

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



**CARACTERIZACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE COLAPSO EN MADERA DE
E. NITENS SECADA CON RADIO FRECUENCIA Y VACÍO**

Informe de Habilitación Profesional presentado
en conformidad a los requisitos para optar al
Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Dr. Carlos Hernán Salinas Lira

FELIPE ANDRES CÁRCAMO JARA

CONCEPCIÓN – CHILE
2020

Agradecimientos

Primero agradezco a Dios, por permitirme cursar esta hermosa carrera y por ayudarme durante el transcurso de esta, ya que solo con su ayuda he podido llegar a esta instancia, porque como dice 1 Corintios 15:10 “Pero por la gracia de Dios soy lo que soy”.

Agradezco a mis padres Ana y Jaime y hermanos Sergio y Jaime por su apoyo incondicional durante estos años de esfuerzo, por incentivarne a estudiar esta hermosa carrera universitaria y por guiarme en el transcurso de esta, los quiero mucho.

Agradezco a mis tíos Viviana y Héctor y a su familia por recibirme como a un hijo, por ayudarme cuando lo necesite y por darme ese cariño y amor todos estos años.

Agradezco a mi Profesor Guía Don Carlos Salinas por su apoyo, comprensión y confianza que depositó en mi durante el desarrollo de mi Habilitación Profesional. De la misma manera agradecer al equipo de secado del Departamento de Ingeniería en Maderas de la Universidad del Bío-Bío, conformado por don Rubén Ananías, Víctor Sepúlveda, Linette Salvo, Héctor Sepúlveda y José Torres. por su tiempo, apoyo y disposición durante el desarrollo del presente trabajo.

RESUMEN

El presente informe de habilitación profesional se desarrolló en el marco del proyecto FONDECYT 1160812 “Drying behavior of Eucalyptus nitens for solid wood products” realizado en la Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile. El propósito de este trabajo es caracterizar la recuperación del colapso en un contexto de secado de madera de *E. nitens* usando tecnología de radio frecuencia y vacío (RFV). Para ello se realizaron dos ensayos de secado, en el primero se utilizó la tecnología RFV llevando la carga de madera a una humedad de entre un 15 y un 20% para luego realizar un reacondicionado, en este caso también se monitorizó el colapso controlando diariamente tanto la humedad como el colapso, además se determinaron los alabeos al inicio del proceso de secado, antes y después del reacondicionado con el fin de determinar la calidad de esta carga de madera. Además, se realizó un segundo ensayo donde se realizó un proceso de pre secado al aire libre, posterior secado hasta llegar a una humedad de entre un 15 y 20%, para luego realizar un proceso de reacondicionado. Al igual que en el proceso de secado RFV en este caso se determinaron los alabeos al inicio del proceso de secado, antes y después del reacondicionado.

Los resultados muestran un aumento considerable en la encorvadura para el secado por radiofrecuencia y vacío, mientras que para el secado convencional se observa un aumento considerable en la torcedura y la encorvadura, sin embargo, todos los alabeos presentan una importante disminución posterior al reacondicionado. Con respecto al colapso, se logró monitorizar las probetas a lo largo del proceso de secado por radiofrecuencia, obteniendo un colapso máximo entre el 33 y el 42% de humedad, es decir antes de llegar al punto de saturación de la fibra. Además, al analizar el colapso después del proceso de secado, se observa que la magnitud de colapso fue mucho menor en el secado convencional llegando a 0,33 mm en promedio, en comparación con el secado por radiofrecuencia y vacío donde llegó a 1,1 mm

INDICE

Capítulo 1	7
Introducción	7
1.1 Generalidades.....	8
1.2 Objetivos.....	9
1.2.1 Objetivo general:	9
1.2.2 Objetivos específicos:	9
Capítulo 2	10
Antecedentes Preliminares	10
2.1 El mercado forestal en Chile	11
2.1.1 Especies y volúmenes	11
2.1.2 Productos.....	12
2.2 Propiedades de la madera: Físicas, mecánicas y anatómicas	13
2.2.1 Propiedades físicas.....	13
2.2.2 Propiedades mecánicas	14
2.3 Procesos de secado y tratamiento térmico de la madera	17
2.3.1 Secado al aire libre.....	18
2.3.2 Secado artificial	18
2.3.3 Etapas del secado de madera.....	18
2.4 Tecnologías de secado de madera solida.....	19
2.4.1 Secado por convección	19
2.4.2 Secado por conducción	20
2.4.3 Secado por radiación.....	20
2.4.4 Secado al vacío	20
2.6 Defectos en la madera producto del secado	21
2.6.1 Colapso.....	21
2.6.2 Tensiones internas en el transcurso del secado	21
2.6.3 Deformaciones.....	22
2.6.4 Grietas superficiales.....	22
2.6.5 Alabeos.....	23
2.7 Normas para evaluación de defectos de la madera	24
Capítulo 3	26
Desarrollo	26

3. Descripción de materiales, equipos y metodología	27
3.1 Equipo utilizado.....	28
3.1.1 Equipo de radiofrecuencia.....	28
3.1.2 Sensor de desplazamiento LVDT (Transductor de desplazamiento variable lineal).....	29
3.1.3 Estructura para medir colapso	30
3.1.4 Data Logger TDS-540.....	31
3.1.5 Estufa de secado con convección forzada.....	32
3.1.6 Balanza digital	33
3.2 Metodología.....	34
3.2.1 Secado por radiofrecuencia y vacío	35
3.2.2 Secado convectivo con secador flexible	44
3.3 Calibración de sensor de desplazamiento LVDT	49
Capítulo 4.....	50
Resultados.....	50
4.1 Alabeos.....	51
4.1.1 Alabeos secado radiofrecuencia y vacío y post reacondicionado.	51
4.1.2 Alabeos secado al aire libre, secado convectivo y post reacondicionado.	52
4.1.3 Análisis comparativo alabeos secado radiofrecuencia y vacío vs secado al aire libre y secado convectivo.	54
4.2 Curvas de secado	54
4.2.1 Curvas de Secado.....	55
4.2.2 Curvas de secado	56
4.3 Colapso.....	57
4.3.1 Estudio transitorio de colapso bajo secado por radiofrecuencia y vacío	57
4.3.2 Recuperación de colapso piezas testigo	61
Capítulo 5.....	66
Conclusiones	66
Capítulo 6.....	69
Referencias	69
Capítulo 7.....	72
Anexos.....	72
Anexo A Planos.....	73
Anexo B Cambio dimensional, alabeos y contenido de humedad.	74
Anexo C Perfiles de colapso antes y después del reacondicionado probetas	78

Anexo D Humedad de la madera y medición de colapso80

Capítulo 1

Introducción

1.1 Generalidades

Del total de plantaciones forestales en Chile, el pino radiata concentra la mayor superficie, con el 56%, seguidas por plantaciones de eucaliptos con el 38%, donde destacan dos especies, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*. (INFOR, 2019)

El *Eucalyptus nitens* llegó a Chile para abastecer de materia prima a la industria de la celulosa y papel, no obstante, ha estado siendo evaluado para su utilización en productos sólidos de mayor valor agregado, madera aserrada, muebles, chapas, tableros. (Ananías et al. 2009)

Por otro lado, la región del Biobío, es una de las regiones donde más se utiliza esta especie, de hecho, de acuerdo a datos del INFOR (2019) es la que tiene mayor consumo de madera en troza (con 3.457.637m³), lo que implica un 40% del total nacional. Sin embargo, su utilización como madera sólida de mayor valor agregado es limitada, debido principalmente a defectos de secado del tipo grietas (internas y superficiales) y colapso (Haslett 1988, Sepúlveda y Urrutia 1996, Galleti 1996, Leandro et al. 2008a, Washusen and Innes 2008, Washusen et al. 2008)

En este contexto, defectos de secado, el presente estudio se concentra en la caracterización de la recuperación del colapso en madera de *E. nitens* producido durante el proceso de secado de Radio Frecuencia y Vacío (RFV).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general:

Caracterización de la recuperación del colapso en un contexto de secado de madera de *E. nitens* usando tecnología de radio frecuencia y vacío (RFV).

1.2.2 Objetivos específicos:

- Evaluar procesos de secado convencional de madera *E. nitens* (testigo): Cinética del secado y calidad de la madera seca.
- Evaluar procesos de secado RFV de madera *E. nitens*: Cinética del secado y calidad de la madera seca.
- Monitorear el colapso y su recuperación durante un proceso de secado RFV.
- Realizar un análisis comparando la recuperación de colapso durante un proceso de secado convencional y RFV.

Capítulo 2

Antecedentes Preliminares

2.1 El mercado forestal en Chile

2.1.1 Especies y volúmenes

El recurso forestal (bosque nativo y plantaciones forestales) cubre 17,9 millones de hectáreas, lo que representa el 23,7% de la superficie nacional (75,6 millones de hectáreas). Más del 90% del recurso forestal (16,2 millones de ha) se localiza entre la Región del Maule y la Región de Magallanes, correspondiendo a uso bosque nativo el 81,3% de la superficie (13,2 millones de ha), y uso plantaciones forestales el 17,6% (2,86 millones de ha); la diferencia corresponde a uso bosque mixto con 1,1% (0,17 millones de ha). (INFOR, 2019)

De acuerdo con la información de CONAF, la superficie cubierta por bosque nativo (14,6 millones de hectáreas), en su mayor parte comprende formaciones de los tipos forestales Lengua (24,8%), Siempreverde (24,0%), Coihue de Magallanes (13,7%), Roble-Raulí-Coihue (11,3%) y Esclerófilo (11,1%). (INFOR, 2019)

En cuanto a la superficie acumulada de plantaciones forestales a diciembre de 2017 (última cifra disponible), INFOR reporta que son 2.289.525 hectáreas. Las plantaciones forestales de pino radiata cubren la mayor parte de esta superficie, con el 56%, seguidas por plantaciones de eucaliptos con el 38%, donde destacan dos especies, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*. (INFOR, 2019)

A continuación, se presenta una gráfica donde se muestra de mejor forma la distribución de las plantaciones forestales por especie.

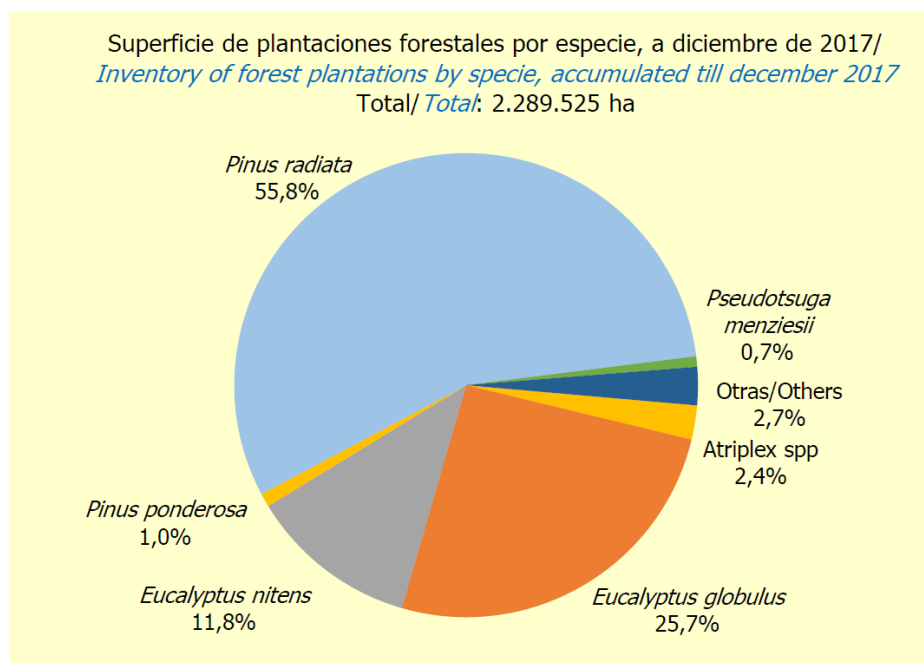


Figura 1 Plantaciones forestales por especie (Fuente: INFOR 2019)

2.1.2 Productos

En las últimas dos décadas, la industria forestal chilena ha experimentado un importante crecimiento en todos los rubros productivos que consumen madera para la elaboración de productos forestales, tales como la pulpa química y la madera aserrada, seguidos de las astillas y los tableros y chapas. (Corma, 2019)

El sector forestal produce una gama variada de productos derivados de las fibras vegetales y madera de uso cotidiano: madera para construcción, cartones de embalaje, bandejas de cartones, papeles de todo tipo, pañuelos desechables, pañales, tableros de madera sólida o “aglomerados”, muebles, terminaciones y revestimientos, entre muchos otros. Gran cantidad de estos productos son exportados, y un remanente se comercializa y se utiliza en el mercado local. (Informe Industria Forestal, 2007)

Un primer destino puede ser las plantas de Aserradero, donde se obtienen productos de madera terminados o productos intermedios que se terminarán en las llamadas Remanufacturas, plantas en donde se les da una mayor terminación a las maderas producidas en aserraderos. Otro destino son las plantas de Paneles, las cuales se dividen en dos tipos, según la forma en que se utiliza el recurso:

1) Paneles de terciado, en que utilizan “planchas” de madera, formando un panel mediante varias de estas planchas unidas.

2) Paneles aglomerados, en los que se utiliza la fibra descompuesta, y con ésta se crean paneles sólidos, como los conocidos “Cholgúan”, “Trupán” y “MDF”.

También hay plantas de Remanufactura que utilizan tableros como materia prima; son las llamadas “Molduras”. El siguiente gran proceso es el de Celulosa, ampliamente desarrollado y estudiado. Aquí, lo que se hace, es básicamente separar las fibras de celulosa presentes en la madera, y con esta fibra, que se obtiene bajo una forma de pasta, se generan distintos tipos de papel. (Informe Industria Forestal, 2007)

A continuación, se presenta una gráfica donde se muestra el consumo de trozos industriales según producto. Desde 1999 hasta 2017 (miles de m³ ssc)

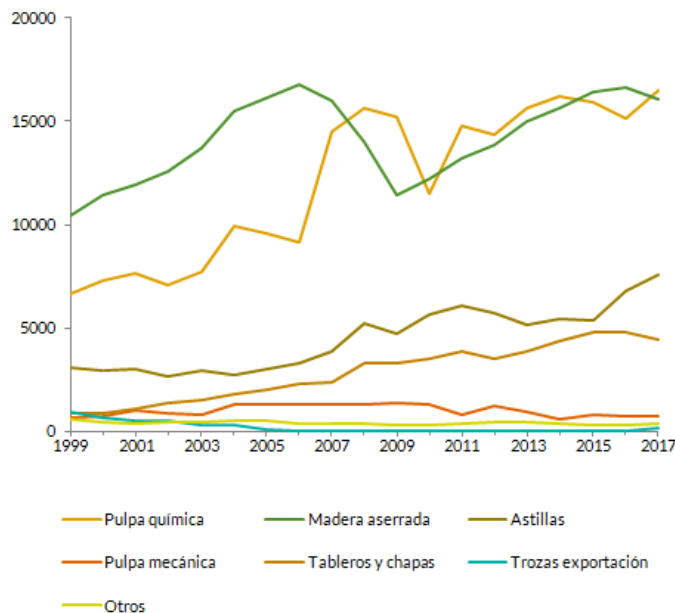


Figura 2 Consumo de trozos industriales según producto (Fuente: Corma, 2019)

2.2 Propiedades de la madera: Físicas, mecánicas y anatómicas

Es de gran importancia entender y definir las propiedades de la madera ya que de ellas depende el uso que se le puede dar a cada especie y tipo de madera.

Las propiedades físicas, corresponden al contenido de humedad, densidad, contracción y alabeos, se pueden medir sin que se afecte la composición del material. Para la manufactura maderera es importante conocer algunas de estas propiedades, porque frecuentemente están relacionadas con los procesos.

2.2.1 Propiedades físicas

2.2.1.1 Contenido de humedad

La estructura de la madera almacena una importante cantidad de humedad. Esta se encuentra como agua ligada (savia embebida) en las paredes celulares y como agua libre, en el interior de las cavidades celulares. El agua contenida en el interior de la madera sea en forma natural o por estar expuesta a condiciones del medio ambiente, puede variar principalmente debido a la humedad y temperatura predominantes en el lugar donde se utiliza. Al cortar un árbol, la madera contiene gran volumen de agua en sus cavidades y paredes celulares, humedad que oscila alrededor del 80%. En algunos casos, puede ser superior al 100%, es decir, el peso del agua contenida en el volumen de madera es superior al peso de ésta anhidra. (Corma, 2015)

2.2.1.2 Densidad de la madera

Como se sabe la madera es un material poroso y fibroso y, dentro de sus cavidades se aloja la humedad. Dicho así, la densidad se vuelve una propiedad muy importante porque permite calcular el volumen, poroso y fibroso, de la madera y, consecuentemente, el contenido de humedad en la pieza o leño de madera. (AGUILAR NARVÁEZ, 2014)

La norma chilena NCh 176/2 Of 1986 Mod. 1988 Madera Parte 2: Determinación de la densidad, establece las siguientes densidades de la madera, determinadas a partir del contenido de humedad de la pieza:

- Densidad Anhidra: Relaciona la masa y el volumen de la madera anhidra (completamente seca).
- Densidad Normal: Aquella que relaciona la masa y el volumen de la madera con un contenido de humedad del 12%.
- Densidad Básica: Relaciona la masa anhidra de la madera y su volumen con humedad igual o superior al 30%.
- Densidad Nominal: Es la que relaciona la masa anhidra de la madera y su volumen con un contenido de humedad del 12%.
- Densidad de Referencia: Aquella que relaciona la masa y el volumen de la madera ambos con igual contenido de humedad.

2.2.2 Propiedades mecánicas

Por otro lado, las características mecánicas de la madera pueden ser analizadas a través de las fibras paralelas y las fibras perpendiculares, siendo mayor la resistencia en la dirección perpendicular.

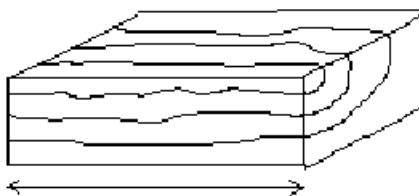


Figura 3 Dirección paralela a la fibra

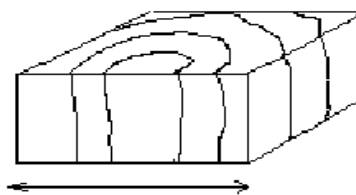


Figura 4 Dirección perpendicular a la fibra.

2.2.2.1 Compresión paralela a la fibra

Es la resistencia de la madera a una carga en dirección paralela a las fibras, la que se realiza en columnas cortas para determinar la tensión de rotura, tensión en el límite de proporcionalidad y módulo de elasticidad. (Corma, 2015)



Figura 5 Esquema de ensayo de compresión paralela a las fibras (Fuente: Corma 2008)

2.2.2.2 Compresión normal a las fibras

Es la resistencia de la madera a una carga en dirección normal a las fibras, aplicada en una cara radial, determinando la tensión en el límite de proporcionalidad y tensión máxima. (Corma, 2015)

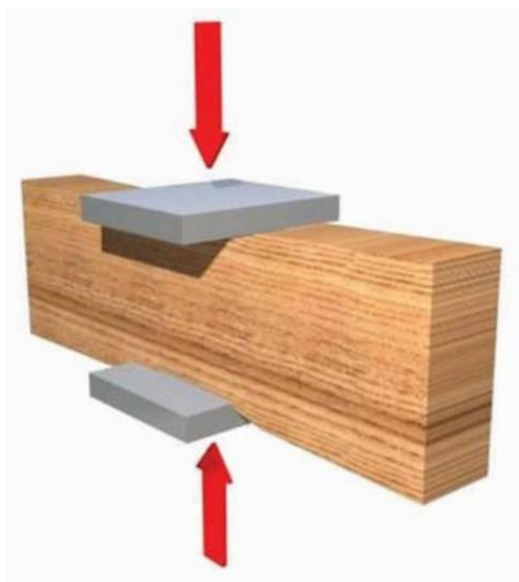


Figura 6 Esquema de ensayo de compresión normal a las fibras (Fuente: Corma 2008)

2.2.2.3 Flexión estática

Es la resistencia de la viga a una carga puntual, aplicada en el centro de la luz, determinando la tensión en el límite de proporcionalidad, tensión de rotura y el módulo de elasticidad. (Corma, 2015)

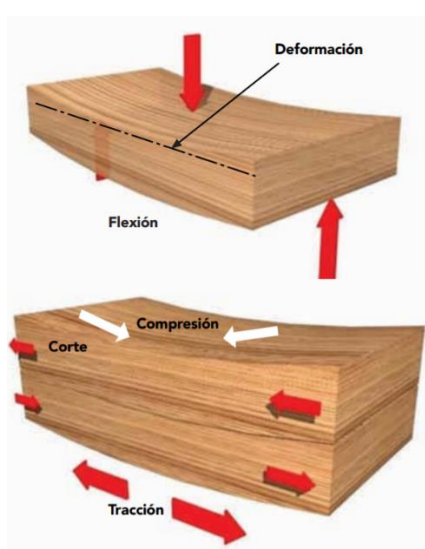


Figura 7 Esquema de ensayo de flexión estática (Fuente: Corma 2008)

2.2.2.4 Tracción paralela a la fibra

Es la resistencia a una carga de tracción en dirección paralela a las fibras. (Corma, 2015)



Figura 8 Esquema de ensayo de tracción paralela a las fibras (Fuente: Corma 2008)

2.2.2.5 Tracción normal a las fibras

Es la resistencia que opone la madera a una carga de tracción en la dirección normal a las fibras. (Corma, 2015)

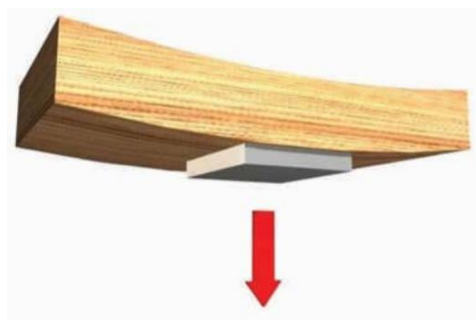


Figura 9 Esquema de tracción normal a las fibras (Fuente: Corma 2008)

