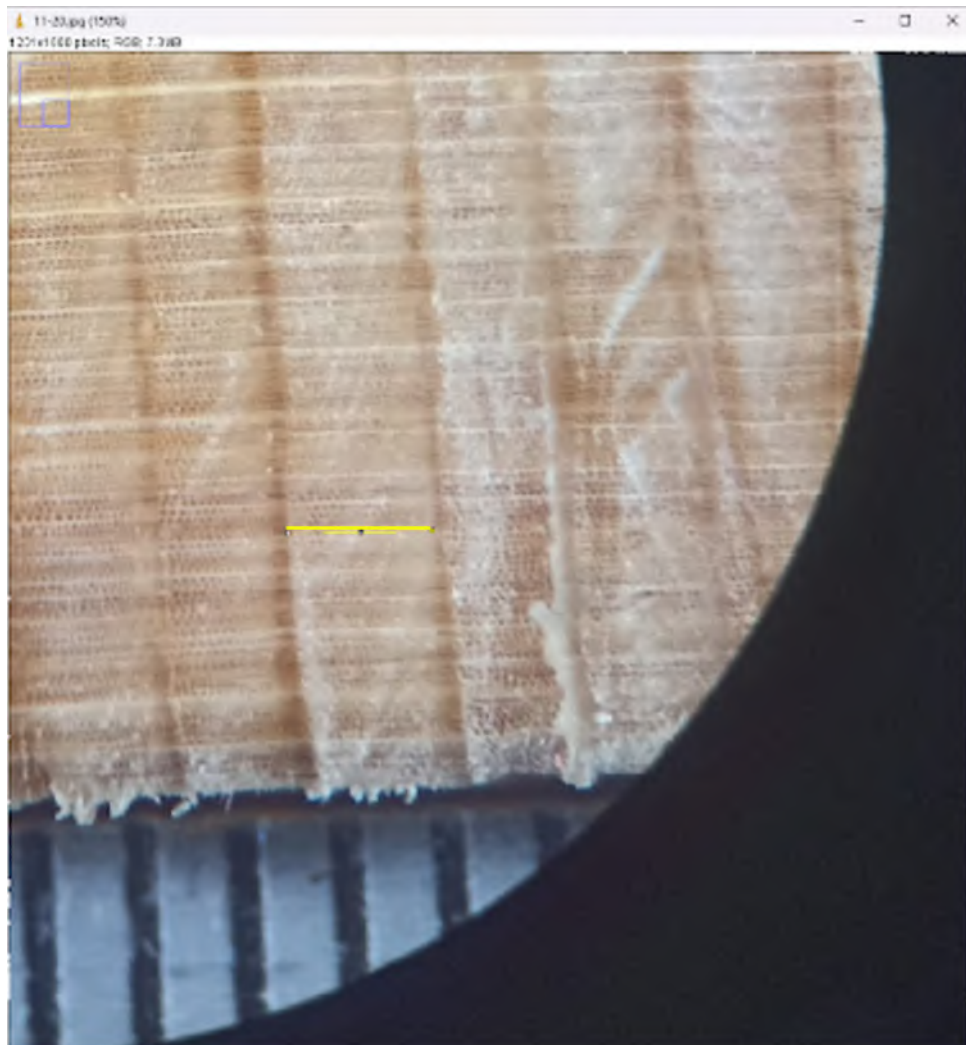


Figura 3.8: Ajuste de escala del Software ImageJ para medición de anillos de crecimiento



17

Figura 3.9: Trazo sobre madera temprana de un anillo de crecimiento para realizar una medición.

Obtención de propiedades mecánicas

La importancia de obtener los valores de las propiedades mecánicas de un material radica en que este es caracterizado al obtener dichos datos. Por sus dimensiones y arreglo estructural, la probeta radial es mayormente definida obteniendo su módulo elástico radial; mientras que la probeta longitudinal es definida obteniendo su módulo elástico longitudinal.

Existen diferentes métodos desarrollados para obtener las propiedades mecánicas de un material. Algunos de ellos pueden resultar bastante costosos. Un método barato en cuanto a la preparación del arreglo experimental es utilizado en este trabajo. Mediante mediciones de respuesta en frecuencia en combinación con el método de Chladni fue posible calcular las propiedades mecánicas más relevantes de cada probeta. El método de Chladni es una forma de visualizar modos de vibración sobre superficies planas. Al esparcir arena fina al azar sobre una placa esta se acomoda formando patrones cuando la placa se encuentra en resonancia. La arena se acumula en los lugares donde la placa no vibra, siendo estos patrones los modos de vibración de la placa.

Para visualizar los modos de vibración de una estructura primero es de mucha utilidad conocer la frecuencia del modo que se desea visualizar. El programa visual analyser instalado en una computadora fue utilizado para medir la frecuencia a la que resonaban las estructuras que se midieron en este trabajo. El programa mostró el espectro del sonido, las frecuencias con mayor amplitud fueron probadas con el método de Chladni para ver cual correspondía al modo que se buscaba. El programa Ansys fue utilizado para calcular los valores de las propiedades mecánicas.

Estas propiedades se miden en unidades de GPa . G es el símbolo utilizado para el prefijo giga, el cual tiene un factor de multiplicación de 10^9 . Pa implica la cantidad de presión o esfuerzo que se está midiendo $1 \text{ Pa} = 1(\frac{N}{m^2})$.

Obtención de frecuencias de resonancia

Un espectro de sonido es la representación gráfica del contenido armónico de un sonido y la amplitud de cada una de sus frecuencias. Analizando el espectro del sonido que provoca una estructura resonante es posible obtener sus frecuencias de resonancia.

Para cada probeta analizada en este trabajo se obtuvo la frecuencia de resonancia del modo de vibración que más la caracteriza. Para esto, cada estructura fue sujeta con los dedos pulgar e índice de la mano izquierda (como si estos fueran una pinza). Mientras tanto, los nudillos de la mano derecha golpeaban la estructura sujeta. La estructura fue sujeta y golpeada cerca del micrófono de la computadora. El programa visual analyser permaneció encendido mientras la estructura era manipulada cerca del micrófono de la computadora. Así, el programa captaba el sonido producido al golpear la estructura para obtener el espectro de dicho sonido. La zona donde las estructuras fueron sujetadas debía ubicarse justo en la zona de alguna línea nodal del modo del cual se deseaba obtener su frecuencia. El lugar donde las probetas fueron golpeadas se encontraba en las áreas vibrantes de la estructura con respecto a dicho modo. La zona de agarre y la zona de golpe varían dependiendo

de la estructura y el modo que se desea obtener. Ver Figura 3.10.

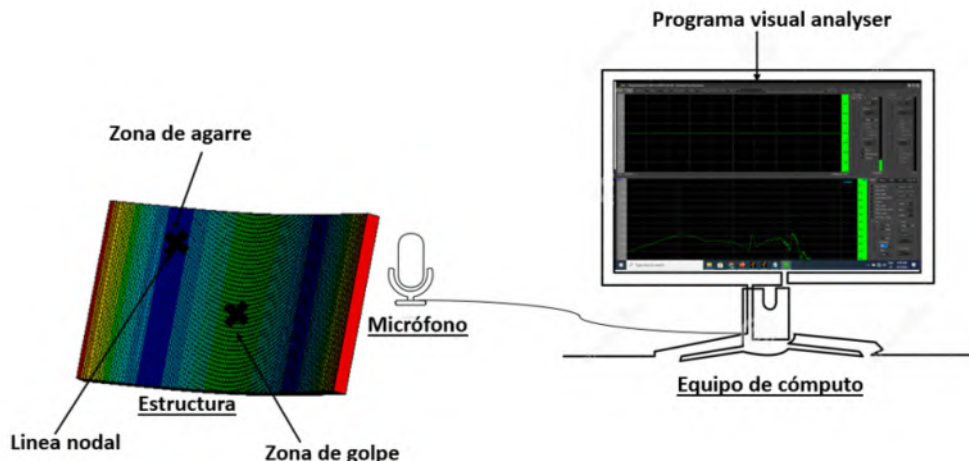


Figura 3.10: Esquema que muestra donde cada probeta fue sujeta y golpeada, y su posición respecto a la posición del micrófono y el equipo de cómputo para la obtención de su frecuencia de resonancia.

Obtención de modos de vibración

Para el experimento del método de Chladni, el arreglo experimental desarrollado consistió en una bocina adaptada con un alambre como extensión fija para transmitir sus vibraciones. También se elaboraron dos soportes para sostener las piezas de madera y tener dos puntos extra de apoyo. Los soportes fueron fabricados usando cilindros de cartón. Los cilindros fueron rellenos con fibra esponja de manera que ésta sobresaliera del cilindro en forma de cono, de esta manera la esponja queda en contacto con la pieza de madera. Al ser un material de baja impedancia la fibra esponja no interfiere con las vibraciones provocadas por la bocina; esta fibra resultó ser un buen material para realizar el experimento en condiciones cercanas a frontera libre. Es necesario esparcir un polvo visible y ligero sobre la estructura colocada en el arreglo experimental. Después de probar con diferentes materiales resultó adecuado utilizar tepojal. Es una pequeña piedra pómic de origen volcánico sumamente ligera, además tiene un color grisáceo que contrasta con el color de la madera y es posible apreciar perfectamente la forma de los modos. Para montar el arreglo experimental, una base fue utilizada para colocar la bocina y los soportes. Así fue posible realizar el experimento de forma controlada, recuperando fácilmente el tepojal que caía sobre la base. Si no se usa la base, el polvo termina en el suelo y es mucho más complicado mantener limpio el lugar.

Cada probeta fue colocada sobre el arreglo experimental teniendo tres puntos de apoyo: el alambre de la bocina y los dos soportes. Los soportes servían de apoyo debajo de las líneas nodales que la estructura presentará según el modo que se deseaba visualizar. El alambre daba soporte en una zona antinodal. El acomodo de los soportes y la bocina en el arreglo experimental fue variando dependiendo de la estructura y el modo a visualizar.

Un generador de frecuencia fue enlazado al amplificador de la bocina. Este enlace se realizó dependiendo de las características del generador (teléfono o computadora). El amplificador enviaba las señales que recibía del generador a la bocina. La frecuencia a la que vibraba la bocina fue controlada desde el generador, como puede observarse en la Figura 3.11. Esto mediante una aplicación de generador de frecuencia instalada en el generador (teléfono o computadora). El alambre de la bocina, además de dar soporte a la estructura colocada, transmitía las vibraciones de la frecuencia salientes de la bocina a la estructura.

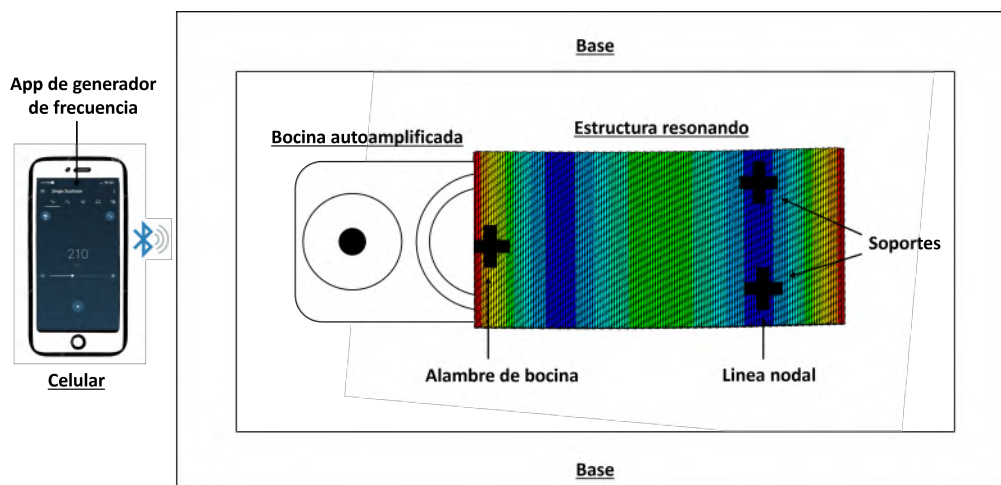


Figura 3.11: Esquema de la vista superior del acomodo de la estructura en el arreglo experimental utilizado para la visualización de un modo de vibración.

Mientras se efectuaban las vibraciones se dispersó tepojal sobre la superficie de la estructura. El tepojal se acumuló sobre las líneas nodales y las zonas antinodales quedaron libres. De esta manera fue posible visualizar el modo de vibración de la estructura que compartía la frecuencia de resonancia a la que vibraba la bocina.

Obtención de modos simulados

Una simulación de las probetas fue creada utilizando sus medidas, peso y densidad. Un batch fue creado en un editor de texto. En este archivo de texto se encuentran los comandos internos que fueron utilizados en el software ANSYS para obtener la simulación. El archivo fue guardado en el equipo de computo. Para que el software Ansys pueda leer el archivo de texto se abre el programa Mechanical APDL de Ansys. En la barra de menús se da clic en el menú "FILE", que desplegará un submenú del cual se da clic en "READ INPUT FROM". Esta opción abre una ventana de búsqueda de los archivos guardados en el equipo, se navega hasta encontrar el batch. Una vez encontrado el batch se selecciona y se da clic en "OK". El batch fue ejecutado de forma automática mostrando los resultados. El archivo de texto utilizado está escrito a continuación:

```
/CLEAR, START
/PREP7
X1 = 0.0415 ! Variables
```

```

Y1 = 0.196
Z1 = 0.007
Weight = 0.02170
Mesh_Size = 0.01
BLOCK,0,X1,0,Y1,0,Z1 ! Geometry
MP, DENS, 1, Weight /(X1*Y1*Z1) ! Material properties
MP, EX, 1, 1.05e9
MP, GXY, 1, 0.385E9
MAT, 1
ET, 1, SOLID92
ESIZE, Mesh_Size
VMESH, 1 ! Mesh
FINISH
/SOLU ! Solution
ANTYPE, MODAL
MODOPT, SUBSP, 20
SOLVE
FINISH
/POST1 ! Viewing results
SET,,,,,,7
PLNSOL, U, Z

```

El archivo de texto fue modificado dependiendo la probeta que se buscaba simular, agregando a cada comando las características de la probeta a simular. Una vez que Ansys leyó el archivo de texto y resolvió el modelo, es posible visualizar los modos de vibración simulados de la placa. Para visualizar los modos de vibración simulados hay que ir al menú “MAIN MENU” y seleccionar “GENERAL POST-PROC”, que despliega un submenú del cual se selecciona “RESULTS VIEWER”. Se abrirá una ventana de controles donde se dará clic en el menú desplegable con la frase “CHOOSE A RESULT ITEM”. Del menú desplegado se selecciona la opción “DOF SOLUTION”, que a su vez desplegará un submenú donde se selecciona la opción “DISPLACEMENT VECTOR SUM”. Los menús desplegables de la ventana de controles deben indicar las opciones mostradas en la Figura 3.5 El primer modo de vibración aparece colocando la barra deslizadora de la ventana de controles en el punto 7. Los primeros 6 puntos corresponden a modos de cuerpo rígido (movimiento de rotación o traslación de un cuerpo sin sufrir ninguna deformación interna significativa).

Cálculo del Módulo de Young de las probetas

Las propiedades mecánicas de las probetas (E_L , E_R) fueron calculadas mediante la solución del elemento finito. Las medidas (largo, ancho, espesor), volumen, peso y densidad de las probetas se obtuvieron experimentalmente para poder llenar la información de los comandos internos del batch. En este punto las frecuencias de resonancia para cada modo de vibración asociado a cada módulo elástico ya eran conocidas. Los valores de los módulos elásticos se obtuvieron modificando el batch, poniendo una estimación burda en el valor del comando del módulo que se deseaba obtener.

El batch fue guardado nuevamente en el equipo de cómputo para que la información agregada se actualizará. Posteriormente se realizaron los pasos explicados con

anterioridad en “Obtención de modos simulados” para que Ansys leyera el archivo de texto, resolviera el modelo y se pudieran visualizar los modos de vibración.

Después, el modo de vibración simulado relacionado con el módulo elástico del cual se buscaba su valor fue visualizado. La frecuencia de resonancia del modo simulado debía coincidir con la frecuencia obtenida para los modos normales de vibración. De ser así, el valor del módulo elástico estaría bien calculado. De lo contrario, hay que modificar el valor del módulo elástico hasta que los valores antes mencionados coincidan.

3.3. Modelo de generación de maderas y cálculo de sus vibraciones

3.3.1. Generación de los datos de las maderas: algoritmo de Scilab

El algoritmo de Scilab es una herramienta diseñada para obtener datos característicos de materiales tipo maderas suaves. Además, fue calibrado para generar datos específicos de la madera de *Picea abies*. Este algoritmo fue creado en el Laboratorio de Acústica de la Escuela de Laudería del INBAL para colaborar con el desarrollo de este trabajo, y responde a la necesidad de contar con información precisa sobre densidad y propiedades mecánicas de madera temprana y madera tardía. La obtención experimental de estos datos implica una labor de alta complejidad, además del uso de equipo especializado, lo cual dificulta su implementación en un tiempo limitado.

Datos de entrada

Esta es la primera sección del algoritmo, comienza con el comando *clear*. Este comando asegura que cualquier variable o dato preexistente no interfiera con los cálculos o resultados del programa actual.

La primera variable, *densidad buscada*, se refiere a una densidad promedio de la madera, la que se obtendría al dividir la masa total de una pieza sobre su volumen total. Estos datos fueron obtenidos de forma experimental, midiendo y pesando las piezas de madera presentadas en la sección “Maderas analizadas”. La variable *Dif* establece la diferencia que se requiere entre la densidad temprana y la densidad tardía, este dato fue obtenido de la bibliografía [\[Stoel and Borman, 2008\]](#). Las variables para *tamaño mínimo y máximo de veta temprana* fueron obtenidas de mediciones experimentales explicadas en el apartado “Mediciones experimentales de ancho de anillos”. Las variables para la *relación mínima y máxima de madera temprana entre tardía* también fueron calculadas en base a los datos obtenidos en las mediciones experimentales.

Las variables *coefiEL* y *coefiER* contienen coeficientes de ecuaciones que calculan las propiedades E_L y E_R respectivamente, a partir del valor conocido de la densidad. La variable *maderasAleatorias* indica el número de maderas que serán calculadas.

```
clear
```

```

DensidadBuscada =
Dif =

tamanoMinimoVetaTemprana =
tamanoMaximoVetaTemprana =
relacionMinTempranaEntreTardia =
relacionMaxTempranaEntreTardia =

coefiEL = []
coefiER = []

maderasAleatorias =

```

Proporciones para madera temprana y madera tardía: variable entradas

En esta sección los datos de entrada *maderasAleatorias*, los datos referentes al *tamaño mínimo y máximo de veta temprana*, así como la *relación mínima y máxima de madera temprana entre tardía*, son usados para generar una nueva variable (*entradas*).

La variable *entradas* es una matriz de dimensiones $m \times 3$, donde m representa el número de filas, que corresponde al número de maderas aleatorias establecidas por el dato de entrada específico. Las columnas de la matriz corresponden, respectivamente, a la densidad temprana, el factor veta y el tamaño de la madera temprana. Estos componentes están comentariados en el algoritmo como se muestra a continuación:

```

// 'rand' da valores aleatorios entre 0 y 1
Entradas = [1000*(rand(maderasAleatorias,1)) 1./ (
    relacionMinTempranaEntreTardia + (
    relacionMaxTempranaEntreTardia -
    relacionMinTempranaEntreTardia)*rand(maderasAleatorias,1))
    tamanoMinimoVetaTemprana + (tamanoMaximoVetaTemprana -
    tamanoMinimoVetaTemprana)*rand(maderasAleatorias,1)]
// Entradas = [densidadtemprana factorveta tama otemprana]

```

Para calcular los elementos de la matriz, cada columna se genera implementando una ecuación que utiliza el comando *rand* como un generador de números aleatorios. El comando *rand* crea una matriz en la que sus elementos son números aleatorios de 0 a 1. En el Cuadro 3.1 se muestra un ejemplo de una matriz creada por este comando con dimensiones 5×1 .

Densidad temprana

Para crear la densidad temprana, el algoritmo utiliza la siguiente fórmula:

$$Densidadtemprana = 1000(rand(maderasAleatorias, 1)) \quad (3.1)$$

En esta fórmula, *rand(maderasAleatorias, 1)* genera una matriz de números aleatorios de tamaño *maderasAleatorias* $\times$ 1. Al multiplicar los valores por el escalar

Cuadro 3.1: Ejemplo de una matriz creada por el comando: rand(5,1)

	1
1	0.2113
2	.756
3	2.2113e-4
4	4.3303
5	0.6654

1000, se obtiene una distribución de densidades aleatorias de 0 a 1000, que representan la densidad de madera temprana.

Factor veta

El factor veta establece el porcentaje de madera tardía con relación a la madera temprana. Para calcularlo se utiliza la fórmula:

$$Factorveta = \frac{1}{(RMnTa/Ti + (RMxTa/Td - RMiTa/Ti) * rand(mA, 1))} \quad (3.2)$$

Donde $RMnTa/Ti$ es la *relación mínima de madera temprana entre tardía*, $RMxTa/Ti$ es la *relación máxima de madera temprana entre tardía*, y $rand(mA, 1)$ representa $rand(maderasAleatorias, 1)$.

$rand(maderasAleatorias, 1)$ genera una matriz de números aleatorios de tamaño $maderasAleatorias \times 1$. La diferencia *relacionMaxTempranaEntreTardía - relacionMinTempranaEntreTardía* representa el rango completo de variación posible en la relación madera temprana-tardía. Este rango es multiplicado por el valor aleatorio generado por $rand(maderasAleatorias, 1)$. Recordemos que $rand$ produce números aleatorios entre 0 y 1, lo que significa que la mayoría de los números generados serán decimales. Por lo tanto, si $rand(maderasAleatorias, 1)$ produce un valor 0, el resultado de la multiplicación será 0, lo que significa que no hay incremento y el valor final será el límite mínimo (*relación mínima de madera temprana entre tardía*), ya que se añade el valor mínimo al resultado de la multiplicación para asegurar que el valor final esté dentro del rango deseado. Si $rand(maderasAleatorias, 1)$ produce un valor 1, el resultado de la multiplicación será igual al rango completo, lo que sumado al valor mínimo da el valor máximo. El resto de los números generados por $rand$ entre 0 y 1 resultaran en un incremento ajustado al valor mínimo y máximo establecido. Finalmente se toma el valor inverso del resultado para establecer el porcentaje de madera tardía respecto a temprana.

Tamaño temprana

El tamaño de la madera temprana se calcula con la siguiente ecuación:

$$TamañoTemprana = tMnVTa + (tMxVTa - tMnVTa) * rand(mA, 1) \quad (3.3)$$

Donde $tMnVTa$ es el *tamaño mínimo de veta temprana*, $tMxVTa$ es el *tamaño máximo de veta temprana*, y $rand(mA, 1)$ representa $rand(maderasAleatorias, 1)$.

$rand(maderasAleatorias,1)$ genera una matriz de números aleatorios de tamaño $maderasAleatorias \times 1$. La diferencia $tamañoMaxVetaTemprana - tamañoMinVetaTemprana$ representa el rango completo de variación posible para el tamaño de veta temprana. Este rango es multiplicado por $rand(maderasAleatorias,1)$, que genera variaciones de incremento dentro del rango establecido. Por lo tanto, la suma: $tamaño\ mínimo\ de\ veta\ temprana +$ el incremento generado, es igual al tamaño de madera temprana.

Propiedades elásticas

En esta sección del algoritmo, se utilizan los datos de entrada correspondientes a los coeficientes para E_L y E_R , junto con las densidades de madera temprana generadas por la variable *entradas*. Estos datos se integran en ecuaciones diseñadas para calcular las propiedades de la madera temprana. Para calcular las propiedades de la madera tardía, las fórmulas requieren además el diferencial de densidad entre madera temprana y madera tardía, establecido en la variable *Dif*.

```

////////////////////////////////////////
//estos ciclos calculan las propiedades el sticas a partir
//de los polinomios creados con los coeficientes dados de
//entrada
////////////////////////////////////////

gradoEL=length(coefiEL)
ELtemprana=0
for qw=1:gradoEL
    ELtemprana=ELtemprana+coefiEL(qw)*Entradas(:,1).^(qw-1)
end

ELtardia=0
for qw=1:gradoEL
    ELtardia=ELtardia+coefiEL(qw)*(Entradas(:,1)+Dif).^(qw-1)
end
////////////////////////////////////////

gradoER=length(coefiER)
ERtemprana=0
for qw=1:gradoER
    ERtemprana=ERtemprana+coefiER(qw)*Entradas(:,1).^(qw-1)
end

ERtardia=0
for qw=1:gradoER
    ERtardia=ERtardia+coefiER(qw)*(Entradas(:,1)+Dif).^(qw-1)
end
////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////

```

Para calcular cada propiedad elástica el algoritmo resuelve la siguiente ecuación:

$$f(x) = C0 + C1X \quad (3.4)$$

Donde X es la densidad del material, localizada en la variable $Entradas(:,1)$, $C0$ y $C1$ representan los coeficientes para cada módulo elástico.

Para resolver la Ecuación 3.4, el comando *for* es utilizado para crear un bucle que ejecuta repetidamente una instrucción (ecuación) en el código mientras la variable qw toma diferentes valores en un rango específico. Por ejemplo, en el cálculo de E_L para madera temprana, el rango de qw está indicado en la expresión *for* $qw=1:gradoEL$, donde se indica que el valor de qw va de 1 a $gradoEL$. El valor de $gradoEL$ está determinado por el comando *length*, el cual es utilizado para determinar la longitud o tamaño de un elemento. Para un vector *length* devuelve el número de elementos en el vector, para una matriz rectangular devuelve el mayor de los dos valores (filas o columnas). En la indicación $gradoEL=length(coefiEL)$ el comando *length* está obteniendo el número de elementos (coeficientes) dentro de *coefiEL*. Por lo tanto el valor de qw va de 1 a 2, ya que hay dos coeficientes dentro de *coefiEL*.

La instrucción (ecuación) a resolver es:

$$ELtemprana = ELtemprana + coefiEL(qw) * Entradas(:,1).^{\hat{qw}-1} \quad (3.5)$$

Donde $ELtemprana$ es una variable igual a 0, $coefiEL(qw)$ es un coeficiente almacenado en el vector *coefiEL*, $Entradas(:,1)$ selecciona la primera columna de la matriz *entradas*, que almacena la densidad de la madera temprana, $.\hat{qw}-1$ indica que cada elemento de la columna $Entradas(:,1)$ se eleva a la potencia $qw-1$.

Si $gradoEL = 2$, el bucle *for* $qw=1:gradoEL$ se ejecutará dos veces con qw tomando los valores 1 y 2. En la primera iteración, cuando $qw = 1$, la ecuación es:

$$ELtemprana = ELtemprana + coefiEL(1) * Entradas(:,1).^{\hat{1}-1} \quad (3.6)$$

En esta primera iteración, todos los elementos de la columna $Entradas(:,1)$ son elevados a la potencia 0, lo cual da una columna de unos. Entonces, lo que se suma a $ELtemprana$ es el primer coeficiente de *coefiEL* multiplicado por la columna de unos generada de elevar a 0 la primera columna de *entradas*.

Iteración 2, cuando $qw = 2$:

$$ELtemprana = ELtemprana + coefiEL(2) * Entradas(:,1).^{\hat{2}-1} \quad (3.7)$$

En la segunda iteración todos los elementos de la matriz $Entradas(:,1)$ son elevados a la potencia 1, lo que significa que no sufren ninguna modificación. A $ELtemprana$ se suma el coeficiente 2 de *coefiEL* multiplicado por la densidad, es decir, los valores de la primera columna de *entradas*.

Para el cálculo de las propiedades de madera tardía las fórmulas establecen que a la columna $Entradas(:,1)$ se le suma el valor del diferencial de densidad, que es igual a la densidad de la madera tardía.

El Cuadro 3.2 muestra un ejemplo de una corrida del programa para calcular E_L de madera temprana. Las variables necesarias para el calculo son incluídas, como los coeficientes para E_L y los valores para qw . También un valor de densidad temprana es asignado en la variable $Entradas(:,1)$. Adicionalmente, la Ecuación 3.4 es resuelta utilizando las variables indicadas.

Densidad promedio

La densidad promedio es un dato importante que se debe calcular. Al calcular las densidades a partir de valores aleatorios no todas las maderas tendrán la misma densidad para madera temprana y madera tardía. Además cada madera presenta diferentes proporciones de madera temprana y madera tardía dentro del rango establecido.

```
densidadPromedio=((Entradas(:,1)+Dif).*(Entradas(:,2).*
    Entradas(:,3)))+(Entradas(:,1).*Entradas(:,3)))/(Entradas(
    :,:3)+(Entradas(:,2).*Entradas(:,3)))
```

La fórmula empleada por el algoritmo tambien puede ser expresada:

$$densidadPromedio = \frac{(\rho Ti * tmTi) + (\rho Ta * tmTa)}{TmTa + TmTi} \quad (3.8)$$

Donde ρTi y $tmTi$ son la densidad de la madeta tardía y el tamaño de la madera tardía respectivamente, ρTa y $tmTa$ son la densidad y el tamaño de la madera temprana.

En la Ecuación 3.8, el numerador calcula la contribución de cada tipo de madera a la densidad promedio, multiplicando la densidad de cada madera por su tamaño específico. En el denominador, la suma de los tamaños de ambas maderas representa el tamaño total de la muestra, combinando ambos tipos. Así, esta fórmula permite obtener la densidad promedio de un anillo de crecimiento, considerando las proporciones relativas de cada tipo de madera.

Ajuste de resultados

En esta sección el algoritmo hace el ajuste de los resultados obtenidos. El orden y la presentación de los datos son importantes para su análisis. Como resultado se obtiene una matriz de dimensiones $maderasAleatorias \times 10$, donde las filas son las maderas creadas y las columnas son los datos que las caracterizan. Las maderas con densidades promedio más cercanas a la densidad buscada se encuentran en las primeras filas de la matriz. Posteriormente los datos de cada columna de la matriz son guardados en archivos csv.

