

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. ING. MECÁNICA



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

**DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE
MADERA PINUS RADIATA IMPREGNADA CON MATERIAL DE
CAMBIO DE FASE**

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

Profesor Guía:

Sr. Carlos Hernán Salinas Lira

IGNACIO JAVIER BARRA REYES

Concepción, 19 de Mayo de 2016



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
DEPTO. INGENIERIA EN MECANICA

*Dedicada con todo mi amor a
mis padres; Jorge y Claudia por
su apoyo inconmensurable y
absoluto.*



SUMARIO

La presente tesis de pregrado fue realizada en el contexto de la investigación y exploración en el área de acondicionamiento térmico, asociado al Grupo de Investigación en Tecnologías del Secado y Tratamientos Térmicos de la Madera de la Universidad del Bío-Bío junto con la colaboración del Dr. Diego Vasco. En esta investigación se estudia el mejoramiento de propiedades de la madera, específicamente del tipo de *Pinus Radiata*, al ser impregnada con un material orgánico de cambio de fase (O-PCM). Se incluyen desarrollos de ensayos experimentales de impregnación, de cómo la anatomía y estructuras de la madera afectan a este proceso, además de la determinación de las propiedades térmicas de la madera posterior a la impregnación.

El primer objetivo fue determinar experimentalmente si es posible la impregnación de madera con un O-PCM del tipo parafínico, en particular octadecano. Caracterizar la cinética de la impregnación para cuatro niveles de presión (1, 2, 3 y 4 bar), en dos direcciones de flujo (radial y tangencial) a temperatura constante de 50 (°C). La madera es recogida de la albura de un árbol de tipo *Pinus Radiata* crecido en la región del Bío-Bío y dimensionada en base a la norma chilena Nch631.of2003, *Madera Preservada-Extracción de muestras*.

Para evaluar las propiedades térmicas de las piezas de madera impregnada con octadecano se utilizó un equipo llamado *KD2-Pro*, con el cual fue posible determinar la conductividad térmica, calor específico, Resistividad térmica y difusividad de las piezas tratadas.

Por otro lado, también se monitorearon visualmente los frentes de impregnación en base a la pigmentación del octadecano con anilina, con la finalidad de poder observar la penetración del PCM en la madera.



CONTENIDOS

	Pág.
SUMARIO	I
CONTENIDOS	II
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. HIPÓTESIS DEL TRABAJO Y OBJETIVOS	3
2.1 HIPÓTESIS DEL TRABAJO	3
2.2 OBJETIVO GENERAL	3
2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
III. MARCO TEÓRICO	5
3.1 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	5
3.1.1 <i>Almacenamiento de Calor Latente.....</i>	<i>6</i>
3.1.2 <i>PCM Orgánicos.....</i>	<i>7</i>
3.1.3 <i>Parafinas</i>	<i>9</i>
3.1.4 <i>Octadecano</i>	<i>10</i>
3.2 MADERA.....	11
3.2.1 <i>Estructura de la Madera, Pinus Radiata</i>	<i>12</i>
3.2.2 <i>Contenido de Humedad.....</i>	<i>18</i>
3.2.3 <i>Densidad</i>	<i>18</i>
3.2.4 <i>Contracción</i>	<i>19</i>
3.2.5 <i>Propiedades Térmicas</i>	<i>21</i>
3.3 PROCESO DE IMPREGNACIÓN DE LA MADERA	22
3.3.1 <i>Método de Célula Vacía</i>	<i>22</i>
3.4 ESTRUCTURA ANATÓMICA Y PERMEABILIDAD	24
3.5 PARAMETROS MACROSCÓPICOS Y MICROSCÓPICOS.....	26
3.5.1 <i>Parámetros macroscópicos</i>	<i>27</i>
3.5.2 <i>Parámetros Microscópicos.....</i>	<i>28</i>
3.6 SISTEMAS PASIVOS DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO.....	30
IV. MATERIALES Y METODOLOGÍA DE IMPREGNACIÓN	33