2.3 Procesos de secado y tratamiento térmico de la madera

El secado es el proceso mediante el cual se elimina el exceso de agua de la madera para facilitar su posterior procesamiento. El problema del secado contempla el conocimiento de la materia prima, de su comportamiento y el equipamiento de procesos. (Keey *et al.* 2000)

El principal objetivo del secado industrial de madera es acelerar los mecanismos de transferencia de masa, optimizar el consumo energético y, principalmente obtener un producto con mejores atributos de calidad. El secado es una operación unitaria de uso frecuente en varias ramas de la industria. Durante una operación de secado, las maderas experimentan cambios físicos y químicos. (Keey *et al.* 2000)

2.3.1 Secado al aire libre

Este es el menos sofisticado de todos los procesos de secado. Consiste en exponer la madera a las condiciones ambientales prevalecientes de temperatura, humedad relativa y velocidad de circulación de aire. El tiempo de secado puede variar desde 3 a 4 semanas hasta 1 o 2 años y el contenido de humedad final será igual o muy próximo al contenido de humedad de equilibrio promedio del sitio donde se realice el secado. (Foglia, R. C, 2005)

2.3.2 Secado artificial

El secado artificial de la madera se realiza bajo condiciones controladas de temperatura, humedad relativa y velocidad de circulación de aire. Permite obtener madera con contenidos de humedad menores (6–15% CH), más uniformes, mejor calidad de madera seca (menor degradación) en un tiempo relativamente corto, en comparación con el secado natural. (Foglia, R. C, 2005)

2.3.3 Etapas del secado de madera

En el proceso de secado de madera se observan distintas etapas, las que se mencionan a continuación:

- a) Elevación inicial de la temperatura: esta etapa es la primera en el proceso de secado. Aquí se eleva progresivamente la temperatura hasta alcanzar la indicada para la primera etapa establecida en el programa de secado. El cálculo del requerimiento calórico para esta etapa debe considerar la energía necesaria para elevar la temperatura de los elementos que se encuentran en el interior de la cámara, como ventiladores, paneles, rieles, etc.
- b) Pre calentamiento de la madera: esta etapa comienza cuando la cámara ya se encuentra a la temperatura de operación. La madera eleva su temperatura y prácticamente no experimenta pérdidas de humedad.
- c) Etapa de secado: en esta etapa la madera ya ha elevado su temperatura y comienza a reducir su contenido de humedad. Las condiciones dentro de la cámara se van modificando a medida que transcurre el secado, de acuerdo con lo establecido en el programa de secado.
- d) Igualado: se realiza una vez culminado el secado, cuando el contenido de humedad de las piezas de madera no es homogéneo y se desea homogenizarlo.
- e) Acondicionado: se realiza una vez culminado el secado, cuando las piezas de madera sufren elevados gradientes de humedad, con el objetivo de reducirlos.
- f) Reacondicionado: solo se aplica en maderas latifoliadas que han sufrido colapso. Este tratamiento permite recuperar las pérdidas dimensionales provocadas por éste.

g) Enfriamiento: esta etapa es necesaria para que la madera no sufra un choque térmico al salir de la cámara de secado a una temperatura elevada. Dependiendo de las condiciones en las que se realice el secado, y de la calidad final requerida, se pueden omitir algunas etapas antes descritas. (Red Madera, 2006)

2.4 Tecnologías de secado de madera sólida

Existen varias tecnologías convencionales de secado de madera, estas se detallan a continuación.

2.4.1 Secado por convección

La ecuación que rige la convección desde una pared a un fluido es la siguiente:

$$Q = h(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Donde: Q: Flujo de calor $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

h: Coeficiente de transferencia de calor $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$

T_s: Temperatura de la superficie (°K)

T_∞: Temperatura del fluido (°K)

En este tipo de método es fundamental mantener un valor del gradiente térmico (T_s-T_∞) elevado para mantener una transferencia de calor aceptable. Esto es fácil durante las primeras etapas del secado ya que, por el proceso de evaporación superficial, la temperatura de la superficie permanece relativamente baja. Sin embargo, conforme avanza el proceso la humedad va quedando concentrada en el centro de la pieza y la temperatura superficial aumenta, lo cual obliga a aumentar la del aire para mantener una transmisión de calor aceptable

Este método se divide en dos, el secado al aire libre que consiste en apilar la madera recién aserrada en pilas ubicadas a la intemperie o, preferentemente, bajo cobertizos que la protejan de la lluvia donde la forma de realizar el apilado es fundamental para realizar un secado correcto, ya que hay que conseguir una buena circulación del aire a través de la torre.

Por otro lado, se tiene el secado en cámara que es lo que se entiende por secado tradicional o convencional, el método consiste en una vez apilada la madera es introducida en la cámara de secado, donde se expone la pila a una corriente de aire a una humedad relativa controlada (40-85%) y a una temperatura de entre 45-85°C. El aire al entrar en contacto con la madera se enfría y se carga de humedad, siendo seguidamente expulsado al exterior. Este método de secado tiene múltiples ventajas, aumenta la calidad del secado, se reduce de forma importante el inmovilizado de madera debido a la enorme reducción del tiempo de secado, que pasa de meses a días o, como mucho, semanas. (Incropera y DeWitt, 1999)

2.4.2 Secado por conducción

El secado por conducción se basa en colocar la madera en contacto con placas calefactoras. Tiene el inconveniente de inducir fuertes gradientes térmicos en las piezas, eso restringe su uso a maderas con bajo contenido en humedad. Estos problemas hacen que no sea un método muy utilizado. . (Fernandez Golfín & Conde Garcia, 2007)

2.4.3 Secado por radiación

Este apartado incluye aquellos métodos que hacen uso de la aplicación directa de campos electromagnéticos a la madera para conseguir su calentamiento. Existen varios tipos en función del tipo de radiación empleada:

2.4.3.1 Secado por radiaciones infrarrojas

En este método se aplica directamente a la madera radiaciones infrarrojas mediante lámparas especiales. Esta radiación produce un calentamiento superficial que se transmite al resto de la pieza por conducción. Este método viene condicionado por el hecho de que la difusión térmica en la madera es difícil y que el tiempo para alcanzar el centro de la pieza aumenta mucho con el espesor. Esto limita su uso a piezas pequeñas pues de lo contrario se corre el riesgo de la aparición de defectos. (Fernandez Golfín & Conde Garcia, 2007)

2.4.3.2 Secado por radiofrecuencia

Este método se basa en el fenómeno de que al situar una pieza de madera entre dos electrodos planos de un circuito de corriente alterna, ésta se calienta fuertemente debido a la agitación molecular. La madera actúa a modo de dieléctrico, definido por su constante dieléctrica. Dicha constante en la madera crece con el peso específico y con el contenido de humedad. La consecuencia de este fenómeno es un calentamiento de la madera en toda su masa, siendo tanto mayor cuanto mayor sea el contenido de humedad. Dado que el mayor contenido en humedad suele estar en el centro de las piezas, esta técnica logra que se caliente más el centro de la pieza que el exterior. Esto conlleva un notable aumento de la circulación del agua debido a que suman los efectos del gradiente térmico (que ahora impulsa el agua hacia el exterior) y de humedad. (Fernandez Golfín & Conde Garcia, 2007)

2.4.4 Secado al vacío

El secado al vacío se basa en dos fenómenos que suceden al disminuir la presión: La disminución del punto de ebullición y el aumento del coeficiente de difusión. De esta manera se puede acelerar notablemente el proceso, logrando tiempos de secado similares a los conseguidos con el secado a alta temperatura, sin correr el riesgo que implican temperaturas elevadas, que no siempre son soportadas por la madera, especialmente en frondosas.

En la industria se suele trabajar con temperaturas de ebullición del agua de entre 40°C y 60°C, con esto se consigue una ebullición interna que causa un flujo de vapor. Dicho flujo puede ser, bien condensado y expulsado al exterior en forma líquida o ser succionado directamente por la acción continua de la bomba de vacío.

Sin embargo, el uso de vacío hace que el diseño de la cámara de secado sea radicalmente diferente ya que para hacer uso del vacío hacen falta cubas herméticas. (Fernandez Golfín & Conde García, 2007)

2.6 Defectos en la madera producto del secado

Existe una gran variedad de defectos que se producen en la madera producto del secado, a continuación, se indican los más importantes.

2.6.1 Colapso

El colapso es una falla de resistencia de las paredes celulares y es reconocida por una ondulación en las caras de la madera. Si es importante, puede conllevar a la aparición de grietas en el interior de la madera, pero esta no es sistemática, y solo aparece en presencia de agua líquida, es decir cuando la madera es aún muy húmeda.

Una temperatura elevada, favorece la aparición del colapso, puesto que ella produce una plasticidad de las paredes celulares. Por lo tanto, para limitar o impedir este defecto, es necesario utilizar una temperatura baja y un alto contenido de humedad, en la medida en que esté presente el agua líquida, o sea hasta el punto de saturación de las fibras.

Cuando el colapso no está acompañado de grietas, se puede practicar un tratamiento para recuperación. Esta operación consiste en someter a la madera, cuando su humedad está comprendida entre 15% a 20%, a un proceso de vaporizado en condición de saturación (100°C y presión atmosférica) durante un determinado tiempo que depende fundamentalmente del espesor de la madera: para una escuadría de madera de 25 mm de espesor, la duración es del orden de 2 horas. Ciertas maderas son más propicias al colapso que otras, por ejemplo, el Eucalipto y por lo general, las maderas duras. (Luis A. Novoa, 2006)

2.6.2 Tensiones internas en el transcurso del secado

En el transcurso del secado aparecen defectos que son consecuencia de las características de contracción de la madera. Esta contracción se produce por debajo del punto de saturación de las fibras. Durante la primera etapa de secado, ninguna parte de la madera es sometida a los fenómenos de contracción y por lo tanto no aparecen las tensiones de secado.

Durante la segunda etapa, las zonas periféricas son sometidas a contracciones y no las zonas internas. La contracción no puede manifestarse libremente, ya que las zonas internas impiden a las zonas periféricas de contraerse. Las zonas periféricas son sometidas a tensiones de tracción y las zonas internas, por reacción, son sometidas a tensiones de compresión; el conjunto está en equilibrio.

A partir del inicio de la tercera etapa, y hasta el fin del secado, las zonas periféricas secadas bajo tensiones de tracción tendrán una contracción un poco menor que las zonas internas. Hay, por lo tanto, una inversión de tensiones de secado.

Las tensiones de secado pueden ser visualizados mediante probetas cortadas en forma de tenedor o peine. Durante la segunda etapa de secado, las láminas se abren ya que las láminas externas son más cortas que las internas. En la tercera etapa, las láminas se sierran por que las láminas externas son más largas que las láminas internas. (Luis A. Novoa, 2006)

2.6.3 Deformaciones

La contracción de la madera no es idéntica en las tres dimensiones. La contracción en la dirección tangencial es 1.5 a 2.5 veces más importante que dentro la dirección radial. La contracción axial (longitudinal) es aproximadamente 50 veces menor que la tangencial. A medida que la humedad de la madera disminuye, la sección de la madera aserrada se deforma.

Debido a la curva de los anillos de crecimiento, una madera cortada en cara tangencial, donde su cara superior es más tangencial que su cara inferior; luego del secado su cara superior se va a contraer más que la cara inferior, por lo que la pieza de madera tenderá a arquearse en dirección contraria a la curvatura del anillo de crecimiento.

En una madera aserrada de sección cuadrada, cortada de tal manera que una de sus diagonales sea tangencial a la otra radial, tendrá su diagonal tangencial que se contraerá luego del secado de 1.5 a 2.5 veces más que su diagonal radial; por lo que la madera de sección cuadrada se transformará en sección romboide. (Luis A. Novoa, 2006)

2.6.4 Grietas superficiales

En referencia a las grietas de superficie, las grietas de extremo y grietas por cementación; Luego de la segunda fase de secado (zonas periféricas por debajo del punto de saturación de las fibras y zonas internas por encima del punto de saturación de las fibras), Las zonas periféricas son sometidas a las tensiones de tracción. Si estas tensiones son superiores a la resistencia a la tracción de la madera, aparecen grietas que parten de la periferia y progresan hacia el interior. Estas grietas superficiales y que pueden o no desaparecer al cepillado, por lo cual es necesario tenerlos en cuenta en la clasificación de defecto.

Las grietas se producen dentro de zonas de menor resistencia mecánica, siguiendo casi siempre los radios leñosos, no obstante, las grietas tangenciales pueden aparecer entre la madera de secano y de lluvias (referente a los anillos de crecimiento).

Por lo tanto, las grietas resultan de la existencia dentro de la madera de una gradiente de humedad muy importante, donde la utilización de humedad relativa del aire muy baja antes de que las zonas internas de la madera hayan llegado al punto de saturación de las fibras. (Luis A. Novoa, 2006)

Luego de la tercera fase de secado, si las zonas internas son sometidas a las tensiones de tracción superiores a la resistencia a la tracción de la madera, se producen las grietas internas.

Estas son debidas a la utilización, luego de la segunda fase de un aire muy seco, que ha provocado un secado de las zonas periféricas bajo tensiones de tracción importantes.

El efecto, las grietas internas, se producen a partir del momento en donde toda la masa de madera ha pasado por debajo del punto de saturación de las fibras. Para evitar la aparición de las grietas internas, es necesario el aire muy húmedo hasta que las zonas internas de la madera hayan llegado al punto de saturación de las fibras. (Luis A. Novoa, 2006)

2.6.5 Alabeos

La norma chilena NCh992 define alabeo como la deformación que puede experimentar una pieza de madera en la dirección de sus ejes longitudinal o transversal o de ambos a la vez, es decir, dependiendo de la orientación reciben diferentes nombres, pero que en general se les denomina alabeos.

Además, según la norma chilena estos se pueden dividir en:

Acanaladura: Alabeo en las caras en la dirección transversal. Ver figura 10 a

Arqueadura: Alabeo en las caras en la dirección longitudinal. Ver figura 10 b

Encorvadura: Alabeo de los cantos en la dirección longitudinal. Ver figura 10 c

Torcedura: Alabeo helicoidal de la pieza en torno a su eje longitudinal. Ver figura 10 d

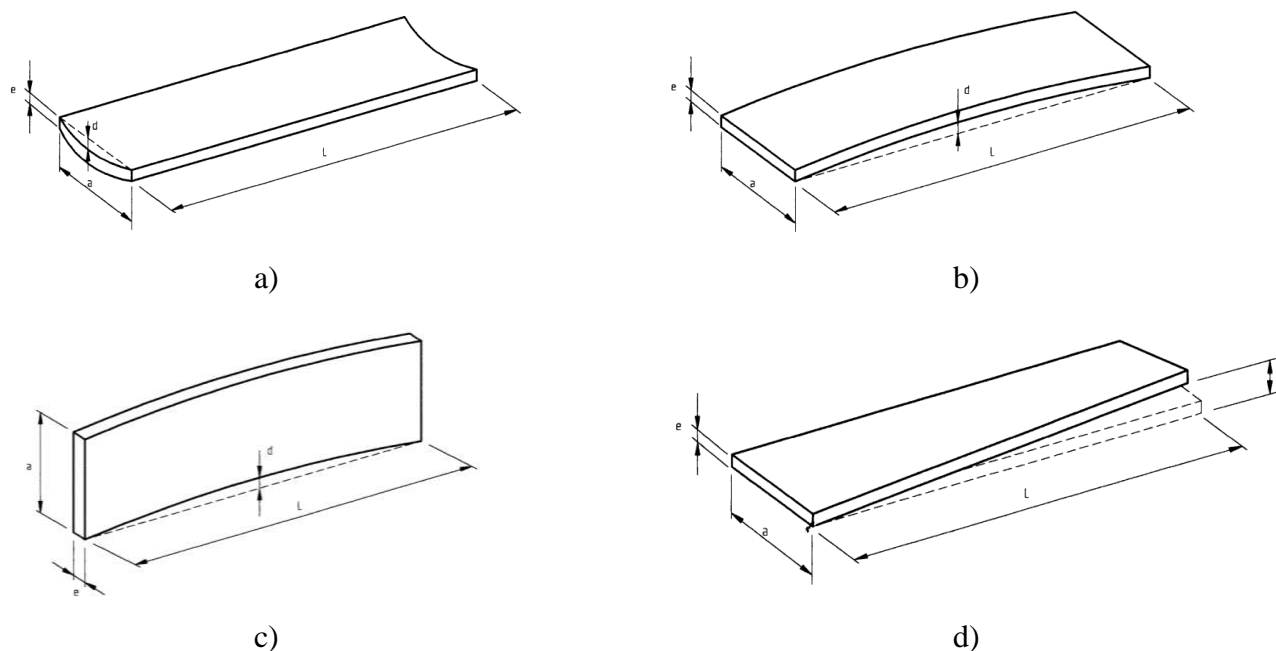


Figura 10 Alabeos a) acanaladura, b) arqueadura, c) encorvadura, d) torcedura

2.7 Normas para evaluación de defectos de la madera

Para la evaluación de las propiedades mecánicas y físicas de la madera se tomó en consideración la norma chilena NCh993 of 72 que establece criterios de evaluación de defectos de la madera. Los defectos más importantes que se midieron fueron los alabeos (acanaladura, arqueadura, encorvadura y torcedura), para estos la norma entrega una clasificación que segmenta por letras, desde la “a” que es la mayor calidad y sin defectos, “b” con deformaciones leves, “c” deformaciones moderadas, “d” deformaciones severas y “e” inaceptable.

A continuación, se muestra una tabla con la clasificación de calidad de acuerdo a la norma NCh993 of 72.

Tabla 1 Clasificación de calidad de alabeos(mm)

	a	b	c	d	e
Acanaladura	0	2,8	5,6	8,4	11,2
Arqueadura	0	17	33	50	-
Encorvadura	0	6	11	17	-
Torcedura	0	9,8	18,2	28	-

Las dimensiones admisibles son para probetas de 25mm x 140mm x 2440 mm

Además de los alabeos se determinará las contracciones en la madera según norma chilena NCh176 parte 3, la cual define como contracción normal, la disminución de dimensiones que sufre la madera al perder humedad bajo el punto de saturación de las fibras, expresada como porcentaje de la dimensión de la madera al estado verde. La contracción total no es más que la suma de la contracción normal más el colapso, al que corresponde la pérdida irregular de dimensiones de la que es víctima la madera de algunas especies (no todas) al disminuir su humedad en las primeras fases del secado.

Capítulo 3

Desarrollo

3. Descripción de materiales, equipos y metodología

Para la investigación, se utilizó una carga de madera consistente en 300 tablas de E. Nitens, de dimensiones aproximadas de 5 metros de largo, 140mm de ancho y 30 mm de espesor. Con una humedad aproximada de un 95%, el tipo de corte es radial y la madera procede de un bosque de 15 años, de la comuna de Valdivia, Regio de los Ríos, Chile.

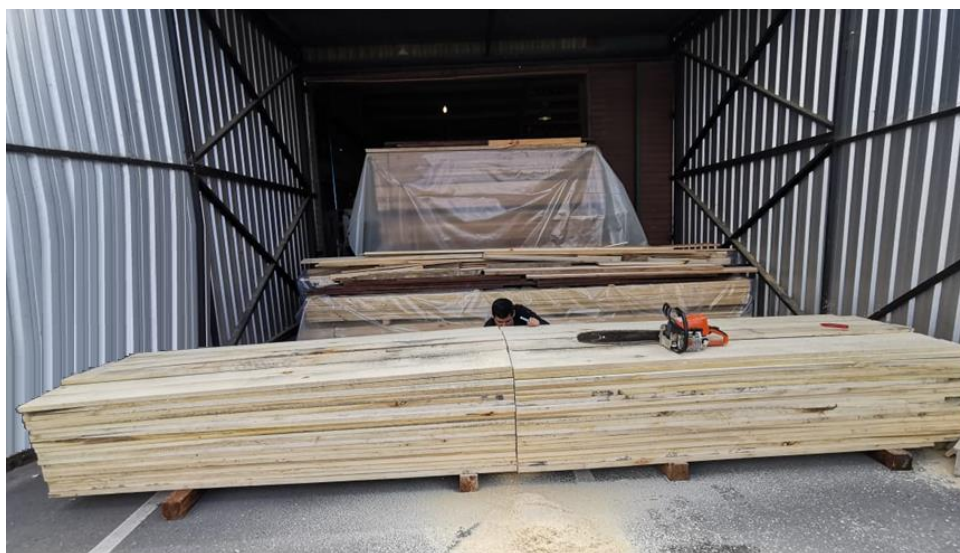


Figura 11 Madera de E. Nitens de dimensiones 5200x140x30 (mm) (Fuente: elaboración propia)

En primer lugar, las tablas de madera se despuntaron para alcanzar un largo de 5 metros y posteriormente cortadas a la mitad, además se removieron las partículas de aserrín. Con esto se pudo obtener un total de 600 tablas de E. Nitens, de dimensiones 2,5 metros de largo, 140mm de ancho y 30 mm de espesor.

De las 600 tablas fueron utilizadas 400 para realizar los ensayos, la mitad se empleó en el sacado RFV y la otra mitad fueron utilizadas para ser secadas convencionalmente en un secador convectivo, previo pre secado al aire libre.

Posteriormente, se procedió a medir el contenido de humedad inicial a 3 tablas, seleccionadas al azar, del conjunto reservado para el secado RFV, a través del método gravimétrico, para ello, se determina la variación del contenido de humedad de cada probeta. Estos trozos fueron pesados con una precisión de 0.1 gramos (M_i). Posteriormente, todos los trozos fueron secados en una estufa a una temperatura de 103 ± 2 °C por 24 horas y pesados nuevamente (M_0). Finalmente se determinó el contenido de humedad mediante la relación (2) (ver Anexo D). Arrojando un contenido de humedad promedio de 92,4%.