Orden de los datos

Los siguientes comandos y variables establecidas son utilizados para ordenar los resultados. La variable *control* obtiene la diferencia entre la *densidad promedio* y la

Cuadro 3.2: Ejemplo de una corrida del programa para obtener E_L de madera temprana comparada con la ecuación 3.4.

<i>Variables</i>				<i>Resultado Iteración 1</i>	<i>Resultado Iteración 2</i>	<i>Ecuación</i>
	EL temprana	coefEL	Entradas(:,1)	qw-1	ELtemprana+coefEL(qw)	C0 + C1X
<i>Variables en iteración 1</i>	0	2.07347665523	211.324	0	2073.4766	
<i>Variables en iteración 2</i>	2073.4766	3.06409918227	211.324	1	8548.6801	8548.6801

densidad buscada, y utiliza el comando *abs* para obtener el valor absoluto de esta resta.

La variable *completa* crea una matriz donde agrupa los resultados obtenidos. La variable *control* es la primera columna de esta matriz y por lo tanto es un dato que determina cuáles son las maderas con densidades más cercanas al valor buscado de la densidad.

Para organizar los datos, la variable *ordenada* usa el comando *gsort* para crear una nueva matriz que ordena las filas de la matriz *completa* en forma creciente, tomando en cuenta la primera columna de la matriz *completa*. Es decir, las filas se ordenan de menor a mayor dependiendo de los datos dentro de la variable *control*.

La variable *etiquetas* crea una matriz que indica los nombres de las columnas dentro de la matriz *ordenada* para que puedan ser consultados en el navegador de variables.

```

////////////////////////////////////
//los siguientes comandos ordenan las maderas para que los
//mejores datos esten al principio de la matriz
////////////////////////////////////
control=abs(densidadPromedio-DensidadBuscada)

Completa=[control Entradas densidadPromedio Entradas(:,1)+Dif
           1e6*ELtemprana 1e6*ELtardia 1e6*ERtemprana 1e6*ERTardia]
//                                           Densidad tard a

ordenada=gsort(Completa,'lr','i')

etiquetas=['meta' 'dens tempr' 'tard %temp' 'tm temp' 'dens
           prom' 'dens tardia' 'ELtemprana' 'ELtardia' 'ERtemprana' '
           ERTardia']
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

```

Archivos generados

El comando *csvWrite* es usado para guardar los datos de interés como densidades, tamaño temprana, factor veta y propiedades mecánicas, en un archivo csv. Los datos son extraídos de la matriz *ordenada*, que presenta las maderas con los resultados más óptimos en las primeras filas. Este proceso garantiza que la información esté disponible para un análisis posterior. Al almacenarse en archivos CSV (Comma-Separated Values), estos documentos pueden ser leídos fácilmente por el software ANSYS para realizar simulaciones utilizando su información. Este tipo de archivo de texto, sin codificación compleja, es legible por cualquier otro programa, lo que facilita su compatibilidad y uso en diferentes plataformas.

```

csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,2)], 'DensTemp.csv
')
```

```

csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,3)], 'tardPctTemp.
csv')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,4)], 'tmnTemp.csv
')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,6)], 'DensTardia.
csv')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,7)], 'ELTemp.csv')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,8)], 'ELtardia.csv
')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,9)], 'ERtemp.csv')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,10)], 'ERtardia.
csv')

```

El comando `csvWrite`, por ejemplo, escribe la matriz `[(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,10)]` en un archivo de texto. Esta es una matriz de dimensiones $maderasAleatorias \times 2$ que está formada de la siguiente manera: `(1:maderasAleatorias)` genera un vector que va de 1 hasta `maderasAleatorias`, al tener un apóstrofo se aplica una transposición conjugada, lo que transfiere al vector de fila a columna. Es decir, se crea una columna de números de 1 hasta `maderasAleatorias`. Por su parte, `ordenada(:,10)` está seleccionando la columna 10 de la matriz `ordenada`, que corresponde al módulo E_R de la madera tardía. Por lo tanto, la primera columna de la matriz indica el número de madera y la segunda columna corresponde a la propiedad elástica. El segundo argumento de la función es el nombre que tendrá el archivo, en este caso: `'ERtardia.csv'`

3.3.2. Análisis Modal: algoritmo de ANSYS

Las maderas creadas por el algoritmo fueron simuladas mediante un batch en un editor de texto utilizado en el programa Mechanical APDL de ANSYS. El batch contiene los comandos internos necesarios para llevar a cabo la simulación. Algunos datos de entrada pueden ser ajustados dentro del batch, tales como: las dimensiones de la placa a simular (ancho, altura, espesor) y el número de modos que se desean visualizar como resultado. Además, es necesario especificar el total de maderas creadas por el algoritmo y elegir el número de madera que se desea simular.

El batch está diseñado para simular madera de *Picea abies*, en conjunto con los datos generados por el algoritmo de Scilab. Las maderas simuladas tienen la particularidad de ser creadas como un material compuesto, teniendo propiedades específicas para los dos tipos de material que la conforman: la madera temprana y la madera tardía. Visualmente es posible apreciar esta característica, solo se debe hacer zoom en las placas simuladas para poder observar las vetas de la madera.

El batch fue creado en el Laboratorio de Acústica de la Escuela de Laudería del INBAL como parte de una colaboración para el desarrollo de este proyecto. Para implementar esta herramienta, fue fundamental comprender en profundidad el funcionamiento del programa, lo que llevó a la consulta del diccionario de comandos de Mechanical APDL para interpretar los comandos internos del batch. Este diccionario se puede encontrar accediendo al programa Mechanical APDL de Ansys. En la barra de menús, se debe hacer clic en “Help”, luego seleccionar “Help Topics”, lo

que abrirá un enlace con documentos que contienen información, guías y tutoriales sobre el uso del software. En el apartado “Command Reference” se encuentra un diccionario completo con descripciones detalladas de los comandos de Mechanical APDL, organizados alfabéticamente. En este documento se obtuvo información detallada sobre los comandos. Cada comando del batch fue consultado en el documento “Command Reference” para identificar su función e instrucciones.

Sección de inicio

A continuación se muestra la sección de inicio del batch. Las descripciones de los comandos se añaden frente a cada comando. El signo de admiración al inicio de cada descripción le indica al software que la frase es un comentario. Algunas líneas del batch no contienen comandos, sino variables, que se pueden reconocer por tener un signo de igual (=) seguido del valor que representan, ya sea una unidad o el nombre de un documento.

```
/CLEAR , all !clear limpia la base de
datos
/CLEAR , START
/CWD,'C:\Users\danas\Documents' !cambia el directorio de
trabajo actual. Nombre completo de la ruta del nuevo
directorio de trabajo.

STRUT='VetasDelgadas' !declaracion de variable
/TITLE,VetasDelgadas !define un titulo principal
/FILNAME,STRUT !cambia el nombre de trabajo
(Jobname) para el analisis.Nombre que se utilizar como
nombre de trabajo
```

Construcción del modelo. Entrada al preprocesador general: PREP7

Esta sección del batch comienza con la instrucción para ingresar al procesador *PREP7*. Un procesador es una colección de comandos relacionados usados para cumplir una función general. El procesador *PREP7* contiene los comandos que construyen el modelo. Las funciones dentro de este procesador son definir la geometría del modelo y las propiedades del material. Además, se genera el mallado del modelo, discretizando la geometría en pequeños elementos finitos que facilitan los cálculos numéricos.

```
/PREP7 !entra en el preprocesador de creacion
de modelos.

maderaPorAnalizar='1' !selecciona un numero de madera creada
por el algoritmo

indiceDeMadera = VALCHR(maderaPorAnalizar)
```



```

!dimensiones de la placa a similar, la variable altura siempre va
    en sentido paralelo a las vetas de la placa

!placatapaviolin
!largo=.210
!altura=.360
!espesor=.003

!placaDani
largo=.026
altura=.199
espesor=.0065
!modo1=990hz, experimental

!Placa Zahid
!largo=.196
!altura=.0415
!espesor=.007
!modo1=310, experimental

!Placa Dana
!largo=.165
!altura=.0855
!espesor=.006
!modo1=260, 510, experimental
!

NumberModes=40

TotalDeMaderasDeScilab=1000

```

Variables de control para guardar cambios

Las siguientes variables son utilizadas para actualizar el directorio de trabajo. Algunos documentos serán creados a partir del análisis del modelo y estas variables son utilizadas para indicar donde serán guardados los datos resultantes.

```

SaveInWorkingDir=1      !1-->WORKING DIRECTORY, 0-->IN THE DIR
    SPECIFIED AT FOLLOWING
DirectoryPart1='C:\Users\Alex Torres' !STRING IN TWO PARTS OF THE
    DIRECTORY TO SAVE    (TOO LENGTH)
!DirectoryPart1='C:\Users\INBA'
DirectoryPart2='\Google Drive\DellyLap\ANSYS'

```

Obtención de los datos generados por el “algoritmo para crear maderas”

Estos comandos le dan a ANSYS la indicación de utilizar los datos creados por “el algoritmo para crear maderas”. El comando **DIM* crea una matriz y le da un nombre para identificarla. El comando **TREAD* lee los datos de un archivo externo

dentro de la matriz que creó el comando **DIM*. Cada par de comandos **DIM* y **TREAD* representa la extracción de un archivo creado por el “algoritmo para crear maderas”. En el último par de comandos de la siguiente lista se encuentra la descripción detallada de cada comando.

```
*DIM,DensTemp,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,DensTemp,DensTemp, csv

*DIME,tardPctTemp,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,tardPctTemp,tardPctTemp, csv

*DIME,tmnTemp,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,tmnTemp,tmnTemp, csv

*DIME,DensTardia,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,DensTardia,DensTardia, csv

*DIME,ELTemp,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,ELTemp,ELTemp, csv

*DIME,ELtardia,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,ELtardia,ELtardia, csv

*DIME,ERtemp,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,ERtemp,ERtemp, csv

*DIME,ERTardia,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
!*DIM
    !define un parametro de arreglo y sus dimensiones,
    crea una matriz
!*ERTardia
    !nombre alfanumerico utilizado para identificar este
    parametro, nombre de la matriz
!*table
    !Los indices de arreglo son numeros reales (no
    enteros) que deben definirse al llenar la tabla. Los n meros de
    indice para las filas y columnas se almacenan en la columna
    cero y en las "posiciones de arreglo" de las filas, y se asignan
    inicialmente a un valor cercano a cero. Los n meros de indice
    deben estar en orden ascendente y se utilizan solo para
    recuperar un elemento del arreglo. Al recuperar un elemento del
    arreglo con un indice real que no coincide con un indice
    especificado, se realiza una interpolaci n lineal entre los
    ndices mas cercanos y los valores correspondientes del arreglo
    (*SET). Se utiliza para tablas 1D, 2D o 3D.
!*TotalDeMaderasDeScilab-1
    !Extensi n de la primera dimension (
    fila). (Para Type = STRING, IMAX se redondea al siguiente
    multiplo de ocho y tiene un limite de 248). Por defecto = 1.
!*1
    !Extension de la segunda dimension (columna). Por
    defecto = 1.

*TREAD,ERTardia,ERTardia, csv
!*TREAD
    !Lee datos de un archivo externo en un
    parametro de arreglo de tabla.
!*ERTardia
    !Nombre del parametro de arreglo de tabla
    segun lo definido por el comando *DIM.
```

!Ertardia	!Nombre del archivo y ruta del directorio
!csv	!Extension del nombre del archive

Variables para la creación de las vetas

Estas variables utilizan los datos creados por el algoritmo respecto al tamaño de la madera temprana y el porcentaje de madera tardía sobre la madera temprana. La variable *vetas* contiene una fórmula que calcula el número de anillos por placa. Divide la variable *largo* entre la suma del tamaño de la madera temprana y el tamaño de la madera tardía.

```
vetas=NINT(largo/(a+b))           !=ancho de la placa/
    tama o temprana+(tama o temprana * tard a % de temprana)
factorVeta=tardPctTemp(indiceDeMadera,1) !porcentaje de madera
    tardia respecto a temprana
a=tmnTemp(indiceDeMadera,1)       !ancho de madera temprana
b=a*factorVeta                    !ancho de madera tardia
tamanoElemento=.05
```

Creación de las vetas

En la siguiente sección se construyen las vetas de la madera. El comando **DO* define el inicio de un ciclo, lo que permite repetir un bloque de instrucciones de manera automática mientras se cumpla una condición específica. En este caso, se asigna al parámetro *n* el valor de 1, que aumenta de uno en uno hasta igualar el número total de anillos. Por lo tanto, *n* representa cada uno de los anillos que componen la placa. Por su parte, el comando *BLOCK* crea un volumen basado en las coordenadas del plano de trabajo (X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2). Hay dos comandos *BLOCK* en este bucle, cada uno contiene fórmulas en el eje X, que utilizan el parámetro *n* y las variables que contienen el tamaño de madera temprana y tardía para determinar sus coordenadas. El primer comando *BLOCK* crea los bloques de madera temprana. El segundo comando *BLOCK* crea los bloques de la madera tardía. Para las coordenadas Y2 y Z2, se utilizan las variables asociadas a estos ejes explicadas en la sección “Variables para dimensionar la placa”.

Los bloques se van creando con la cantidad de madera temprana y tardía correspondiente a cada anillo según los datos dados por el algoritmo. Las vetas surgen en una acción de bucle hasta que *n* es igual al número total de anillos, o sea hasta que *n* es igual a *vetas*.

```
*DO,n,1,vetas,1
!*DO,n,1,vetas,1    = *DO, Par, IVAL, FVAL, INC
!*DO                                !Define el comienzo de un bucle
    do.
!n                                !Nombre del par metro escalar
    que se utilizara como indice del bucle.
!1,vetas,1=IVAL, FVAL, INC        !Asignar inicialmente IVAL a Par
    . Incrementar IVAL en INC para cada iteracion sucesiva del bucle
    . Si IVAL excede FVAL y INC es positivo, el bucle no se ejecuta.
    INC tiene un valor predeterminado de 1. Se permiten incrementos
    negativos y numeros no enteros.
```

```

BLOCK, (n-1)*(a+b), n*a+(n-1)*b, 0, altura, 0, espesor      !Crea un
    volumen de bloque basado en las coordenadas del plano de trabajo
    .X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2. Crea bloques de madera temprana.
BLOCK, (n*a)+(n-1)*b, n*(a+b), 0, altura, 0, espesor      !Crea bloques
    de madera tardia
*ENDDO
    !Termina un bucle do e inicia la accion de bucle.
VGLUE, ALL          ! !Genera nuevos volúmenes al "unir" volúmenes.
    Todos los volúmenes seleccionados serán unidos.

```

En el Cuadro 3.3 se muestra un ejemplo de una corrida del programa donde el número total de anillos es igual a 6. Las variables son identificadas en la sección izquierda del cuadro. Valores fueron establecidos en la variables utilizadas en el cálculo de las coordenadas para dimensionar madera temprana y tardía. Para cada anillo de crecimiento, representados por n , se resuelven las ecuaciones que dan como resultado las coordenadas $X1$ y $X2$. La distancia entre éstas coordenadas representa el ancho de madera temprana o mandera tardía según sea el caso.

Propiedades del material

El comando *MP* otorga propiedades al material. Este modelo tiene diferentes tipos de materiales, madera temprana y madera tardía, por lo que es necesario especificar qué propiedades corresponden a cada uno. En una de las especificaciones del comando *MP* se establece el número de referencia que tendrá el material.

En este caso se establecen las propiedades de la madera temprana. El número de referencia utilizado para este material es el 1. El primer comando contiene una descripción detallada de cada uno de sus componentes. Las propiedades mecánicas generadas por el algoritmo son utilizadas (densidad, E_L y E_R), el resto de las propiedades fueron obtenidas de la literatura [Torres et al., 2020].

```

MP, DENS, 1, DensTemp(indiceDeMadera, 1)
!MP                                !Define una propiedad de material
    lineal como una constante o una funcion de la temperatura.
!DENS                              !Etiqueta de propiedad de
    material valida: densidad
!1                                  !Numero de referencia del
    material que se asociara con los elementos,
!DensTemp(indiceDeMadera, 1)      !Valor de la propiedad del
    material, o si se esta definiendo un polinomio de propiedad
    frente a la temperatura, el termino constante en el polinomio. C
    0 tambien puede ser un nombre de tabla (%tabname%); si C0 es un
    nombre de tabla, C1 a C4 se ignoran

MP, EY, 1, ELTemp(indiceDeMadera, 1)      !Modulo de Young
MP, EX, 1, ERTemp(indiceDeMadera, 1)      !Modulo de Young
MP, EZ, 1, ERTemp(indiceDeMadera, 1)      !Modulo de Young
MP, GXZ, 1, .5E9                        !Modulo cortante
MP, GXY, 1, .5E9                        !Modulo cortante
MP, GYZ, 1, .5E9                        !Modulo cortante
MP, NUXY, 1, .03                         !Razon de Poisson
MP, NUYZ, 1, .019                        !Razon de Poisson

```

Cuadro 3.3: Ejemplo de una corrida del programa para calcular coordenadas X1 y X2 para bloques de madera temprana y madera tardía respectivamente.

Variables			Madera Temprana		Madera Tardía	
	Tamaño temprana	Tamaño tardía	Número de anillo	Segundo comando BLOCK		
Tardía % temprana		a*factorvera		X1	X2	
factorveta	a	b	n	(n-1)*(a+b)	(n*a)+(n-1)*b	n*(a+b)
0.25	0.8	0.2	1	0	0.8	1
			2	1	1.8	2
			3	2	2.8	3
a+b=ancho de 1 anillo			4	3	3.8	4
			5	4	4.8	5
			6	5	5.8	6

```
MP,NUXZ,1,.33 !Razon de Poisson
```

A continuación se establecen propiedades para la madera tardía, a la cual se le otorga el número de referencia 2. Al igual que para la madera temprana, la densidad y los módulos de Young E_L y E_R son obtenidas de los datos generados por el algoritmo. El resto de las propiedades fueron obtenidas de la literatura [Torres et al., 2020].

```
MP,DENS,2,DensTardia(indiceDeMadera,1)
MP,EY,2,ELTardia(indiceDeMadera,1)
MP,EX,2,ERTardia(indiceDeMadera,1)
MP,EZ,2,ERTardia(indiceDeMadera,1)
MP,GXZ,2,.5E9
MP,GXY,2,.5E9
MP,GYZ,2,.5E9
MP,NUXY,2,.03
MP,NUYZ,2,.019
MP,NUXZ,2,.33
```

Asignación del material 1

El comando *MAT* asigna un material que será utilizado y le da un número de material para identificarlo. Los siguientes comandos son la asignación del material 1, el cual fue definido en la sección “Propiedades del material”. También es asignado el tipo de elemento utilizado, así como su tamaño.

```
MAT,1 !Establece el puntero de
      atributo de material del elemento, Asigna este n mero de
      material a los elementos definidos posteriormente (por defecto
      es 1).
ESIZE,tamanoElemento !Especifica el n mero predeterminado de
      divisiones de l nea .Longitud de borde del elemento
      predeterminada en los l mites de la superficie
ET,1,Solid45 !Define un tipo de
      elemento
```

El tipo de elemento usado: *SOLID45*, se utiliza para el modelado 3D de estructuras sólidas. El elemento se define mediante ocho nodos, teniendo tres grados de libertad en cada nodo: en las direcciones nodales X, Y, Z. El elemento cuenta con capacidades de plasticidad, fluidez, hinchamiento, endurecimiento por esfuerzo, grandes deflexiones y grandes deformaciones.

Mallado de la madera temprana

Los bloques de madera temprana y madera tardía son mallados por separado ya que son materiales con propiedades diferentes. Al utilizar un batch, o sea, un archivo de texto de ejecución por lotes, cada comando es una actualización de instrucciones. En la sección anterior se hizo la asignación del material 1, que contiene las propiedades de la madera temprana, establecidas en el apartado de “Propiedades del material”. El comando *VMESH* realiza el mallado en base a la última instrucción dada para la asignación de un material, por lo que es necesario establecer una especificación para mallar madera temprana.

En la sección “Creación de las vetas” se crearon los volúmenes de las vetas. Para cada bloque de madera temprana y madera tardía se crea un volumen. Al utilizar el comando *VGLUE* estos volúmenes fueron unidos y nuevos volúmenes se generaron.

El comando *VMESH* malla volúmenes, pero es necesario especificar los números de los volúmenes y limitar el mallado a solo la madera temprana. En esta parte del batch, el comando *VMESH* utiliza una fórmula que calcula el número de volúmenes que corresponden a la madera temprana después de que los bloques fueron unidos.

Para desarrollar esa fórmula se debió conocer el número de volúmenes creados antes de la unión. Para esto es necesario abrir el programa MECHANICAL APDL de ANSYS. Copiar todos los comandos del batch hasta la sección de “Creación de las vetas” sin incluir el comando *VGLUE*, y pegarlos en la barra de comandos de MECHANICAL APDL, presionando enter. Luego, en la barra de menú seleccionar “PlotCtrls”, del submenú desplegado dar clic en “Numbering...”. De la ventana emergente seleccionar la opción “VOLU Volume numbers” y dar clic en “ok”. Los volúmenes serán numerados y diferenciados por colores. En este caso ANSYS ubica el número de volumen en un lado lateral de cada bloque, por lo que sólo es posible observar el número del último volumen creado.

También se debe conocer el número de volúmenes generados después de la unión de los bloques. Solo se debe agregar el comando *VGLUE,ALL* en la barra de comandos y dar enter para que el nuevo número de volúmenes se actualice. Ver Figura

3.3.2

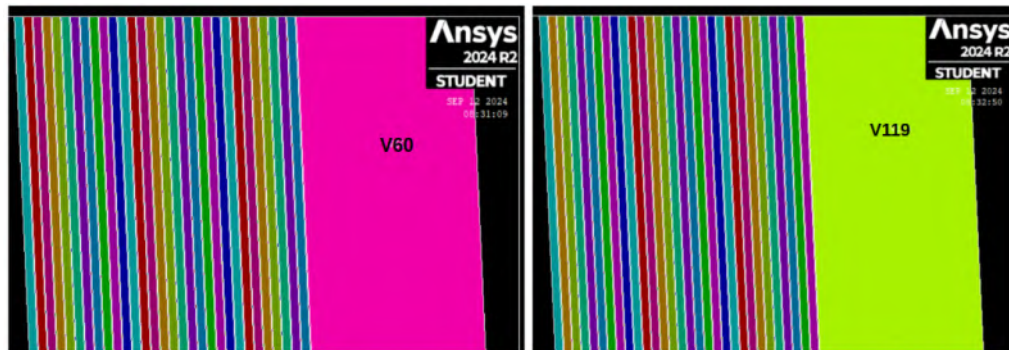


Figura 3.12: A la izquierda, número total de volúmenes en los bloques antes de ser unidos. A la derecha, número total de volúmenes en los bloques después de ser unidos. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

El comando *VMESH* tiene la instrucción de mallar desde el primer número de volumen de madera temprana hasta el último número de volumen en intervalos de dos, para así solo mallar madera temprana. Estos números son identificados mediante las fórmulas creadas a partir de conocer los números de volumen antes y después de ser unidos.

La descripción detallada del comando *VMESH* se encuentra comentada en el batch. En esta sección también se establece un color de material 1 con el comando */COLOR*.

```

VMESH,1,                                !Genera nodos y elementos de
    volumen dentro de los vol menes.
VMESH,1+(1+2*vetas),2*vetas+(1+2*vetas),2
!VMESH,1+(1+2*vetas),2*vetas+(1+2*vetas),2 = VMESH, NV1, NV2, NINC
!VMESH                                !Genera nodos y elementos de volumen
    dentro de los vol menes.
1+(1+2*vetas),2*vetas+(1+2*vetas),2 = VMESH, NV1, NV2, NINC
    !Mallado de vol menes desde NV1 hasta NV2 (por defecto NV1)
    en pasos de NINC (por defecto 1). Si NV1 = ALL, NV2 y NINC se
    ignoran y se mallan todos los vol menes seleccionados (VSEL).
    Si NV1 = P, se habilita la selecci n gr fica y se ignoran
    todos los dem s campos del comando (v lido solo en la interfaz
    gr fica de usuario). Tambi n se puede sustituir un nombre de
    componente por NV1 (se ignoran NV2 y NINC).
/COLOR,NUMB,YELL,1
!/COLOR                                !Especifica el mapeo de colores para
    varios tems .
!NUMB                                !items numerados de forma discreta (
    como tipos de elementos, materiales de elementos, etc., seg n
    se muestra en el comando /PNUM). Tambi n se debe especificar el
    n mero (del 1 al 11) en el campo N1. Por ejemplo, /COLOR,NUM,
    RED,3 asignar el color rojo a todos los tems que tengan el
    n mero discreto 3 (las visualizaciones de materiales
    mostrar an los elementos con el material 3 en rojo).
!YELL                                !Yellow
!1                                Material 1

```

Asignación del material 2

El comando *MAT* hace una nueva asignación de material para ser utilizado, en este caso el material 2. La asignación del material 2 se aplica al mallado de los elementos que contienen las propiedades definidas con este material. También es asignado el tipo de elemento utilizado, así como su tamaño.

```

MAT,2
ET,2,SOLID45
ESIZE,tamanoElemento

```

Mallado de madera tardía

Ya que la asignación del material 2 se realizó en comandos previos. El siguiente comando *VMESH* malla material del tipo de madera tardía. Ya que el material 2 fue definido con propiedades de madera tardía en la sección "Propiedades del material". Nuevas fórmulas son establecidas para identificar el primer número de volumen de madera tardía y mallar bloques de dos en dos hasta el último número de volumen creado.

```

VMESH,2+(2*vetas-1),2*vetas+(2*vetas-1),2
/COLOR,NUMB,ORAN,2
/PNUM,MAT,1                                !Controla la numeraci n/coloreado de
    entidades en los gr ficos. N meros de conjuntos de materiales
    y colores en gr ficos de elementos y modelos s lidos. Activa
    los n meros/colores para la etiqueta especificada.

```

```
/REPLOT                                !Reemite el ltimo comando de
visualizaci n .
```

Densidad promedio

Los siguientes comandos son escritos para que ANSYS calcule la densidad promedio de la placa simulada. Este conjunto de comandos selecciona el volumen completo y lo calcula. Posteriormente se utiliza ese volumen total de la placa simulada para obtener la densidad promedio de la placa mediante fórmulas.

```
vsel ,all                                !Selecciona un subset de vol menes
, Restaura el conjunto completo
VSUM                                     !Calcula e imprime las
estad sticas de geometr a de los vol menes seleccionados .

*GET ,volumenT ,VOLU ,0 ,VOLU           !Recupera un valor y lo almacena
como un par metro escalar o como parte de un par metro de
arreglo, Nombre del parametron resultante, Palabra clave de
entidad, El n mero o etiqueta de la entidad . En algunos casos ,
un cero (o en blanco) ENTNUM representa todas las entidades del
conjunto, Nombre de un tem particular para la entidad dada .

masaEarly=volumenT*a/(a+b)*DensTemp(indiceDeMadera ,1)
masaLate=volumenT*b/(a+b)*DensTardia(indiceDeMadera ,1)

densidadPromedio=(masaEarly+masaLate)/volumenT
```

Solución del modelo. Entrada al procesador de Solución: SOLU

Una vez construido el modelo se puede entrar al procesador de solución (*SOLU*). Este procesador contiene los comandos que aplican las cargas y obtiene una solución. *SOLU* toma la malla y los parámetros físicos del sistema para resolver las ecuaciones que representan el comportamiento del modelo, por lo que el tipo de análisis debe ser establecido en este procesador

```
/SOLU                                !entra en el procesador de soluciones
```

Tipo de análisis

Los siguientes comandos establecen lo referente al tipo de análisis para el modelo. *ANTYPE* especifica el tipo de análisis, en este caso se aplica la opción de análisis modal. *MODOPT* especifica las opciones de análisis modal e indica el método de extracción de modos. El método utilizado es el método de iteración del subespacio, una metodología efectiva ampliamente utilizada en la práctica de la ingeniería para la solución de valores propios y ecuaciones de elementos. Esta técnica es particularmente adecuada para el cálculo de unos pocos valores propios y vectores propios de grandes sistemas de elementos finitos. En este caso los vectores propios del sistema son los modos de vibración y los valores propios son las frecuencias de resonancia.