4.1	OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE PROBETAS	33
4.2	PROCESO DE IMPREGNACIÓN	36
4.3	RESULTADOS DEL PROCESO DE IMPREGNACIÓN	38
V.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	43
5.1	ANÁLISIS MACROSCÓPICO	43
5.1.1	<i>Resultados análisis macroscópico</i>	45
5.2	EVALUACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS	45
5.2.1	<i>Resultados evaluación de propiedades térmicas a 20 [°C]</i>	48
5.2.2	<i>Resultados evaluación de propiedades térmicas a 30 [°C]</i>	52
5.3	ANÁLISIS DE PENETRACIÓN CON TINTA	56
5.3.1	<i>Flujo tangencial</i>	57
5.3.2	<i>Flujo Radial</i>	59
VI.	CONCLUSIONES	60
VII.	BIBLIOGRAFÍA	62
VIII.	APÉNDICE	63
IX.	ANEXO	71



I. INTRODUCCIÓN

La madera es un material homogéneo, poroso, anisótropico e higroscópico. Posee una compleja estructura natural, diseñada para servir a las necesidades funcionales de un árbol en vida. Ha sido utilizada por el hombre desde la antigüedad, de forma intensiva como material de construcción por sus distintas propiedades.

Al ser un material orgánico, la madera está formada por distintas células y la conformación y disposición de estas son las responsables de sus diferentes propiedades, las que varían con la dirección. Las paredes celulares están constituidas fundamentalmente por celulosa, que forma cadenas alargadas. Contienen también lignina y hemicelulosas, las que se ubican entre las cadenas de celulosa, donde además puede haber agua.

Si bien existe una gran gama de especies, el trabajo se centra en el estudio de las coníferas (*Pinus Radiata*), que corresponde a una clasificación de orden superior, que abarca aquellas especies cuyos frutos son estructuras llamadas conos.

Al analizar la anatomía de la madera se distinguen sectores bien definidos, de los cuales destacan la *Albura* y *Duramen*, siendo las partes más utilizadas en el área de la construcción. Si bien sus propiedades mecánicas y los contenidos de humedad no difieren en demasía, al momento de ser tratada, ya sea en procesos de secado o de impregnación, se prefiere la presencia de la *Albura*, ya que ésta tiene una mayor penetración que el *Duramen*.

Las propiedades térmicas de la madera son principalmente la conductividad térmica, la dilatación térmica y el calor específico, las que se ven afectadas por el contenido de humedad presente.



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
DEPTO. INGENIERIA EN MECANICA

La madera al ser sometida a tratamientos adecuados destaca como un material cálido y duradero, mejorando la calidad de vida de las personas al utilizarse como material de construcción. Gracias a su baja conductividad térmica se evitan pérdidas de calor, reduciendo la necesidad de calentar o enfriar los ambientes.

Las propiedades térmicas de la madera se pueden modificar, con miras a la mejora de la eficiencia energética en la calefacción de espacios. Este tema se ha vuelto indispensable debido al cambio climático que afecta al planeta, por el uso extensivo de recursos energéticos.

En esta misma línea, adquiere mucha importancia el estudio de los PCM (Phase Change Materials) los que tienen la particularidad de que a ciertas temperaturas pueden cambiar de fase (líquido-sólido), almacenando o liberando energía.



II. HIPÓTESIS DEL TRABAJO Y OBJETIVOS

2.1 HIPÓTESIS DEL TRABAJO

El presente proyecto se centra en el estudio de investigación en el área de acondicionamiento térmico, en el cual se busca determinar las propiedades termofísicas de madera "*Pinus radiata*" impregnada con un material orgánico de cambio de fase, específicamente Octadecano. Para la impregnación se sostiene que la anatomía de la madera: espesor de pared celular, porcentaje de madera tardía, canales resiníferos, traqueidas, etc. Influyen en la permeabilidad y retención de la madera.

2.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluación experimental de propiedades termofísicas de probetas de madera del tipo "*Pinus Radiata*" impregnadas con Octadecano, con la finalidad que en el futuro dicha información pueda ser útil a nuevos proyectos de investigación relacionados a sistemas pasivos de acondicionamiento térmico.