Este ensayo fue realizado según NCh176/1.Of84. El procedimiento es aplicable a maderas con cualquier contenido de humedad. Sirve para determinar el contenido de humedad de lotes de piezas de madera y de probetas destinadas a ensayos de laboratorio. Las muestras deben ser cortadas a una distancia de por lo menos 50 cm del extremo de la pieza, ya que en esa zona el contenido de humedad puede ser menor, y debe tener como mínimo 25 mm de longitud. Ésta debe estar libre de corteza y defectos y las herramientas de corte bien afiladas para evitar pérdidas de humedad por recalentamiento de las superficies de corte.

3.1 Equipo utilizado

3.1.1 Equipo de radiofrecuencia

El equipo de radio frecuencia utilizado cuenta con un sistema de vacío para aumentar la eficiencia del proceso de secado, dado que permite evaporar el agua contenida en la madera a menor temperatura. El equipo tiene una capacidad máxima de 3.2 m³ de madera. La carga es estabilizada mediante un contrapeso de acero, controlado por dos cilindros hidráulicos. El vacío en la cámara es propiciado por una bomba de vacío enfriada con agua. El contenido de humedad es extraído de la cámara en parte por la bomba de vacío en forma de vapor y, por otra parte, a través de la evacuación por gravedad del condensado propiciado en las paredes del autoclave.

Tabla 2 Especificaciones equipo de radiofrecuencia y vacío

Modelo	HFVD30-SA
Marca	SAGA
Lugar de origen	Shijiazhuang, Hebei, China
Tipo	Equipo de secado por radio frecuencia con vacío
Potencia	30 kW
Energía	AC 380V 50 Hz
Capacidad efectiva	3.2 m ³
Tamaño de madera óptimo	L 3000 mm· A 1000 · H 1000 (3 CBM de capacidad)
Vacío generado	-0.095 MPa
Frecuencia	6.78 MHz
Sistema hidráulico	Potencia nominal de 7 MPa, 4T
Sistema de Vacío	Bomba de vacío de anillo de agua de acero inoxidable de 7.5 kW
Sistema de Refrigeración	Torre de enfriamiento de acero inoxidable



Figura 12 Equipo de radiofrecuencia y vacío (Fuente: elaboración propia)

3.1.2 Sensor de desplazamiento LVDT (Transductor de desplazamiento variable lineal)

Es un dispositivo de censado de posición que provee una salida de corriente alterna proporcional al desplazamiento de núcleo que pasa a través de sus arrollamientos.

Los sensores de distancia tipo LVDT son elementos de medida inductivos. Se basan en el principio inductivo de transformador de núcleo variable. Esto permite que un movimiento lineal del núcleo en el interior del cuerpo del sensor provoque una variación de inducción entre primario y secundario, lo que se traduce en un cambio de señal de salida, proporcional a ese desplazamiento.

Este equipo funciona con un transformador que posee tres bobinas dispuestas extremo con extremo alrededor de una barra. La bobina central es el devanado primario y las externas son los secundarios. Un núcleo ferromagnético de forma cilíndrica, sujeto al objeto cuya posición desea ser medida, se desplaza respecto a las bobinas a lo largo del eje de la barra.

Cuando una corriente alterna circula a través del primario, causa un voltaje que es inducido a cada secundario proporcionalmente a la inductancia mutua con el primario. La frecuencia del oscilador que causa la corriente alterna está en el rango de 1 a 10 kHz.



Figura 13 Sensor de desplazamiento LVDT (Fuente: Elaboración propia)

3.1.3 Estructura para medir colapso

Para la medición del colapso se diseñó una estructura de acuerdo con el plano de la Figura N°34 (Ver anexo A), posteriormente esta estructura se une a un sistema de rieles que permite desplazar el sensor LVDT a través de la superficie de madera a evaluar. En la Figura 15 se observa cómo se utilizó la estructura para realizar las mediciones.

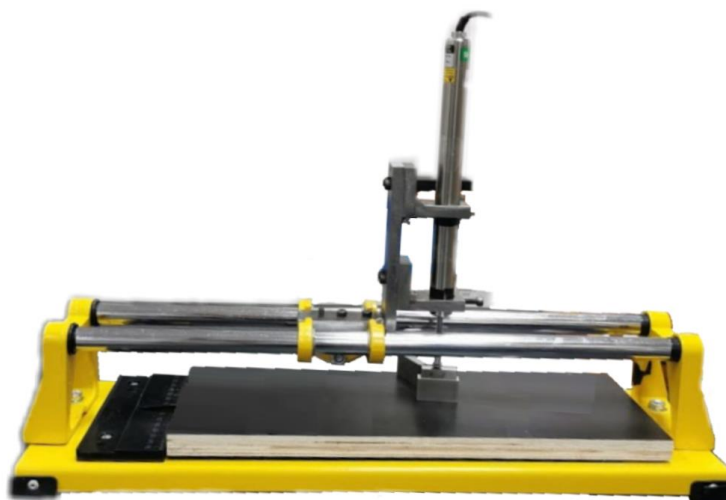


Figura 14 Estructura utilizada para realizar las mediciones de colapso (Fuente: elaboración propia)



Figura 15 Medición de colapso a una pieza testigo a través del sensor LVDT (Fuente: elaboración propia)

3.1.4 Data Logger TDS-540

Este equipo permite tomar Medición de deformación, transductor tipo extensómetro, voltaje y temperatura. Este registrador de datos es un medidor de deformación estático todo en uno. Este medidor de tensión único permite la medición utilizando un medidor de tensión, un transductor de tipo medidor de tensión, voltaje, termopar y Pt-RTD.

Algunas características se muestran a continuación:

- La pantalla LCD a color integrada con panel táctil ofrece una excelente operatividad intuitiva en inglés o japonés
- Equipado con tres interfaces de LAN, USB y RS-232C
- La tarjeta SD y la memoria USB se pueden usar para almacenar datos además de la memoria de datos interna
- Tarjeta de función de registro de datos remota proporcionada



Figura 16 Data Logger TDS-540 (Fuente: Manual del fabricante)

3.1.5 Estufa de secado con convección forzada

Las características de la estufa de secado Binder FP 53 son las siguientes:

- Rango de temperatura: desde 5 °C por encima de la temperatura ambiente hasta 300 °C
- Tecnología de cámara de precalentamiento APT.line™
- Velocidad del ventilador ajustable
- Rejilla de aire regulable
- Controlador con programación de períodos y en tiempo real
- 2 rejillas cromadas
- Dispositivo de seguridad de temperatura con ajuste independiente de clase 2 (DIN 12880) y alarma óptica
- Interfaz de ordenador: RS 422



Figura 17 Estufa de secado con convección forzada (Fuente: Elaboración propia)

3.1.6 Balanza digital

Balanza digital de sobremesa utilizada para medir la masa de las probetas estudiadas. Las características se indican a continuación.

- Capacidad: 5kg
- Precisión: 0.1g
- Unidad de medida: G, ct, lb, oz, dwt
- Dimensiones (escala): 260mm x 180mm x 64mm
- Pantalla: pantalla de 5/6 dígitos con luz
- Fuente de alimentación: adaptador de corriente DC 9V



Figura 18 Balanza digita (Fuente: Sitio web del fabricante)

3.2 Metodología

A continuación, se muestra un diagrama donde se puede observar la metodología que se siguió para realizar este experimento.

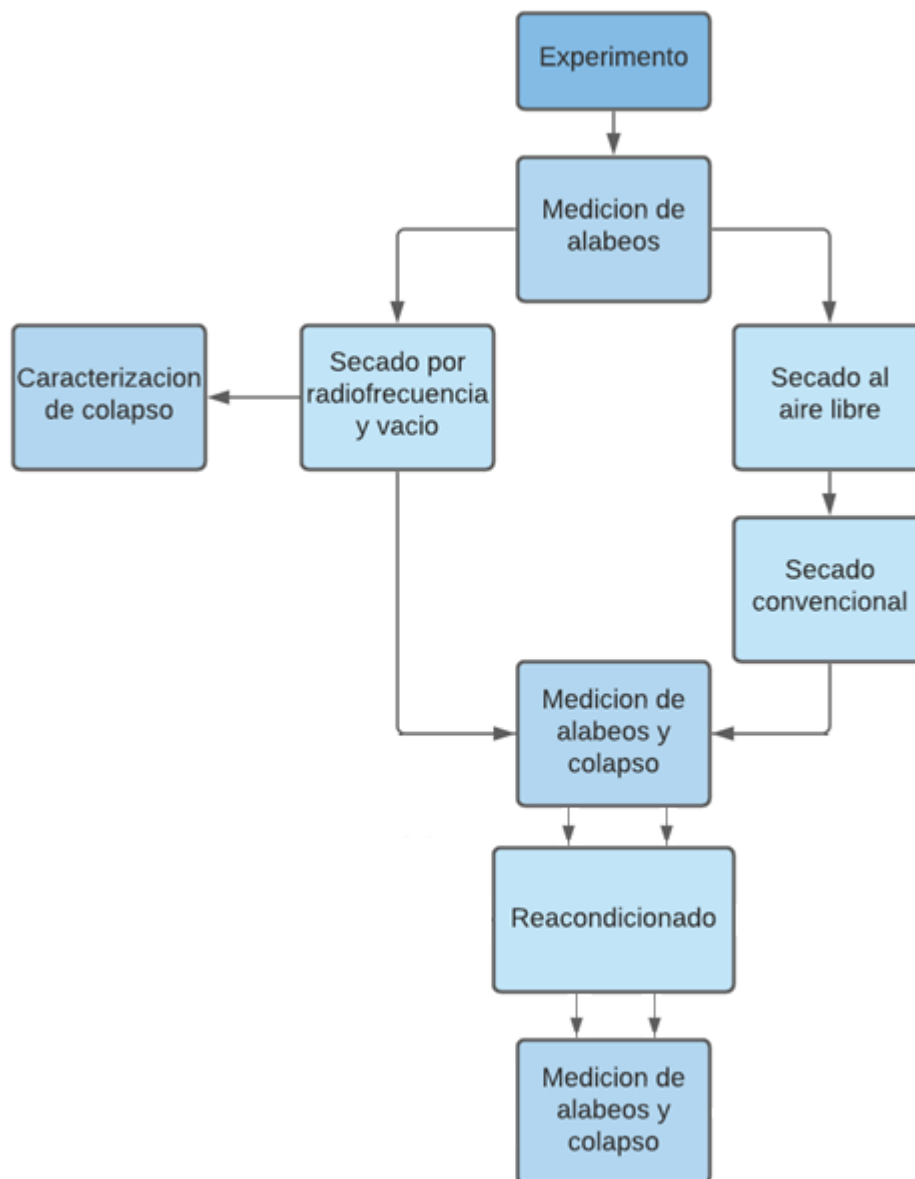


Diagrama 1 Metodología del experimento (Fuente: Elaboración propia)

3.2.1 Secado por radiofrecuencia y vacío

Antes de proceder a acomodar la madera para su posterior secado, se tomaron 20 piezas testigo para efectos de evaluar su contenido de humedad y deformación por alabeos: arqueadura, torcedura, encorvadura y acanaladura. (Ver Figura 10)

Los alabeos son medidos en una mesa de alabeos, la que consiste básicamente de una estructura metálica con una placa de acero, lo más recta posible, de manera que, al tomar las dimensiones con un Pie de metro digital, estas no se vean afectadas por el estado de la mesa.



Figura 19 Mesa de alabeos (Fuente: elaboración propia)

Para el secado de la madera en el equipo de radiofrecuencia la carga se dispuso conforme lo sugerido por el esquema de la figura 20, las piezas testigo se ubicaron en el centro.

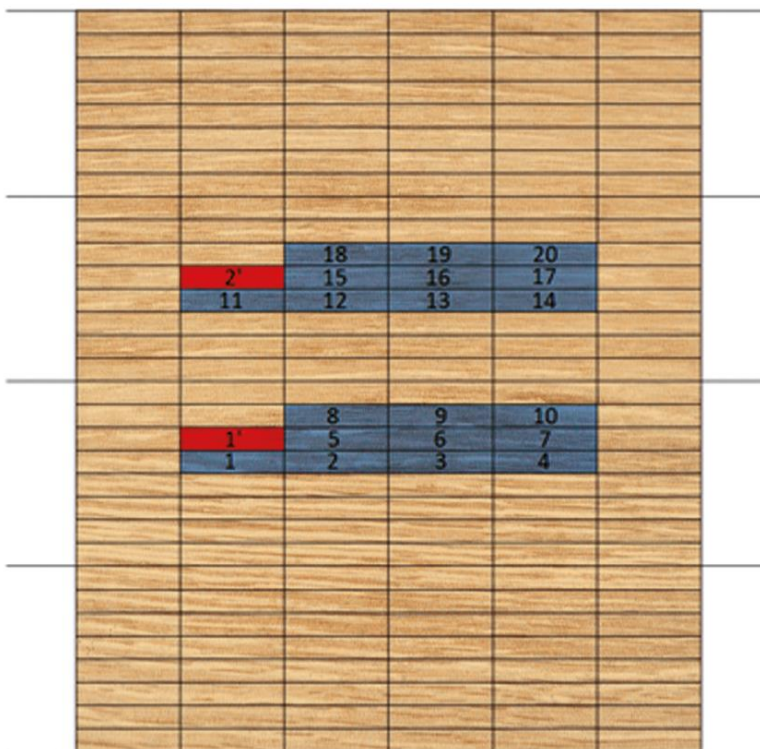


Figura 20 Distribución de las piezas testigo para el secado por radiofrecuencia y vacío (Fuente: elaboración propia)

En azul se muestran las piezas testigo y su ubicación desde la 1 a la 20, además las piezas que se muestran en rojo son las probetas estudiadas y a las que se les midió el colapso y humedad relativa diariamente, estas piezas se dispusieron de acuerdo con lo indicado en la Figura 23. El resto son piezas de relleno que sólo son utilizadas para completar la carga, pero no son estudiadas.



Figura 21 Carga antes del secado por radiofrecuencia y vacío (Fuente: Elaboración propia)



Figura 22 Carga de madera en el equipo de radiofrecuencia y vacío (Fuente: Elaboración propia)

El programa de secado por radiofrecuencia utilizado se muestra a continuación.

Tabla 3 Programa de secado por radiofrecuencia y vacío *E. nitens*

Etapa	Valor
Vacío (MPa)	-0,091
T (°C)	31,4
Potencia (kW)	12
Tiempo (horas)	688.8

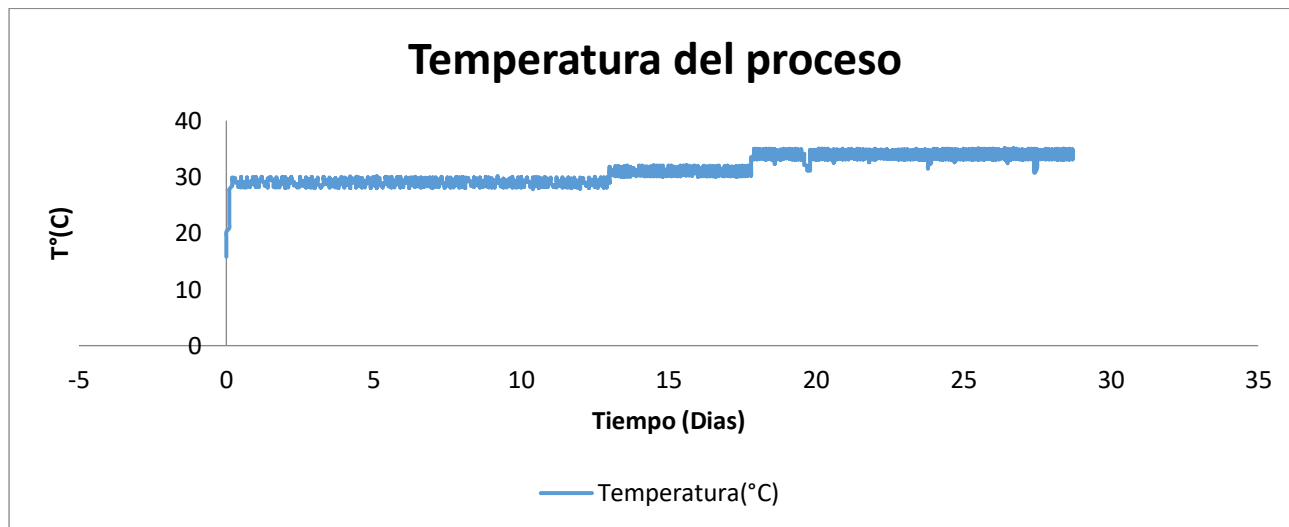


Gráfico 1 Temperatura en el proceso de secado por radiofrecuencia y vacío *E. nitens*

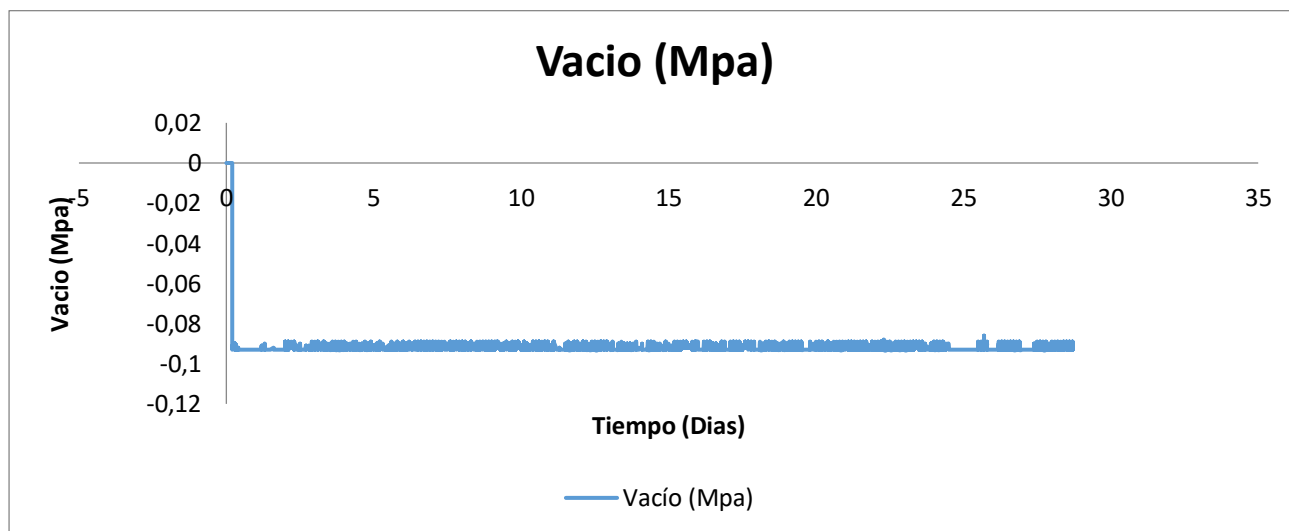


Gráfico 2 Vacío en el proceso de secado por radiofrecuencia y vacío *E. nitens*

Este programa de secado se utilizó basado en experiencias exploratorias en el marco del desarrollo del proyecto FONDECYT 1160812 “Drying behavior of *Eucalyptus nitens* for solid wood products”, procurando la mejor relación entre tiempo y calidad del secado.

Para estudiar la evolución del colapso en el secado con radiofrecuencia a través del tiempo se midieron las variaciones del colapso y la humedad de las probetas que se encuentran de color rojo en la Figura 20, para ello se utilizó un sensor LVDT junto a la estructura fabricada para este fin y una balanza digital para medir el peso de las probetas. Sin embargo, como no se podía medir diariamente una escuadría completa, ya que esto implicaría detener el equipo diariamente por muchas horas, variando demasiado las condiciones del experimento, se optó por cortar las dos tablas antes mencionadas en su extremo superior e inferior, para tener de cada una de estas, dos probetas más pequeñas y que se pudieran extraer de manera más fácil y rápida por las escotillas del equipo y sin afectar mucho las condiciones del experimento, ya que la temperatura prácticamente se mantuvo constante, las medidas de estas probetas fueron de 250 mm de largo, 140 mm de ancho y 30 mm de espesor. Además, debido a esta limitante del equipo sólo se pudieron medir las cuatro probetas mencionadas. Para entender de mejor manera como se cortaron las probetas, a continuación, se muestra la figura 23.

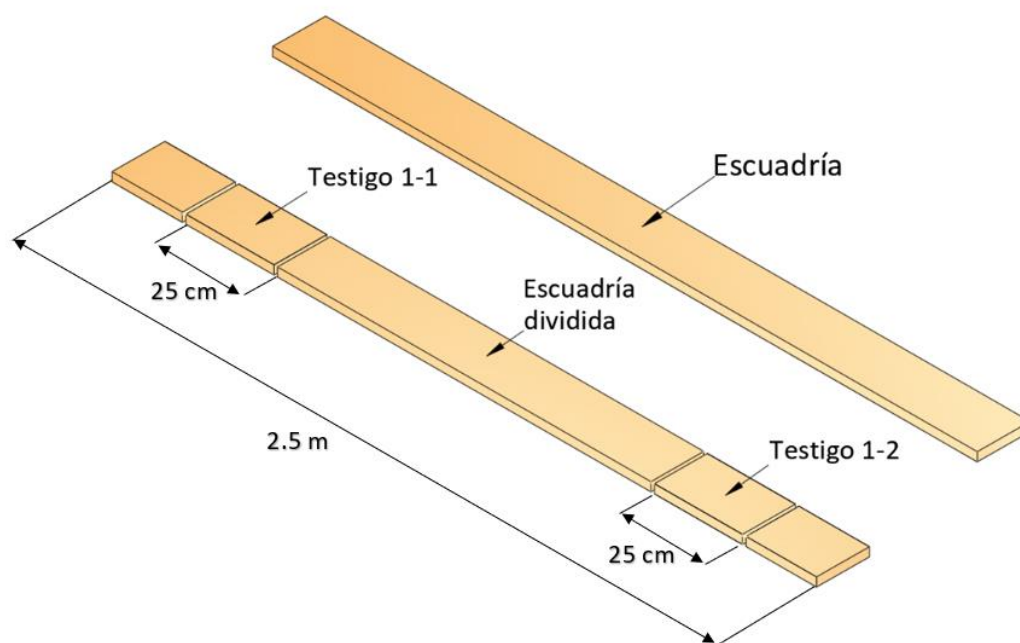


Figura 23 Distribución de la madera en el ensayo con radiofrecuencia y vacío

(Fuente: elaboración propia)

Por otro lado, para lograr que las piezas más pequeñas perdieran humedad de forma similar a la escuadría completa, se selló el contorno con silicona de alta temperatura dejando libre solo la zona

superior e inferior de las piezas testigo con el fin de que la pérdida de humedad se realizara por dichas zonas

Para medir la evolución del colapso fue necesario marcar las probetas como se muestra a continuación.