El comando *RIGID* indica el número de modos de cuerpo rígido conocidos en el modelo, permitiendo que ANSYS inicie el cálculo de los modos de vibración a partir de estos.

```

ANTYPE,MODAL                                !Especifica el tipo de análisis
      y el estado de reinicio, Realiza un análisis modal. Válido
      para grados de libertad estructurales y de fluidos.
MODEOPT,SUBSP,NumberModes                  !Especifica las opciones de
      análisis modal, método de algoritmo de subespacio, número de
      modos a extraer
RIGID,0,0,0,0,0,0                          !Especifica los modos de cuerpo
      rígido conocidos (si los hay) del modelo. Hasta seis direcciones
      cartesianas globales de los modos rígidos. Para un modelo 2D
      completamente libre, usa ALL o UX, UY, ROTZ. Para un modelo 3D
      completamente libre, usa ALL o UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ.
      Para un modelo restringido, usa UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, o ROTZ,
      según corresponda, para especificar cada dirección no
      restringida que exista en el modelo (no especificar todas las
      direcciones puede causar dificultades en la extracción de los
      modos).

SOLVE                                      !comienza la solución

SOLVE

```

Creación del archivo Matprops

El comando **If* se usa para crear declaraciones condicionales. En este caso es utilizado para establecer que si la variable *SaveInWorkingDir* es igual a "1", el comando *MPWRITE* escribirá las propiedades mecánicas de la madera analizada en un archivo de texto y será guardado en el directorio de trabajo actual. De lo contrario el archivo será guardado en el directorio establecido por el comando *MPWRITE* que está escrito después del comando **ELSE*, que separa el bloque condicional del comando **If*.

```

*IF,SaveInWorkingDir,EQ,1,THEN
!*IF,SaveInWorkingDir,EQ,1,THEN = *IF, VAL1, Oper1, VAL2, Base1,
  VAL3, Oper2, VAL4, Base2
!*If                                     !Hace que los comandos se lean de
      manera condicional
!SaveInWorkingDir    !Primer valor numérico (o parámetro que se
      evalúa como un valor numérico) en la operación de
      comparación condicional. VAL1, VAL2, VAL3 y VAL4 también
      pueden ser cadenas de caracteres (entre comillas) o parámetros
      para Oper = EQ y NE solamente.
!EQ                                     !Etiqueta de operación. Se utiliza
      una tolerancia de 1.0E-10 para comparaciones entre números
      reales. Equal (for VAL1 = VAL2)
!1                                     !Segundo valor numérico (o
      parámetro que se evalúa como un valor numérico) en la
      operación de comparación condicional
!THEN                                     !Acción basada en que la expresión
      lógica (Oper1) sea verdadera. Si es falsa, continúa leyendo en

```

```

la siguiente línea. Esto es condicional, excepto para las
construcciones IF-THEN-ELSE descritas a continuación;
cualquiera de las siguientes construcciones (hasta Base1 = THEN)
hace que se ignoren todos los campos subsiguientes. Convierte
este IF en una construcción if-then-else (ver más abajo). Los
siguientes valores opcionales determinan la conexión entre las
dos cláusulas lógicas Oper1 y Oper2.

MPWRITE, STRCAT('MatProps',maderaPorAnalizar), txt,

*ELSE                                !Separa el bloque final if-then
  -else
MPWRITE, STRCAT('MatProps',maderaPorAnalizar),txt,STRCAT(
  DirectoryPart1,DirectoryPart2)

*ENDIF                                !Finaliza un if-then-else

```

Resultados. Entrada al postprocesador general: POST1

El procesador *POST1* incluye comandos que permiten listar y visualizar los resultados de una solución. Se utiliza para analizar y manipular los resultados una vez que el análisis ha concluido. En *POST1*, ANSYS extrae los datos generados durante la fase de solución desde la base de datos, ofreciendo opciones para visualizarlos mediante gráficos. Además, es posible generar y almacenar datos adicionales de post procesamiento en la base de datos, que también pueden ser consultados posteriormente.

```

/POST1                                !Entra en el postprocesador de
  resultados de la base de datos

```

Omisión de los modos de cuerpo rígido

Los resultados del análisis son los modos de vibración de la placa y sus respectivas frecuencias. El primer set de resultados corresponden a los modos de cuerpo rígido, que son 6 conocidos para un modelo como este. El comando *SET* lee un conjunto de datos del archivo de resultados. La siguiente sección de comandos le indica a ANSYS que muestre el primer conjunto de resultados, los cuales corresponden a los modos de cuerpo rígido. Usando la opción *NEXT*, se puede avanzar al siguiente resultado, lo que permite omitir los modos de cuerpo rígido en este caso.

```

SET,FIRST                            !Define el conjunto de datos que se leer del
  archivo de resultados, Lee el primer conjunto de datos (Sbstep
  y TIME se ignoran)
SET,NEXT                             !Define el conjunto de datos que se leer del
  archivo de resultados, Lee el siguiente conjunto de datos (
  Sbstep y TIME se ignoran). Si se está en el último conjunto de
  datos, se leer el primer conjunto de datos como el siguiente.
SET,NEXT
SET,NEXT
SET,NEXT
SET,NEXT

```

```
SET, NEX
```

Visualización de resultados

En el siguiente comando se especifican las condiciones de visualización de los resultados de acuerdo al desplazamiento estructural Z .

```
PLNSOL,U,Z                                !Muestra los resultados de la solución
      como contornos continuos de elementos, Etiqueta que identifica el
      item (Desplazamiento estructural en X, Y o Z o suma vectorial),
      componente el item
```

Creación del archivo "Modal Frequencies"

Esta sección de comandos crea un archivo de texto con la información de las frecuencias modales de cada modo de vibración resultante en el análisis. De nuevo, el comando **If* establece la acción condicional para guardar el archivo. El comando **cfopen* abre una hoja de archivo donde se escribirán los datos solicitados. Las frecuencias modales son obtenidas mediante una acción de bucle establecido con el comando **DO*, donde se asigna al parámetro *paso* el valor de 1, que aumenta de 1 en 1 hasta llegar a *NumberModes*. Por lo tanto el parámetro *paso* representa cada una de las frecuencias modales solicitadas por la variable escrita al inicio del batch *NumberModes*. En esta acción de bucle el comando *GET* recupera los valores de las frecuencias de resonancia, los cuales son escritos en un archivo en secuencia por el comando **vwrite*.

```
*IF, SaveInWorkingDir, EQ, 1, THEN

*cfopen, STRCAT('ModalFrequencies', maderaporAnalizar), txt,      ! CR
!
*ELSE                                                                !
  Separa el bloque final if-then-else

*cfopen, STRCAT('ModalFrequencies', maderaporAnalizar), txt, STRCAT(
  DirectoryPart1, DirectoryPart2)

*ENDIF                                                                !
  Finaliza un if-then-else
*DO, paso, 1, NumberModes, 1
*GET, fmodo, MODE, paso, FREQ
!*GET, fmodo, MODE, paso, FREQ = *GET, Par, Entity, ENTNUM, Item1
  , IT1NUM, Item2, !IT2NUM
!*GET                                !Recupera un valor y lo almacena como un
  par metro escalar o como parte de un par metro de matriz
!fmodo                                !El nombre del par metro resultante
!MODE                                !palabra clave de la entidad
!paso                                !n mero o etiqueta de la entidad
!FREQ                                !El nombre de un tem particular para la
  entidad dada
*vwrite, fmodo                                !Escribe datos en un
  archivo en una secuencia formateada, par metro
```

```

(F6.1)                                     !Indica el
n mero de d gitos solicitados para la frecuencia de modo, el
n mero despu s del punto indica la cantidad de d gitos
solicitados despu s del punto decimal
*ENDDDO                                     !Termina un bucle do
e inicia la acci n de bucle.
*cfclos                                     !Cierra el
archivo de comandos

```

Creación del archivo "Parámetros Madera"

El archivo *ParametrosMadera* contiene los parámetros de la placa y el número de madera del algoritmo utilizado para la simulación. El comando **If* establece la acción para guardar el archivo dentro del escrito de trabajo actual o en su defecto en el directorio establecido dentro de la acción condicional. El comando *PARSAV* es utilizado para escribir los parámetros del modelo.

```

*IF,SaveInWorkingDir,EQ,1,THEN
PARSAV, SCALAR,STRCAT('ParametrosMadera',maderaPorAnalizar), txt,
!PARSAV
                                !Escribe par metros en un archive
!SCALAR
                                !Escribe solo par metros escalares
!STRCAT('ParametrosMadera',maderaPorAnalizar)           !Nombre del
archivo y directorio
!TXT
                                !Extensi n del archive

*ELSE
PARSAV, SCALAR,STRCAT('ParametrosMadera',maderaPorAnalizar), txt,
STRCAT(DirectoryPart1,DirectoryPart2)
*ENDIF                               !Ends an if-then-else

```

3.4. Calibración del modelo

Un proceso fundamental para el uso óptimo del modelo de simulación fue su calibración. Este procedimiento asegura que las maderas creadas por el algoritmo correspondan con las características propias de la madera de *Picea abies*. El proceso implicó ajustar los datos de entrada del algoritmo de Scilab, corroborando los resultados al simular placas mediante el algoritmo de ANSYS. Un punto clave fue el cálculo de los coeficientes empleados para calcular las propiedades mecánicas.

La Figura 3.13, extraída de Woodhouse, 2024, presenta las propiedades mecánicas de diferentes especies de madera, graficadas a partir de datos obtenidos experimentalmente. Las propiedades a lo largo del grano, mencionadas en la gráfica en inglés (properties along the grain), corresponden al módulo de Young longitudinal. Las propiedades a través del grano (properties across the grain) corresponden al módulo de Young radial. En esta gráfica, el eje X (densidad) y eje Y (módulo de Young) muestran una tendencia lineal notable. Por ello, el método de regresión polinómica, para obtener una ecuación que relacione los módulos elásticos con la

densidad, fue propuesto. Esta fue una manera de obtener los coeficientes que el algoritmo necesita, como datos de entrada, para calcular las propiedades elásticas de madera temprana y madera tardía.

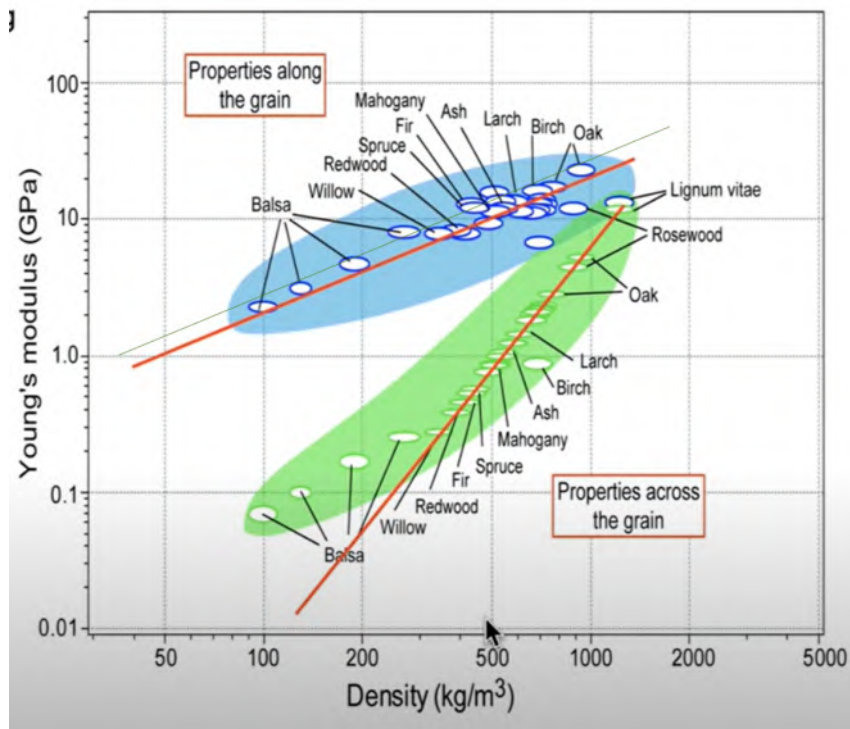


Figura 3.13: Relación entre densidad y propiedades mecánicas de diferentes especies de maderas [Woodhouse, 2024].

Para llevar a cabo la regresión polinómica, es fundamental digitalizar correctamente los datos experimentales de la gráfica. Esto implica obtener los pares (X,Y), ya que estos valores serán la base para realizar la regresión lineal. El software Digitizelt fue utilizado para digitalizar la información contenida en la gráfica. Este software digitaliza un gráfico o diagrama escaneados y los convierte en datos (x, y). Se trata de un proceso de tres pasos:

1. Importar el gráfico desde un archivo o copiarlo en el portapapeles.
2. Definir el sistema de coordenadas.
3. Digitalizarlo de forma automática o manual.

Los datos (X,Y) de La Figura 3.13 fueron utilizados para la generación de un polinomio para estimar propiedades mecánicas en madera a partir del valor conocido de la densidad. Un polinomio es una expresión algebraica construida a partir de sumas y productos de términos conocidos como monomios. Cada monomio está compuesto por un coeficiente numérico multiplicado por una variable elevada a una potencia no negativa. El grado de un polinomio $P(X)$ es el mayor exponente al que se encuentra elevada la variable X . Por otro lado, un modelo de análisis de regresión es la relación entre la variable independiente X y la variable dependiente Y se modela en un polinomio de n -ésimo grado en X . Una regresión polinomial busca obtener la predicción de una variable de respuesta cuantitativa a partir de

una variable predictora cuantitativa.

Para un conjunto de datos de pares X, Y , se puede generar una regresión polinómica de este tipo:

$$f(x) = C0 + C1X + C2X^2 + C3X^3 \quad (3.9)$$

En la cual $C0$, $C1$, $C2$... representan coeficientes creados por un procedimiento matemático.

La aplicación JavaScript fue utilizada para implementar el método de regresión polinómica con los datos (X, Y) digitalizados de la gráfica de Jim Woodhouse, donde X (variable independiente) representa la densidad y Y (variable dependiente) las propiedades de la madera.

La aplicación utilizada se encuentra en el siguiente enlace: <https://arachnoid.com/polysolve/>. Los datos X, Y digitalizados de la gráfica fueron ingresados en esta herramienta para realizar un ajuste de curva. La aplicación genera automáticamente los coeficientes de la ecuación en función del grado polinómico elegido. Como resultado, se obtuvieron coeficientes para dos polinomios independientes, uno para cada propiedad que el algoritmo calcula: E_L y E_R . Estos polinomios permiten estimar las propiedades mecánicas de la madera a partir de la densidad.

Los datos generados en trabajos previos de la autora sobre propiedades mecánicas y densidad también fueron integrados en este proceso (Torres et al., 2019). Estos se complementaron con los datos experimentales de densidad y módulos elásticos obtenidos de las probetas radial y longitudinal estudiadas en la presente tesis. El objetivo principal fue desarrollar coeficientes específicos que permitieran calcular propiedades mecánicas a partir de información exclusivamente relacionada con la madera de *Picea abies*. En la Figura 3.14, se presentan los datos utilizados como base para la generación de estos coeficientes. Esta figura es una versión con datos propios de la gráfica de la Figura 3.13 (de Woodhouse, 2024), pero con los datos experimentales obtenidos por el equipo de trabajo al que la autora pertenece.

Otros datos de entrada fundamentales para el algoritmo de Scilab, son la densidad promedio de la madera junto con el diferencial de densidad entre madera temprana y tardía. Este último dato fue tomado de referencias bibliográficas especializadas. El Cuadro 3.4 presenta datos obtenidos de la bibliografía sobre densidad promedio y diferencial de densidad analizadas en tapas de violín [Stoel and Borman, 2008]. Estos valores se emplearon como referencia tanto para la calibración del modelo como para la generación de datos utilizados en las simulaciones de madera de *Picea abies* estudiadas en este trabajo.

Para que el algoritmo de Scilab calcule el tamaño de los anillos es necesario llenar los datos de entrada correspondientes. Deben establecerse los valores mínimo y máximo del tamaño de la madera temprana. Para esto, la información experimental obtenida de cada probeta fue utilizada. La madera temprana y tardía de cada anillo de crecimiento de cada probeta fue medida, tal como se detalla en el apartado “Mediciones experimentales de ancho de anillos”. Asimismo, se debe indicar como datos de entrada la relación mínima y máxima de madera temprana entre tardía. Para cada anillo de crecimiento de ambas probetas, dicha relación se calculó dividiendo el valor de la madera temprana entre el de la madera tardía.

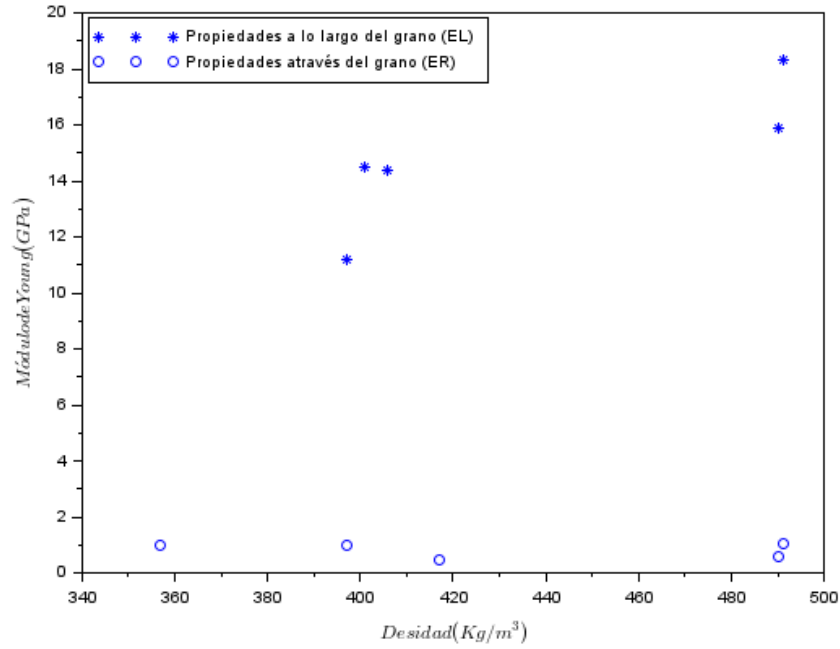


Figura 3.14: Relación entre densidad y propiedades mecánicas en madera de *Picea abies* obtenida experimentalmente.

Cuadro 3.4: Digitalización de gráfico encontrado en estudio sobre densidades en violines antiguos y modernos [Stoel and Borman, 2008]

Tapas de violín			
Violines antiguos		Violines modernos	
Densidad promedio	Diferencial de densidad	Densidad promedio	Diferencial de densidad
378	413	380	141
339	313	379	171
410	287	343	189
355	270	340	205
353	266	368	199
394	253		
349	250		
357	142		

Las mediciones experimentales revelaron diferencias significativas entre ambas probetas. La probeta longitudinal se caracteriza por anillos de crecimiento estrechos, lo que se traduce en valores generalmente bajos de la relación entre madera temprana y tardía en comparación con los obtenidos en la probeta radial. Por su parte, la probeta radial presenta anillos de crecimiento amplios y un mayor porcentaje de madera temprana. Estos datos se encuentran graficados en las Figuras 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18.

En la calibración del modelo, fueron utilizados únicamente los valores mínimos y

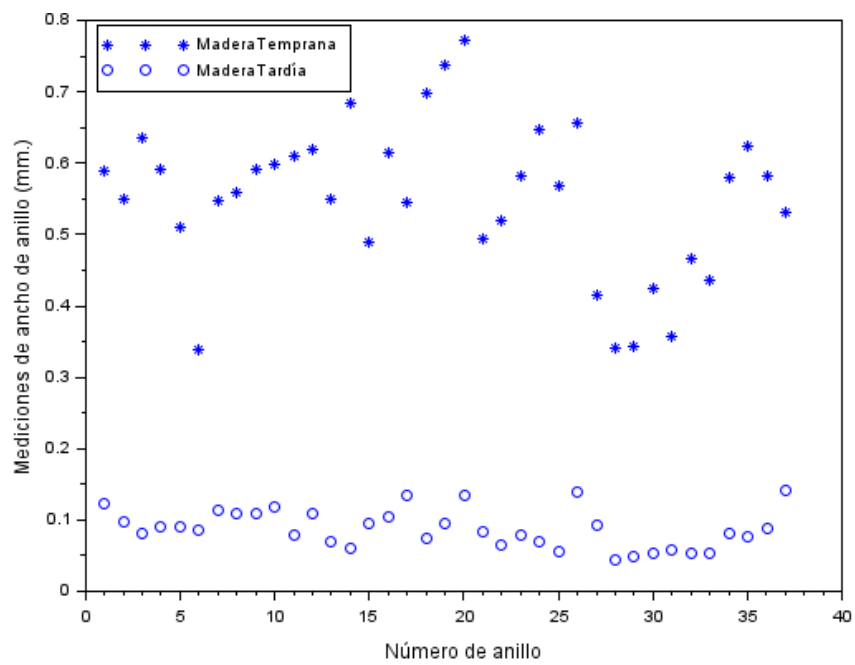


Figura 3.15: Mediciones de ancho de anillos para madera temprana y madera tardía de la probeta longitudinal.

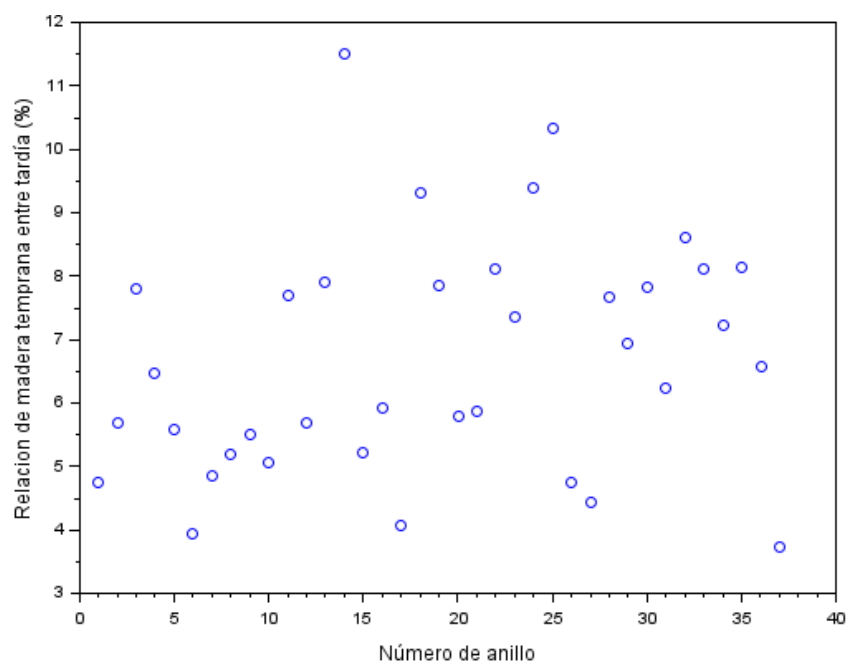


Figura 3.16: Valores de relación: madera temprana/tardía, probeta longitudinal

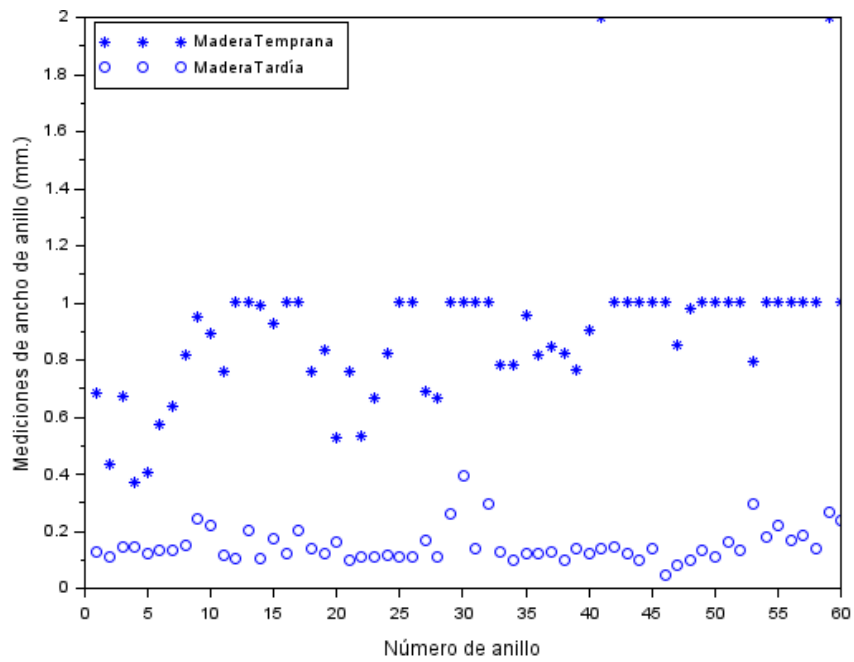


Figura 3.17: Mediciones de ancho de anillos para madera temprana y madera tardía de la probeta radial.

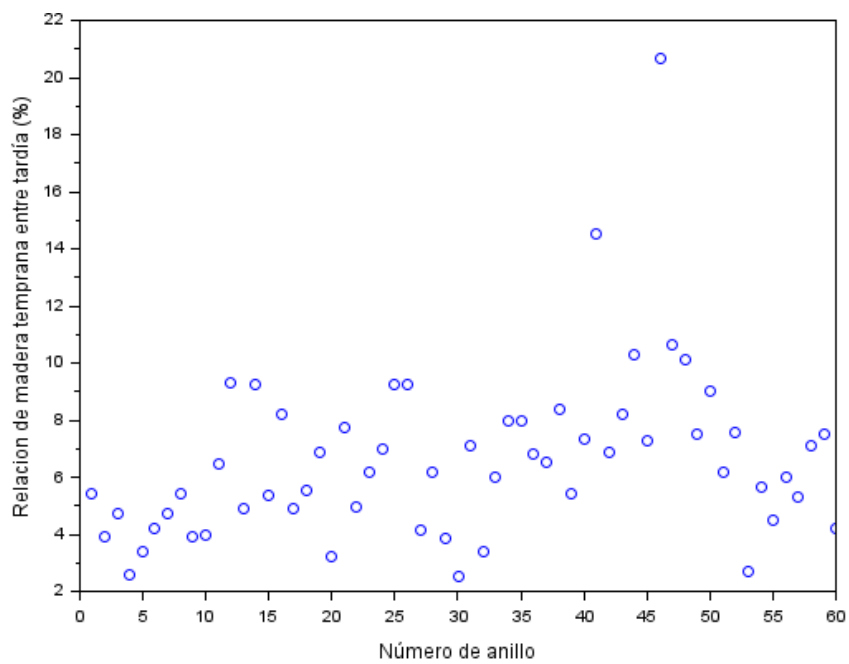


Figura 3.18: Valores de relación: madera temprana/tardía, probeta radial

máximos del tamaño de la madera temprana para cada probeta, junto con el valor correspondiente de la relación entre la madera temprana y tardía.

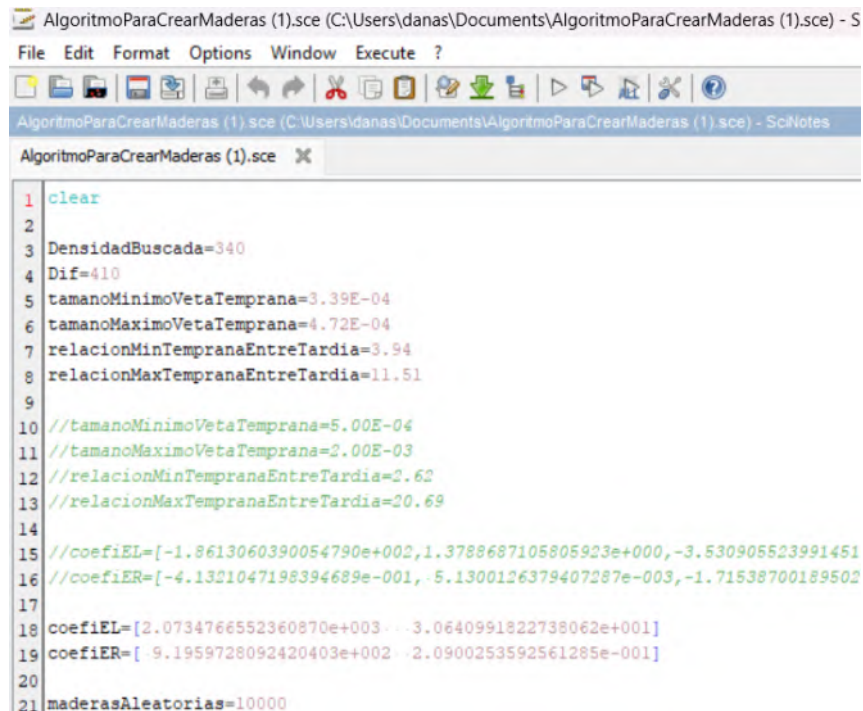
La fiabilidad de los datos de entrada para el algoritmo de Scilab fue comprobada al llevar a cabo simulaciones de prueba. Para esto, el algoritmo Scilab y el algoritmo de ANSYS fueron empleados como herramientas complementarias en la generación de resultados. El objetivo de estas simulaciones fue evaluar y ajustar el modelo de simulación. De este modo, se buscaba generar maderas virtuales cuyo comportamiento vibratorio fuera similar al de las maderas reales.

Las pruebas consistieron en simular dos placas empleando la geometría y los datos experimentales obtenidos de cada una de las probetas descritas en el apartado “Maderas analizadas”. Por lo tanto, las maderas simuladas fueron evaluadas tomando como referencia la información de las maderas reales.

Primero, el algoritmo de Scilab fue utilizado para generar los datos característicos de cada madera a simular. Para esto, la densidad promedio y los valores relacionados con el ancho de los anillos de cada probeta fueron utilizados. Además, los coeficientes para el cálculo de E_L y E_R se consideraron constantes en la generación de datos para ambas maderas. Estos datos llenaron las entradas del algoritmo. Por lo tanto, una prueba consistía en simular cada probeta con sus características geométricas y microestructurales particulares, pero utilizando los mismos coeficientes para el cálculo de E_L y E_R .

Para utilizar el algoritmo de Scilab, es necesario abrir el software Scilab. En la ventana izquierda de la pantalla de la consola se encuentra el explorador de archivos. Allí, se debe buscar y seleccionar el documento llamado “Algoritmo para crear maderas”. Una vez abierto el documento, es necesario llenar los datos de entrada del algoritmo. Cuando esta información esté completa, el algoritmo puede ser ejecutado. Solo se debe dar clic en la opción “save and execute”. En la Figura 3.19 se observa una captura de pantalla del algoritmo abierto en el programa Scilab. Los datos de entrada son llenados y se da clic en “save and execute” para guardar y correr el programa.

En la consola, la ventana de variables ubicada en la esquina superior izquierda de la pantalla enlista las variables del programa ejecutado. La variable *ordenada* contiene los resultados organizados. Las filas de la matriz *ordenada* aparecen enumeradas. Cada fila es una madera diferente, y las columnas representan una característica o propiedad de las maderas. Es recomendable abrir la variable *ordenada* junto con la variable *etiquetas* para identificar cada propiedad en la matriz. La Figura 3.20 muestra la ventana emergente al seleccionar la variable *ordenada* con los datos que ésta matriz contiene. A partir de los datos arrojados por la matriz *ordenada* una madera a simular fue seleccionada, identificada con el número de fila que le corresponde dentro de la matriz. Es importante mencionar que, el algoritmo escribe y guarda automáticamente cada característica de las maderas en archivos independientes. Es decir, la información contenida dentro de las columnas de la matriz ordenada es almacenada. Estos documentos quedan guardados en la carpeta de trabajo del algoritmo. Cada vez que el algoritmo es ejecutado, los documentos generados se reescriben en los archivos existentes con la nueva información. Incluso si los datos de entrada no fueron modificados, si el algoritmo es ejecutado nuevamente, nuevos datos son generados de forma aleatoria.

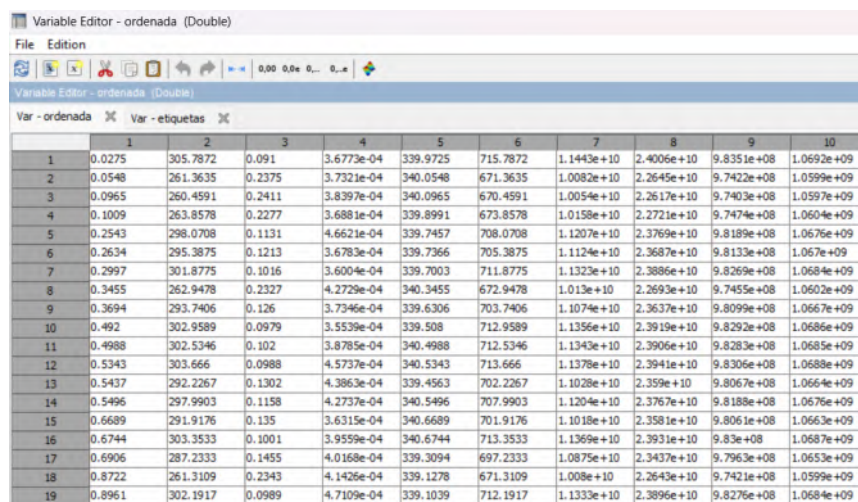


```

1 clear
2
3 DensidadBuscada=340
4 Dif=410
5 tamanoMinimoVetaTemprana=3.39E-04
6 tamanoMaximoVetaTemprana=4.72E-04
7 relacionMinTempranaEntreTardia=3.94
8 relacionMaxTempranaEntreTardia=11.51
9
10 //tamanoMinimoVetaTemprana=5.00E-04
11 //tamanoMaximoVetaTemprana=2.00E-03
12 //relacionMinTempranaEntreTardia=2.62
13 //relacionMaxTempranaEntreTardia=20.69
14
15 //coefiEL=[-1.8613060390054790e+002,1.3788687105805923e+000,-3.530905523991451
16 //coefiER=[-4.1321047198394689e-001,-5.1300126379407287e-003,-1.71538700189502
17
18 coefiEL=[2.0734766552360870e+003,-3.0640991822738062e+001]
19 coefiER=[-9.1959728092420403e+002,-2.0900253592561285e-001]
20
21 maderasAleatorias=10000

```

Figura 3.19: Datos de entrada del algoritmo para crear maderas siendo guardados y ejecutados en el programa Scilab.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.0275	305.7872	0.091	3.6773e-04	339.9725	715.7872	1.1443e+10	2.4006e+10	9.8351e+08	1.0692e+09
2	0.0548	261.3635	0.2375	3.7321e-04	340.0548	671.3635	1.0082e+10	2.2645e+10	9.7422e+08	1.0599e+09
3	0.0965	260.4591	0.2411	3.8397e-04	340.0965	670.4591	1.0054e+10	2.2617e+10	9.7403e+08	1.0597e+09
4	0.1009	263.8578	0.2277	3.6881e-04	339.8991	673.8578	1.0158e+10	2.2721e+10	9.7474e+08	1.0604e+09
5	0.2543	298.0708	0.1131	4.6621e-04	339.7457	708.0708	1.1207e+10	2.3769e+10	9.8189e+08	1.0676e+09
6	0.2634	295.3875	0.1213	3.6783e-04	339.7366	705.3875	1.1124e+10	2.3687e+10	9.8133e+08	1.067e+09
7	0.2997	301.8775	0.1016	3.6004e-04	339.7003	711.8775	1.1323e+10	2.3886e+10	9.8269e+08	1.0684e+09
8	0.3455	262.9478	0.2327	4.2729e-04	340.3455	672.9478	1.013e+10	2.2693e+10	9.7455e+08	1.0602e+09
9	0.3694	293.7406	0.126	3.7346e-04	339.6306	703.7406	1.1074e+10	2.3637e+10	9.8099e+08	1.0667e+09
10	0.492	302.9589	0.0979	3.5539e-04	339.508	712.9589	1.1356e+10	2.3919e+10	9.8292e+08	1.0685e+09
11	0.4988	302.5346	0.102	3.8785e-04	340.4988	712.5346	1.1343e+10	2.3906e+10	9.8283e+08	1.0685e+09
12	0.5343	303.666	0.0988	4.5737e-04	340.5343	713.666	1.1378e+10	2.3941e+10	9.8306e+08	1.0688e+09
13	0.5437	292.2267	0.1302	4.3863e-04	339.4563	702.2267	1.1028e+10	2.359e+10	9.8067e+08	1.0664e+09
14	0.5496	297.9903	0.1158	4.2737e-04	340.5496	707.9903	1.1204e+10	2.3767e+10	9.8188e+08	1.0676e+09
15	0.6689	291.9176	0.135	3.6315e-04	340.6689	701.9176	1.1018e+10	2.3581e+10	9.8061e+08	1.0663e+09
16	0.6744	303.3533	0.1001	3.9559e-04	340.6744	713.3533	1.1369e+10	2.3931e+10	9.83e+08	1.0687e+09
17	0.6906	287.2333	0.1455	4.0168e-04	339.3094	697.2333	1.0875e+10	2.3437e+10	9.7963e+08	1.0653e+09
18	0.8722	261.3109	0.2343	4.1426e-04	339.1278	671.3109	1.008e+10	2.2643e+10	9.7421e+08	1.0599e+09
19	0.8961	302.1917	0.0989	4.7109e-04	339.1039	712.1917	1.1333e+10	2.3896e+10	9.8276e+08	1.0684e+09

Figura 3.20: Variable ordenada que contiene los datos de las maderas creadas por el algoritmo de Scilab .

Una vez que el número de madera seleccionada fue identificado, el algoritmo de ANSYS fue utilizado para llevar a cabo la simulación. El algoritmo de ANSYS debe estar guardado en la misma carpeta de trabajo donde se encuentra al algoritmo de Scilab y los documentos que éste genera.

Es imprescindible llenar los datos de entrada correspondientes en el algoritmo de ANSYS. Se debe indicar al programa el número de madera a simular. Es decir, el número de madera seleccionada entre las maderas mostradas por la matriz *ordenada*. El dato debe colocarse dentro del código de simulación en la variable *maderaPorAnalizar*, lo que permitirá al batch tomar las propiedades de la madera seleccionada.

También es necesario llenar la variable *TotalDeMaderasDeScilab*, con el número total de maderas que el algoritmo de Scilab creó. Además, las variables para dimensionar la placa deben ser añadidas según la estructura que se desea simular. La variable *NumberModes* debe ser especificada con el número de modos que se desean obtener del análisis modal.

Una vez actualizada esta información el algoritmo de ANSYS fue ejecutado. Las frecuencias de resonancia de los modos de vibración asociados al módulo elástico más característico de cada probeta fueron comparados con los resultados obtenidos en las maderas simuladas. Debido a su estructura particular, cada probeta sirvió como referencia de una propiedad mecánica en particular.

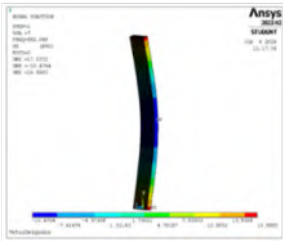
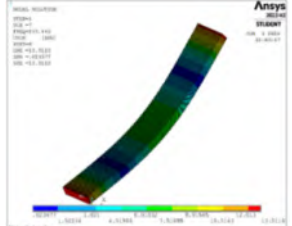
Varias simulaciones de prueba fueron realizadas. En cada prueba los coeficientes para E_L y E_R fueron modificados. Los coeficientes que resultaron óptimos para el cálculo de las propiedades son mostrados en el Cuadro 3.5. Como resultado, las frecuencias obtenidas para las maderas simuladas mostraron una alta concordancia con las de las maderas reales. El Cuadro 3.4 presenta las frecuencias correspondientes a las maderas reales y simuladas, junto con sus respectivos modos de vibración. En este punto el modelo de simulación fue considerado calibrado.

Cuadro 3.5: Coeficientes para el cálculo de propiedades mecánicas (E_L y E_R) de madera de *Picea abies* utilizados por el algoritmo de Scilab, definidos durante el proceso de calibración.

<i>Coeficientes para E_L</i>	<i>Coeficiente para E_R</i>
2.0734766552360870e+003	9.1959728092420403e+002
3.0640991822738062e+001	2.0900253592561285e-001

3.5. MODAL ASSURANCE CRITERION COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS

Cuadro 3.6: Respuesta vibratoria de las probetas analizadas y las maderas creadas durante el proceso de calibración. *Las imágenes de las maderas simuladas fueron creadas con ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.*

	Maderas reales		Maderas simuladas	
	Modo de vibración	f (Hz.)	Modo de vibración	f (Hz.)
<i>Probeta longitudinal</i>		990		992
<i>Probeta radial</i>		310		301

3.5. Modal Assurance Criterion como herramienta de análisis

Las características de vibración (frecuencias naturales y modos de vibración) de las maderas creadas por el algoritmo fueron determinadas mediante un análisis modal. El análisis MAC fue implementado para comparar los resultados de los análisis modales de las maderas simuladas. Cuatro análisis MAC fueron realizados para evaluar e identificar cómo las propiedades microestructurales influyen en el comportamiento modal de las maderas. Cada análisis representa una comparación entre el comportamiento modal de dos maderas, que tienen un factor microestructural diferente entre sí: diferencial de densidad o ancho de anillos.

Cada análisis MAC fue llevado a cabo de la siguiente manera. Dos equipos de cómputo fueron utilizados; en ambos, el software ANSYS fue instalado. Las carpetas con los archivos de cada madera fueron guardadas en el escritorio de ambos equipos. Para simular una madera específica, los archivos correspondientes a esa madera eran trasladados a la carpeta de trabajo del batch, permitiendo que ANSYS accediera a la información necesaria para la simulación. Al editar el batch con la información de la madera a simular se establecieron 300 modos de vibración para la variable *NumberModes*. Como resultado, 300 modos de vibración fueron obtenidos en el análisis modal de todas las maderas.

Para cada tipo de análisis MAC, una madera diferente fue simulada en cada equipo de cómputo. Posteriormente, los resultados de ambas maderas fueron visualizados, siguiendo las indicaciones explicadas en los apartados “Uso del batch” y “Obtención de modos simulados”. A través de un rastreo modo a modo de cada madera, fue posible identificar las diferencias en el comportamiento vibratorio entre las maderas analizadas. En cada análisis MAC, los 300 modos de vibración obtenidos para cada madera fueron comparados uno a uno con los 300 modos correspondientes de la otra madera.

Los resultados obtenidos de cada análisis MAC fueron registrados en matrices diseñadas específicamente para reportar estos análisis. Estas matrices, generadas en el programa Scilab, permitieron detallar las similitudes y diferencias en el comportamiento vibratorio entre las maderas. Posteriormente, los resultados de las matrices fueron graficados para proporcionar una representación visual y clara de los datos. Estas gráficas permiten la comprensión de las similitudes y diferencias en el comportamiento vibratorio entre las maderas.

Capítulo 4

Resultados y discusiones

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la caracterización de la madera de *Picea abies*, mediante el uso de diversas técnicas de medición enfocadas en el análisis químico y superficial del material.

Las características de las maderas generadas y simuladas a través del modelo de simulación implementado, son expuestas por medio de tablas y figuras. Las diferencias en el comportamiento modal entre las maderas simuladas, identificadas a través de los análisis MAC, son explicadas de forma detallada. Además, los resultados sobre cada análisis son explicados y mostrados gráficamente. Finalmente, se discute sobre la importancia e influencia de las características microestructurales en el comportamiento vibratorio de este material.

Mediante los análisis MAC, un rastreo modo a modo entre maderas con variaciones estructurales fue llevado a cabo. Cada análisis MAC reveló las diferencias en el comportamiento vibratorio entre las maderas simuladas. Las comparaciones modo a modo mostraron cambios en el orden de aparición de los modos de vibración, así como modificaciones significativas en las líneas nodales y las formas modales entre modos que son considerados equivalentes. Estas diferencias se visualizan a través de gráficos diseñados para ilustrar las variaciones de comportamiento vibratorio resultantes.

4.1. Análisis superficial y químico

Las probetas de madera analizadas mostraron diferencias en el arreglo estructural de sus anillos de crecimiento. En la Figura 4.1 se observan imágenes de SEM de la cara transversal de las muestras de madera de *Picea abies*. Ambas imágenes fueron obtenidas a la misma escala, donde es posible apreciar las diferencias en porcentaje de madera temprana y madera tardía en cada muestra. Dichas imágenes coinciden con las mediciones experimentales de ancho de anillos, donde se encontró que la probeta radial tiene secciones de madera temprana de hasta 2 mm. de espesor, mientras que en la probeta longitudinal ningún anillo de crecimiento es superior a 1 mm. Estos datos resultaron de suma importancia para la calibración del modelo computacional para la simulación de las placas.

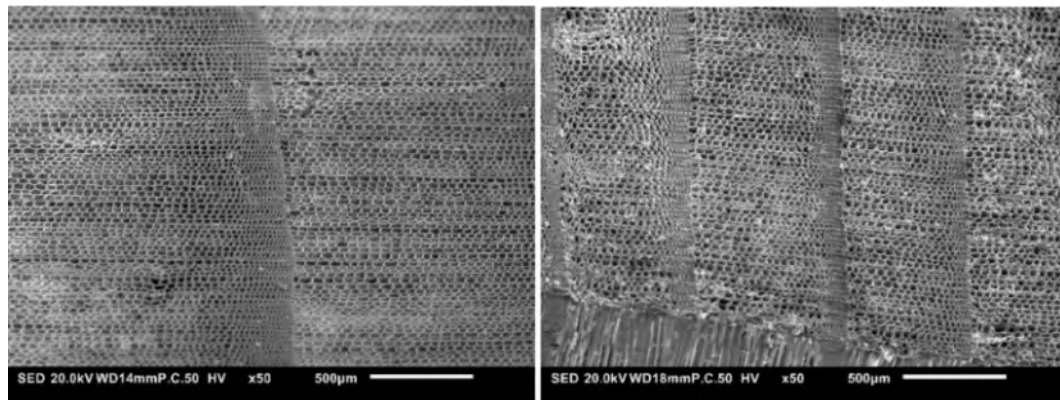


Figura 4.1: Imágenes de SEM de la vista transversal de las probetas de madera de *Picea abies*. A la izquierda, probeta radial. A la derecha, probeta longitudinal.

Los análisis por FTIR revelaron los grupos funcionales que típicamente conforman los componentes de la madera. OH (hidroxilo) y C-O (enlace glucosídico) para la celulosa. CH₂ (metileno) en la hemicelulosa. O-CH₃ (metoxi) para la lignina. Sin embargo, la Figura 4.2 muestra que la sección tardía de la madera de *Picea abies* siempre revela una mayor intensidad en todas las bandas de absorción. Las mediciones del ángulo de contacto sugieren que la madera temprana presenta una mayor hidrofiliicidad, por medio de este experimento atribuimos esa característica a la superficie de la madera en la cara tangencial, que es la zona donde se pudo realizar esta medición. Ver Figura 4.3.

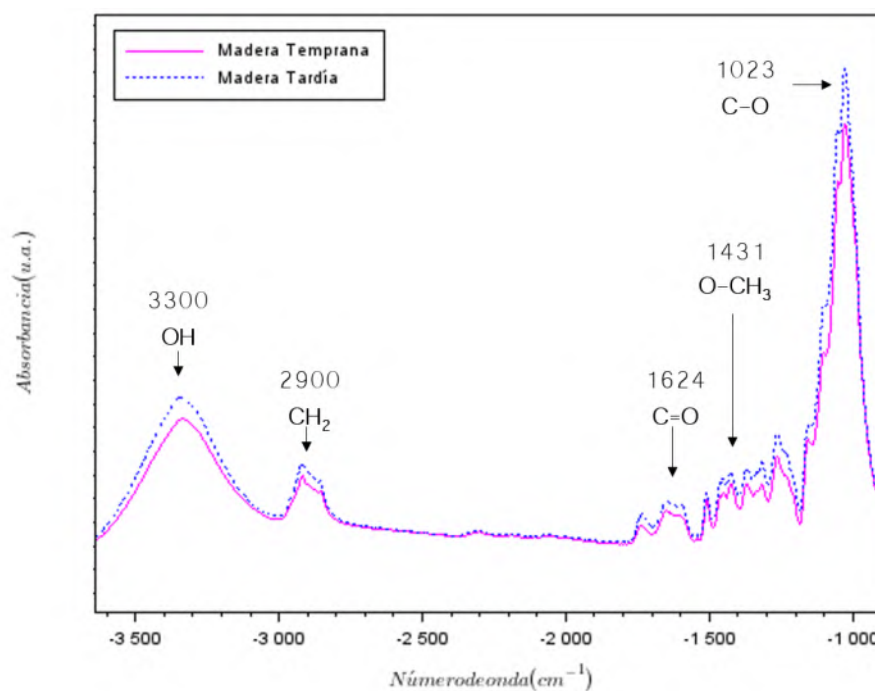


Figura 4.2: Analisis FTIR de la madera de *Picea abies*.

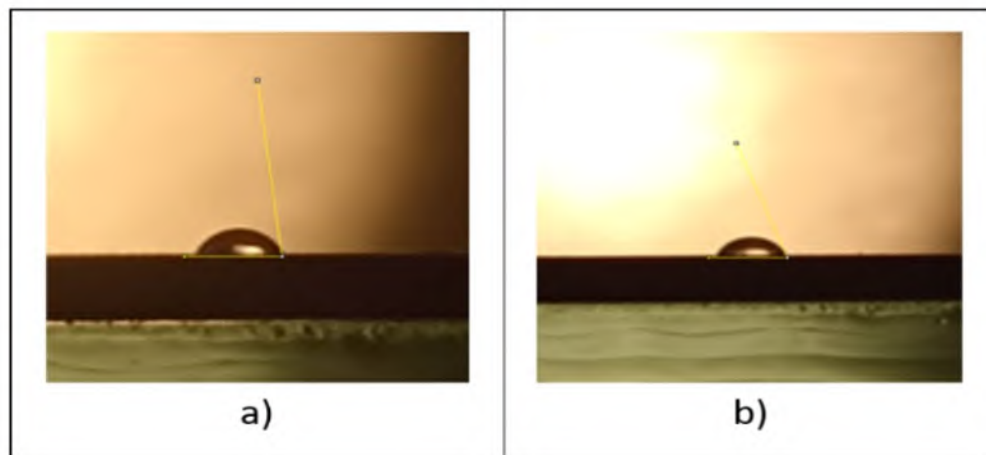


Figura 4.3: Ángulo de contacto. a) madera tardía, ángulo promedio 81o b) madera temprana, ángulo promedio 74o

El análisis termogravimétrico de la madera de *Picea abies* en las secciones temprana y tardía, muestra los intervalos de temperatura de la descomposición característicos de los materiales lignocelulósicos. Menor a los 100 °C es la principal pérdida de humedad. De 100 a 250 °C inicia la descomposición de los extraíbles. De 250 a 350 °C predomina la descomposición de la hemicelulosa. De 350 a 500 °C, descomposición de la celulosa y lignina. La madera tardía exhibe una mayor resistencia térmica según los resultados expresados en la Figura 4.4, donde se observan las diferencias en la degradación de la madera temprana y madera tardía. La Figura 4.5 muestra los resultados del análisis por difracción de rayos X, que indica una mayor cristalinidad para la sección de madera tardía. Estos resultados concuerdan con la resistencia térmica superior de la madera tardía sobre la sección temprana mostrada en los análisis de TGA.

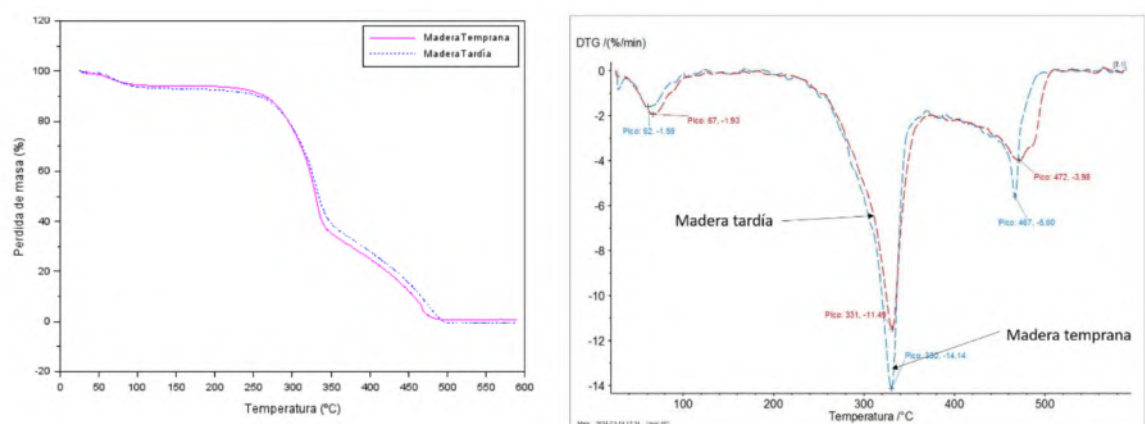


Figura 4.4: TGA y DTG de la madera de *Picea abies* en secciones temprana y tardía.

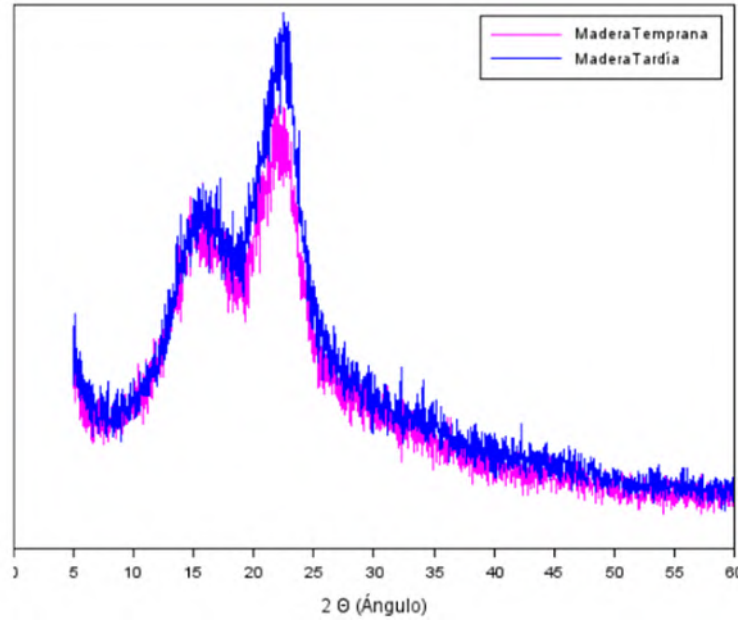


Figura 4.5: DRX de la madera de *Picea abies*.

4.2. Características de las maderas creadas por el modelo de simulación

Una vez calibrado el modelo de simulación, las simulaciones de madera de *Picea abies*, para estudiar influencias microestructurales, fueron realizadas. Cuatro maderas fueron simuladas. Los parámetros en común entre estas cuatro maderas fueron la densidad promedio y sus dimensiones.

El diseño microestructural de las maderas tuvo como propósito permitir el análisis de características particulares al compararlas entre sí. El Cuadro 4.1, muestra las características de diseño de cada madera. Estas características se centran en la diferencia de tamaño de anillos y en el diferencial de densidad entre madera temprana y tardía.

Las maderas simuladas pueden ser divididas en dos grupos, desde la perspectiva del tamaño de anillos, en maderas con anillos estrechos y maderas con anillos abiertos. Cada madera simulada recibió un nombre para ser identificada tomando en cuenta sus características. Las maderas fueron nombradas de la siguiente manera: anillos estrechos dif 140, anillos estrechos dif 410, anillos abiertos dif 140, anillos abiertos dif 410. Los nombres de las maderas indican la clasificación a la que pertenecen por su tamaño de anillos. Además, la palabra dif es una abreviación del diferencial de densidad entre madera temprana y tardía.

Las dos maderas con anillos estrechos fueron creadas en base a los datos de ancho de anillos correspondientes a la probeta longitudinal. Los datos de entrada fueron ajustados en el algoritmo para simular maderas con anillos de crecimiento lo más estrechos posible. Esto, siguiendo el procedimiento explicado en el apartado “Uso del algoritmo”. La principal diferencia microestructural entre estas dos maderas es el diferencial de densidad, por lo tanto, fueron creadas por ejecuciones independientes

4.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS MADERAS CREADAS POR EL MODELO DE SIMULACIÓN

Cuadro 4.1: Características para el diseño microestructural de las maderas simuladas.

Maderas				
Características de diseño	Anillos estrechos dif 140	Anillos estrechos dif 410	Anillos abiertos dif 140	Anillos abiertos dif 410
Anillos de crecimiento	Pequeños		Grandes	
Diferencial de densidad	140	410	140	410
Densidad promedio ($\frac{kg}{m^3}$)	340			

del algoritmo. Ambas maderas presentan ligeras variaciones en las dimensiones de los anillos de crecimiento. Las maderas con mayor similitud en el tamaño de anillos fueron seleccionadas para formar parte del grupo de maderas con anillos estrechos.

Las dos maderas con anillos abiertos, por su parte, se generaron utilizando los valores máximos de ancho de anillos provenientes de la probeta radial. Al igual que las maderas con anillos estrechos, estas se diseñaron a través de ejecuciones independientes del algoritmo. El diferencial de densidad fue considerado como la principal diferencia microestructural entre ambas maderas. Para cada madera con un determinado diferencial de densidad en el grupo de anillos abiertos, existe su equivalente respecto a ese diferencial dentro de maderas con anillos estrechos. La Figura 4.6 representa las características de diseño compartidas entre las cuatro maderas simuladas. Los diferenciales de densidad empleados se obtuvieron al seleccionar los valores mínimo y máximo encontrados en la bibliografía [Stoel and Borman, 2008].

Cada vez que el algoritmo fue ejecutado para la creación y selección de una madera específica, los archivos generados fueron clasificados adecuadamente. Estos archivos fueron organizados en carpetas de trabajo externas, fuera de la carpeta principal del algoritmo y del batch. Las carpetas fueron identificadas con el número de madera seleccionada, la característica del tamaño de anillos y el diferencial de densidad utilizado.

A las maderas creadas por el modelo de simulación se les fue dada una geometría en forma de placa. Todas las maderas simuladas y analizadas comparten una geometría de 360 mm. x 210 mm. x 3 mm., para el largo, ancho y espesor, respectivamente. A la izquierda, en la Figura 1, es posible observar la vista general de las dimensiones de una de las maderas. Además, en esta imagen se accede a la visualización de los resultados de la simulación, por lo que es posible observar uno de los modos de vibración de la placa.

Al hacer un acercamiento a las maderas simuladas es posible apreciar sus características microestructurales correspondientes a los anillos de crecimiento. Es decir, las vetas de la madera pueden ser observadas. El algoritmo de ANSYS establece colores para la madera temprana y madera tardía. La madera temprana se identifica con el color amarillo y la madera tardía con el color naranja (ver Figura 4.2). A la derecha, en la Figura 4.2, se muestra una comparación entre los tamaños de los anillos de crecimiento de las cuatro maderas analizadas. Estas imágenes fueron obtenidas sometiendo a todas las maderas a un aumento con la misma distancia de visualización.

4.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS MADERAS CREADAS POR EL MODELO DE SIMULACIÓN

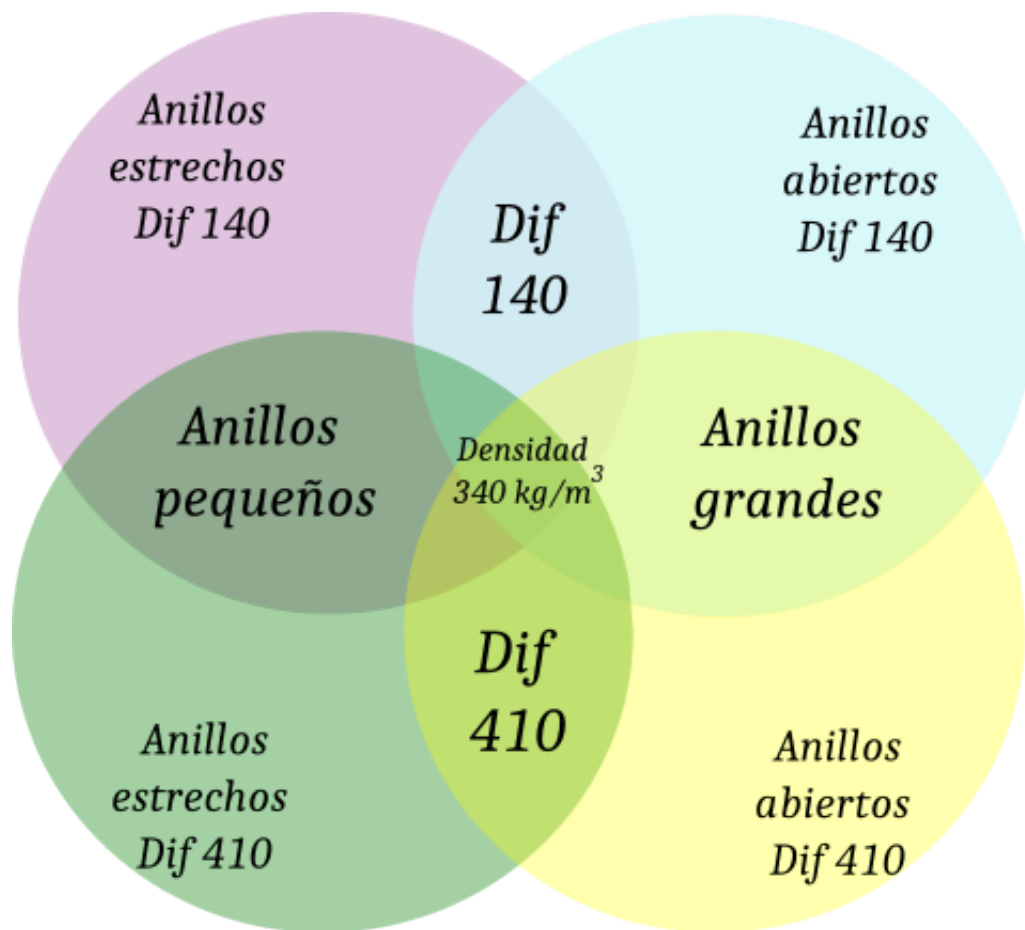


Figura 4.6: Características microestructurales compartidas entre las maderas creadas utilizando el modelo de simulación calibrado.