Figura 24 Probeta marcada para realizar las mediciones de colapso (Fuente: elaboración propia)

Como se observa en la figura 24, cada probeta se marcó en el centro con una línea y en ella se marcaron 29 puntos con una distancia de 5 milímetros, esto debido a que los anillos tienen una distancia aproximada de 10 milímetros, por lo que de esta manera existe más posibilidad de observar las crestas y los valles cuando se genere el colapso. Estos 29 puntos fueron medidos dos veces al día para determinar la variación del colapso a través del tiempo. Además, al medir el colapso, se pesaban las probetas.



Figura 25 Medición de masa de las probetas (Fuente: elaboración propia)

Al finalizar la etapa de secado (15-20% de humedad) la carga de madera se trasladó al secador flexible para realizar el reacondicionado con el fin de recuperar el colapso, previa medición de su colapso en las 20 piezas testigo en el centro de la escuadría de E. Nitens.



Figura 26 Medición del colapso en una pieza testigo (Fuente: elaboración propia)

Para realizar el proceso de reacondicionado se utilizó la siguiente distribución de la carga de madera donde se debió cambiar la cantidad de filas, ya que el secador flexible no permitía tener la misma altura que la distribución anterior. En este secado se utilizaron separadores de 25 mm, ver figura 28

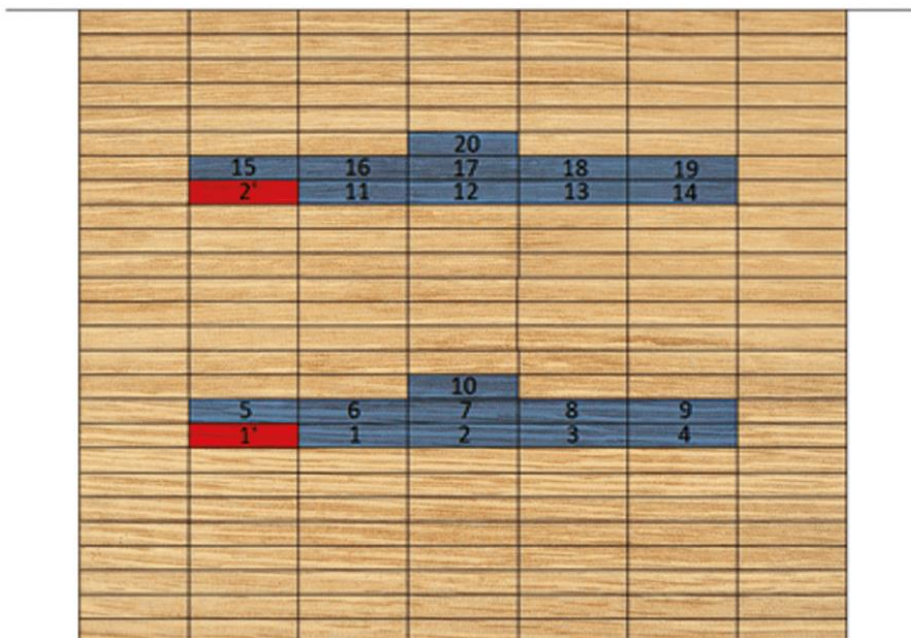


Figura 27 Distribución de la carga de madera en el reacondicionado para la madera secada por radiofrecuencia y vacío (Fuente: elaboración propia)



Figura 28 Carga de madera seca por radiofrecuencia y vacío en el secador flexible (Fuente: elaboración propia)

Al finalizar el proceso de recuperación de colapso se evalúan las 20 piezas testigo en cuanto a la efectividad del reacondicionado: colapso, variación dimensional, alabeos y grietas.

El programa utilizado para realizar el reacondicionado de la carga de madera seca en el equipo de radiofrecuencia y vacío se muestra a continuación.

Tabla 4 Programa de acondicionado de la carga de madera *E. nitens* secada por radiofrecuencia y vacío

Etapa	Tbs °C	Tbh °C	Tiempo (h)
Calentamiento	40		0,2
Calentamiento	70		0,1
Calentamiento	100		0,3
Acondicionado	100	100	3,2
Enfriamiento			1,5

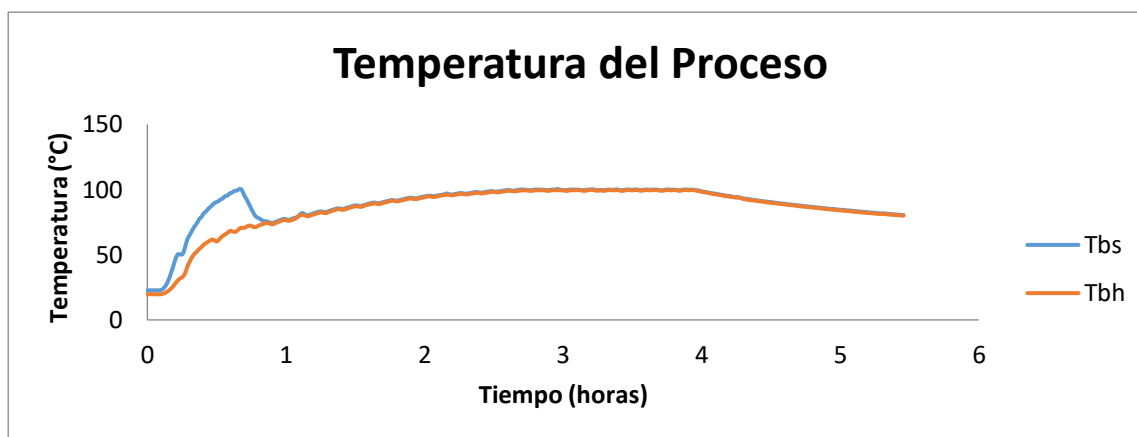


Gráfico 3 Temperatura del proceso acondicionado de la carga de madera *E. nitens* secada por radiofrecuencia y vacío

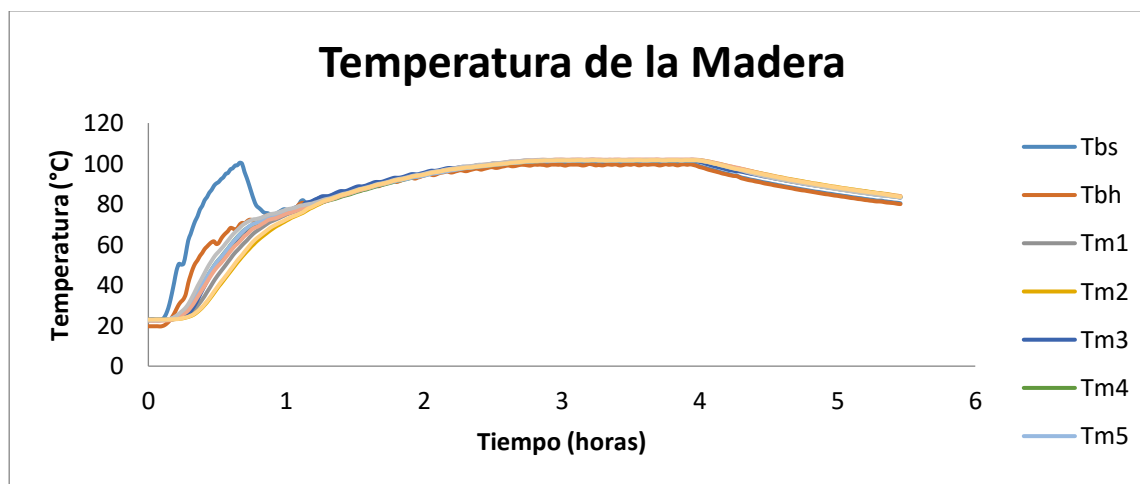


Gráfico 4 Temperatura de la madera acondicionado de la carga de madera *E. nitens* secada por radiofrecuencia y vacío

El tiempo de vaporizado utilizado se basa en experiencias exploratorias en el marco del proyecto FONDECYT 1160812 “Drying behavior of Eucalyptus nitens for solid wood products”, además el tiempo de vaporizado, es similar al utilizado en la literatura (Rozas, C., Sánchez, R., & Pinedo, P. 2005)

3.2.2 Secado convectivo con secador flexible

Antes de proceder a acomodar la madera para su posterior secado, se tomaron 20 piezas testigo para efectos de evaluar su contenido de humedad y deformación por alabeos: arqueadura, torcedura, encorvadura y acanaladura (ver Figura 10)

Posteriormente se encastilló la madera y se armó una torre con la distribución que muestra la Figura 29, en este caso las piezas testigo se ubicaron en la zona superior e inferior para poder obtener datos más representativos, esta distribución se mantuvo a lo largo de todo el proceso de pre secado, secado y reacondicionado.

Para realizar el proceso de pre secado al aire (con temperatura y humedad ambiente), se dejó la madera dentro de una bodega, bajo sombra y además cubierta con polietileno, esto con el fin de que la pérdida de humedad sea de forma lenta y no se produzcan deformaciones ni defectos importantes en este proceso, ya que se sabe que el *E. nitens* es una especie que sufre defectos fácilmente con los procesos de secado. El programa de pre secado se muestra a continuación:

Tabla 5 Programa de pre secado

Proceso	Temperatura promedio (°C)	Humedad relativa promedio del aire (%)	Tiempo (días)
Pre secado	16,25	75.3	85



Figura 29 Madera encastillada cubierta con polietileno para el proceso de pre secado (Fuente: elaboración propia)



Figura 31 Carga de madera antes del secado convectivo (Fuente: elaboración propia)

El programa de secado utilizado para esta carga de madera se muestra a continuación.

Tabla 6 Programa de secado de la carga de madera *E. nitens* secado convectivo

Etapa	Tbs °C	Tbh °C	Tiempo (h)
Calentamiento	40		0,2
Secado	40	37	12
Secado	45	45	5
Secado	45	40	12
Secado	50	50	5
Secado	50	42	12
Secado	55	55	2,2
Secado	55	46	12
Secado	60	60	1
Secado	60	44	116,5
Enfriamiento			2

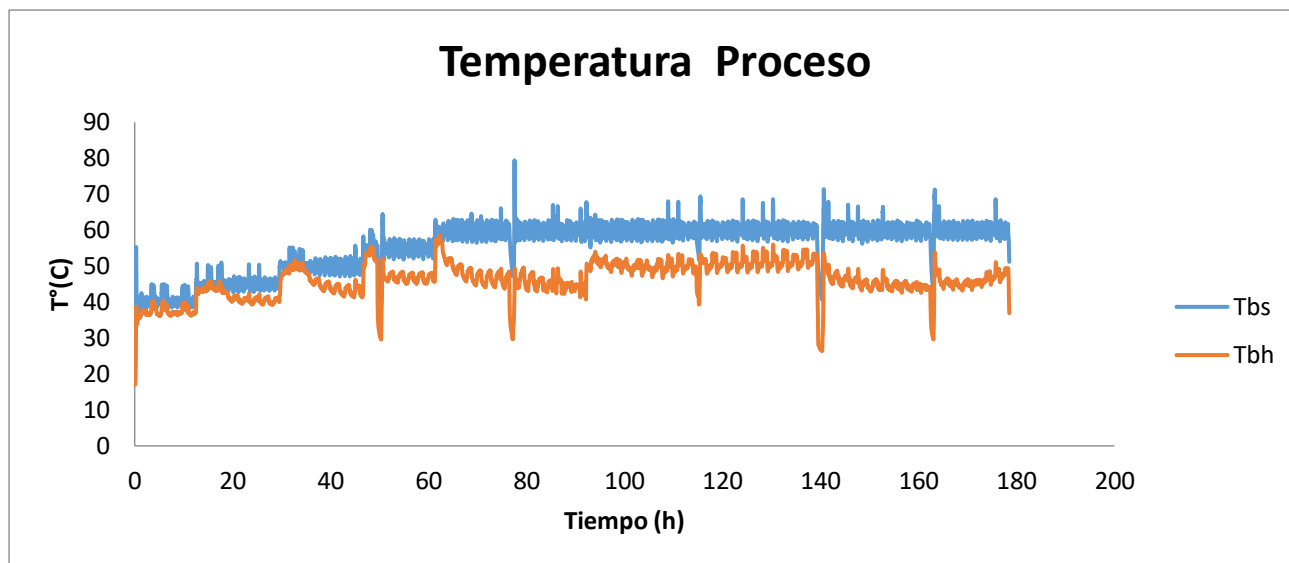


Gráfico 5 Temperatura del proceso de la carga de madera *E. nitens* secado convectivo

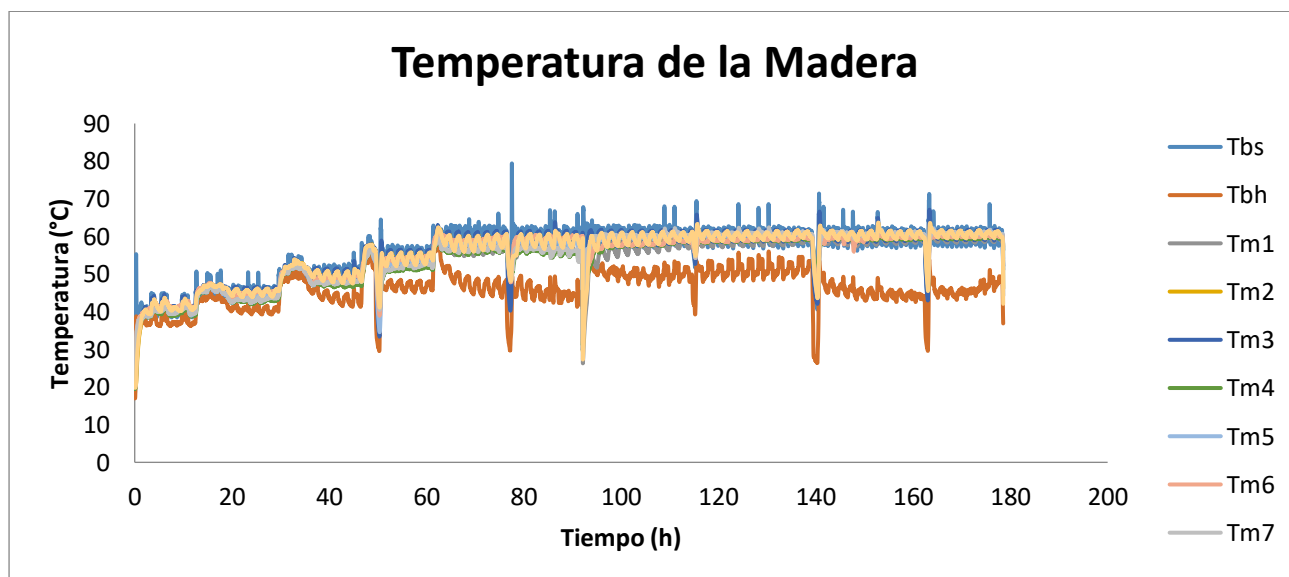


Gráfico 6 Temperatura de la madera de la carga de madera *E. nitens* secado convectivo

Este programa de secado se utilizó basado en experiencias exploratorias en el marco del desarrollo del proyecto FONDECYT 1160812 “Drying behavior of *Eucalyptus nitens* for solid wood products”, procurando la mejor relación entre tiempo y calidad del secado.

Posteriormente se realizó el reacondicionado de la madera y recuperar el colapso que se generó durante el proceso de secado, para ello se utilizó la distribución de carga de la madera que se muestra en la Figura 28, por lo que no fue necesario mover la madera ni redistribuirla.

Al finalizar el proceso de recuperación de colapso se midieron las 20 piezas testigo para comprobar que tan efectiva fue el reacondicionado. Determinando el colapso recuperado, la disminución de

volumen, disminución de masa, los alabeos, grietas internas, grietas en las caras, entre otros defectos que pudieron ser recuperados a través de este proceso.

Este proceso se realizó de acuerdo con el programa de secado que se detalla a continuación.

Tabla 7 Programa acondicionado de la carga de madera *E. nitens* secado convectivo

Etapa	Tbs °C	Tbh °C	Tiempo (h)
Calentamiento	40		0,2
Calentamiento	70		0,1
Calentamiento	100		0,3
Acondicionado	100	100	4
Enfriamiento			0,4

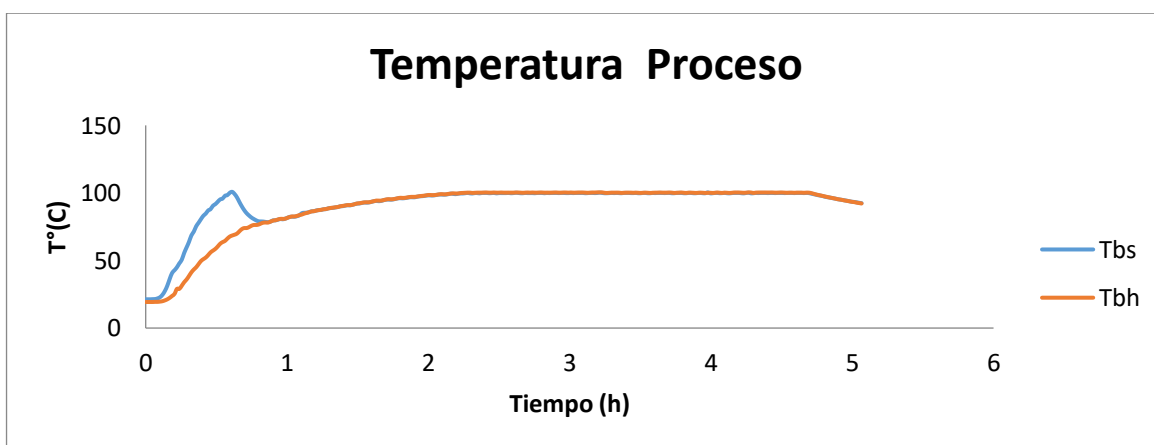


Gráfico 7 de la carga de madera *E. nitens* secado convectivo

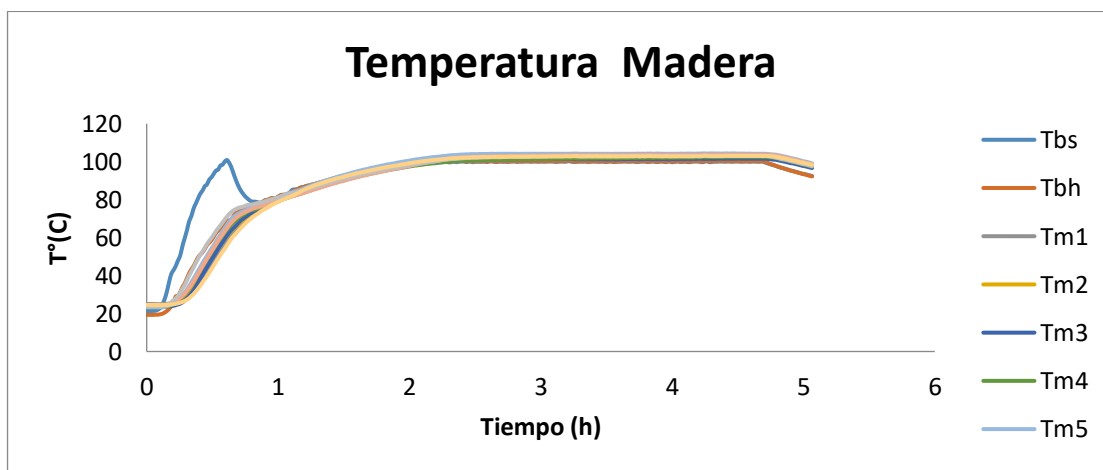


Gráfico 8 de la carga de madera *E. nitens* secado convectivo

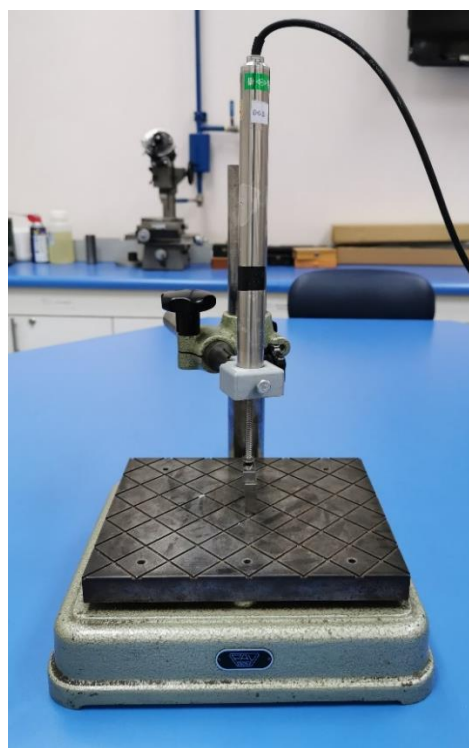
El tiempo de vaporizado utilizado se basa en experiencias exploratorias en el marco del proyecto FONDECYT 1160812 “Drying behavior of Eucalyptus nitens for solid wood products”, además el tiempo de vaporizado, es similar al utilizado en la literatura (Rozas, C., Sánchez, R., & Pinedo, P. 2005)

3.3 Calibración de sensor de desplazamiento LVDT

Para la calibración del sensor de desplazamiento se empleó un método de comparación para obtener un coeficiente de corrección que permita realizar las mediciones con el menor error posible. El procedimiento consiste en mantener el sensor LVDT fijo en posición vertical, luego se ubica el bloque patrón con medidas conocidas. La distancia recorrida por el transductor de desplazamiento tiene que ser igual a la medida de los bloques, de esta forma se interpola el coeficiente hasta obtener el más cercano a la realidad.

De esta forma la distancia inicial, es la máxima capacidad del recorrido que abarca el dispositivo y las dimensiones de los bloques fueron corroboradas por un pie de metro digital. Se iteraron los factores en el equipo de adquisición de datos hasta obtener los calores de los bloques patrón.

Además, es importante mencionar que esta calibración se realizó bajo entornos a condiciones ambientales conforme a las requeridas por el ensayo por efecto de la dilatación térmica.



a)



b)

Figura 32 Calibración de sensor de desplazamiento LVDT a) Montaje completo b) ubicación sobre el bloque patrón (Fuente: elaboración propia)

Capítulo 4

Resultados

4.1 Alabeos

4.1.1 Alabeos secado radiofrecuencia y vacío y post reacondicionado.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de alabeos para la carga de madera que secada por radiofrecuencia y vacío y post reacondicionado de acuerdo con los programas que se indican en las tablas N°3 y N°4 respectivamente.

En la tabla 8 se indican los alabeos previos al secado, posterior al secado y posterior al reacondicionado. Además, se observa que los alabeos fueron clasificados de acuerdo con la norma chilena NCh993 of 72.

En general, se puede observar que la arqueadura se mantuvo constante casi en todo el proceso, mientras que el resto de los alabeos sufrieron grandes variaciones después del secado siendo la encorvadura la que más sufrió cambios, pasando de 5mm a 26mm llegando a una clasificación c (deformaciones leves). El reacondicionado resulto particularmente beneficioso para disminuir considerablemente tanto la torcedura como la encorvadura: la torcedura disminuyo un 51% y la encorvadura un 40%.

Tabla 8 Alabeos pre rf, post rf y post reacondicionado

Pieza	Arqueadura (mm)			Torcedura (mm)			Encorvadura (mm)			Acanaladura(mm)		
	pre rf	post rf	post reac.	pre rf	post rf	post reac.	pre rf	post rf	post reac.	pre rf	post rf	post reac.
1	2,5	0	0	0	2,91	2,1	0	10,84	1,41	0	0	0
2	0	8,82	2,03	0	14,84	3,4	2,31	16,39	3,55	0	4,43	1,77
3	3,44	5,56	3,57	0	1	0	2,95	5,14	4,93	0	0	0
4	2,1	0	0	0	2,05	1,35	0	6,9	2,95	0	0	0
5	5,67	5,75	4,46	0	0	2,16	0	7,63	3	0	3,28	2,22
6	2,83	6,39	2,77	0	3,13	0	0	5,08	1,24	0	4,11	0
7	2,35	5,47	3,48	0	3,32	2,11	0	10,34	5,34	0	1,21	0
8	2,35	1,05	3,74	0	3,68	6,27	3,01	13,48	12,53	0	1,5	2,65
9	2,77	1,41	1,31	0	3,47	3,1	0	10,57	9,17	0	4,3	1,5
10	1,87	2,55	1,2	0	0	0	4,43	14,12	11,34	0	0	0
11	7,73	1,44	3,64	0	7,19	0	2,7	14,81	14,81	0	6,13	1,74
12	2,43	1,6	8,25	2,67	4,53	0	0	9,41	6,46	0	3,06	2,93
13	4,2	3,31	5,7	0	0	0	0	4,99	5,1	0	1,12	1,72
14	6,6	2,95	2,09	0	0	0	0	12,92	5,27	0	4,18	1,05
15	0	2,26	2,13	0	3,12	1,69	0	9,83	8,74	0	3,99	7,32
16	3,2	3,33	3,36	0	6,83	3,94	2,86	23,12	12,9	0	0	1,59
17	3,87	2,88	1,52	0	0	4,79	7,06	20,52	10,92	0	2,67	0
18	3,08	1,24	0	0	0	0	6,65	3,54	5,27	0	0	1,18
19	1,89	2,1	0	0	2,84	0	0	10,95	4,71	0	0	6,921
20	4,27	2,28	4,17	0	8,25	2,25	0	9,49	2,05	0	0	1,44
Promedio	3,16	3,02	2,67	0,13	3,36	1,66	1,6	11	6,58	0	2,1	1,7
Varianza	3,62	5,25	4,46	0,36	13,66	3,54	5,32	26,15	16,86	0	4,11	4,35
Clasificación	b	b	b	b	b	b	b	c	c	a	b	b

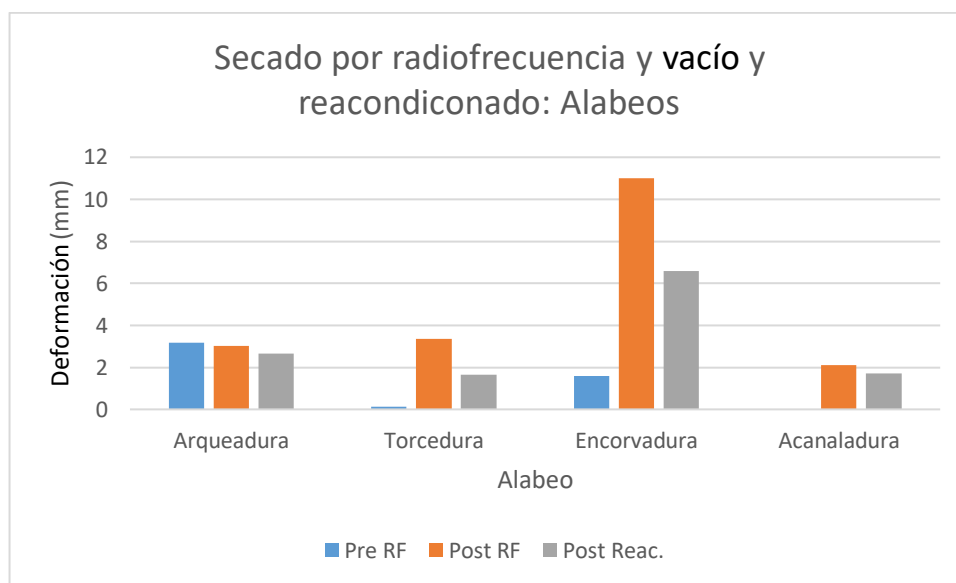


Gráfico 9 Secado por radiofrecuencia y vacío: Alabeos

4.1.2 Alabeos secado al aire libre, secado convectivo y post reacondicionado.

Por otro lado, el secado convectivo y post reacondicionado se realizó de acuerdo con los programas que se indica en las tablas N°5 y N°6.

A continuación, se muestran los alabeos antes de entrar a la cámara de secado, posterior al secado y posterior al reacondicionado. Además, es importante mencionar que los alabeos fueron clasificados de acuerdo con la norma chilena NCh993 of 72 y lo que muestra la tabla 1.

En este caso se puede mencionar que la arqueadura disminuyó con el secado convectivo, sin embargo, el cambio no fue considerable. Por otro lado, el resto de los alabeos aumentaron considerablemente con el secado pasando cada uno de ellos al siguiente nivel de clasificación. Posteriormente con el reacondicionado se logró disminuir los alabeos considerablemente, en este caso la arqueadura disminuyó un 62%, la Torcedura un 52%, la Encorvadura un 44% y la acanaladura un 67%. Además, se puede mencionar que la encorvadura gracias al reacondicionado pasó de un nivel de clasificación c (deformaciones moderadas) a un nivel b (deformaciones leves).

Tabla 9 Alabeo pre secado convectivo, post secado convectivo y post reacondicionado

Pieza	Arqueadura (mm)			Torcedura (mm)			Encorvadura (mm)			Acanaladura(mm)		
	pre sc	post sc	post reac.	pre sc	post sc	post reac.	pre sc	post sc	post reac.	pre sc	post sc	post reac.
21	2,18	6,19	2,05	0	3,15	2,29	2	6,1	2,67	0	2,48	0
22	7,97	2,86	2,37	0	0	0	0	3,78	0	0	1,26	0
23	6,16	2,92	1,81	0	2,38	0	0	4,57	0	0	1,9	0
24	6,07	6,1	1,99	0	0	0	3,2	7,41	6,61	0	0	0
25	2,21	0	0	0	0	2,34	0	1,69	0	0	0	0
26	4,08	3,95	0	0	7,74	5,7	4,81	6,55	6,39	0	0	0
27	2,97	1,95	0	0	3,74	0	2	8,49	4,23	0	1,9	0
28	1,96	2,49	0	0	4,08	0	0	3,94	0	0	2,44	0
29	2,66	3,47	3,02	0	5,18	1,98	3,31	6,21	2,36	0	0	0
30	8,1	4,78	4,47	0	7,23	2,79	1,45	15,22	14,28	0	4,49	0
31	2,78	3,25	1,87	0	8,08	0	4,53	12,5	8,42	0	7,45	5,59
32	0	4,6	2,29	0	15,7	11,8	0	3,45	0	0	4,31	0
33	5,3	1,72	0	0	3,22	0	1,37	2,68	0	0	2,93	0
34	6,11	2,88	2,08	0	2,53	0	1,67	7,92	4,43	0	3,52	1,83
35	2,37	4,77	0	0	0	1,89	6,55	16,26	12	0	0	1,87
36	2,95	2,92	0	0	8,65	5,72	1,4	3,94	0	0	1,9	0
37	0	1,97	0	0	5,29	3,05	2,96	11,38	5,68	0	4,51	4,79
38	1,73	2,72	0	0	4,89	4,31	1,68	4,91	0	0	1,87	0
39	6,51	3,67	2,39	0	11,35	4,51	12,03	12,3	8,33	0	0	0
40	5,51	2,52	0	0	4,18	0	0	7,38	6,23	0	1,05	0
Promedio	3,88	3,29	1,22	0	4,87	2,32	2,45	7,33	4,08	0	2,1	0,7
Varianza	5,89	2,21	1,86	0	16,45	9,01	8,47	17,5	18,99	0	4,02	2,69
Clasificación	b	b	b	a	b	b	b	c	b	a	b	b

Pre secado al aire, secado convencional y reacondicionado: Alabeos

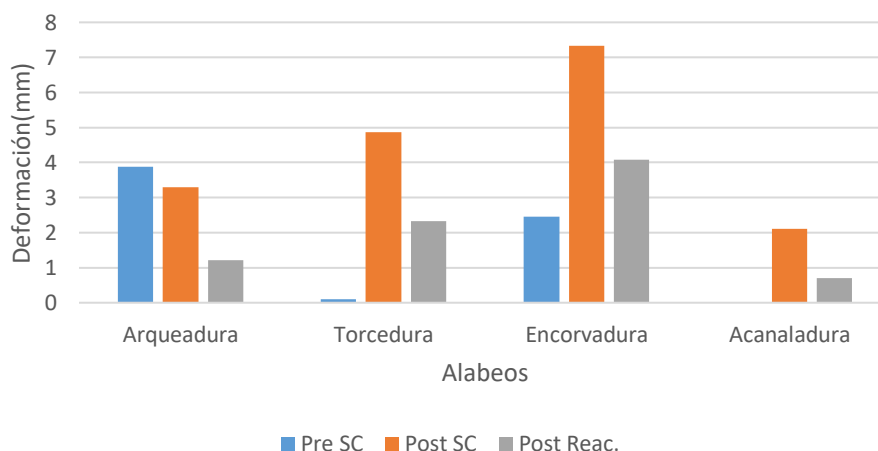


Gráfico 10 Secador flexible: Alabeos

4.1.3 Análisis comparativo alabeos secado radiofrecuencia y vacío vs secado al aire libre y secado convectivo.

Se puede observar que para ambos procesos la arqueadura disminuyó durante los procesos de secado, mientras que el resto de los alabeos aumentaron, en algunos casos pasando al siguiente nivel de clasificación de defectos, como por ejemplo el caso de la encorvadura para ambos casos, donde paso de una clasificación b (deformaciones leves) a una clasificación c (deformaciones moderadas).

Por otro lado, durante el proceso de reacondicionado en ambos casos se logró minimizar los alabeos obteniendo una importante disminución, sobre todo en el secado convectivo, donde los estos habían sido de mayor magnitud.

En cuanto a la clasificación final que se obtuvo para ambas cargas se puede observar que fue similar, ya que para todos los alabeos la clasificación fue de deformaciones leves, excepto para la encorvadura, donde en el secado por radiofrecuencia y vacío se obtuvo una clasificación final de deformaciones moderadas.

Tabla 10 porcentaje de disminución de alabeos después del reacondicionado

	Arqueadura (%)	Torcedura (%)	Encorvadura (%)	Acanaladura (%)
Radiofrecuencia y Vacío	11,6	51	40	19,1
Secado Convectivo	62	52	44	67

4.2 Curvas de secado

A continuación, se presentan las curvas de secado obtenidas en algunas de las probetas que fueron secadas por radiofrecuencia y vacío.

Para elaborar estas curvas, se pesaron las probetas todos los días y se determinó el contenido de humedad de acuerdo con la ecuación (2) (ver anexo D).

4.2.1 Curvas de Secado: Pre secado al aire y secador flexible

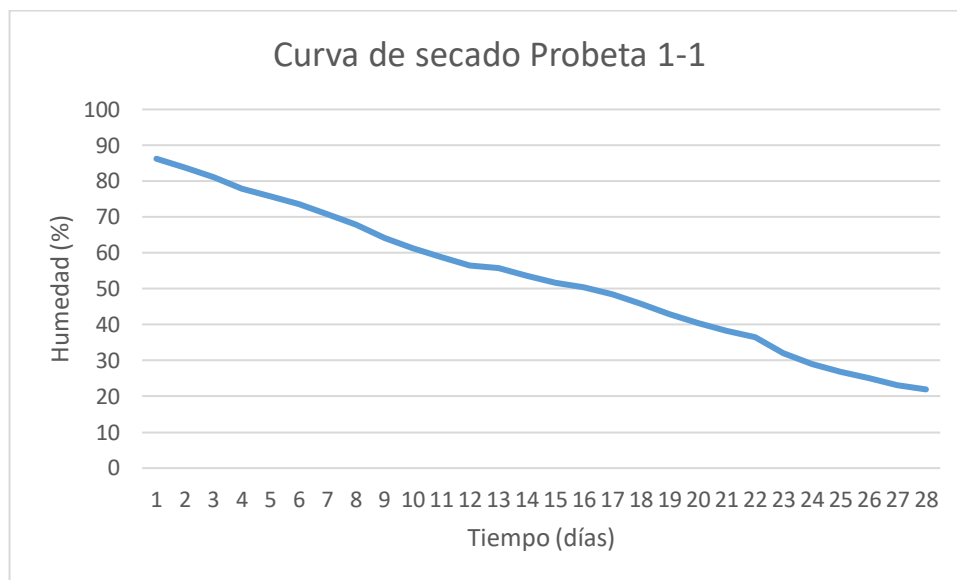


Gráfico 11 Curva de secado Probeta 1-1

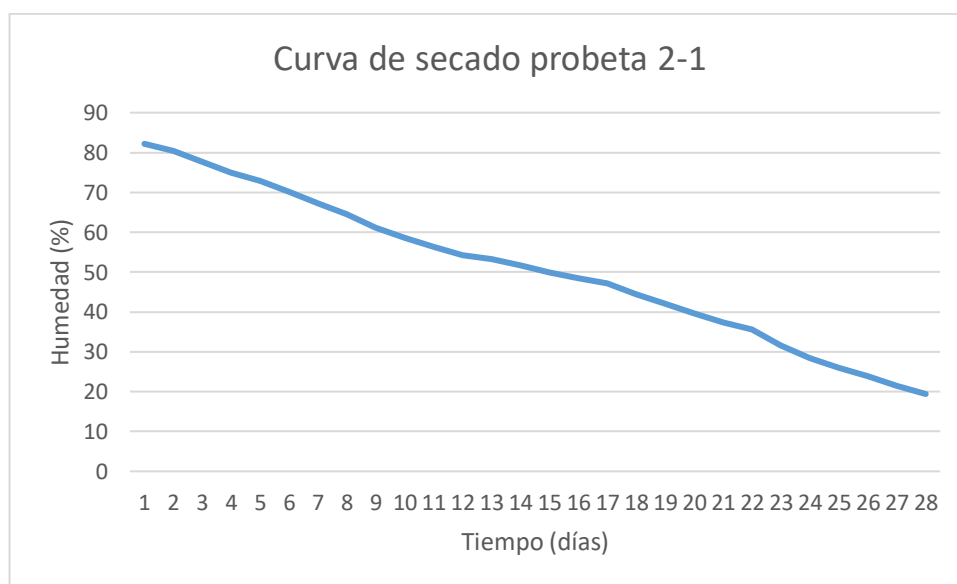


Gráfico 12 Curva de secado probeta 2-1

Las curvas de secado para el secado por radiofrecuencia y vacío muestran que se realizó la etapa de secado en 28 días. Por otro lado, el contenido de humedad final para la probeta 1-1 fue de 21,9%, mientras que para la probeta 2.1 fue de 19,4%. Además, se obtuvieron curvas de secado con una tendencia lineal, ya que la temperatura del programa de secado fue aumentada en dos ocasiones el día 13 y el día 18.

4.2.2 Curvas de secado: carga pre secado al aire y secador flexible

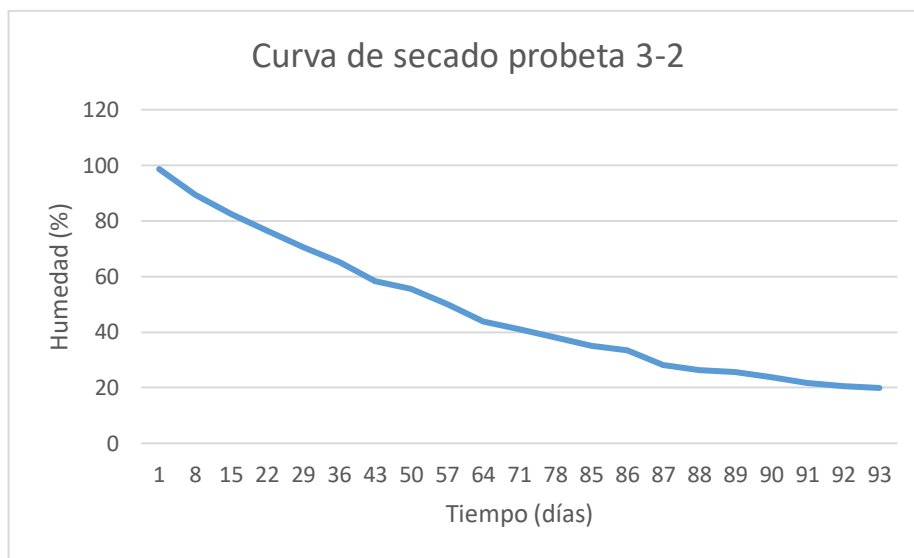


Gráfico 13 Curva de secado probeta 3-2

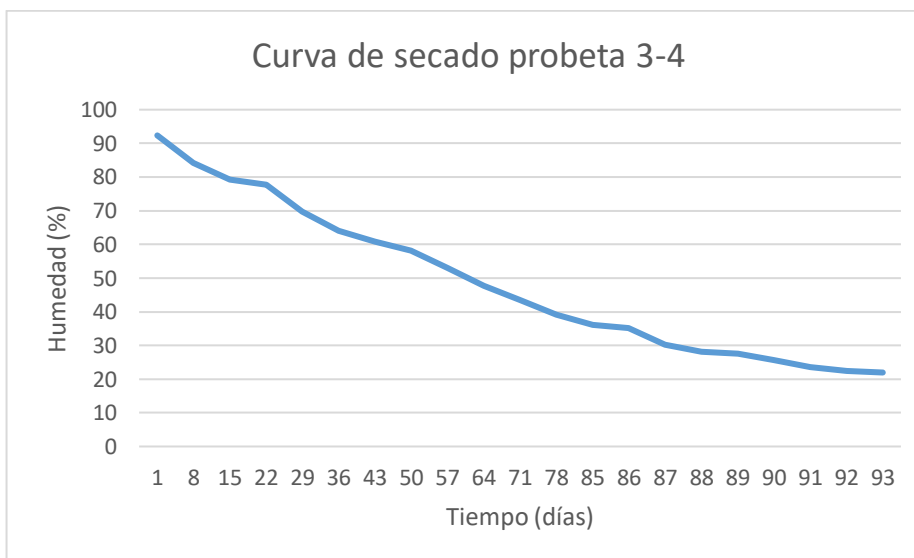


Gráfico 14 Curva de secado probeta 3-4

Las curvas de secado en este caso (Gráficos 13 y 14) muestran que para este ensayo el pre secado tomo 85 días, mientras que la etapa de secado tomo 8 días. Por otro lado, al finalizar la etapa de secado la probeta 3-2 muestra un contenido de humedad de 19,9%, mientras que la probeta 3-4 un 21,96%. Además, se obtuvieron curvas de secado un poco irregulares, esto debido a que en el pre secado al aire la temperatura variaba al igual que la humedad relativa del lugar.

4.3 Colapso

En este apartado se muestran los resultados de colapso obtenido a lo largo de este experimento y también los resultados de recuperación de colapso que se obtuvo posterior al reacondicionado.

4.3.1 Estudio transitorio de colapso bajo secado por radiofrecuencia y vacío

Para estos efectos se utilizó el equipo que se indica en el apartado 4.1.2 y 4.1.3. En particular, para ciertos casos, se opta por mostrar dichos resultados transiente en función del contenido de humedad, lo cual puede ser visto como transformación de espacio para el análisis transitorio que permite una interpretación con mayor sentido físico y posibilidad de análisis estadístico.