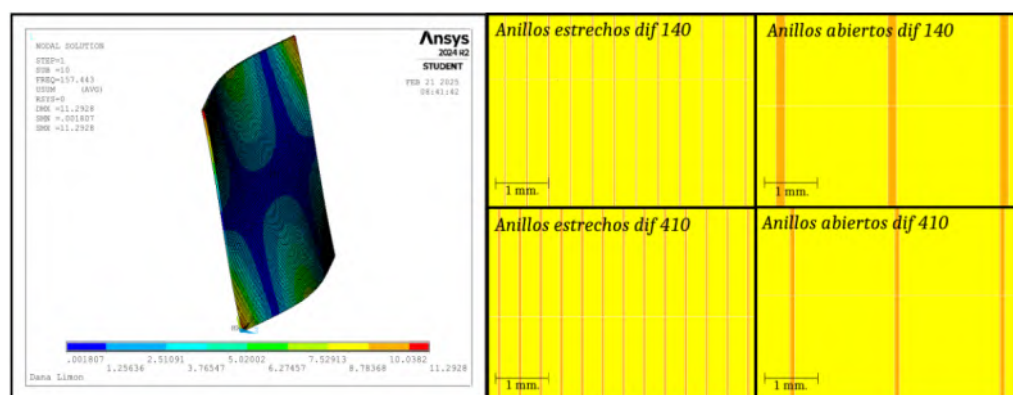


Figura 4.7: A la izquierda, vista general de una madera creada por el modelo de simulación. A la derecha, acercamiento a cada una de las maderas creadas por el modelo de simulación. *Figura generada con ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.*

4.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS MADERAS CREADAS POR EL MODELO DE SIMULACIÓN

Las características microestructurales de diseño de las maderas fueron los datos de entrada dados al algoritmo para su creación. Por lo tanto, cada madera tiene propiedades elásticas particulares, calculadas en base al tamaño de anillos y densidades. El Cuadro 4.2 describe las características de las maderas creadas por el modelo de simulación necesarias para un análisis modal.

Cuadro 4.2: Características de las maderas simuladas.

Características	Maderas			
	Anillos estrechos dif 140	Anillos estrechos dif 410	Anillos abiertos dif 140	Anillos abiertos dif 410
Dimensiones (mm.)	360 × 210 × 3			
Tamaño de anillos (mm.)	.4204	.3990	2.14	2.01
N de anillos	499	526	98	104
Tamaño temprana (mm.)	0.386482	0.346373	1.9715	1.9156
Tamaño tardía (mm.)	0.033946	0.052587	0.178203	0.101449
Densidad promedio ($\frac{kg}{m^3}$)	340			
Diferencial de densidad	140	410	140	410
Densidad temprana ($\frac{kg}{m^3}$)	328	285	328	319
Densidad tardía ($\frac{kg}{m^3}$)	468	695	468	729
E_L temprana (GP_a)	12.148534166	10.833963141	12.124838889	11.866345034
E_L tardía (GP_a)	16.438273021	23.396769788	16.414577744	24.429151681
E_R temprana (GP_a)	0.98831935694	0.97935265379	0.98815773120	0.98639454182
E_R tardía (GP_a)	1.0175797119	1.0650436935	1.0174180862	1.0720855815

4.3. Interpretación y análisis de gráficos MAC

Antes de presentar los resultados y gráficos obtenidos en cada análisis MAC es conveniente explicar la forma de interpretarlos. Por ello, las diferentes características de comportamiento observadas entre las maderas son explicadas a continuación. En el Cuadro 4.3 se muestran las maderas analizadas en cada tipo de análisis MAC, junto con la característica microestructural evaluada en cada uno. Cada análisis MAC fue identificado por un nombre, dependiendo del tipo de maderas analizadas.

Cuadro 4.3: Maderas analizadas en cada análisis MAC.

Tipo de análisis	MAC anillos estrechos	MAC anillos abiertos	MAC diferencial 140	MAC diferencial 410
Maderas analizadas	Anillos estrechos dif 140 × Anillos estrechos dif 410	Anillos abiertos dif 140 × Anillos abiertos dif 410	Anillos estrechos dif 140 × Anillos abiertos dif 140	Anillos estrechos dif 410 × Anillos abiertos dif 410
Característica evaluada	Diferencial de densidad		Tamaño de anillos	

Comportamiento similar

Éstas secciones exhiben modos similares que se identifican cuando, al comparar dos maderas, cada modo tiene un equivalente en la otra. En estas secciones, los modos mantienen el mismo orden de aparición en ambas maderas, lo que facilita su identificación mediante el número correspondiente. En la Figura 4.8 se observa un ejemplo de gráfico MAC que compara modos de vibración entre dos maderas. Cada cuadro amarillo corresponde a un modo de vibración específico que ha sido encontrado en ambas maderas (modos equivalentes). La ubicación de los cuadros en el gráfico representa el orden de aparición. El acomodo diagonal de los cuadros indica el comportamiento similar entre las maderas. En este caso, del modo 8 al 18, las maderas presentan los mismos modos de vibración en el mismo orden.

Modos invertidos

Los modos invertidos se describen en este trabajo como aquellos en los que al comparar dos maderas, el orden de aparición de un modo en una madera no corresponde directamente al mismo número de modo en la otra madera, sino que está intercambiado con el modo vecino. El modo equivalente de una madera aparece en una posición inmediatamente anterior o posterior en la secuencia de modos de la otra madera. Aunque el orden de aparición está invertido, ambos modos mantienen la misma forma de modo, lo que permite identificarlos como equivalentes. Por ejemplo: Si el modo 161 de una madera corresponde al modo 162 de la otra madera, y viceversa, se considera que estos modos están invertidos. Un comportamiento de este tipo se observa en la Figura 4.9, donde la sección de comportamiento similar se ve interrumpida por dos modos invertidos.

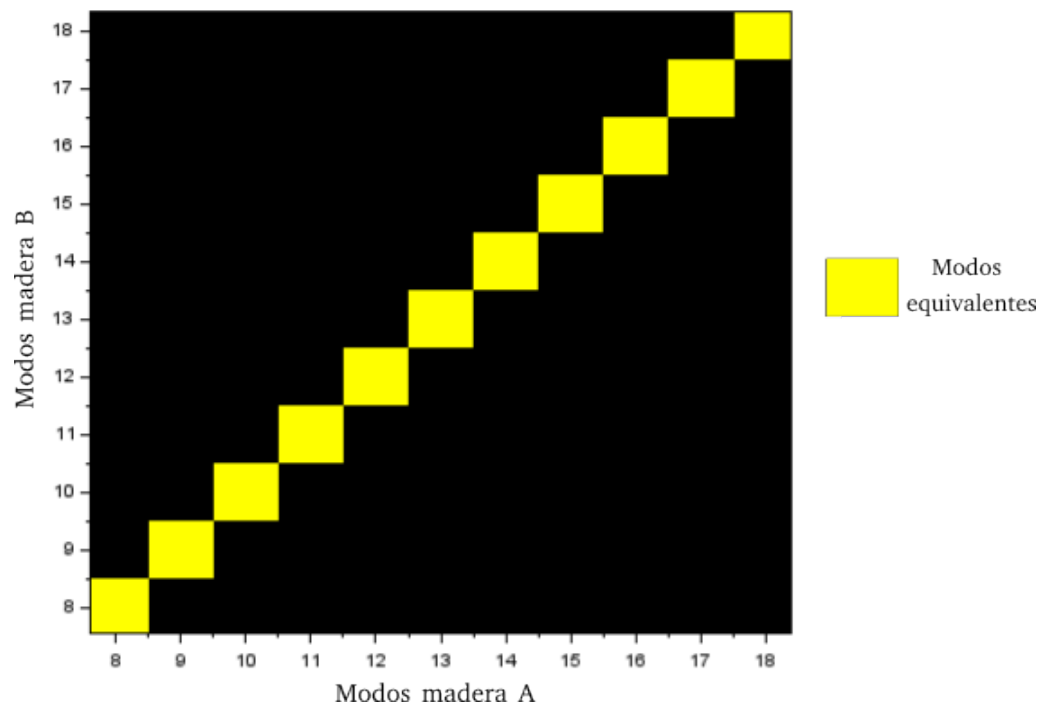


Figura 4.8: Ejemplo de gráfico MAC con datos que revelan comportamiento similar entre maderas analizadas.

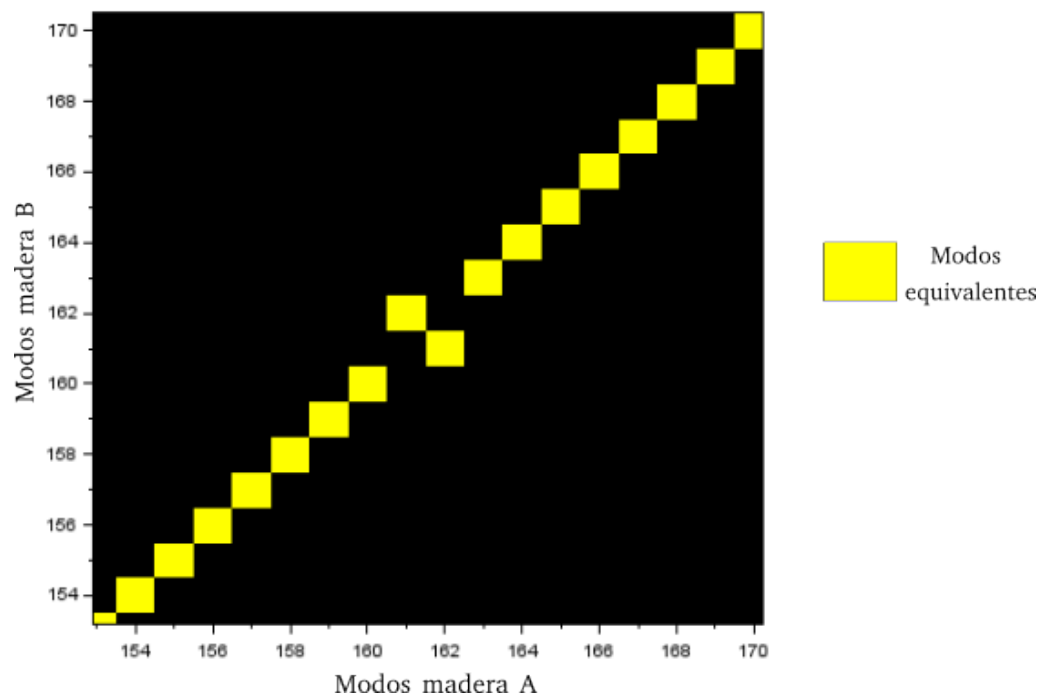


Figura 4.9: Ejemplo de gráfico MAC con datos que muestran comportamiento similar y modos invertidos entre maderas analizadas.

Interferencia en las líneas nodales

En este trabajo, la interferencia en las líneas nodales de los modos puede ser explicada como el fenómeno en el que, al comparar dos maderas, se identifican modos que comparten la misma cantidad de líneas nodales pero presentan formas de modo diferentes. Esta interferencia puede manifestarse de dos maneras:

1. Interferencia en ambas maderas: Ambas maderas muestran patrones atípicos y formas de modo diferentes entre sí, pero con igual o con casi la misma cantidad de líneas nodales. La Figura 4.3(a) muestra un ejemplo de modos con esta característica. Ambos modos presentan 8 líneas nodales en sentido vertical y dos líneas nodales en sentido horizontal, sin embargo, las formas de modo varían.

2. Interferencia en una sola madera: Mientras una madera exhibe una forma típica para un modo específico, la otra presenta la misma forma modal pero distorsionada. Un ejemplo de este fenómeno se observa en la Figura 4.3(b), donde ambos modos presentan la misma cantidad de líneas nodales y una forma modal bastante similar.

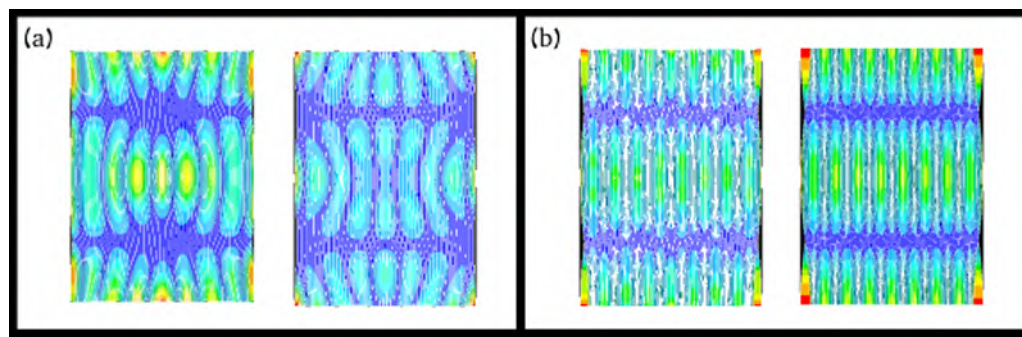


Figura 4.10: (a) Modos de vibración con interferencia en ambas maderas. (b) Modos de vibración con interferencia en una sola madera. *Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.*

Dentro de los gráficos MAC de este trabajo, la interferencia en las líneas nodales entre modos es señalada con cuadros de color azul. La Figura 4.11 muestra el ejemplo de un gráfico MAC que compara modos de vibración entre dos maderas. En este ejemplo, se observa un comportamiento similar entre las maderas respecto al orden de aparición de los modos y a las formas modales, excepto para el modo 274 de cada madera. Este modo presenta el mismo orden de aparición en ambas maderas debido a su ubicación en el gráfico. Sin embargo, como se indica en la imagen, las maderas presentan algún cambio en la forma modal debido a interferencias en las líneas nodales.

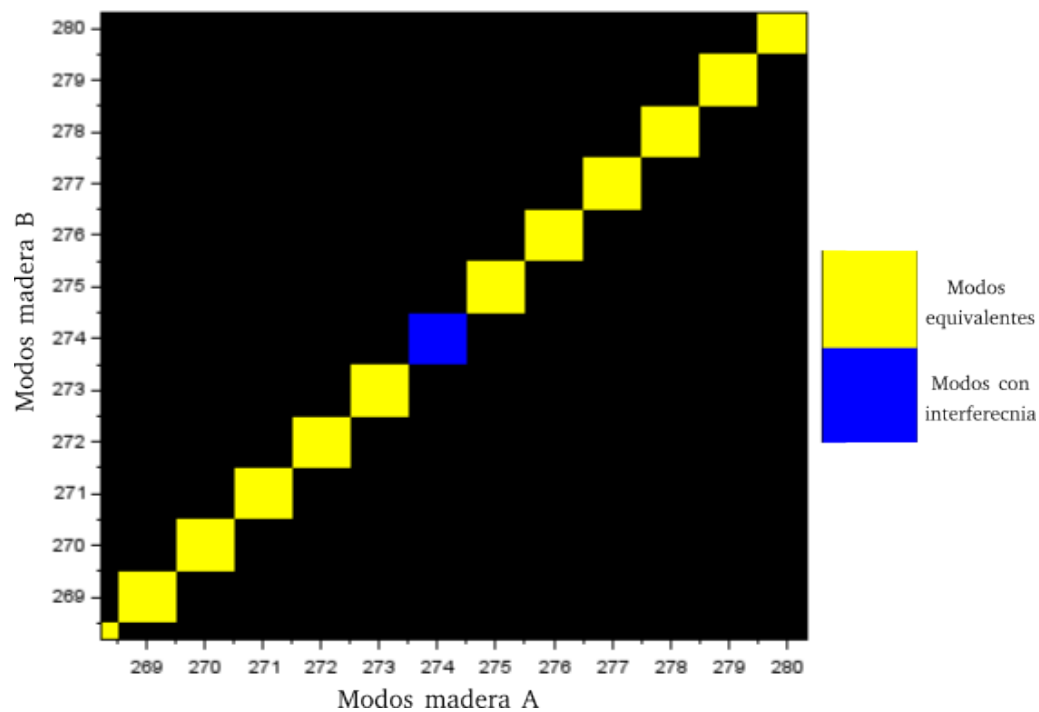


Figura 4.11: Ejemplo de gráfico MAC con datos que muestran comportamiento similar y modos con interferencia en las líneas nodales entre maderas analizadas.

Secciones de comportamiento contrastante

El comportamiento contrastante se presenta en secciones donde, al comparar dos maderas, cada modo de una madera tiene su equivalente en la otra sin un orden de aparición aparente. Además, los modos dentro de estas secciones pueden presentar anomalías como interferencias en las líneas nodales. El desfase en el orden de aparición de los modos entre dos maderas es ilustrado en la Figura 4.12. En estas secciones, los cuadros que indican la presencia de modos equivalentes o con interferencia pierden su acomodo diagonal.

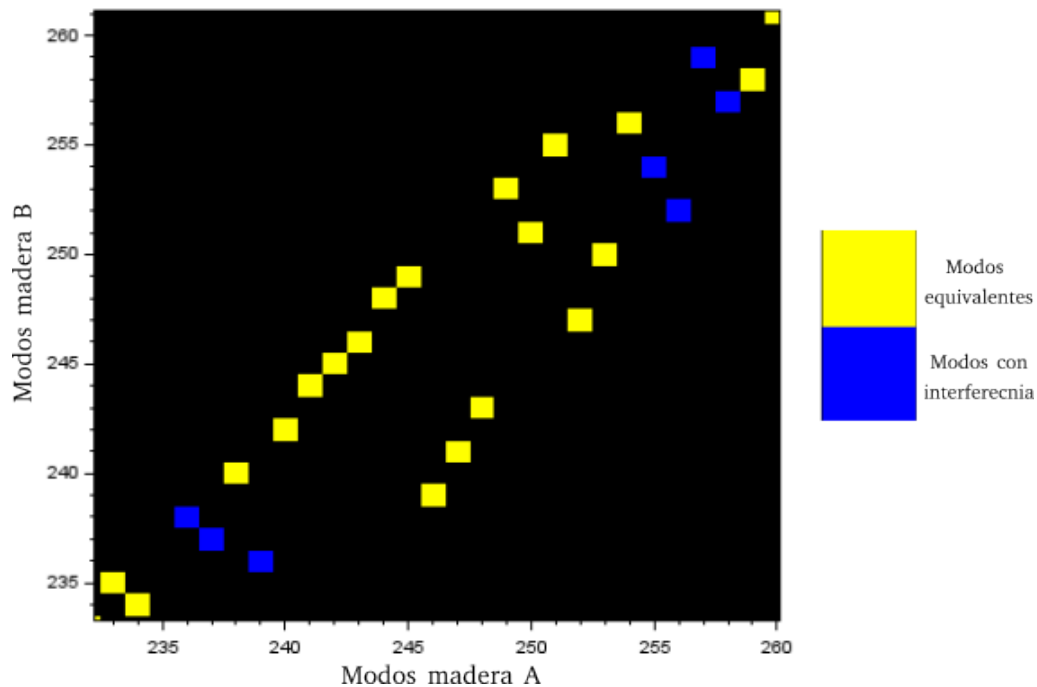


Figura 4.12: Ejemplo de gráfico MAC con datos que muestran comportamiento contrastante y modos con interferencia en las líneas nodales entre maderas analizadas.

4.4. Vibraciones de maderas con diferente diferencial de densidad

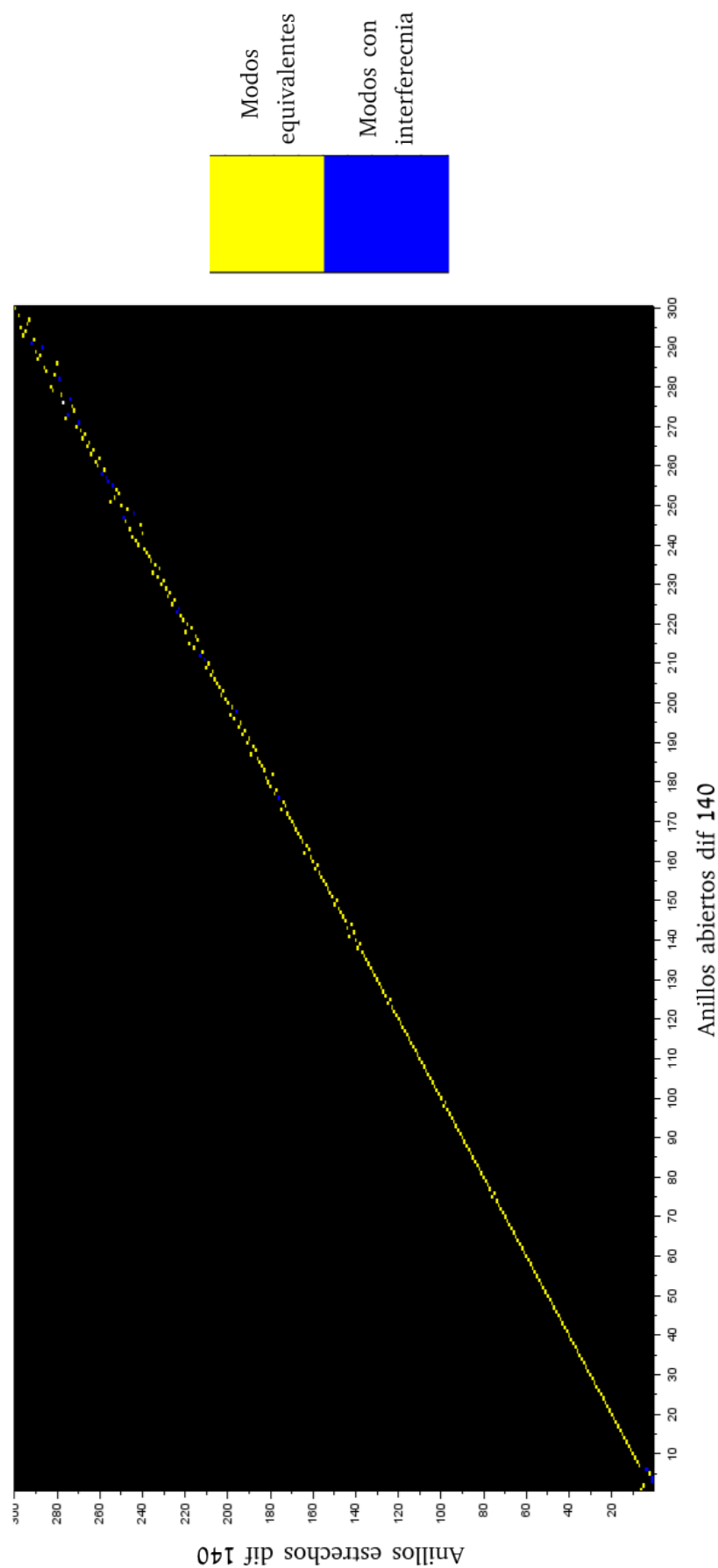
4.4.1. Análisis MAC diferencial 140

En este análisis MAC se compararon maderas con diferente ancho de anillos. El factor en común entre estas maderas es el diferencial de densidad de 140. Entre estas maderas se observa un comportamiento similar, sin alteraciones significativas, en los primeros modos de vibración. La Figura 4.13 muestra que, a partir del modo 138 las diferencias entre el comportamiento de ambas maderas son más evidentes. Surgen modos invertidos, secciones de comportamiento contrastante y modos con interferencia en las líneas nodales. Los modos con interferencia obtenidos en este análisis se presentan en los apéndices, en las Figuras 5.5, 5.5, 5.5.

4.4.2. Análisis MAC diferencial 410

Este análisis revela los cambios en el comportamiento vibratorio entre dos maderas provocados por la diferencia en el tamaño de anillos. El diferencial de densidad utilizado es el valor máximo encontrado en la bibliografía. La Figura 4.14 ilustra las diferencias en el comportamiento vibratorio entre estas maderas. En estas maderas el comportamiento contrastante comienza después de los primeros 60 modos de vibración. Los modos con interferencia obtenidos en este análisis se presentan en los apéndices, en las Figuras 5.5, 5.5, 5.5, 5.5.

Figura 4.13: Análisis MAC dif 140



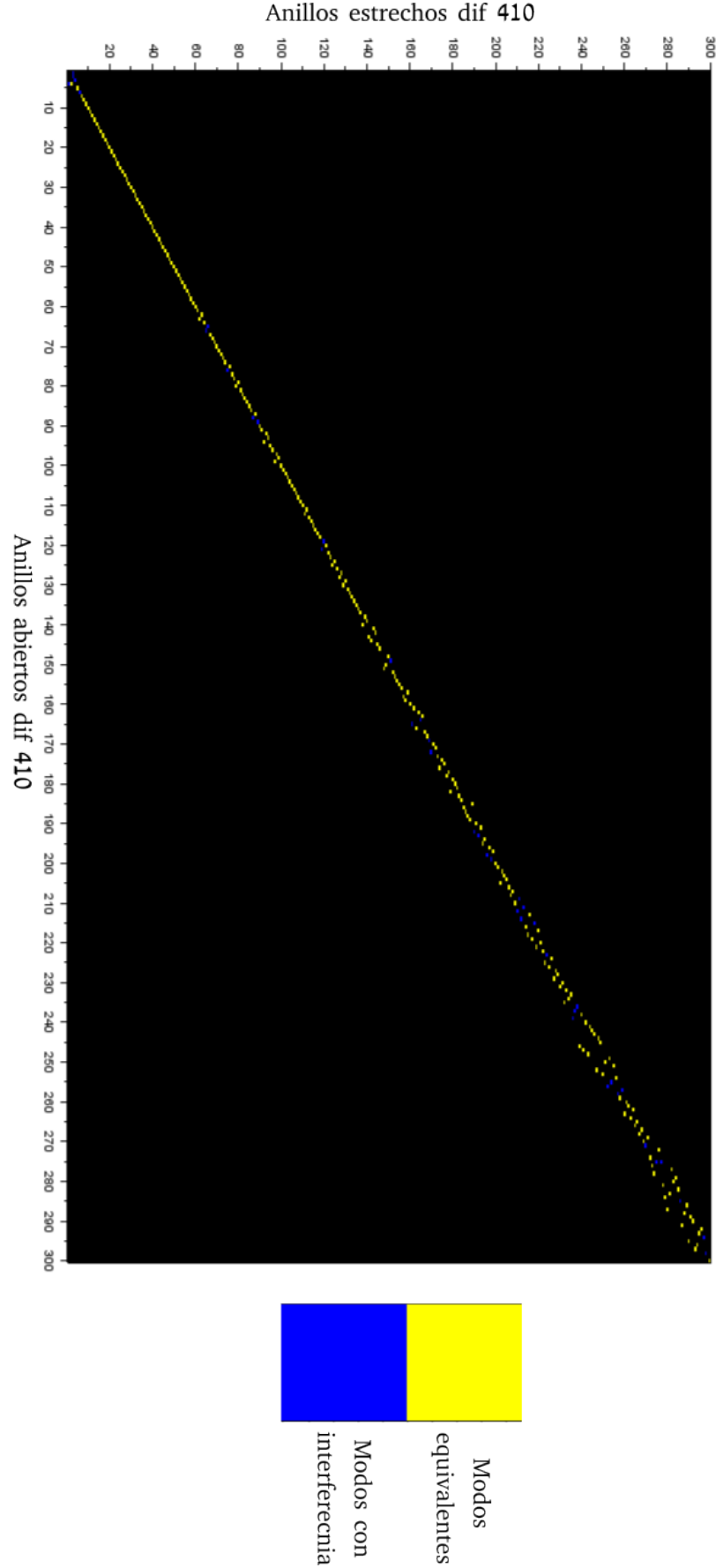


Figura 4.14: Análisis MAC dif 140

4.5. Vibraciones de maderas con diferente ancho de anillos

4.5.1. Análisis MAC anillos abiertos

Las diferencias en el comportamiento vibratorio entre las maderas con anillos abiertos y diferente diferencial de densidad se muestran en la Figura 4.15. En este gráfico es posible observar una sección extensa de comportamiento similar entre ambas maderas. Esto, en los primeros 60 modos de vibración, donde la frecuencia de resonancia es baja. A medida que la frecuencia de resonancia aumenta, la diversidad en el comportamiento vibratorio entre las maderas comienza a ser evidente. En general secciones de comportamiento similar se ven divididas por modos invertidos y pequeñas secciones de comportamiento contrastante entre las maderas. Los modos con interferencia obtenidos en este análisis se presentan en los apéndices, en las Figuras 5.11, 5.12, 5.13, 5.

4.5.2. Análisis MAC anillos estrechos

Este análisis MAC comparó los modos de vibración entre maderas con anillos estrechos y diferente diferencial de densidad. La Figura 4.16 muestra el gráfico MAC resultante de esta comparación. Este análisis revela una alta concordancia entre el comportamiento vibratorio entre ambas maderas. Extensas secciones de comportamiento similar entre los modos de vibración son evidentes. Algunos modos invertidos intervienen en las secciones de comportamiento similar.

Entre estas maderas, solo un modo de vibración con interferencia en las líneas nodales es reportado. El modo 274, de la madera con anillos estrechos dif 140, presenta alteraciones en la forma de las líneas nodales. La Figura 4.5.2 muestra el modo 274 de ambas maderas, donde se aprecia la interferencia en las líneas nodales únicamente para la madera con diferencial de 140. La frecuencia de resonancia entre ambos modos varía sólo unos pocos hertz entre una madera y otra. Lo mismo sucede con el resto de los modos de vibración evaluados, ya que tampoco existe gran diferencia entre las frecuencias de resonancia de los modos equivalentes.