4.3.1.1 Resultados de colapso con respecto a la humedad

A continuación, se muestran los gráficos obtenidos de colapso vs humedad para las probetas que fueron secadas por radiofrecuencia y vacío y post reacondicionado de acuerdo con los programas que se indican en las tablas N°3 y N°4 respectivamente.

Para determinar el colapso, se utilizó el criterio que se menciona en el Anexo D.

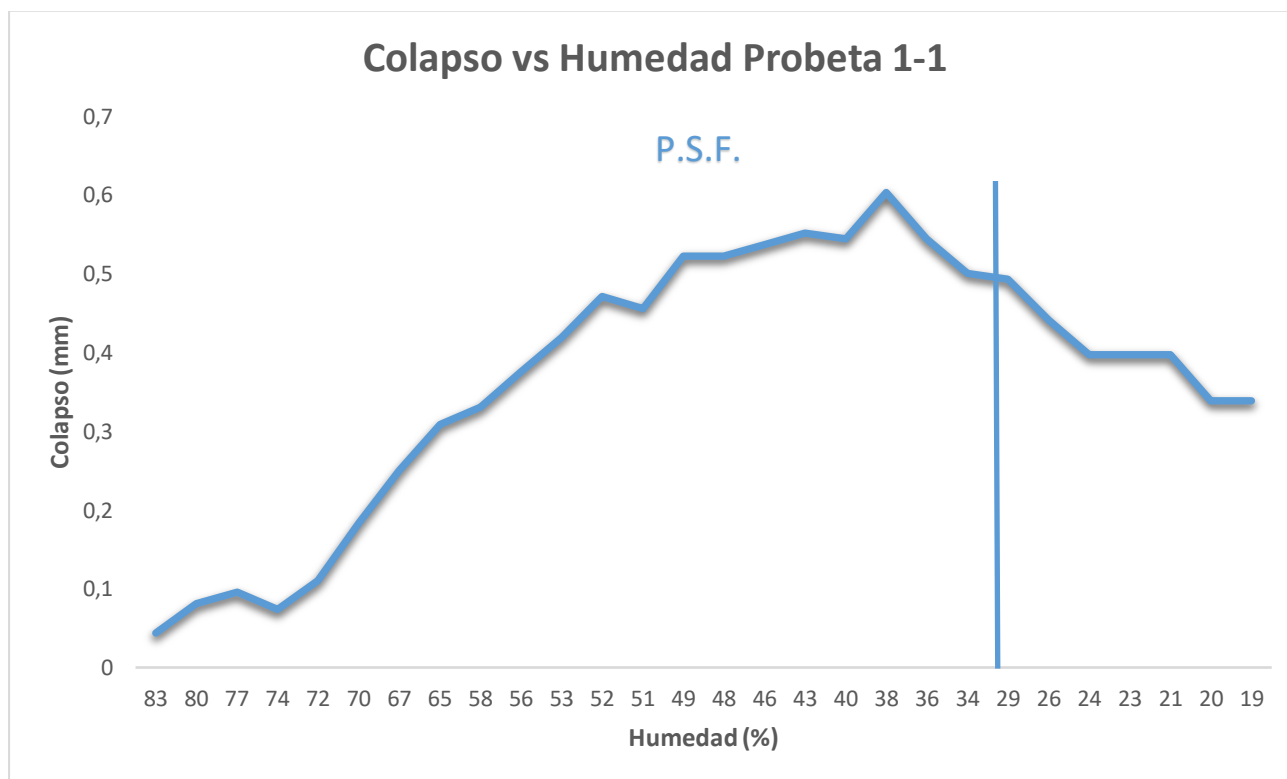


Gráfico 15 Colapso probeta 1-1

Como se ve en el Grafico 15, la probeta 1-1 comenzó a aumentar el colapso hasta llegar a un punto máximo de 0,6 mm al 38 % de humedad, y posteriormente comenzó a disminuir hasta llegar a 0,34

mm al 19% de humedad.

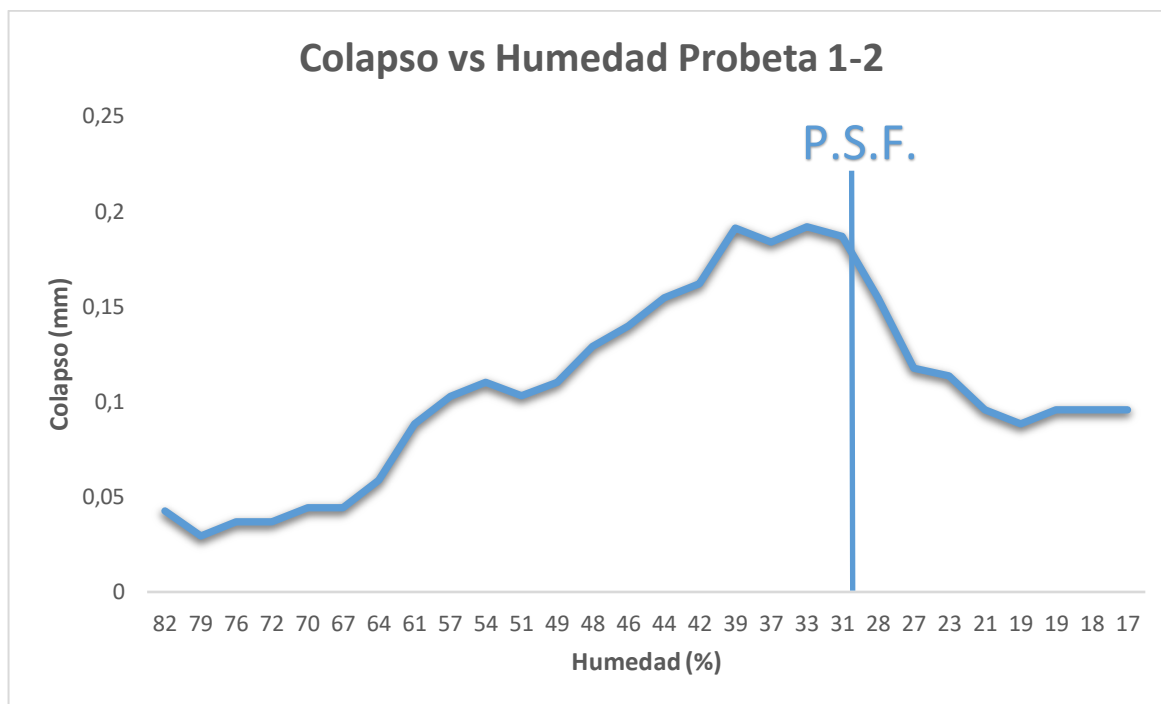


Gráfico 16 Colapso probeta 1-2

En el caso de la probeta 1-2, llego a un máximo de 0,2 mm al 33% de humedad y posteriormente comenzó a disminuir hasta llegar a un 0,957 mm al 17 % de humedad.

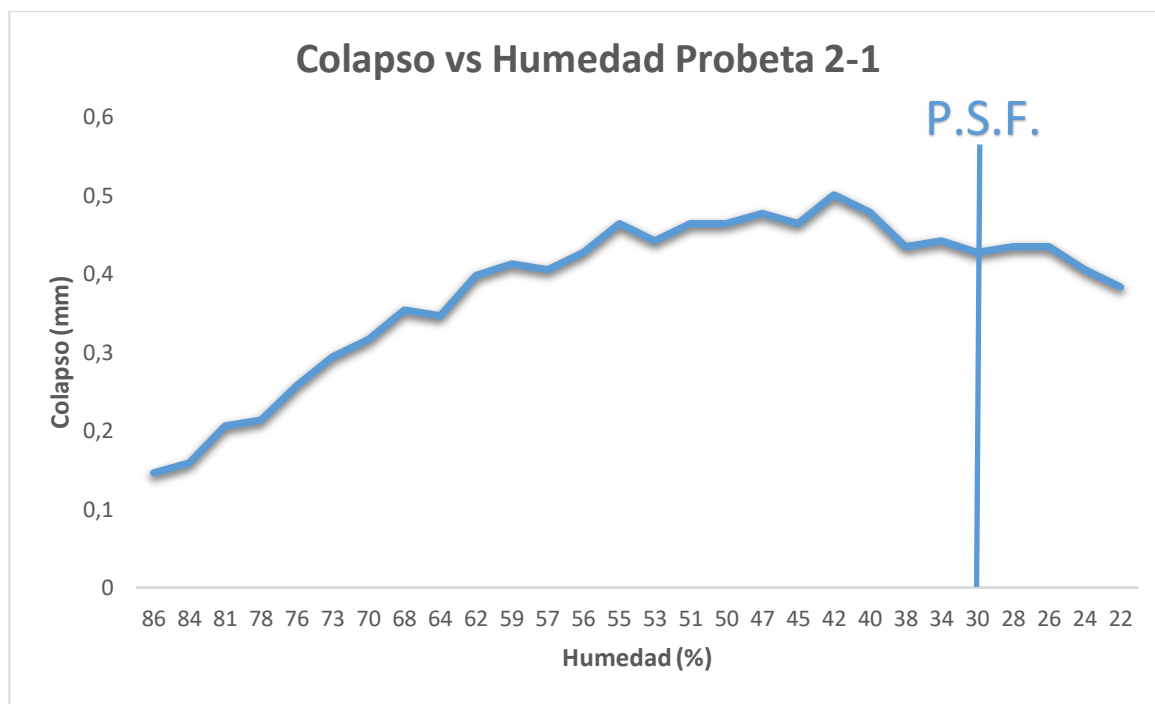


Gráfico 17 Colapso probeta 2-1

En el caso de la probeta 2-1, el colapso fue aumentando hasta llegar a un máximo de 0.5 mm al 42% de humedad y posteriormente comenzó a disminuir hasta llegar a un 0,38 mm al 22 % de humedad.

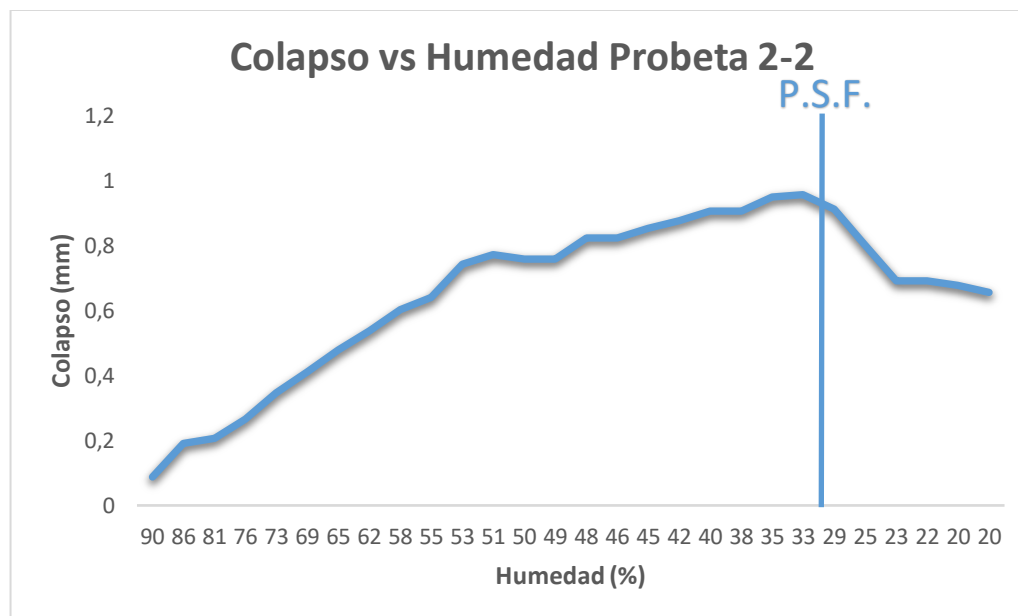


Gráfico 18 Colapso probeta 2-2

Para la probeta 2-2, se observa que el colapso aumento hasta llegar a un máximo de 0.96 mm al 33 % de humedad y posteriormente comenzó a disminuir hasta 0,66 mm al 20 % de humedad.

Como se puede observar en los gráficos, el colapso máximo se alcanzó entre el 33% y el 42% de humedad. Para las probetas que estaban ubicadas a la entrada del equipo el colapso máximo fue de un 38% y un 42%, mientras que para las probetas que estaban ubicadas atrás el colapso fue de 33%, esta diferencia probablemente se debió a que las probetas no tienen una humedad uniforme, sin embargo se puede determinar un promedio donde el colapso máximo fue alcanzado al 37% de humedad, es decir se alcanzó antes de llegar al punto de saturación de la fibra, desde comenzó una leve disminución hasta llegar al final de la etapa de secado.

4.3.1.2 Perfiles de colapso

A continuación, se muestran algunos de los perfiles de colapso en diferentes días a lo largo de este experimento, para mostrar la evolución del colapso en algunas de las probetas estudiadas.

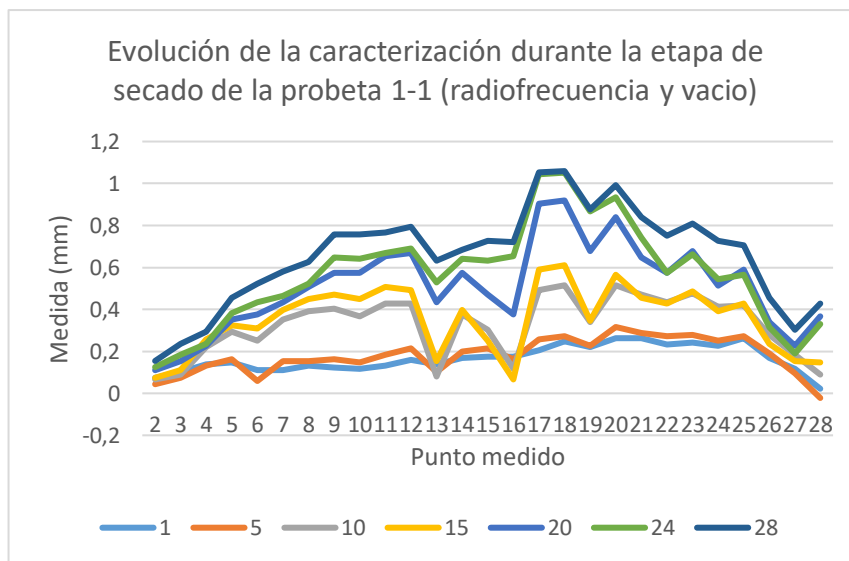


Gráfico 19 Evolución de la caracterización durante la etapa de secado de la probeta 1-1
Días:

Como se observa en la gráfica 19, el colapso entre los días 1 (83% de humedad) y 5 (72% de humedad) aumentó de manera leve, sin embargo, a partir del día 10 (56% de humedad), el aumento fue considerable llegando a un máximo en el día 20 (36% de humedad) y posteriormente disminuye nuevamente.

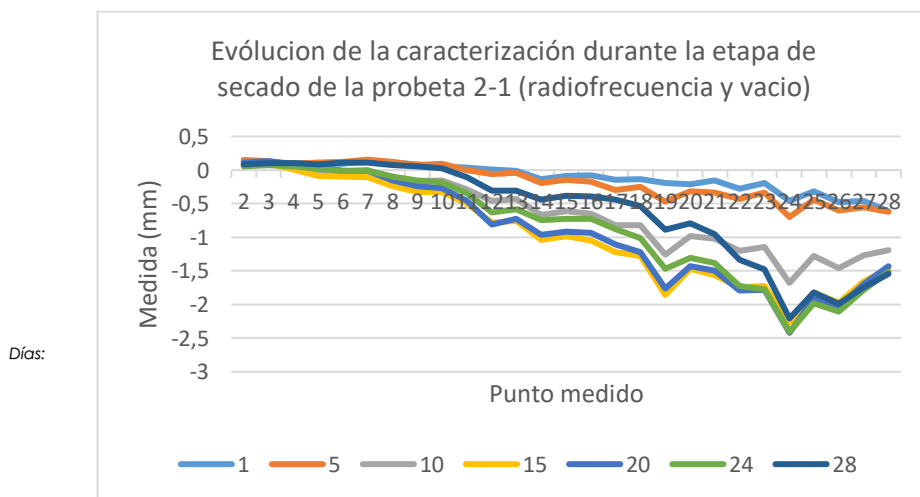


Gráfico 20 Evolución de la caracterización durante la etapa de secado de la probeta 2-1
Días:

Como se observa en la gráfica 20, el colapso entre los días 1 (86% de humedad) y 5 (76% de humedad) aumentó de manera leve, sin embargo, a partir del día 10 (62% de humedad), el aumento fue considerable llegando a un máximo en el día 20 (42% de humedad) y posteriormente disminuyendo nuevamente.

Es importante mencionar que en estas figuras solo se muestra la caracterización que se obtuvo directamente por el sensor de desplazamiento en distintos días del ensayo, por lo que los valores negativos solo se explican debido a la referencia, que en este caso es el primer punto medido

4.3.1.3 Recuperación de colapso

El gráfico 21, muestra la recuperación de colapso en las probetas secadas por radiofrecuencia y vacío, mientras que el gráfico 22 muestra cómo se recuperó el colapso en las probetas secadas convencionalmente.

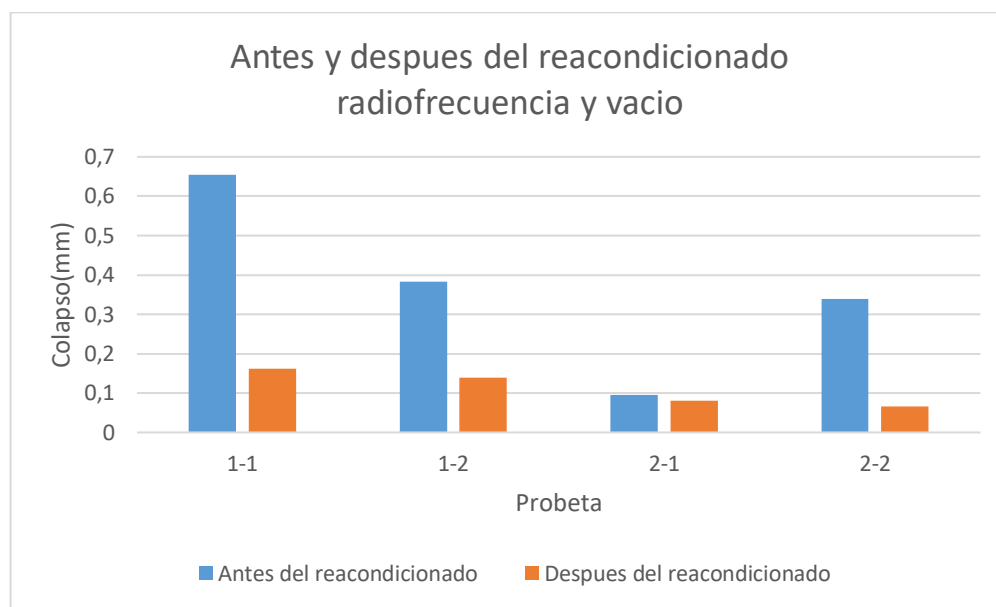


Gráfico 21 recuperación de colapso probetas secadas por radiofrecuencia y vacío

Como se observa en el gráfico 21, las probetas secadas por radiofrecuencia y vacío 1-1, 1-2, 2-1 y 2-2 obtuvieron una disminución importante de colapso llegando a un 75,28%, 63,45%, 15,46% y 80,43% respectivamente, por lo que en promedio la reducción de colapso fue de un 58,66%.

4.3.2 Recuperación de colapso piezas testigo

4.3.2.1 Recuperación de colapso piezas testigo radiofrecuencia y vacío

A continuación, se muestran los datos obtenidos de las piezas testigo que se midieron antes y después de realizar el reacondicionado, por lo que muestran de qué manera se recuperó el colapso en la carga secada por radiofrecuencia y vacío

El gráfico 23 se obtuvo a partir de la medición del colapso máximo en cada una de las piezas testigo que se muestran en el Figura 27.

La Tabla 10 se obtuvo a partir de calcular el porcentaje de colapso que disminuyó para las piezas testigo que fueron secadas por radiofrecuencia y vacío de acuerdo la metodología y a los programas de secado que se detallan en el apartado 4.2.1.

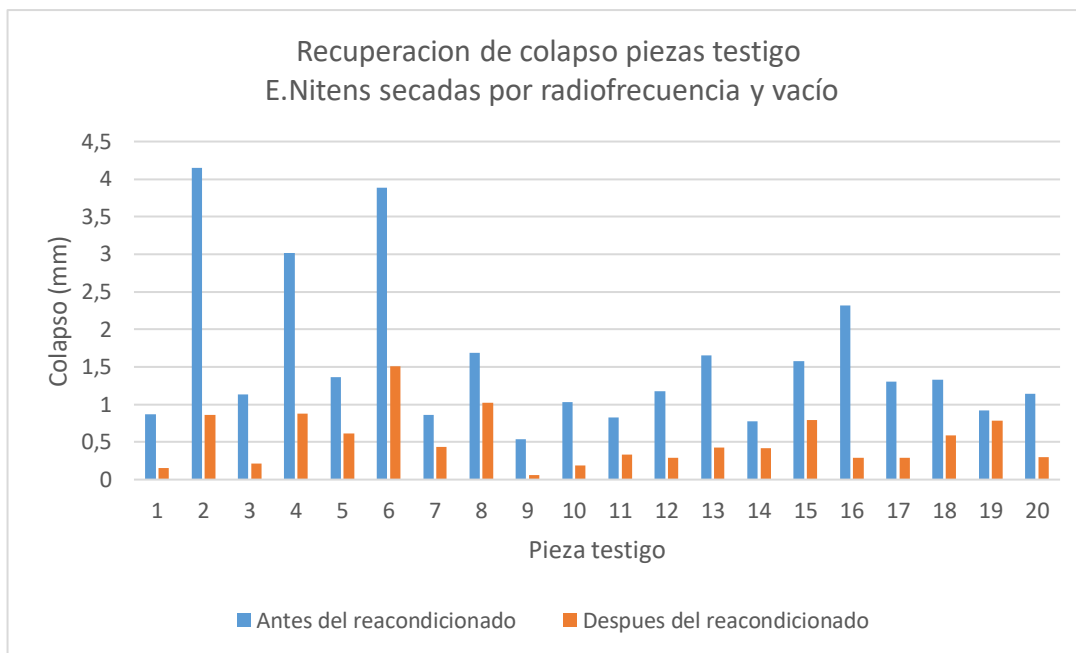


Gráfico 22 Recuperación de colapso piezas testigo E. Nitens secadas por radiofrecuencia y vacío

Tabla 11 Porcentaje de disminución de colapso de piezas testigo secadas por radiofrecuencia y vacío

Pieza testigo	Porcentaje de disminución (%)
1	82,2
2	79,3
3	81,2
4	71
5	55,1
6	61,2
7	49,6
8	39,3
9	89
10	81,4
11	59,8
12	75,6
13	74,2
14	46,2
15	49,5
16	87,6
17	77,4
18	55,8
19	14,4
20	73,6
Promedio	65,2

Como se observa en el Grafico 23 y la Tabla 11, después de realizar el reacondicionado a la carga de madera E. Nitens secada por radiofrecuencia y vacío, se observó una importante disminución en el colapso, obteniendo un promedio de 65,2%.