Figura 4.15: Análisis MAC dif 140

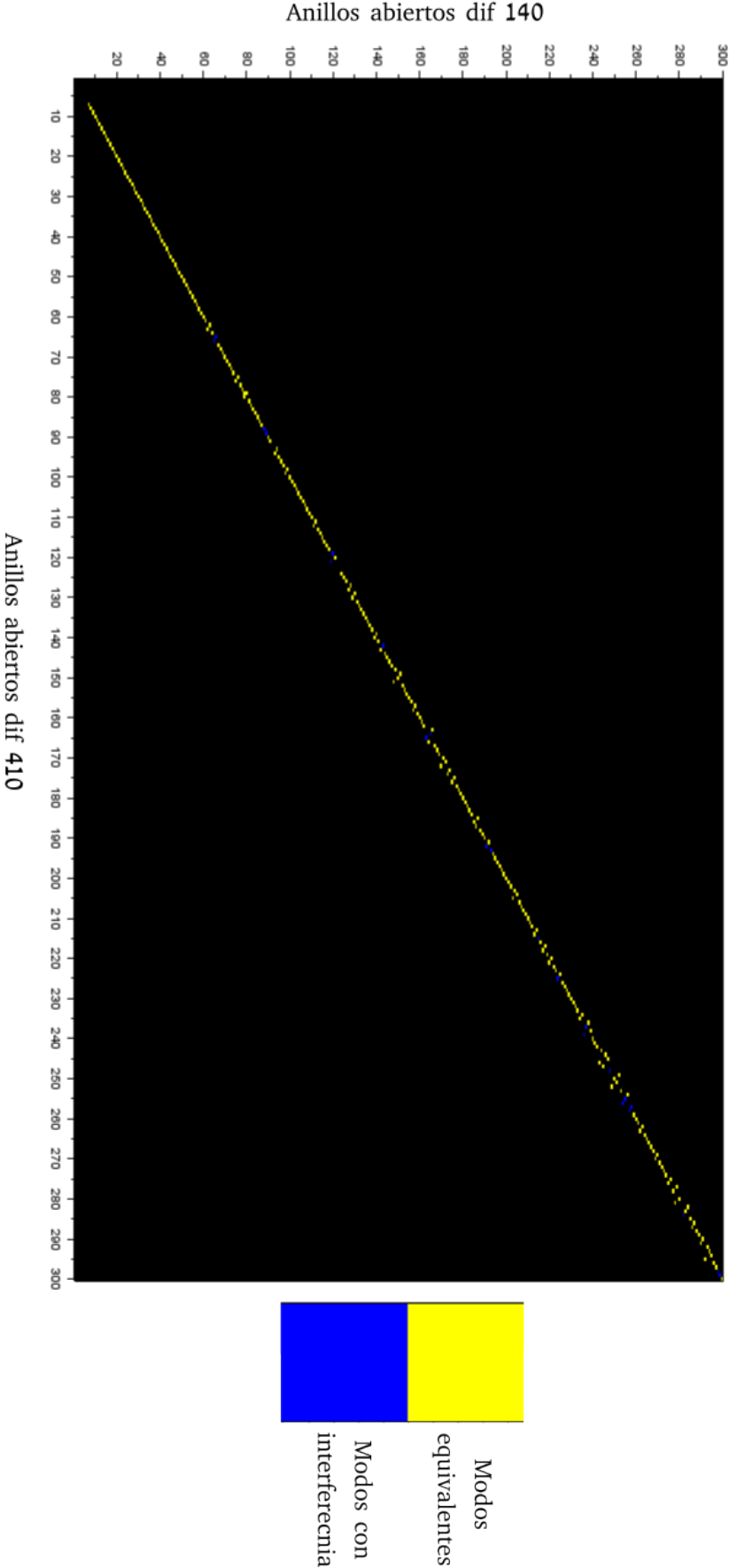
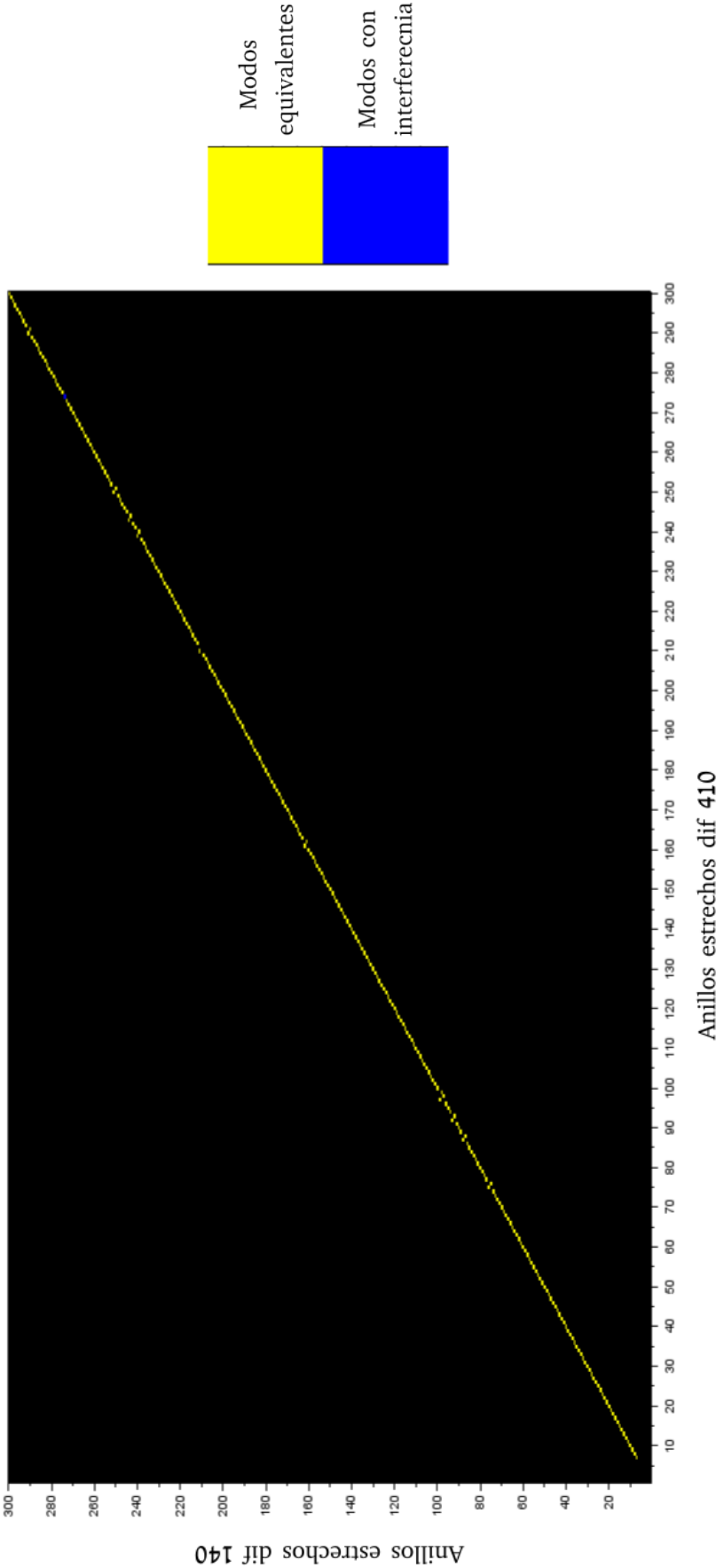


Figura 4.16: Análisis MAC dif 140



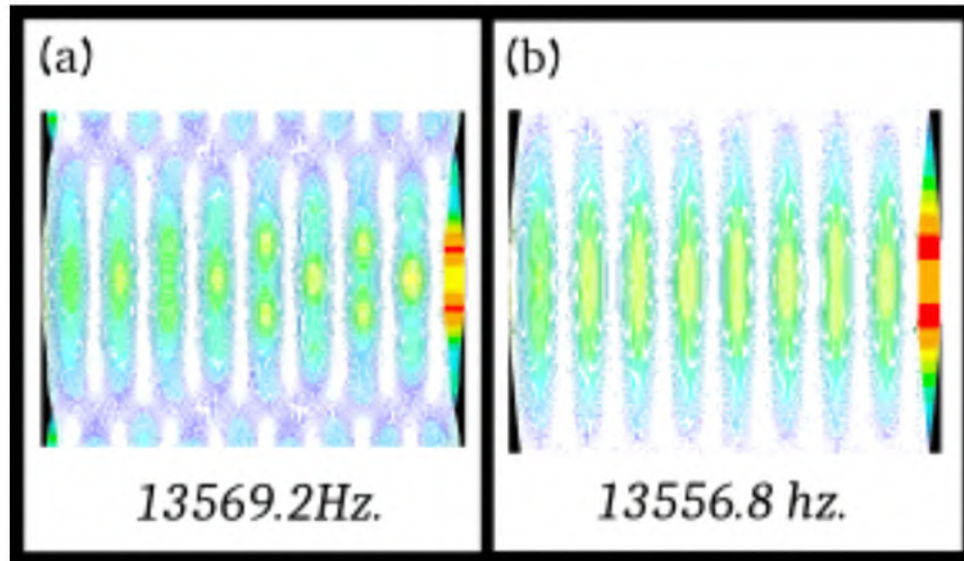


Figura 4.17: Modos con interferencia entre maderas con anillos estrechos. (a) Modo 274 de la madera anillos estrechos dif 140. (b) Modo 274 de la madera anillos estrechos dif 410. *Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.*

4.6. Discusión

En maderas con densidades promedio similares y mismo diferencial, las diferencias estructurales de ancho de anillos generan un impacto en el comportamiento vibratorio. Estos cambios estructurales provocan amplias secciones con modos desfasados entre ambas maderas, además de alterar las líneas nodales y las formas modales de algunos modos equivalentes. Aproximadamente, los últimos 40 de los 300 modos evaluados en estas maderas no presentan correspondencia directa en la comparación 1 a 1 de cada análisis MAC. En estas zonas de mayor disparidad entre los modos de vibración, la frecuencia de resonancia también presenta mayor variación entre una madera y otra.

Un comportamiento similar sucede en las maderas analizadas con anillos abiertos, donde el cambio estructural entre ambas se presenta en el diferencial de densidad. Las Figuras 4.18 y 4.19, a la izquierda, muestran las zonas de mayor disparidad de comportamiento entre las maderas para los diferentes análisis MAC realizados. A la derecha, se encuentran las respectivas frecuencias de resonancia de las maderas analizadas. Al observar la Figura 4.18 (a, b) y la Figura 4.19(c) es notorio que los tres análisis MAC involucrados presentan el mismo tipo de alteraciones en el comportamiento de las maderas analizadas. En general, estos análisis indican que, mientras la frecuencia de resonancia aumenta, las diferencias en el comportamiento vibratorio de las maderas son más evidentes.

Por el contrario, al analizar maderas con anillos estrechos y un cambio estructural también dado por el diferencial de densidad, las correspondencias 1 a 1 entre modos se mantienen en secciones extensas, incluso a altas frecuencias (Ver Figura 4.19(d)). No se presentan alteraciones en las líneas nodales ni en las formas modales equivalentes que indiquen grandes diferencias entre los modos y las frecuencias de resonancia de ambas maderas analizadas.

Los análisis sobre caracterización superficial y química proveen datos valiosos sobre las propiedades intrínsecas de la madera temprana y tardía. La mayor cristalinidad y resistencia térmica de la madera tardía, evidenciadas en los análisis de DRX y TGA, indican una estructura interna más ordenada y rígida. La mayor hidrofiliidad de la madera temprana, identificada mediante el ángulo de contacto, puede asociarse con una mayor capacidad de amortiguamiento interno. Finalmente, las diferencias en la intensidad de absorción en los espectros FTIR sugieren una variación en la composición relativa de celulosa, hemicelulosa y lignina entre zonas tempranas y tardías. Estos aspectos podrían explicar por qué los anillos más anchos, con mayor variabilidad estructural interna, muestran mayor sensibilidad al diferencial de densidad y presentan interferencias nodales más pronunciadas.

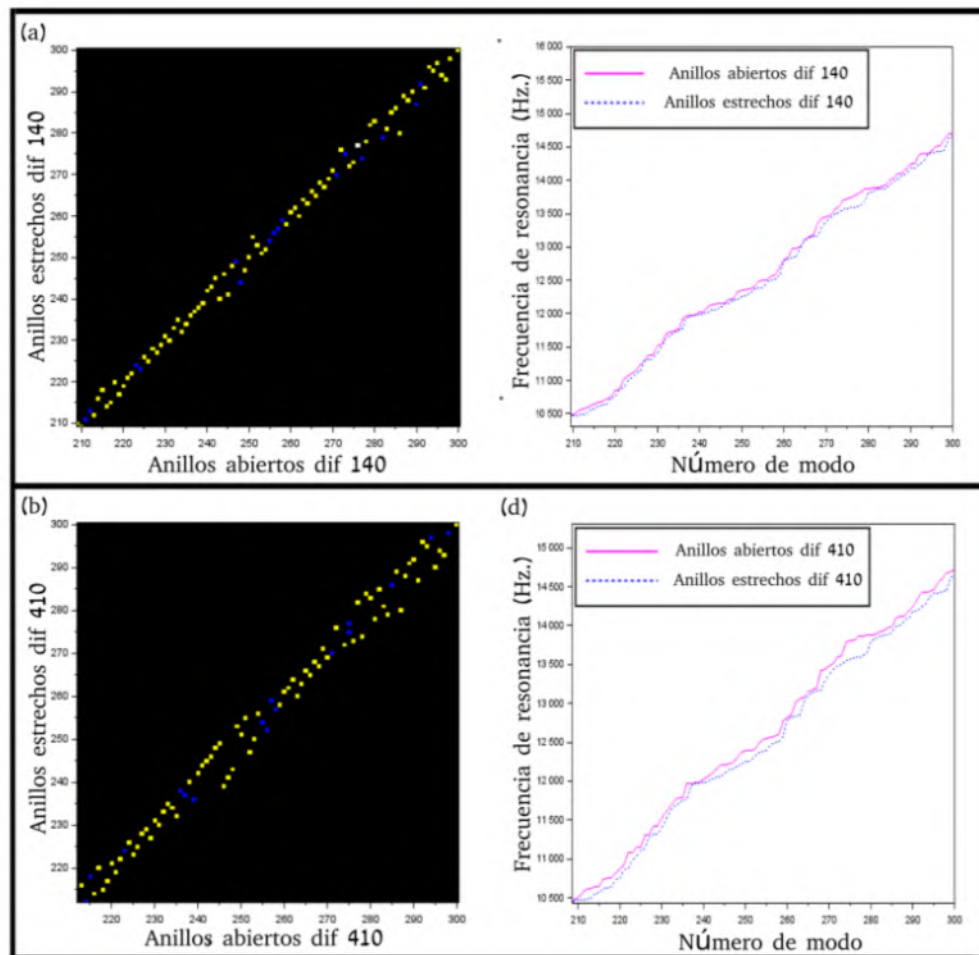


Figura 4.18: Zonas con mayor disparidad de comportamiento entre las maderas analizadas. a) A la izquierda: análisis MAC diferencial 140, a la derecha: frecuencias de resonancia respectivas. b) A la izquierda: análisis MAC diferencial 410, a la derecha: frecuencias de resonancia respectivas.

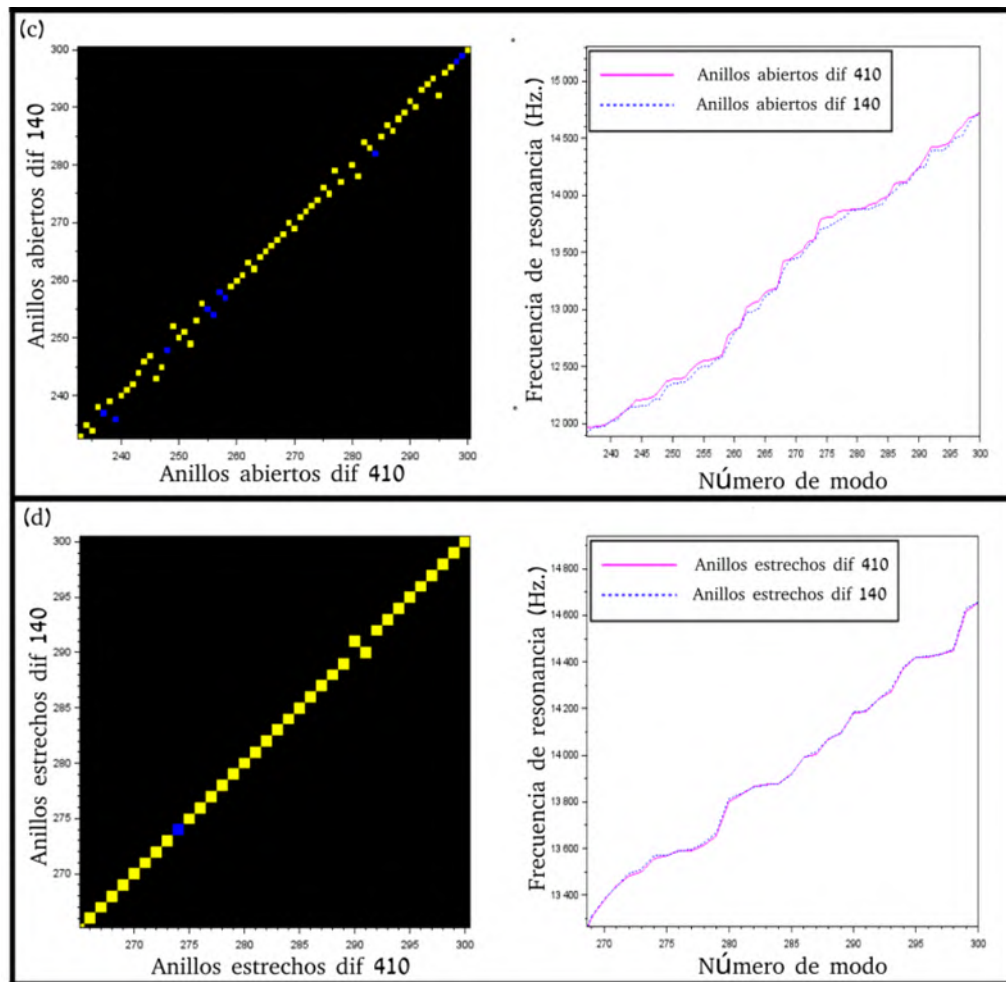


Figura 4.19: Zonas con mayor disparidad de comportamiento entre las maderas analizadas. c) A la izquierda: Análisis MAC anillos abiertos. A la derecha: frecuencias de resonancia respectivas d) A la izquierda: Análisis MAC anillos estrechos. A la derecha: frecuencias de resonancia respectivas.

Capítulo 5

Conclusiones

El modelo computacional de simulación calibrado empleado en este trabajo facilitó la obtención de las propiedades mecánicas de la madera de *Picea abies*, tanto de la madera temprana como de la tardía. Esta herramienta hizo posible prescindir del uso de equipo especializado que, aunque permite determinar dicha información a nivel celular, representa un proyecto independiente. Además, este método permite crear y simular maderas con características microestructurales controladas, lo que resultó particularmente útil para la comparación de las maderas simuladas y el análisis de datos.

Al comparar maderas con variaciones estructurales en el tamaño de los anillos, es notorio que, a altas frecuencias, surgen amplias secciones con diferencias significativas en el comportamiento vibratorio entre las maderas. En estas regiones, los modos equivalentes entre ambas estructuras muestran desfases considerables en su orden de aparición. Además, las modificaciones en las formas modales, tanto en una como en ambas maderas, se vuelven más frecuentes bajo estas condiciones. Esto indica que, a altas frecuencias, donde la longitud de onda es más corta, el ancho de anillos adquiere una influencia notable en el comportamiento modal de la estructura.

Por otro lado, los análisis comparativos en maderas con variaciones en el diferencial de densidad entre madera temprana y tardía sugieren que, en maderas con densidades promedio similares y anillos estrechos, el impacto del diferencial de densidad en el comportamiento modal es limitado. En contraste, en maderas con anillos más anchos, este diferencial parece generar alteraciones más significativas.

Esta información abre nuevas interrogantes. Las maderas simuladas fueron generadas a partir de datos obtenidos de muestras reales, en las que se observó que los anillos más anchos suelen contener un mayor porcentaje de madera temprana en comparación con los anillos estrechos. Un trabajo futuro podría centrarse en evaluar el impacto vibratorio considerando un nuevo enfoque: el análisis del porcentaje relativo de madera temprana y tardía dentro de un solo anillo de crecimiento. Este criterio de distribución interna permitiría vincular de manera más precisa la proporción de componentes de la madera, sus propiedades químicas, como la cristalinidad y la hidroficidad, y así comprender mejor su influencia sobre la respuesta dinámica del material. Este enfoque de caracterización en el modelado contribuiría a establecer relaciones más directas entre la microestructura y el comportamiento vibratorio, avanzando hacia modelos predictivos más detallados y representativos del material.

Anexos

Bases del código de Scilab

Scilab es un software de código abierto para cálculo científico. Las referencias de los comandos empleados en el algoritmo se consultaron en la página oficial de Scilab (<https://help.scilab.org/>). Si no se está familiarizado con Scilab, es recomendable comprender primero las siguientes funciones y conceptos básicos, que son necesarios para analizar en detalle la estructura y el funcionamiento de este algoritmo:

Comentarios (//)

Algunas líneas dentro del algoritmo comienzan con doble slash (//), lo que le indica al programa que lo que se escribe a continuación es información que debe ser ignorada. Esto sirve para establecer comentarios dentro del código.

Corchetes ([])

Los corchetes se emplean para agrupar datos de manera estructurada. En general, lo que se encuentra entre corchetes representa un vector o matriz y los espacios o comas actúan como separadores de columnas.

Dos puntos (:)

Los dos puntos pueden ser usados para formar vectores, por ejemplo $k:j$ es el vector $[k, k+1, \dots, j]$. También permiten seleccionar filas, columnas y elementos específicos de vectores y otras matrices. Por ejemplo: la expresión $A(:,1)$ representa la columna 1 de A , mientras que la expresión $A(1,:)$ representa la fila 1 de A .

Paréntesis ()

Los paréntesis izquierdo y derecho se utilizan para especificar el orden de evaluación y controlar cómo se ejecutan las operaciones en una expresión. Al llamar a la función de un comando, los argumentos que se establecen deben estar dentro de paréntesis y separados por comas. Además, los paréntesis se utilizan para acceder a elementos específicos, como el caso de: $A(:,1)$.

Apóstrofo (')

El apóstrofo (') se usa para la transposición conjugada (conjugación hermitiana) de una matriz. Las comillas simples (') o dobles (") también se usan para definir cadenas de caracteres. Por ejemplo, las comillas simples son utilizadas para definir cadenas de texto, permitiendo encapsular el contenido.

Punto (.)

Además de ser usado para marcar decimales en los números, el punto se utiliza en conjunto con otros símbolos de operador (* / \ ^ ') para realizar operaciones elemento por elemento. Las operaciones matemáticas estándar (como * para multiplicación) se aplican a matrices de acuerdo con las reglas de álgebra matricial. Sin embargo, a veces es necesario realizar operaciones que afecten a cada elemento de las matrices de manera individual. Para esto, se utilizan los operadores con un punto (.). Por ejemplo, si $A = [1, 2; 3, 4]$ y $B = [5, 6; 7, 8]$, entonces $C = A .* B$ // C será $[1*5, 2*6; 3*7, 4*8] = [5, 12; 21, 32]$.

Código de Scilab

```
clear

DensidadBuscada=340
Dif=410
tamanoMinimoVetaTemprana=3.39E-04
tamanoMaximoVetaTemprana=4.72E-04
relacionMinTempranaEntreTardia=3.94
relacionMaxTempranaEntreTardia=11.51

coefiEL=[2.0734766552360870e+003    3.0640991822738062e+001]
coefiER=[ 9.1959728092420403e+002    2.0900253592561285e-001]

maderasAleatorias=10000
////////////////////////////////////////
//estos ciclos calculan las propiedades el sticas a partir
//de los polinomios creados con los coeficientes dados de
//entrada
////////////////////////////////////////

gradoEL=length(coefiEL)
ELtemprana=0
for qw=1:gradoEL
    ELtemprana=ELtemprana+coefiEL(qw)*Entradas(:,1).^ (qw-1)
end

ELtardia=0
```

[illegible]

```
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,2)], 'DensTemp.csv')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,3)], 'tardPctTemp.csv')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,4)], 'tmnTemp.csv')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,6)], 'DensTardia.csv')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,7)], 'ELTemp.csv')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,8)], 'ELtardia.csv')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,9)], 'ERtemp.csv')
csvWrite([(1:maderasAleatorias)' ordenada(:,10)], 'ERTardia.csv')
```

Código de ANSYS

```

/CLEAR , all                !Clear limpia la base de
    datos
/CLEAR , START

/CWD,'C:\Users\danas\Documents'    !Cambia el directorio
    de trabajo actual. Nombre completo de la ruta del nuevo
    directorio de trabajo.

STROUT='VetasDelgadas'        !comando no conocido
/TITLE,Dana Limon,            !Define un titulo principal
/FILNAME,STROUT                !Cambia el nombre de trabajo (
    Jobname) para el analisis. Nombre que se utilizar como
    nombre de trabajo (Jobname) ???

/UNITS,SI                     !sistema de unidades utilizado

/PREP7                         !Entra en el preprocesador de
    creaci n de modelos.

maderaPorAnalizar='5'        !# de las maderas creadas por
    el algoritmo
indiceDeMadera = VALCHR(maderaPorAnalizar)

!dimensiones de la placa a similar, la variable altura
    siempre va en sentido paralelo a las vetas de la placa

!placatapaviolin
largo=.210
altura=.360
espesor=.003

!placaDani
!largo=.026
!altura=.199
!espesor=.0065
!modo1=990hz, experimental

!Placa Zahid
!largo=.196
!altura=.0415
!espesor=.007
!modo1=310, experimental

```

[illegible]

```

TotalDeMaderasDeScilab=10000

SaveInWorkingDir=1      !1-->WORKING DIRECTORY, 0-->IN THE
    DIR SPECIFIED AT FOLLOWING
DirectoryPart1='C:\Users\Alex Torres' !STRING IN TWO PARTS
    OF THE DIRECTORY TO SAVE (TOO LENGTH)
!DirectoryPart1='C:\Users\INBA'
DirectoryPart2='\Google Drive\DellyLap\ANSYS'

*DIM,DensTemp,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,DensTemp,DensTemp, csv

*DIM,tardPctTemp,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,tardPctTemp,tardPctTemp, csv

*DIM,tmnTemp,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,tmnTemp,tmnTemp, csv

*DIM,DensTardia,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,DensTardia,DensTardia, csv

*DIM,ELTemp,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,ELTemp,ELTemp, csv

*DIM,ELtardia,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,ELtardia,ELtardia, csv

*DIM,ERtemp,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,ERtemp,ERtemp, csv

*DIM,ERtardia,table,TotalDeMaderasDeScilab-1,1
*TREAD,ERtardia,ERtardia, csv

factorVeta=tardPctTemp(indiceDeMadera,1)

a=tmnTemp(indiceDeMadera,1)

b=a*factorVeta
vetas=NINT(largo/(a+b))
tamanoElemento=.01

der=DensTemp(indiceDeMadera,1) !para ver el valor de la
    variable
dtria=DensTardia(indiceDeMadera,1)

```

```

Eltem=ELTemp(indiceDeMadera,1)
Ertem=ERTemp(indiceDeMadera,1)
Eltria=ELtardia(indiceDeMadera,1)
Ertria=ERTardia(indiceDeMadera,1)


MP,DENS,1,DensTemp(indiceDeMadera,1)
MP,EY,1,ELTemp(indiceDeMadera,1)
MP,EX,1,ERTemp(indiceDeMadera,1)
MP,EZ,1,ERTemp(indiceDeMadera,1)
MP,GXZ,1,.5E9
MP,GXY,1,.5E9
MP,GYZ,1,.5E9
MP,NUXY,1,.03
MP,NUYZ,1,.019
MP,NUXZ,1,.33
MAT,1
ESIZE,tamanoElemento
!ET,1,Solid187
ET,1,Solid45


MP,DENS,2,DensTardia(indiceDeMadera,1)
MP,EY,2,ELTardia(indiceDeMadera,1)
MP,EX,2,ERTardia(indiceDeMadera,1)
MP,EZ,2,ERTardia(indiceDeMadera,1)
MP,GXZ,2,.5E9
MP,GXY,2,.5E9
MP,GYZ,2,.5E9
MP,NUXY,2,.03
MP,NUYZ,2,.019
MP,NUXZ,2,.33


*DO,n,1,vetas,1
BLOCK,(n-1)*(a+b),n*a+(n-1)*b,0,altura,0,espesor      !Crea
    bloques de madera temprana
BLOCK,(n*a)+(n-1)*b,n*(a+b),0,altura,0,espesor
*ENDDO
VGLUE,ALL


VMESH,1,                                !Genera
    nodos y elementos de volumen dentro de los vol menes.

```

```

VMESH,1+(1+2*vetas),2*vetas+(2*vetas-1),2      ! CR
/COLOR,NUMB,YELL,1                                ! CR

MAT,2
!ET,2,SOLID187
ET,2,SOLID45
ESIZE,tamanoElemento

VMESH,2+(2*vetas-1),2*vetas+(2*vetas-1),2
/COLOR,NUMB,ORAN,2
/PNUM,MAT,1
/REPLOT

vsel,all
VSUM
*GET,volumenT,VOLU,0,VOLU

masaEarly=volumenT*a/(a+b)*DensTemp(indiceDeMadera,1)
masaLate=volumenT*b/(a+b)*DensTardia(indiceDeMadera,1)

densidadPromedio=(masaEarly+masaLate)/volumenT

/SOLU

!tipo de analisis

ANTYPE,MODAL
MODOPT,SUBSP,NumberModes
RIGID,0,0,0,0,0,0
SOLVE

SOLVE

*IF,SaveInWorkingDir,EQ,1,THEN
MPWRITE, STRCAT('MatProps',maderaPorAnalizar), txt,
*ELSE
MPWRITE, STRCAT('MatProps',maderaPorAnalizar), txt,STRCAT(
    DirectoryPart1,DirectoryPart2)
*ENDIF

/POST1

SET,FIRST
SET,NEXT

```

```

SET,NEXT
SET,NEXT
SET,NEXT
SET,NEXT
SET,NEXT

PLNSOL,U,Z

*IF,SaveInWorkingDir,EQ,1,THEN
*cfcopen,STRCAT('ModalFrequencies',maderaPorAnalizar),txt,
*ELSE
*cfcopen,STRCAT('ModalFrequencies',maderaPorAnalizar),txt,
    STRCAT(DirectoryPart1,DirectoryPart2)
*ENDIF

*DO,paso,1,NumberModes,1
*GET,fmodo,MODE,paso,FREQ
*vwrite,fmodo
(F7.1)
*ENDDO
*cfclos

*IF,SaveInWorkingDir,EQ,1,THEN
PARSAV, SCALAR,STRCAT('ParametrosMadera',maderaPorAnalizar),
    txt,
*ELSE
PARSAV, SCALAR,STRCAT('ParametrosMadera',maderaPorAnalizar),
    txt,STRCAT(DirectoryPart1,DirectoryPart2)
*ENDIF

```

Modos con interferencia obtenidos del análisis MAC adiferencial 140

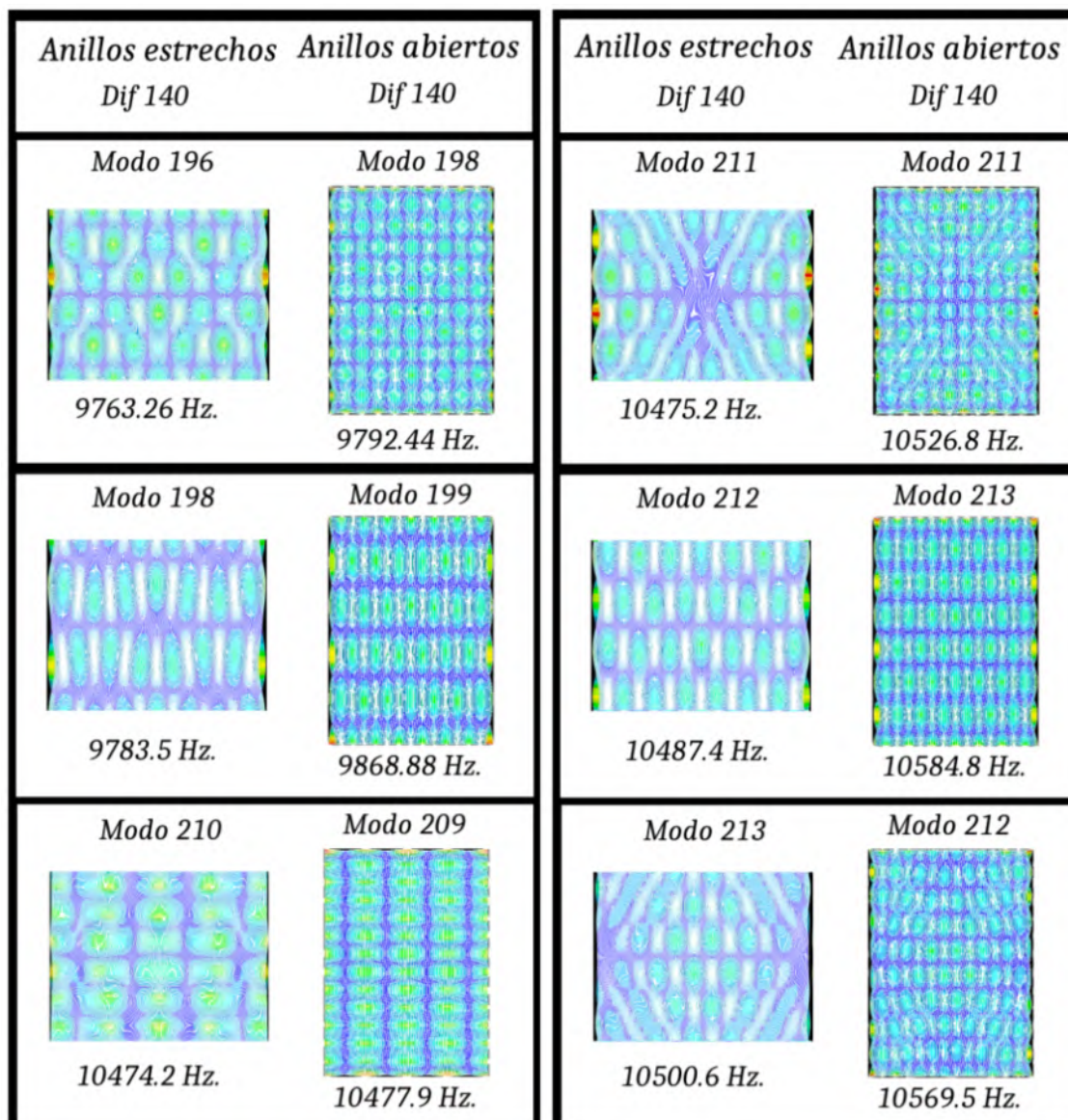


Figura 5.1: Comparación entre la madera anillos estrechos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 140. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

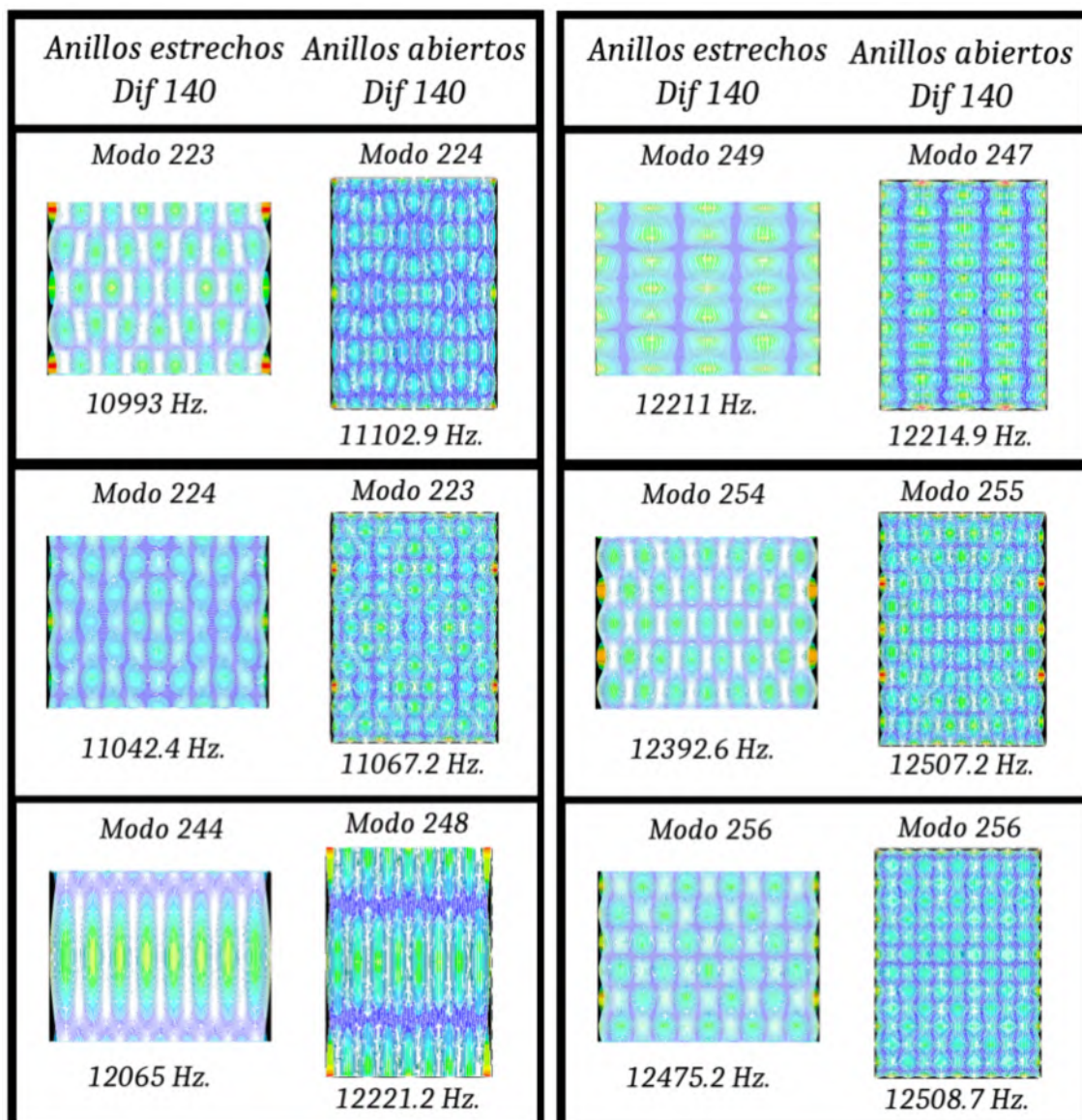


Figura 5.2: Comparación entre la madera anillos estrechos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 140. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

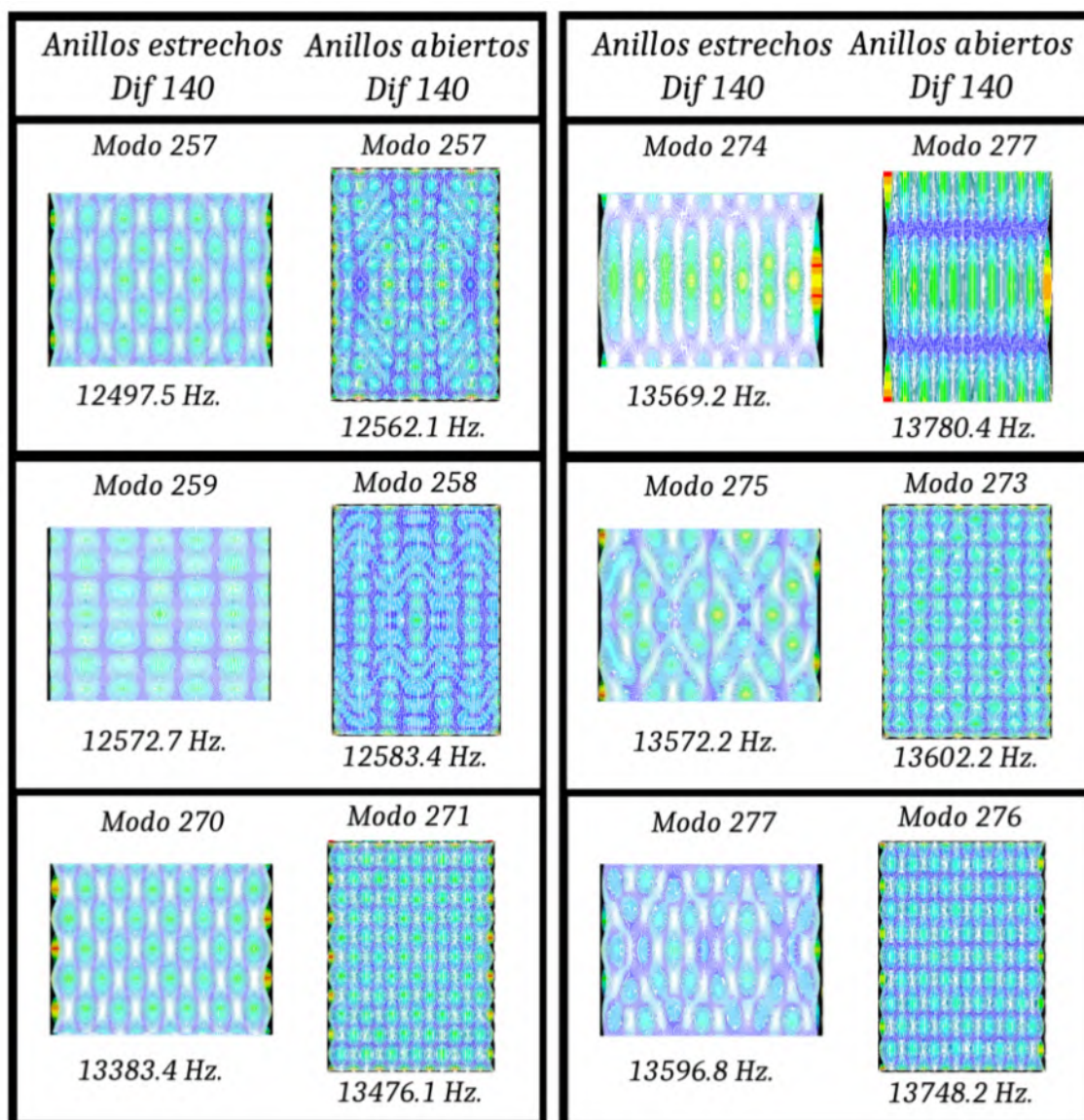


Figura 5.3: Comparación entre la madera anillos estrechos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 140. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

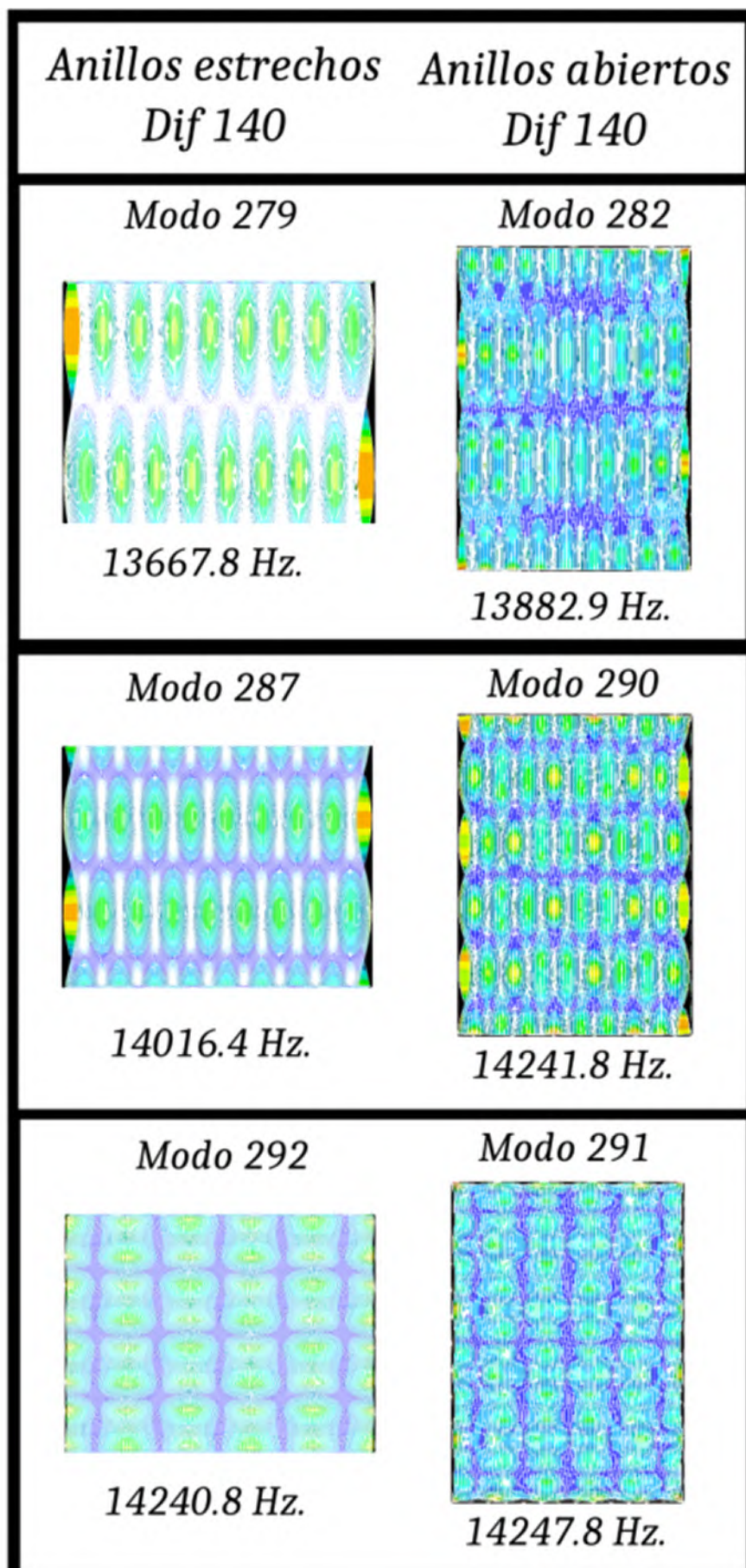


Figura 5.4: Comparación entre la anillos abiertos dif 140 y madera anillos abiertos dif 410. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

Modos con interferencia obtenidos del análisis MAC diferencial 410

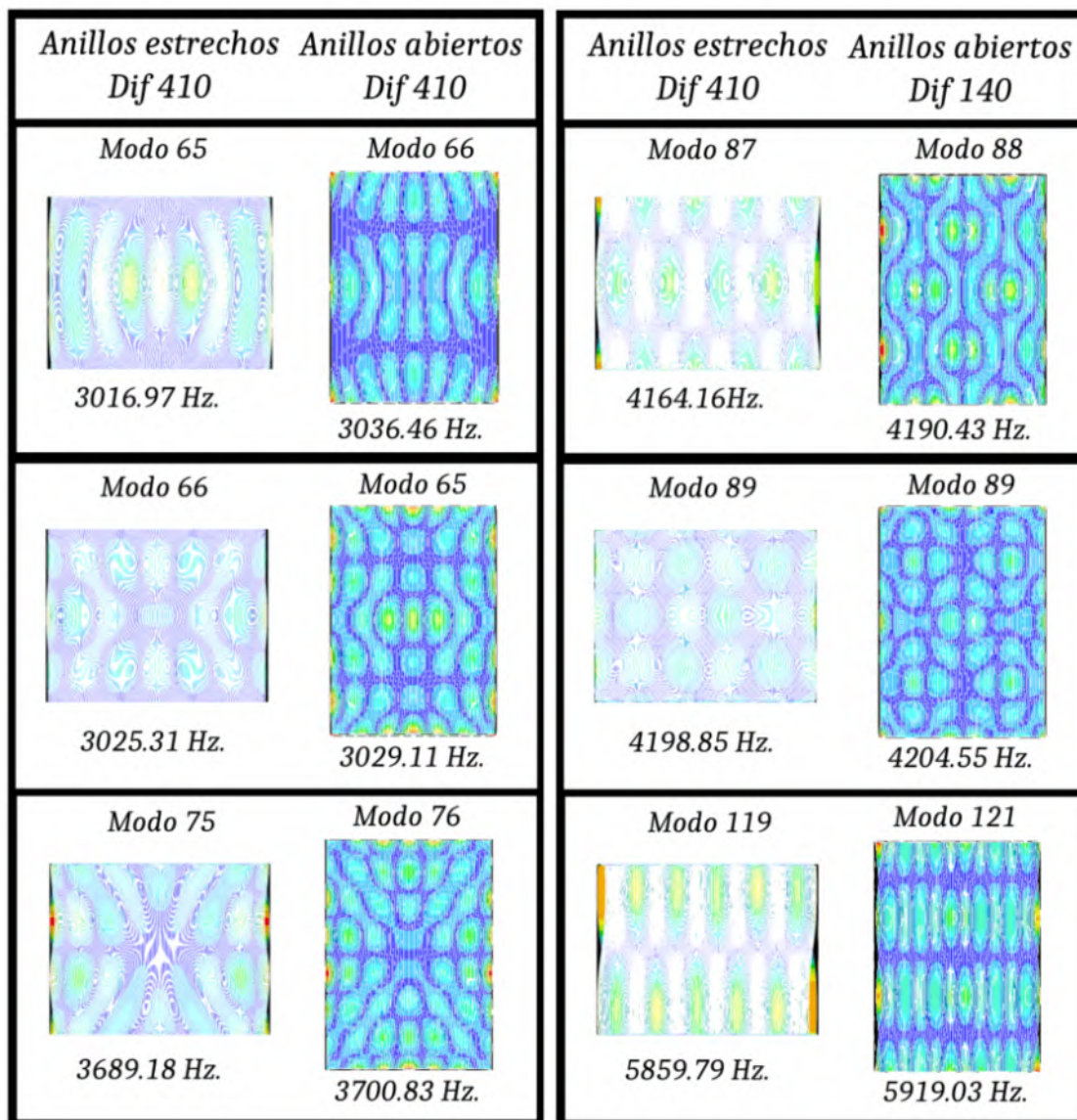


Figura 5.5: Comparación entre la madera anillos estrechos dif 410 y la madera anillos abiertos dif 410. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

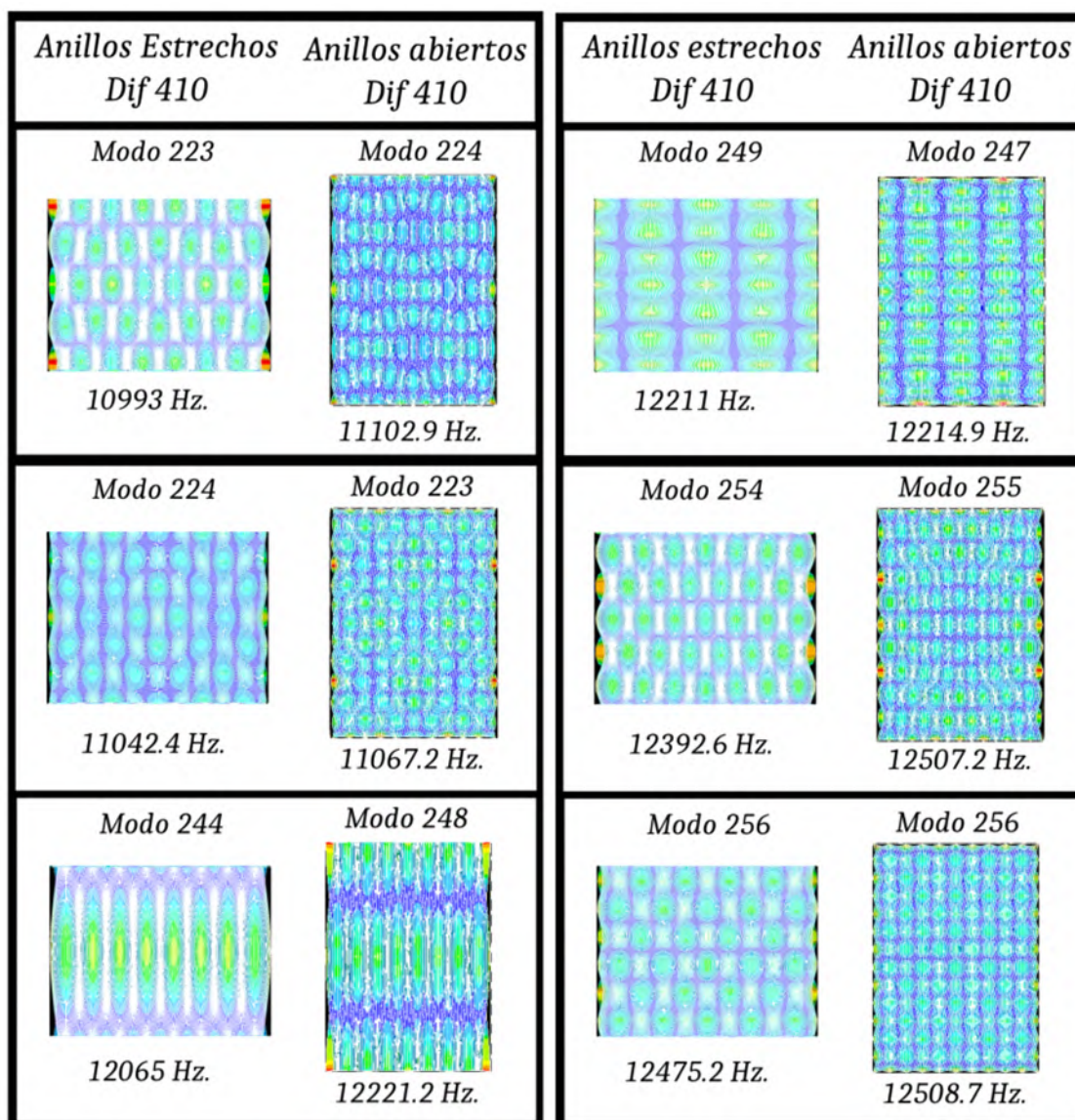


Figura 5.6: Comparación entre la madera anillos estrechos dif 410 y la madera anillos abiertos dif 410. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

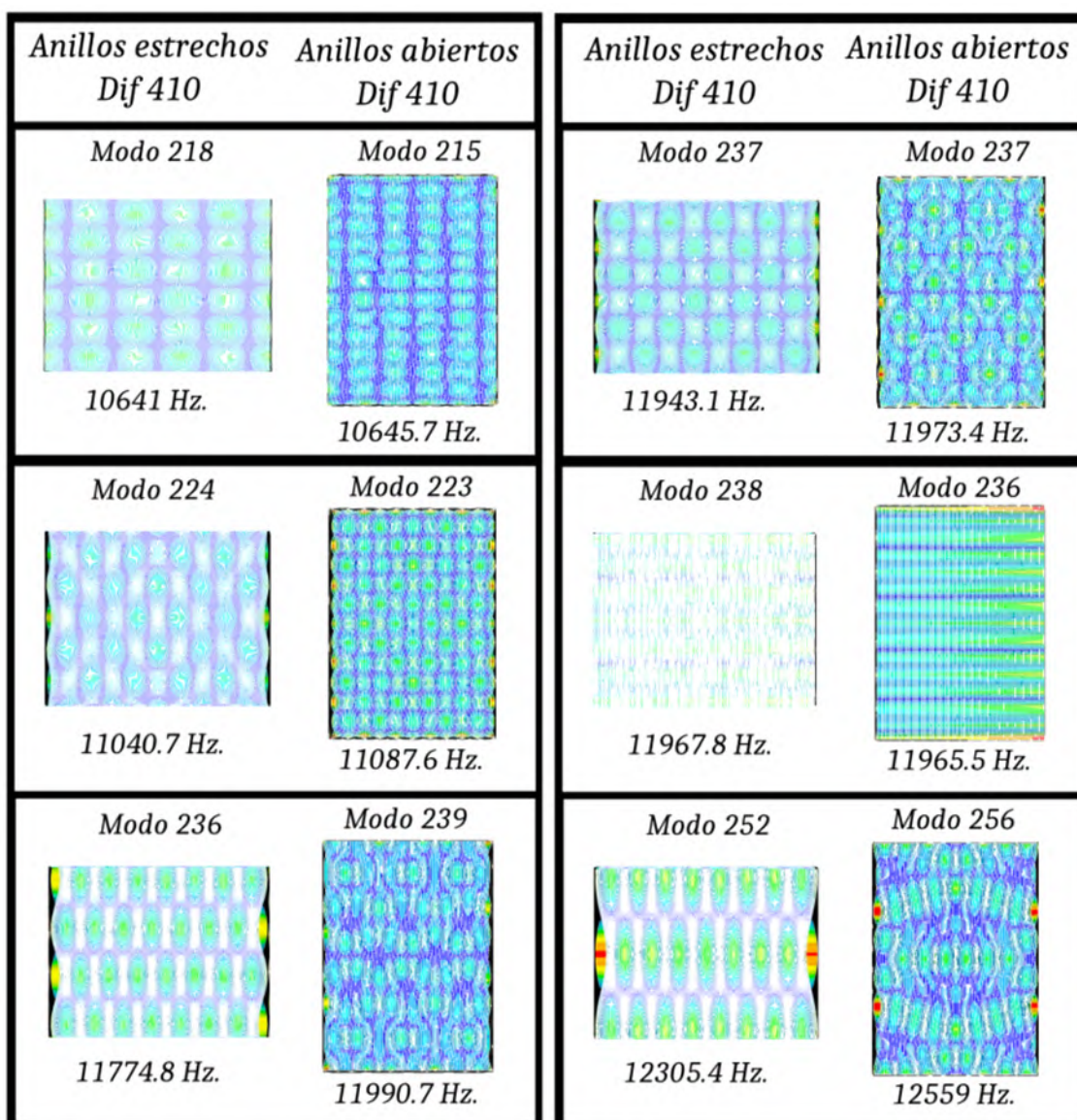


Figura 5.7: Comparación entre la madera anillos estrechos dif 410 y la madera anillos abiertos dif 410. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

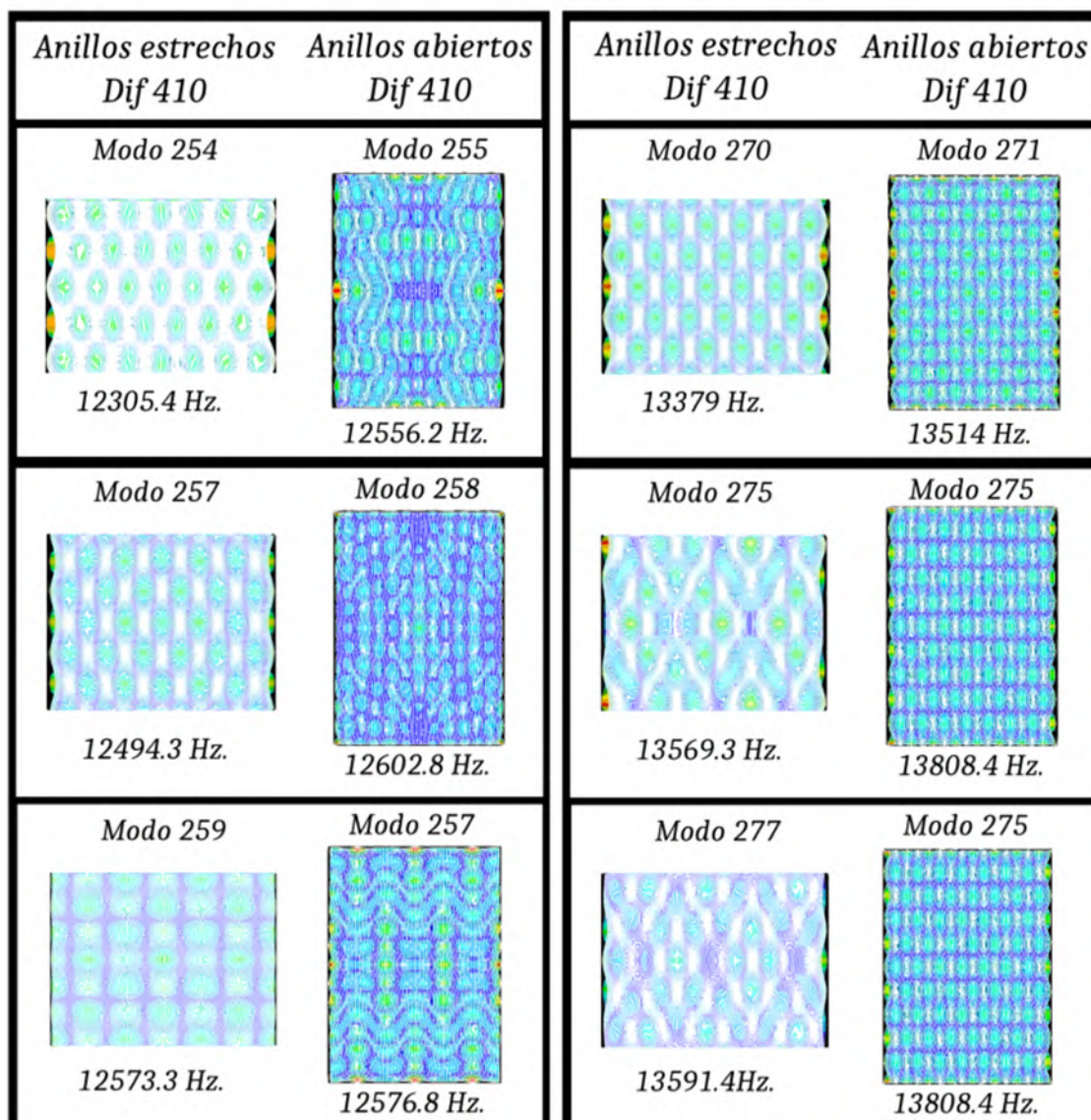


Figura 5.8: Comparación entre la madera anillos estrechos dif 410 y la madera anillos abiertos dif 410. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