4.3.2.2 Recuperación de colapso piezas testigo pre secado al aire y secado convencional

A continuación, se muestran los datos obtenidos de las piezas testigo que se midieron antes y después de realizar el reacondicionado, por lo que muestran de qué manera se recuperó el colapso en la carga pre secadas al aire y secado convencional.

El gráfico 22 se obtuvo a partir de la medición del colapso máximo en cada una de las piezas testigo que se muestran en el Figura 30.

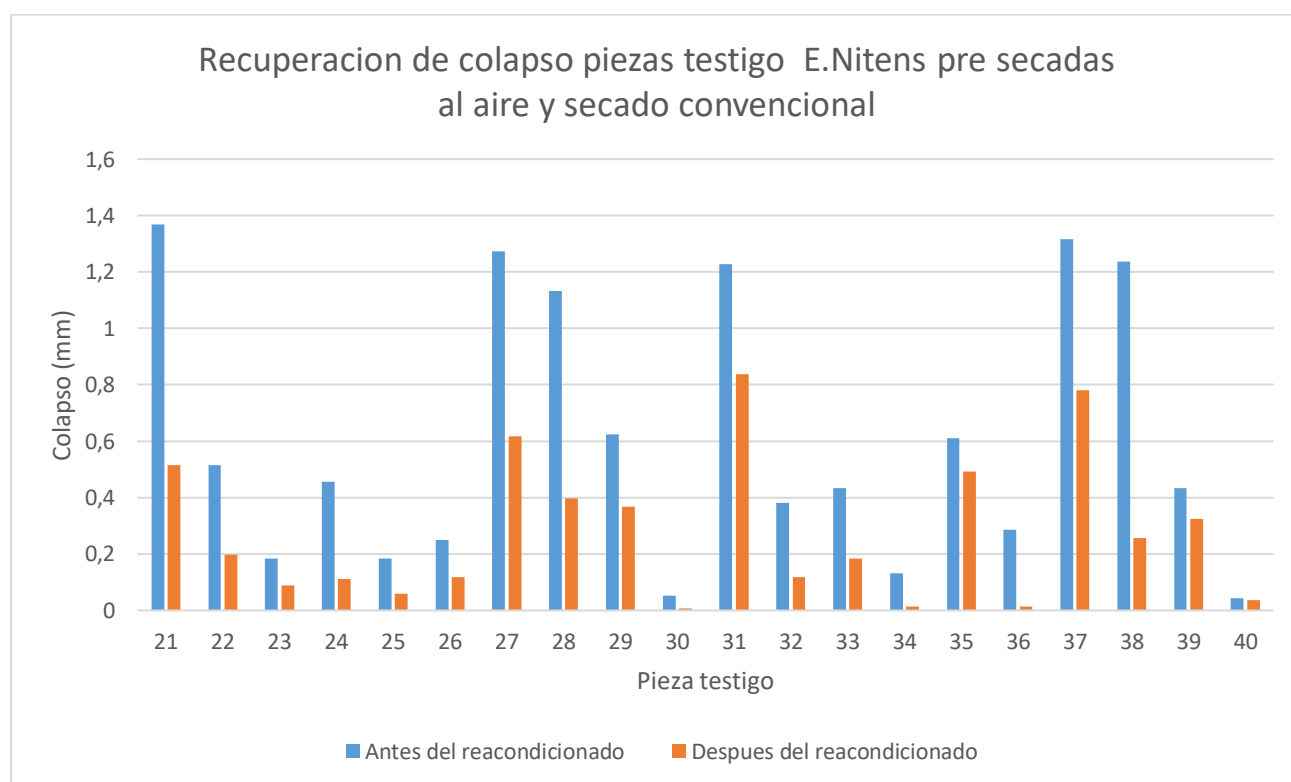


Gráfico 23 Recuperación de colapso piezas testigo E. Nitens pre secadas al aire y secado convencional

La Tabla 11 se obtuvo a partir de calcular el porcentaje de colapso que disminuyó para las piezas testigo que fueron pre secadas al aire y con secado convencional de acuerdo la metodología y a los programas de secado que se detallan en el apartado 4.2.2.

Tabla 12 Porcentaje de disminución de colapso de piezas testigo pre secadas al aire y secado convencional

Pieza testigo	Porcentaje de disminución (%)
21	62,4
22	61,4
23	52
24	75,8
25	68
26	52,9
27	51,4
28	64,9
29	41,2
30	85,6
31	31,7
32	69,2
33	57,6
34	88,9
35	19,3
36	94,9
37	40,8
38	79,2
39	25,4
40	16,6
Promedio	57

Como se observa en el Grafico 24 y la Tabla 12, después de realizar el reacondicionado a la carga de madera E. Nitens que fue pre secada al aire y con secado convectivo, se observó una importante disminución en el colapso, obteniendo un promedio de 57%.

4.3.2.3 Análisis comparativo recuperación de colapso secado radiofrecuencia y vacío vs secado al aire libre y secado convencional

Al comparar la recuperación de colapso se puede observar que en ambos tipos de secado se obtuvo un valor cercano en promedio de la recuperación, con un 65,2% para el secado RF y vacío y un 57% para el secado convencional. Además, la desviación estándar para ambos casos también fue similar con un 19% para el secado RF y un 22,7% para el secado convencional.

Tabla 13 Promedio de recuperación de colapso y desviación estándar

	Secado RFV	Secado convencional
Promedio de recuperación	65,2%	57%
Desv. Est.	19%	22,7%

Por otro lado, con respecto a la magnitud del colapso obtenido, si bien los datos son dispersos, se observa claramente que en el secado por radiofrecuencia y vacío la magnitud de colapso alcanzada es mayor, llegando a 1,1 mm en promedio, mientras que para el secado convencional alcanzó una magnitud de 0,33 mm en promedio.

Tabla 8 Promedio de colapso y desviación estándar

	Secado RFV	Secado convencional
Promedio colapso	1.1 mm	0.33 mm
Desv. Est.	0.8 mm	0.28 mm

Capítulo 5

Conclusiones

Se evaluó el proceso de secado convencional donde se obtuvieron curvas de secado con un total de 85 días de pre secado hasta llegar a un 30% de humedad aproximadamente, 8 días de secado, hasta un 15 a un 20% de humedad. Debido al extenso pre secado se favoreció que los defectos producidos durante la etapa de secado, como los alabeos el colapso generado fuera leve, ya que el colapso se genera desde madera verde hasta el punto de saturación de la fibra (30% de humedad aprox.). Además, los alabeos obtenidos para esta carga de madera son los esperados para esta especie dadas las condiciones del ensayo, de acuerdo con evidencia bibliográfica (INFOR, 2004).

Se evaluó el proceso de secado por radiofrecuencia y vacío donde se realizó la etapa de secado en 28 días y posterior reacondicionado. El análisis de los alabeos muestra que la encorvadura fue el defecto con mayor desarrollo en el proceso, llegando a un nivel de clasificación c (deformaciones moderadas) durante el proceso de secado continuando aun después del reacondicionado. El resto de los alabeos si bien se produjeron no fueron tan importantes llegando a un nivel de clasificación b (deformaciones leves). Si bien no se encontraron datos previos de alabeos para una carga de madera en condiciones de secado similares, se puede observar que, en comparación con otros tipos de secado, los alabeos obtenidos son bajos en general, por lo que el secado fue de buena calidad.

Se logro monitorear el colapso durante el proceso de secado RFV, para ello fue necesario desarrollar una metodología que permitiera alcanzar este objetivo. Además, con respecto a las probetas que se utilizaron con este fin, se puede decir que se alcanzó el colapso máximo entre un 33% y un 42% de humedad, es decir antes de llegar al punto de saturación de la fibra, para luego comenzar una leve disminución hasta llegar al final de la etapa de secado.

Se realizo un análisis comparativo de la recuperación de colapso entre ambos procesos, donde se observa que hay una disminución importante del colapso que se había generado en la etapa de secado de ambos procesos, sin embargo, en el secado por radiofrecuencia y vacío la recuperación fue un poco mayor, llegando a un 65,2% de disminución en promedio, en comparación con un 57% del secado convencional. Por otro lado, con respecto a la magnitud de colapso para ambos tipos de secado, se puede decir que para el secado convencional fue mucho menor, alcanzando una magnitud de 0,33 mm en promedio, mientras que para el secado por radiofrecuencia y vacío alcanzó una magnitud de 1,1 mm, esta diferencia pudo ser debido a que para el secado convencional se realizó un pre secado que llego muy cercano al punto de saturación de la fibra, lo cual favorece a que el colapso sea leve.

Capítulo 6

Referencias

Ananías, R. A., Díaz, C., & Leandro, L. (2009). Estudio preliminar de la contracción y el colapso en *Eucalyptus nitens*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 11(3), 251-260.

INFOR. (2019). *Anuario Forestal*. Santiago, Chile: Boletín Estadístico

Washusen, R.; Innes, T. 2008. Processing plantation Eucalypts for high-value timber. In plantation *Eucalypts* for high-value timber. Ed. A.G. Brown and C.L. Beadle. RIRDC Publication N°8: 92-118.

NCh 176/1 Of 84. Madera

NCh 993 EOf 72. Madera

INFOR. (2010). Anuario Forestal 2010. Boletín estadístico N° 128. *Instituto Forestal*, 134.

Corporación Chilena de la Madera. (2015). *CORMA*. Obtenido de Productos Forestales

Red Madera. 2006. “Secado de la madera”, Documento técnico n° 3. Ministerio de educación. Programa ChileCalifica. Red manufacturera de la Madera de la región del Maule. Talca, enero 2006.

Keey, R. B., Langrish, T. A., & Walker, J. C. (2000). The Structure of Wood. In *Kiln-Drying of Lumber* (pp. 1-21). Springer, Berlin, Heidelberg.

Foglia, R. C. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la madera. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 2(5), 88-92.

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación.

Fernandez-Golfín Seco, J. I., & Conde García, M. (2007). *Manual técnico de secado de maderas*.

Novoa Robles, L. A. (2006). Manual de buenas prácticas de manufactura para la preservación de madera aserrada; acorde a los estándares expresados en las propuestas de normas.

Rozas, C., Sánchez, R., & Pinedo, P. (2005). Secado de *Eucalyptus nitens* y *globulus* y su aprovechamiento en blocks, pisos y muebles. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 7(2), 109-120.

INFOR. (2004). *Eucalyptus nitens* en Chile: Procesos industriales de la madera. Informe técnico N° 164. Instituto Forestal. Valdivia, Chile.

Capítulo 7

Anexos

Anexo A Planos

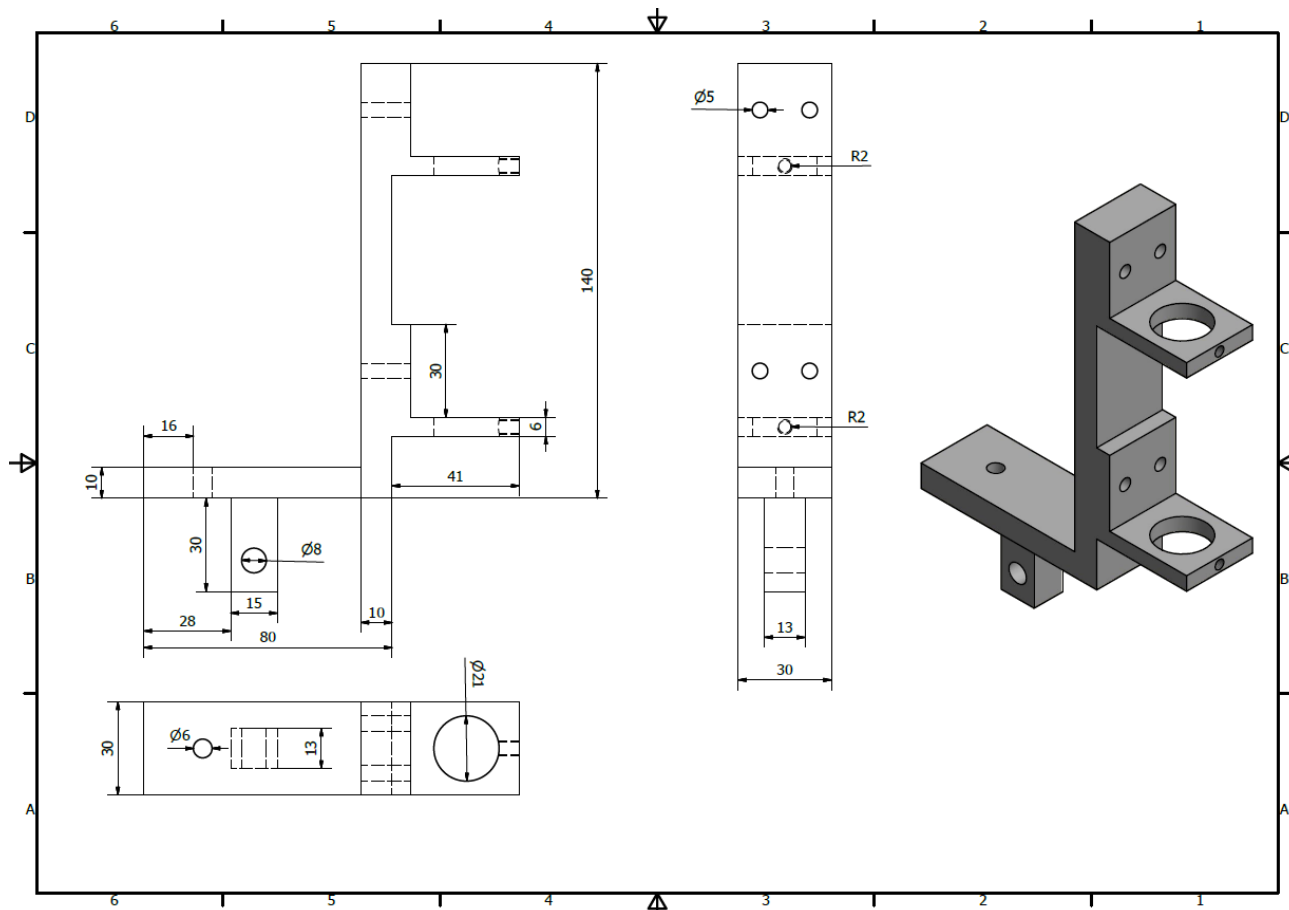


Figura 33 Plano estructura que soporta el sensor de desplazamiento LVDT

Anexo B Cambio dimensional, alabeos y contenido de humedad.

Tabla 9 Cambio dimensional, alabeos y contenido de humedad antes del secado por radiofrecuencia y vacío

Pieza	Masa	Ancho	Espesor	Arqueadura	Torcedura	Encorb.	Acanaladura
1	10,8	140,4	29	2,5	0	0	0
2	10,55	140,4	27,7	0	0	2,31	0
3	10,15	140,5	28,5	3,44	0	2,95	0
4	11,15	140,4	28,7	2,1	0	0	0
5	10,5	140,4	28,4	5,67	0	0	0
6	10,45	140,6	27,5	2,83	0	0	0
7	10,8	139,5	28,7	2,35	0	0	0
8	10,9	140,1	29,6	2,35	0	3,01	0
9	10,75	140,9	28,5	2,77	0	0	0
10	10	140,3	27,4	1,87	0	4,43	0
11	10,7	140,7	27,7	7,73	0	2,7	0
12	10,95	139,7	29,2	2,43	2,67	0	0
13	10,75	140,8	29	4,2	0	0	0
14	11,5	139,7	29,3	6,6	0	0	0
15	10,7	141	28,2	0	0	0	0
16	11,15	140,9	29,1	3,2	0	2,86	0
17	10,05	140,9	28,1	3,87	0	7,06	0
18	10,4	140,7	28,2	3,08	0	6,65	0
19	10,8	140,4	28,2	1,89	0	0	0
20	10,1	140,3	28,6	4,27	0	0	0

Tabla 10 Cambio dimensional, alabeos y contenido de humedad después del secado por radiofrecuencia y vacío

Pieza	Masa	Ancho	Espesor	Arqueadura	Torcedura	Encorb.	Acanaladura	CH
1	5,5	112,4	24,3	0	2,91	10,84	0	22,2
2	5,9	117,8	24,8	8,82	14,84	16,39	4,43	19,7
3	5,7	130,7	26,6	5,56	1	5,14	0	14,1
4	6,65	127,3	25,2	0	2,05	6,9	0	25,1
5	6,25	132	26,3	5,75	0	7,63	3,28	16,9
6	5,9	127,4	26	6,39	3,13	5,08	4,11	16,1
7	6,1	111,8	25,6	5,47	3,32	10,34	1,21	18,6
8	5,8	128,3	24,4	1,05	3,68	13,48	1,5	31,3
9	6,5	122	26,1	1,41	3,47	10,57	4,3	31,4
10	5,95	133,2	26,1	2,55	0	14,12	0	19
11	6,15	124,7	26	1,44	7,19	14,81	6,13	16,9
12	6,95	119,9	27,6	1,6	4,53	9,41	3,06	17,5
13	5,5	121,4	27,2	3,31	0	4,99	1,12	15,2
14	6,45	130,4	26,3	2,95	0	12,92	4,18	14,1
15	6,35	117,9	26	2,26	3,12	9,83	3,99	28,2
16	5,75	125,2	27,3	3,33	6,83	23,12	0	17,7
17	5,5	129,1	26,2	2,88	0	20,52	2,67	15,9

18	5,95	130,8	26	1,24	0	3,54	0	24,3
19	7,55	130,1	26,6	2,1	2,84	10,95	0	34,7
20	6,25	129,7	27,6	2,28	8,25	9,49	0	21,9

Tabla 11 Cambio dimensional, alabeos y contenido de humedad después del reacondicionado

Pieza	Masa	Ancho	Espesor	Arqueadura	Torcedura	Encorb.	Acanaladura	CH
1	5,55	133,7	27,3	0	2,1	1,41	0	18,9
2	5,9	134,1	26,9	2,03	3,4	3,55	1,77	17,3
3	5,85	136,2	27,7	3,57	0	4,93	0	16,8
4	6,35	134,5	27,6	0	1,35	2,95	0	21,3
5	6,3	135,4	27,2	4,46	2,16	3	2,22	17,5
6	6,05	134,4	26,8	2,77	0	1,24	0	16,1
7	6,1	130	27,5	3,48	2,11	5,34	0	17,6
8	5,45	135,7	27,3	3,74	6,27	12,53	2,65	20,6
9	6,25	133,7	27,7	1,31	3,1	9,17	1,5	23,5
10	6,1	137,6	26,2	1,2	0	11,34	0	20,3
11	6,35	134,3	27	3,64	0	14,81	1,74	19,3
12	7,2	131,6	28,6	8,25	0	6,46	2,93	19,9
13	5,65	134,9	28,3	5,7	0	5,1	1,72	16,3
14	6,55	134,3	28	2,09	0	5,27	1,05	17,5
15	6,15	132,7	28,1	2,13	1,69	8,74	7,32	24
16	5,9	137,2	28,8	3,36	3,94	12,9	1,59	19,8
17	5,65	136,4	20,1	1,52	4,79	10,92	0	19,1
18	5,9	137,6	27,5	0	0	5,27	1,18	21,1
19	6,9	134,9	27,7	0	0	4,71	6,921	22,4
20	6,05	137,2	28,1	4,17	2,25	2,05	1,44	18,1

Tabla 12 Cambio dimensional, alabeos y contenido de humedad antes del presecado al aire

Pieza	Masa	Ancho	Espesor	Arqueadura	Torcedura	Encorb.	Acanaladura
21	10,1	140,5	27,6	2,18	0	2	0
22	9,75	139,5	28,4	7,97	0	0	0
23	10,7	140,4	29	6,16	0	0	0
24	10,45	140,9	29,2	6,07	0	3,2	0
25	10,1	140,2	28,2	2,21	0	0	0
26	10,6	139	28,5	4,08	0	4,81	0
27	10,1	140,9	29,1	2,97	0	2	0
28	10,9	139,1	28,7	1,96	0	0	0
29	10,65	140,6	28	2,66	0	3,31	0
30	11,35	140,3	28,3	8,1	2,01	1,45	0
31	10,55	138,6	29,5	2,78	0	4,53	0
32	9,65	139,7	28,6	0	0	0	0
33	10,7	140,6	28,6	5,3	0	1,37	0
34	10,4	140,6	28,2	6,11	0	1,67	0
35	10,4	138,7	28,8	2,37	0	6,55	0

36	10,6	141,2	28,2	2,95	0	1,4	0
37	10,4	139	28,4	0	0	2,96	0
38	10,6	138,2	28,1	1,73	0	1,68	0
39	10,6	138,4	28,7	6,51	0	12,03	0
40	9,8	139,8	28,6	5,51	0	0	0

Tabla 13 Cambio dimensional, alabeos y contenido de humedad antes del secado convencional

Pieza	Masa	Ancho	Espesor	Arqueadura	Torcedura	Encorb.	Acanaladura	CH
21	7,7	136,2	26,1	1,27	0	0	0	33,6
22	8,4	136,7	28,2	6,31	0	0	0	31,4
23	9,05	138,7	28,4	5,95	0	0	0	34,7
24	8,5	139,1	27,9	5,36	0	2,86	0	34,6
25	7,2	135,5	27,7	2,59	0	1,59	0	26,4
26	8,6	134,1	28,3	2,04	6,54	4,6	0	42,5
27	8,8	139,9	28,9	2,69	0	0	0	47,5
28	9,6	132	27,6	0	0	0	0	39,4
29	7,95	139	27,9	0	0	4,53	0	32,8
30	7,95	126,3	28	1,44	0	7,45	0	29,9
31	8,1	126,7	28,9	1,75	0	0	3,19	34,7
32	7,4	136,6	28,3	0	5,5	0	3,55	28,7
33	8,55	134,7	27,9	4,46	0	0	0	40,1
34	7,45	134,5	27,9	4,49	0	2,59	2,62	29
35	5,25	129,9	27,4	5,02	0	14,14	0	17,2
36	7,3	139,1	27,7	1,26	0	1,57	0	27,2
37	7,65	128,6	27,2	1,82	7,17	5,46	0	38,7
38	7,5	122,5	27,2	0	1,79	4,6	0	34,4
39	7,5	129	27,8	5,83	0	6,97	0	28,4
40	6,6	134,9	27,6	5,91	3,33	3,24	1	18

Tabla 14 Cambio dimensional, alabeos y contenido de humedad después del secado convencional

Pieza	Masa	Ancho	Espesor	Arqueadura	Torcedura	Encorb.	Acanaladura	CH
21	4,85	130,1	24,3	6,19	3,15	6,1	2,48	8,1
22	5,5	128,2	26,6	2,86	0	3,78	1,26	8,7
23	5,85	129,7	27,5	2,92	2,38	4,57	1,9	9,3
24	5,9	135,4	26,5	6,1	0	7,41	0	10,4
25	5,65	130,4	27,1	0	0	1,69	0	7,7
26	5,2	124	27,9	3,95	7,74	6,55	0	8,9
27	5,45	131,7	28,2	1,95	3,74	8,49	1,9	11,3
28	6,45	120,7	25,9	2,49	4,08	3,94	2,44	13,9
29	5,25	133,7	27,3	3,47	5,18	6,21	0	8,6
30	6,35	122,4	27,5	4,78	7,23	15,22	4,49	8,9
31	5,1	117,1	28,3	3,25	8,08	12,5	7,45	11,4
32	4,8	128,4	27,3	4,6	15,7	3,45	4,31	7,2
33	5,9	129,1	26,7	1,72	3,22	2,68	2,93	12,4
34	5,8	128,3	26,7	2,88	2,53	7,92	3,52	9

35	4,65	127,1	26,9	4,77	0	16,26	0	7,3
36	5,3	134,5	27,3	2,92	8,65	3,94	1,9	8,2
37	4,75	123,7	27,2	1,97	5,29	11,38	4,51	7,9
38	5,2	117,2	26,3	2,72	4,89	4,91	1,87	10,8
39	6	123,2	26,6	3,67	11,35	12,3	0	8,8
40	5,95	131,7	27	2,52	4,18	7,38	1,05	8,3

Tabla 15 Cambio dimensional, alabeos y contenido de humedad después del reacondicionado

Pieza	Masa	Ancho	Espesor	Arqueadura	Torcedura	Encorb.	Acanaladura	CH
21	4,95	131,7	25	2,05	2,29	2,67	0	9,8
22	5,5	130,2	26,8	2,37	0	0	0	9,4
23	5,9	131,5	27,7	1,81	0	0	0	10,8
24	5,95	136,1	26,9	1,99	0	6,61	0	11,4
25	5,65	132,1	27,1	0	2,34	0	0	9,5
26	5,2	129	27,7	0	5,7	6,39	0	10,8
27	5,4	134,7	27,3	0	0	4,23	0	12,2
28	6,4	127	26,6	0	0	0	0	12
29	5,25	135,4	27,1	3,02	1,98	2,36	0	11
30	6,4	125,5	27,5	4,47	2,79	14,28	0	9,8
31	5,05	124,9	28,2	1,87	0	8,42	5,59	11,2
32	4,9	131,5	27,7	2,29	11,8	0	0	9,7
33	5,8	133,4	26,8	0	0	0	0	13,4
34	5,8	129,7	26,4	2,08	0	4,43	1,83	10
35	4,75	129	27,3	0	1,89	12	1,87	9,6
36	5,35	135,9	27,2	0	5,72	0	0	9,7
37	4,75	128,9	27,2	0	3,05	5,68	4,79	9,9
38	5,2	124,1	26,8	0	4,31	0	0	11,5
39	6,05	125,2	26,8	2,39	4,51	8,33	0	11
40	6	132,5	27	0	0	6,23	0	8,9

Anexo C Perfiles de colapso antes y después del reacondicionado probetas

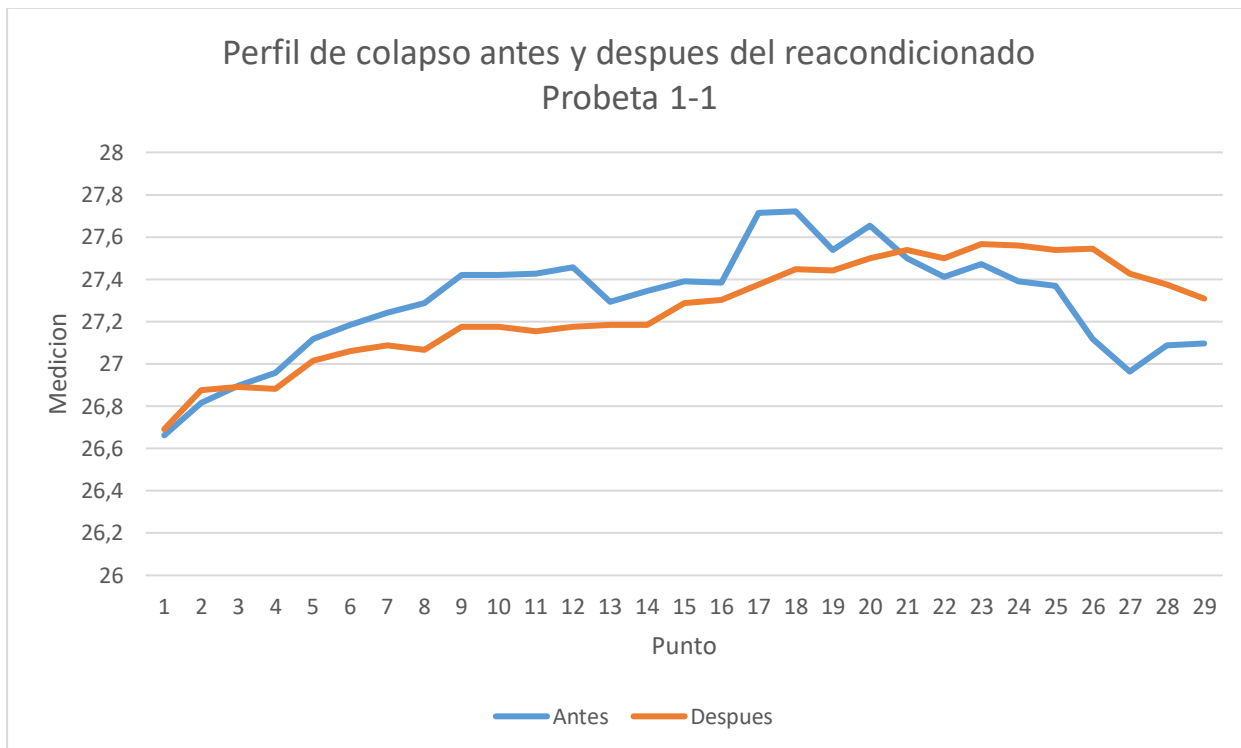


Gráfico 24 Perfil de colapso antes y después del reacondicionado Probeta 1-1

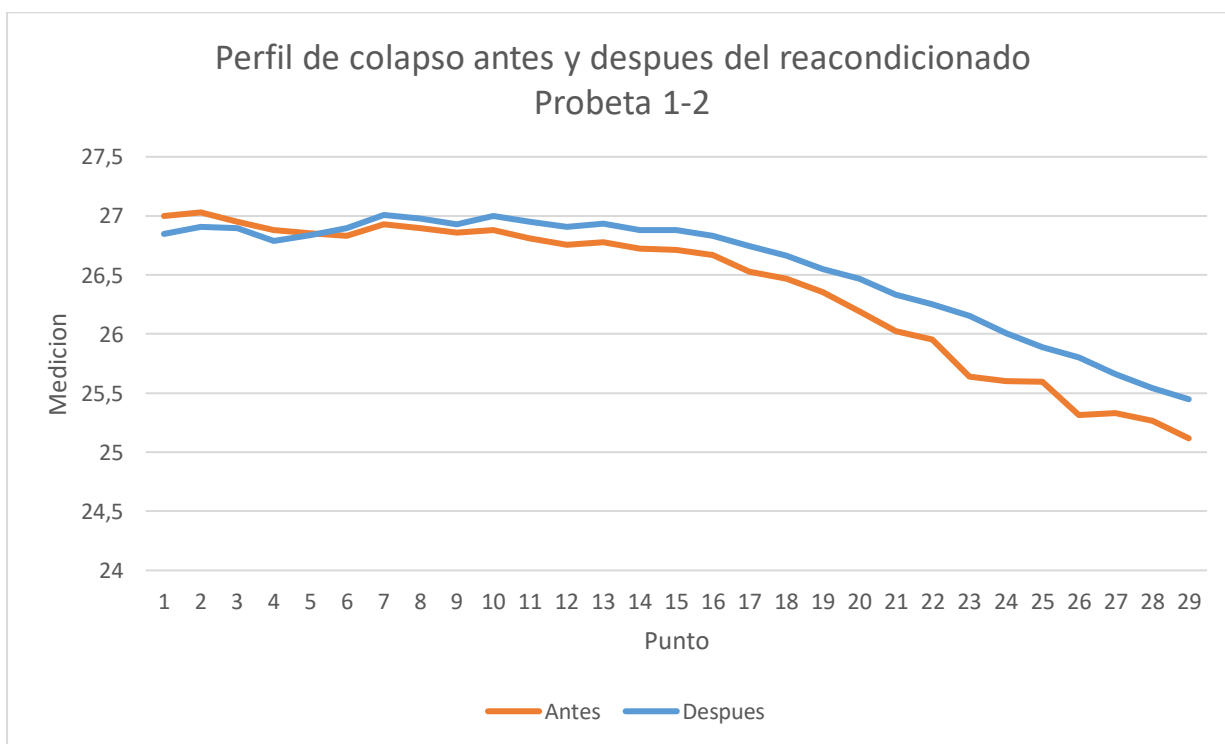


Gráfico 25 Perfil de colapso antes y después del reacondicionado Probeta 1-2

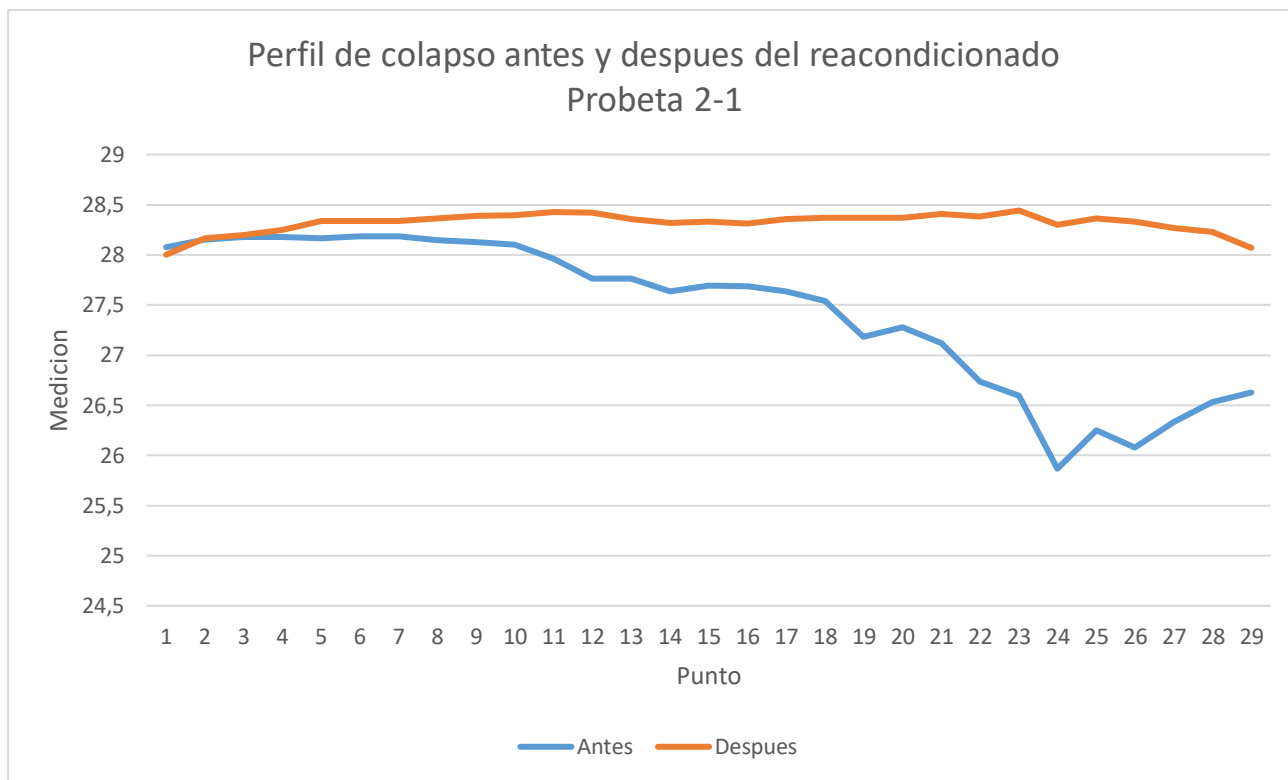


Gráfico 26 Perfil de colapso antes y después del reacondicionado Probeta 2-1

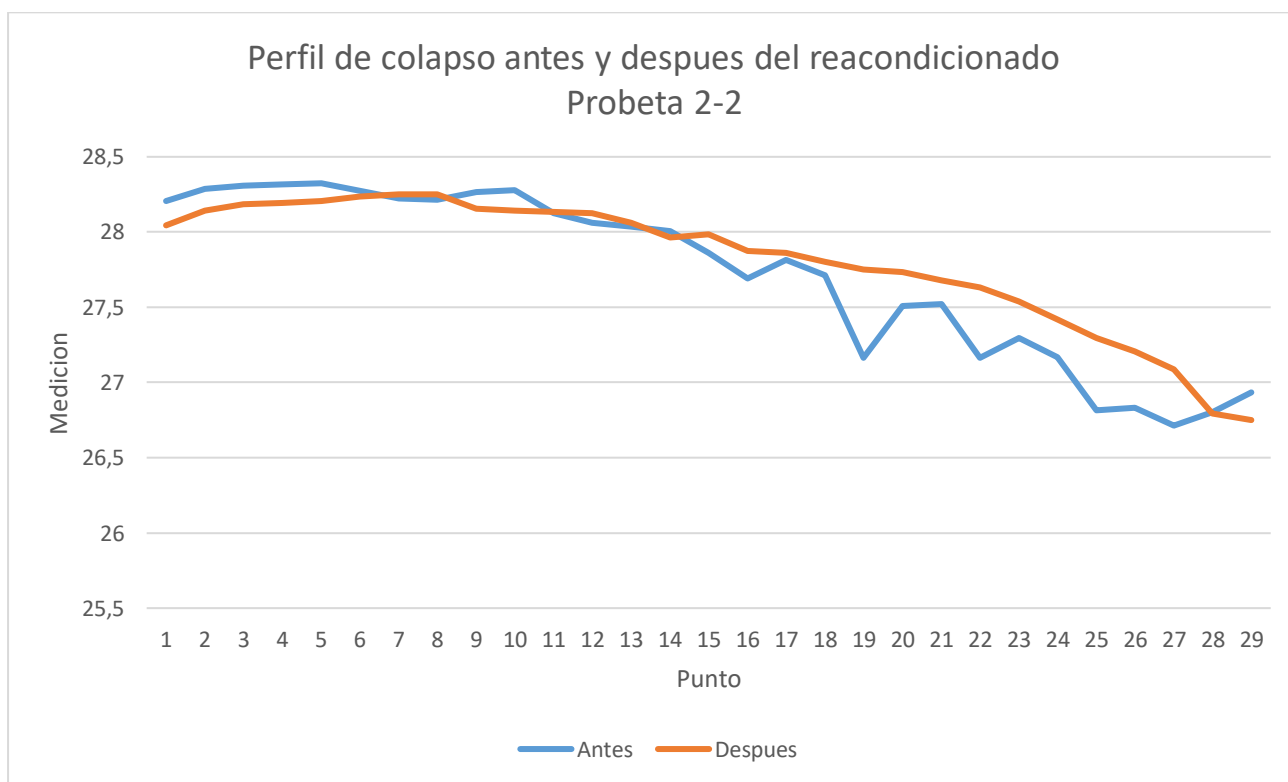


Gráfico 27 Perfil de colapso antes y después del reacondicionado Probeta 2-2

Anexo D Humedad de la madera y medición de colapso

Determinación del contenido de humedad

La determinación del contenido de humedad (CH) en la madera se hace considerando sólo los valores del agua libre y de saturación o higroscópica. Es decir, en la práctica, la madera se considera totalmente seca cuando al secarla en estufa a 103 ± 2 grados centígrados alcanza su peso constante (Manual del grupo andino para el secado de madera, 1989).

El contenido de humedad es la cantidad de agua presente en la madera; se expresa como porcentaje del peso de la madera seca o anhidra, y al emplear el método gravimétrico, se determina como:

$$CH(\%) = \frac{\text{masa agua}}{\text{masa anhidra}} = \frac{(M_i - M_o)}{M_o} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

- CH Humedad de la madera expresada como un porcentaje de su peso anhidro (%).
- Mi Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial (kg).
- Mo Peso de la madera en estado anhidro; peso final o constante (kg).

Determinación de colapso

Para la determinación del colapso que se produjo en cada probeta no se pudo utilizar un criterio que estuviera dado por alguna norma, ya que las normas NCh 992 of 72 y NCh 993 Of 72 nos dan una definición de este y la forma de calcularlo es con la contracción que se mide antes y después de reacondicionar, sin embargo, para este trabajo se necesitaba monitorizar el colapso durante el transcurso de los ensayos y caracterizar la rugosidad que se produce en la madera durante el proceso de secado, por lo que primero obtuvo el perfil de colapso, para ello se caracterizó la rugosidad que presentaba la sección transversal de la pieza estudiada a través de los equipos que se muestran en el apartado 3.1.2, 3.1.3 y 3.1.4. Posteriormente en cada perfil de colapso se observó que existían otros defectos tales como acanaladura que podían modificar los datos de colapso, por lo que fue necesario determinar la mayor diferencia entre cresta y valle de cada probeta y esta se consideró como el colapso máximo.

A continuación, se muestra un ejemplo de cómo se obtuvo el colapso máximo para la probeta 1-1 en el día 20 del proceso de secado, como se observa la mayor diferencia entre valle y cresta que no puede ser considerado como alabeo esta entre el punto 16 y 18.

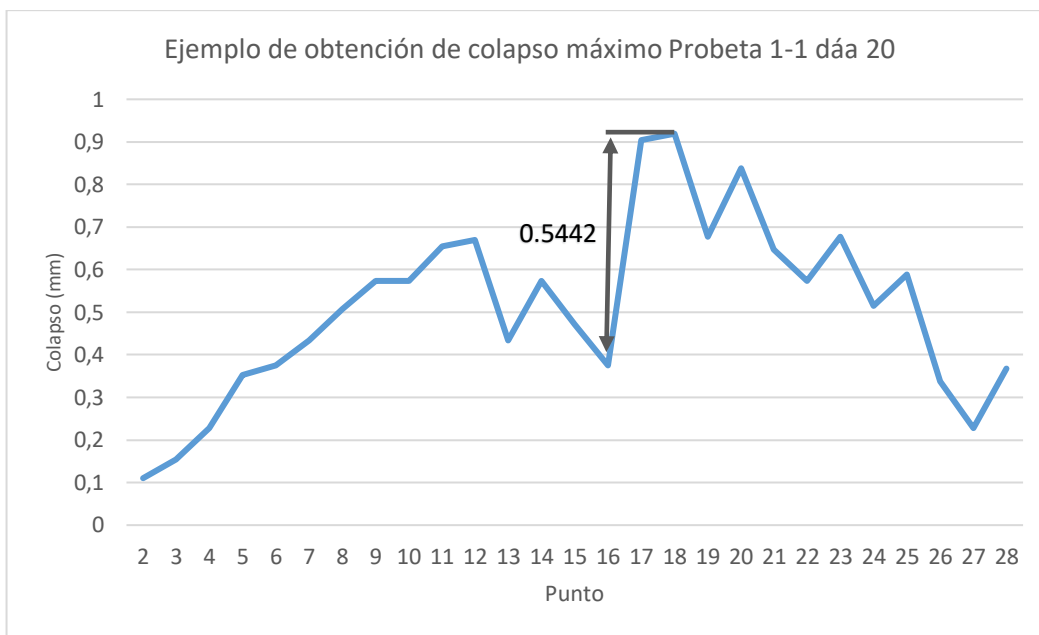


Gráfico 28 Ejemplo de obtención de colapso máximo Probeta 1-1, día 20