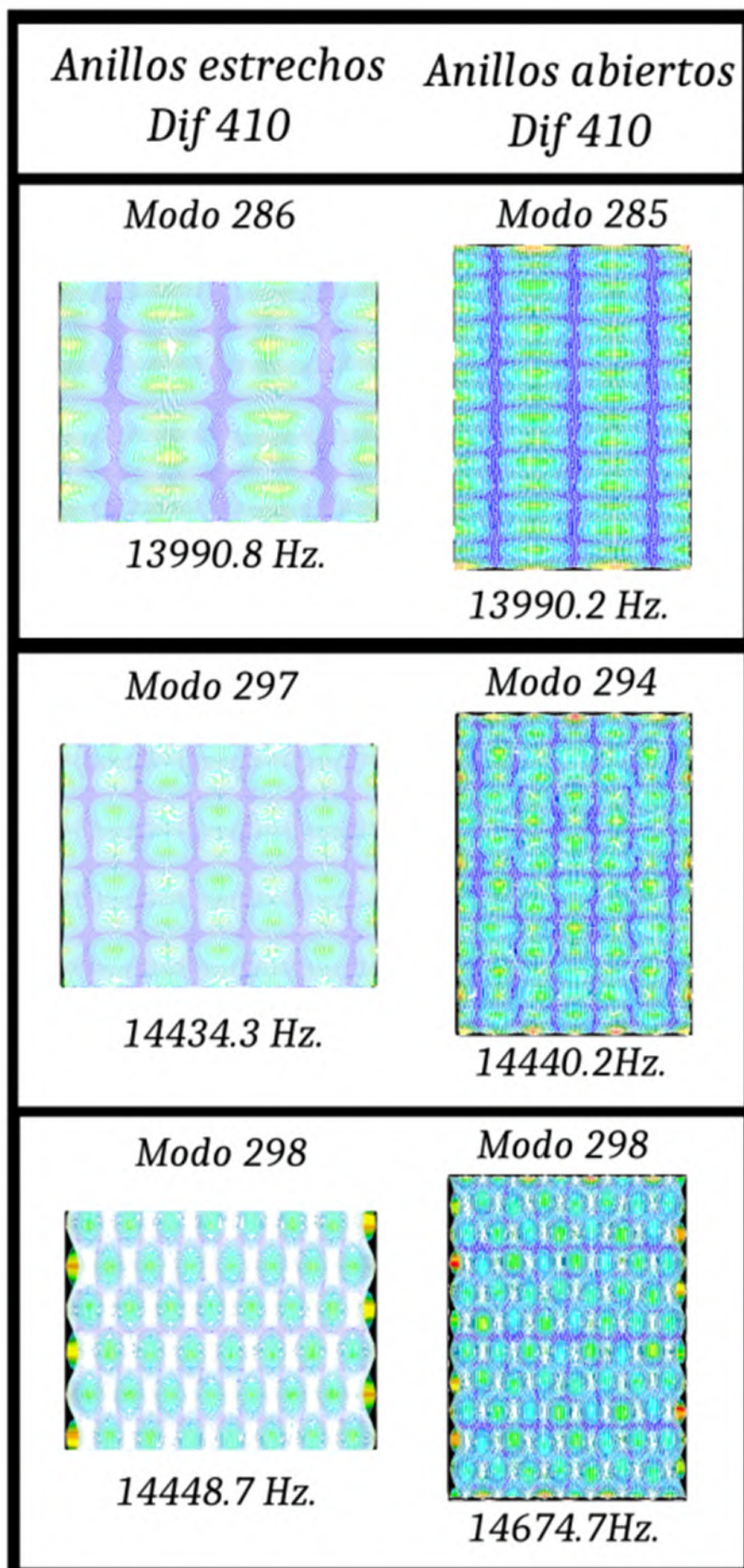


Figura 5.9: Comparación entre la madera anillos estrechos dif 410 y la madera anillos abiertos dif 410. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

Modos con interferencia obtenidos del análisis MAC anillos abiertos

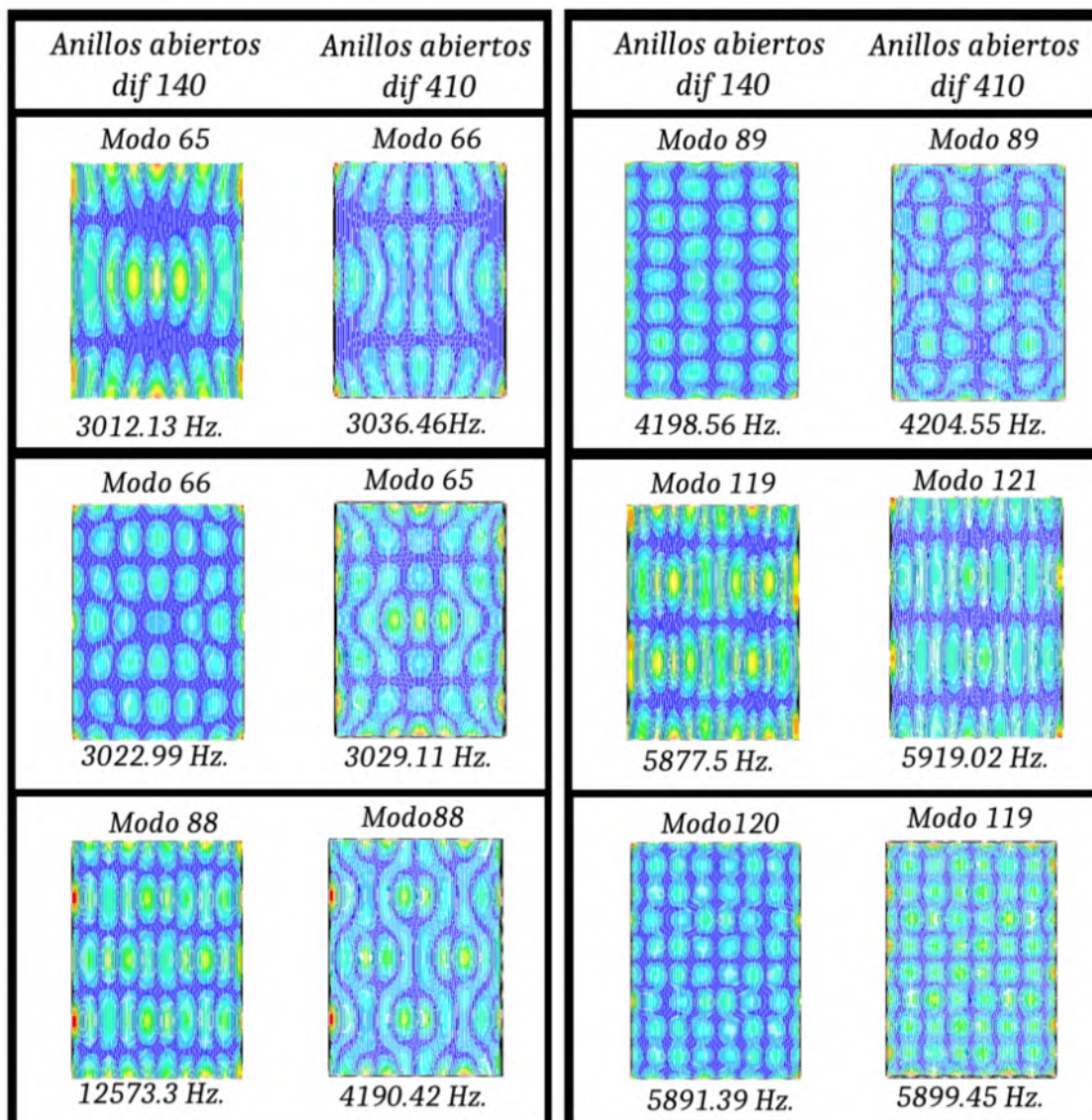


Figura 5.10: Comparación entre la madera anillos abiertos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 410. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

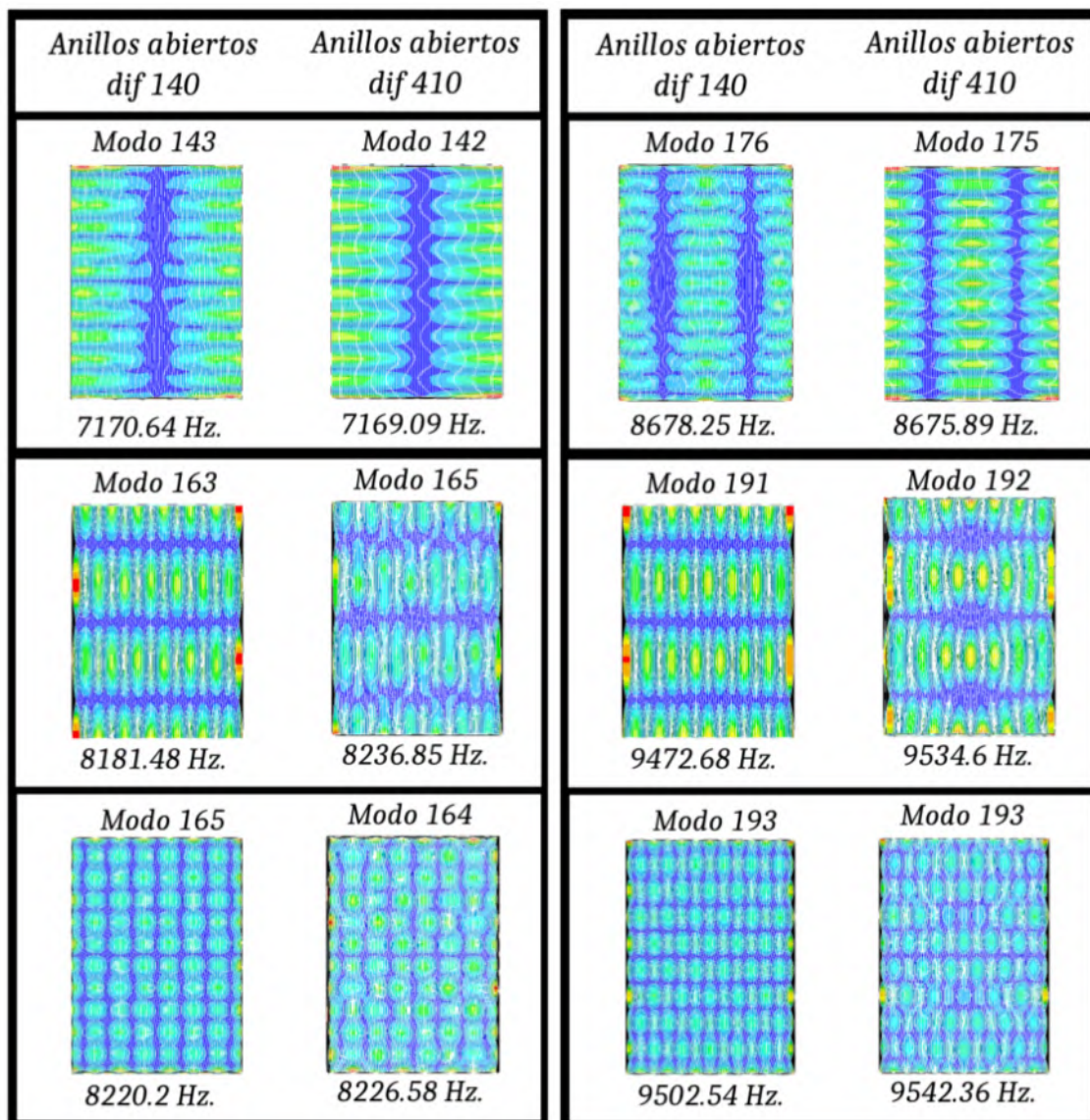


Figura 5.11: Comparación entre la madera anillos abiertos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 410. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

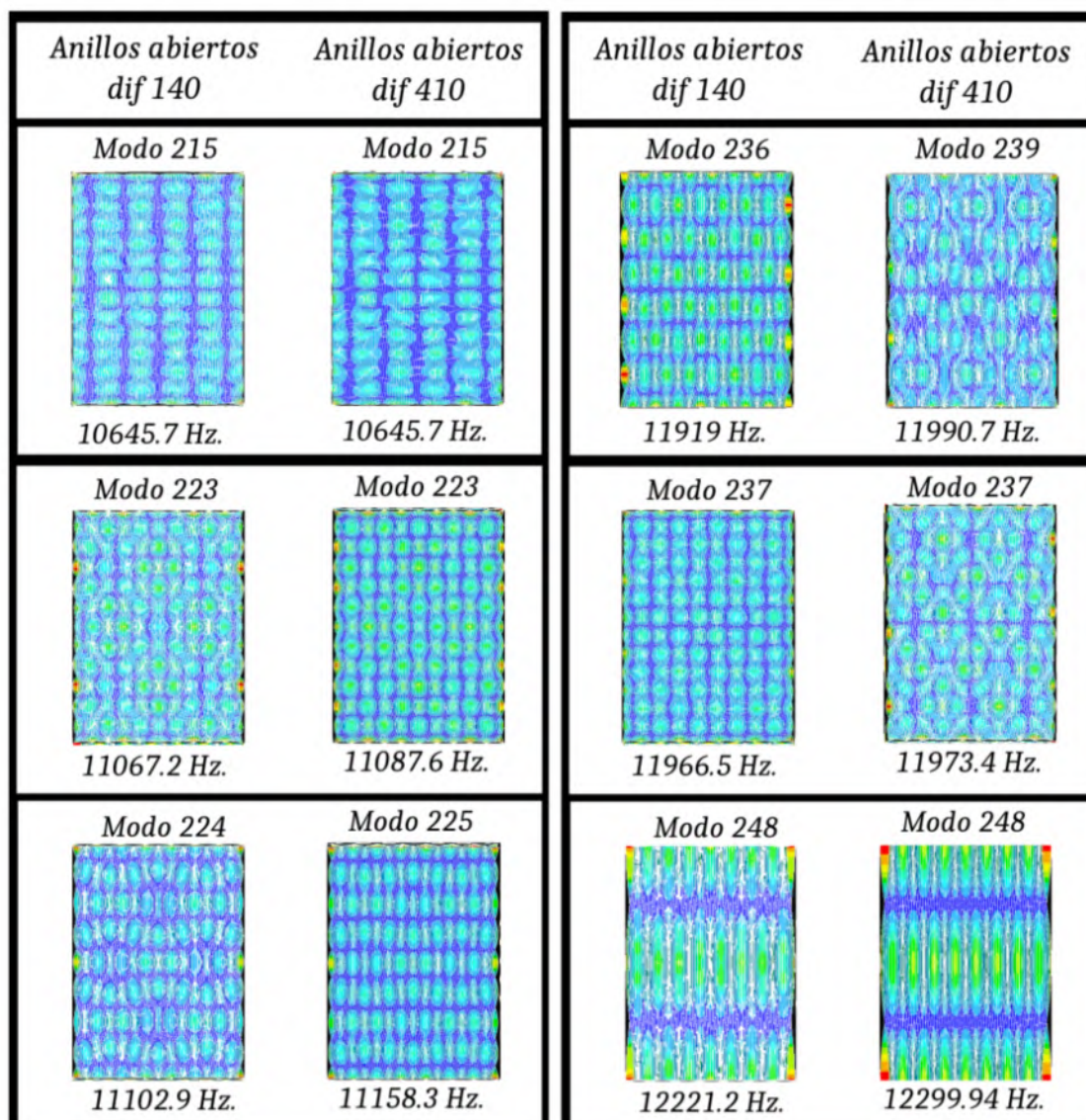


Figura 5.12: Comparación entre la madera anillos abiertos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 410. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

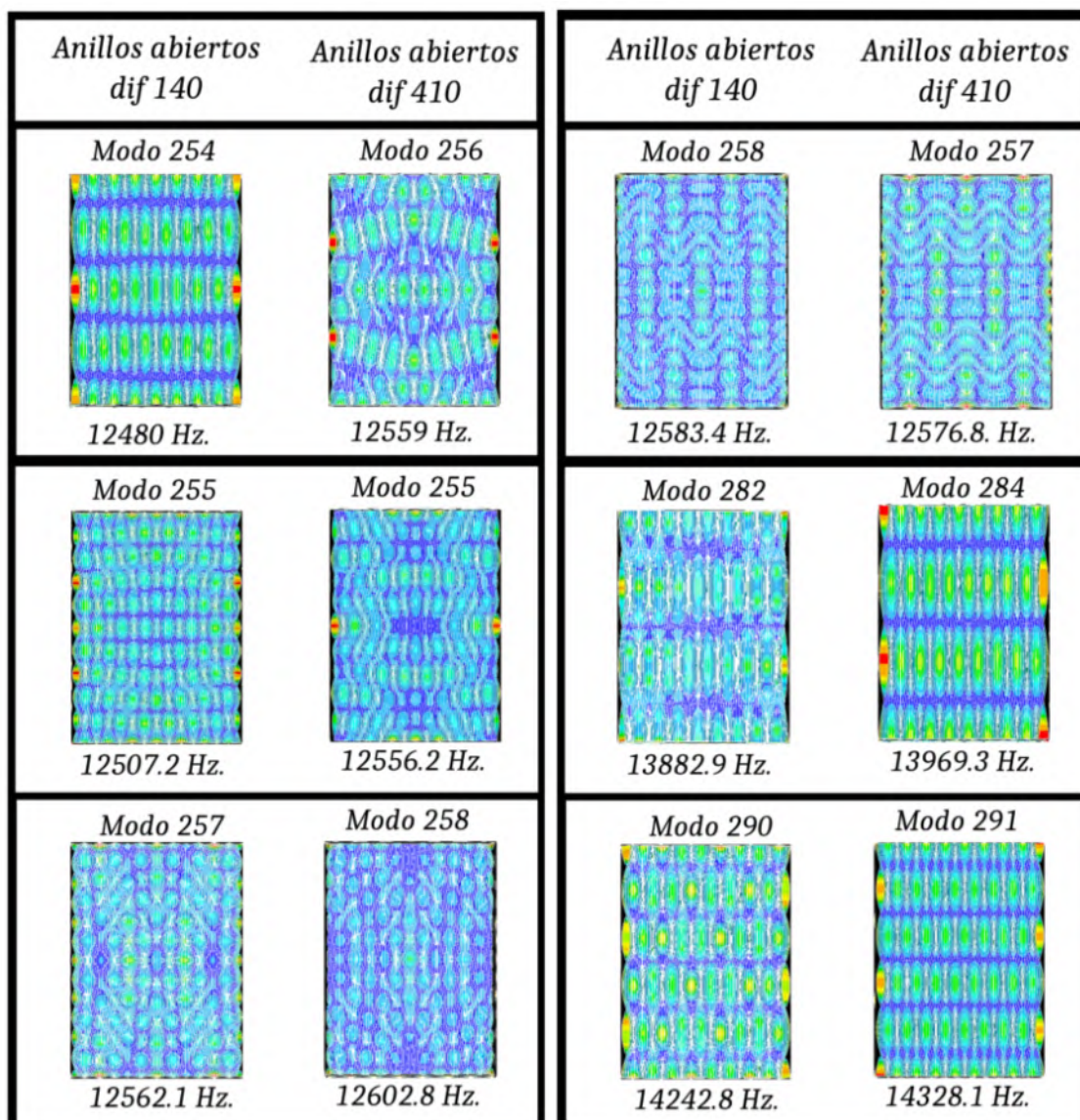


Figura 5.13: Comparación entre la madera anillos abiertos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 410. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

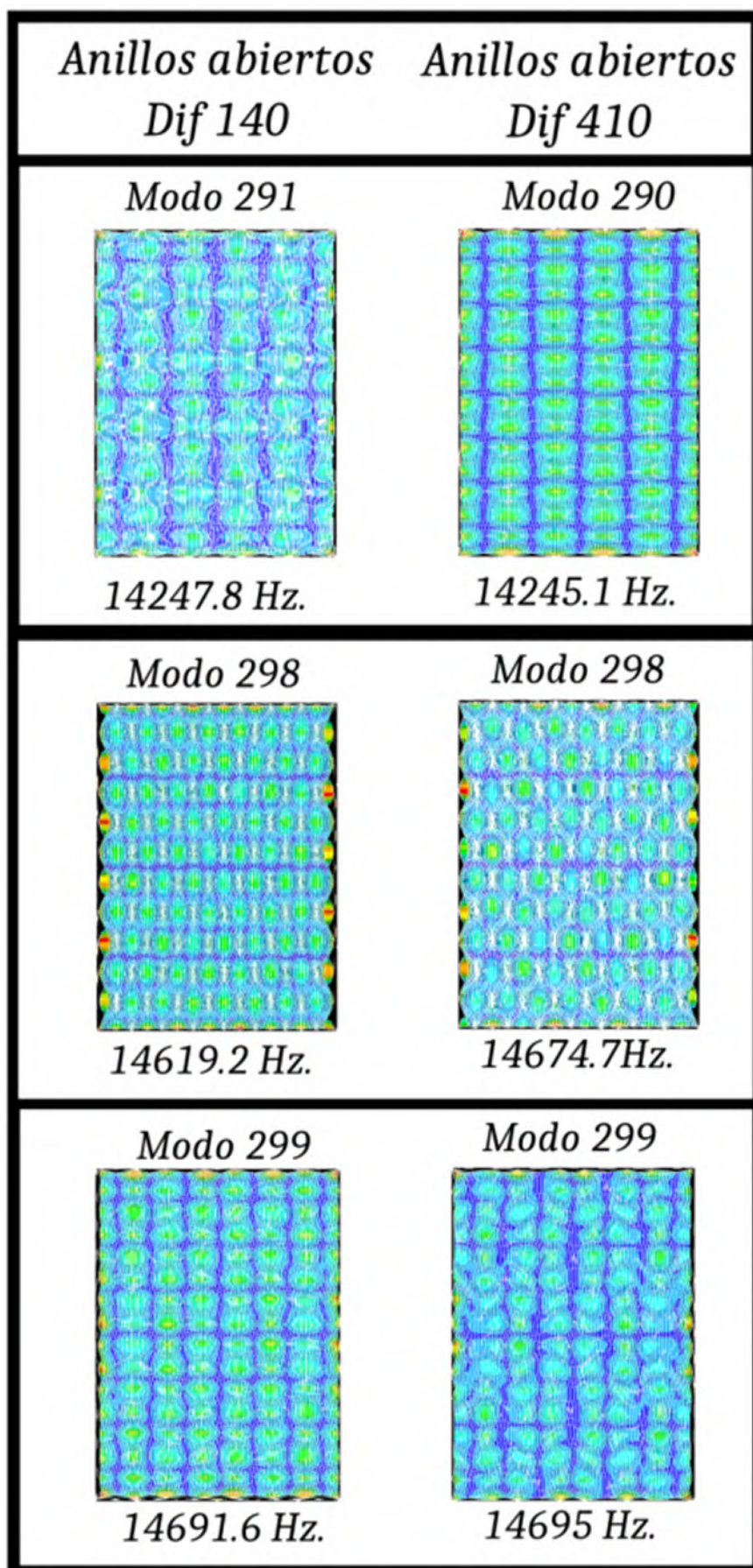


Figura 5.14: Comparación entre la madera anillos abiertos dif 140 y la madera anillos abiertos dif 410. Imágenes obtenidas de ANSYS® Student (Ansys, Inc.), bajo licencia gratuita para fines académicos.

Bibliografía

- [Bracco and Holst, 2013] Bracco, G. and Holst, B., editors (2013). *Surface Science Techniques*. Springer Science & Business Media.
- [Bucur, 2016] Bucur, V. (2016). *Handbook of materials for string musical instruments*. Springer.
- [Bucur, 2017] Bucur, V. (2017). *The Acoustics of Wood*. CRC Press.
- [Bueche et al., 1991] Bueche, F. J., Hecht, E., and Castellanos, J. H. P. (1991). *Física General*. McGraw-Hill.
- [Córdova et al., 2024] Córdova, Z. G., Limón, D. S., and Torres, J. A. (2024). Speckle interference for naked-eye detection of vibrations. *European Journal of Physics*, 45(3):035005.
- [David, 2000] David, L. C. (2000). *Álgebra Lineal y sus Aplicaciones*. Editorial Addison Wesley Longman de México, S.A. de C.V.
- [Diéguez Aranda et al., 2003] Diéguez Aranda, U., Barrio Anta, M., Castedo Dorado, F., Ruiz González, A. D., Álvarez Taboada, M. F., and Álvarez González, J. G. (2003). *Dendrometría*.
- [Fengel et al., 1989] Fengel, D., Wegener, G., and Greune, A. (1989). Studies on the delignification of spruce wood by organosolv pulping using sem-edx and tem. *Wood Science and Technology*, 23:123–130.
- [Fletcher and Rossing, 2012] Fletcher, N. H. and Rossing, T. D. (2012). *The Physics of Musical Instruments*. Springer Science & Business Media.
- [Fritz and Dubois, 2014] Fritz, C. and Dubois, D. (2014). On perceptual evaluation of musical instruments: The case of the violin put into perspective. *Acta Acustica united with Acustica*, 100.
- [Harada and Côté, 1985] Harada, H. and Côté, W. A. (1985). Structure of wood. In *Biosynthesis and Biodegradation of Wood Components*, pages 1–42.
- [Jia et al., 2007] Jia, H., Ordonez, F., and Dessouky, M. M. (2007). Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies. *Computers & Industrial Engineering*, 52(2):257–276.

- [Manzano, 1991] Manzano (1991). *Acústica Físico-Musical*. Paraninfo, Madrid, España.
- [Menczel and Prime, 2009] Menczel, J. D. and Prime, R. B., editors (2009). *Thermal Analysis of Polymers*. Wiley.
- [Parham and Gray, 1984] Parham, R. A. and Gray, R. L. (1984). *Formation and Structure of Wood*.
- [Pastor et al., 2012] Pastor, M., Binda, M., and Harčarik, T. (2012). Modal assurance criterion. *Procedia Engineering*, 48:543–548.
- [Rainieri and Fabbrocino, 2014] Rainieri, C. and Fabbrocino, G. (2014). *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures*. Springer, New York.
- [Richardson, 1997] Richardson, M. H. (1997). Is it a mode shape, or an operating deflection shape? *Sound and Vibration*, 31(1):54–67.
- [Richter et al., 2004] Richter, H. G., Grosser, D., Heinz, I., and Gasson, P. E. (2004). Iawa list of microscopic features for softwood identification. *IAWA Journal*, 25(1):1–70.
- [Ross, 2010] Ross, R. J. (2010). *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. General Technical Report FPL-GTR-190. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. 509 p.
- [Sacconi, 1979] Sacconi, S. F. (1979). *The Secrets of Stradivari*. Eric Blot, Cremona, Italy.
- [Stoel and Borman, 2008] Stoel, B. C. and Borman, T. M. (2008). A comparison of wood density between classical cremonese and modern violins. *PLoS One*, 3(7):e2554.
- [Stuart, 2004] Stuart, B. H. (2004). *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons.
- [Torres et al., 2020] Torres, J. A., Soto, C. A., and Torres-Torres, D. (2020). Exploring design variations of the titian stradivari violin using a finite element model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 148(3):1496–1506.
- [Torres-Torres et al., 2019] Torres-Torres, D., Torres, J. A., and García-García, A. (2019). Finite element simulation based-on atomic force microscopy and nano-indentation for spruce wood microstructure analysis. *Microscopy Research and Technique*, 82(5):507–516.
- [Wegst, 2006] Wegst, U. G. (2006). Wood for sound. *American Journal of Botany*, 93(10):1439–1448.
- [Welzel et al., 2005] Welzel, C., Inglehart, R., and Deutsch, F. (2005). Social capital, voluntary associations and collective action: which aspects of social capital have the greatest ‘civic’ payoff? *Journal of Civil Society*, 1(2):121–146.

- [Woodhouse, 2024] Woodhouse, J. (2024). Understanding the properties of wood. *[https://www.youtube.com/results?search_query = undertanding + wood + properties + +jim + woodhouse](https://www.youtube.com/results?search_query=undertanding+wood+properties++jim+woodhouse)*.
- [Zhang et al., 2015] Zhang, N., Li, S., Xiong, L., Hong, Y., and Chen, Y. (2015). Cellulose-hemicellulose interaction in wood secondary cell-wall. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 23(8):085010.

10% Similitud general

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

Fuentes principales

9%	 Fuentes de Internet
4%	 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	Análisis microestructural de madera de <i>Picea abies</i> basado en su comportamiento vibratorio	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Dana Sofía Limón Cordero	2348968k@umich.mx
Director	Dr. Salomón Ramiro Vásquez García	salomon.vasquez@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Crisanto Velázquez Becerra	jef.div.posg.fitm@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	

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
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Dana Sofía Limón Cordero 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán. México. A 16 de julio del 2025