2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudio de propiedades anatómicas y térmicas de “Pinus Radiata” y Octadecano, además de sistemas pasivos de acondicionamiento.
- Diseño de experimento de impregnación de probetas de “Pinus Radiata” con Octadecano.
- Evaluación de propiedades termo físicas de probeta impregnada en Hexadecano.
- Análisis de datos obtenidos de las mediciones de las propiedades térmicas de las probetas impregnadas con Octadecano



III. MARCO TEÓRICO

3.1 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Existe una serie de alternativas para el almacenamiento de energía térmica, para luego utilizarla cuando sea necesario. La base de los sistemas de almacenamiento es usar materiales que absorban y liberen una gran cantidad de calor por unidad de volumen.

Estos sistemas pueden ser utilizados para balancear la demanda de energía durante el día y la noche. La energía térmica tiene más valor cuanto más alta es la temperatura, debido a que con el aumento de temperatura aumentan las posibilidades del uso del calor para los diversos procesos.

Una aplicación del almacenamiento que ha ido ganando importancia en los últimos años con el desarrollo de nuevos materiales, es la climatización a través de la manipulación de la inercia térmica de edificios. En este tipo de aplicaciones, el almacenamiento sirve para absorber puntas de temperaturas ambientales, con el fin de ayudar a mantener un clima agradable en espacios habitables.

En cualquier caso, es importante para el funcionamiento del sistema de almacenamiento térmico, que los procesos sean reversibles, es decir, que el hecho de introducir y extraer calor se pueda repetir un gran número de veces.



3.1.1 Almacenamiento de Calor Latente

Para almacenar el calor latente, es necesaria la utilización de un material de cambio de fase o PCM, cuya característica principal es que su temperatura de cambio de fase ocurre a temperatura constante, parámetro importante al momento de seleccionar un PCM. Existe una amplia variedad con distintas ventajas y desventajas, por lo que es necesario conocer otros requerimientos de la aplicación para seleccionar el PCM más adecuado.

Estos materiales (PCM) poseen un alto calor latente que, a la temperatura de cambio de fase (sólido \leftrightarrow líquido), son capaces de almacenar o liberar grandes cantidades de energía (hasta 100 veces más que si emplea el calor sensible). La fusión y solidificación se caracteriza por un cambio de volumen, que por lo general es inferior al 10%. Luego, si para el recipiente que contiene al PCM se ha considerado ésta variación de volumen de forma que el material pueda expandirse con espacio suficiente, entonces la presión del líquido no cambia significativamente y por lo tanto la fusión y solidificación del PCM ocurren a una temperatura constante. De ésta forma, todo el calor que se transfiere al material, es ocupado en efectuar el cambio de fase del mismo y no en aumentar su temperatura, la cual se mantiene constante.

El *Gráfico N°3.1* muestra un esquema del proceso de acumulación de energía y compara la diferencia de la cantidad de calor almacenado como calor latente y calor sensible. (Mehling H., 2008)

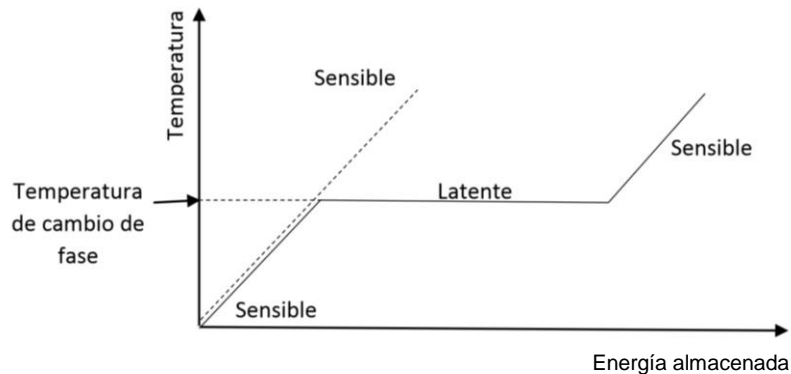


Gráfico N°3.1. Almacenamiento de energía como calor latente para el caso de cambio de fase.

La figura muestra el proceso de absorción de energía de un material que se encuentra inicialmente en estado sólido. Cuando el calor es adicionado al material, éste comienza a almacenar energía en forma de calor sensible, lo que se traduce en un aumento de su temperatura, pero alcanzada la temperatura de cambio de fase, la energía comienza a ser almacenado en forma de calor latente, lo que significa que la temperatura se mantendrá constante hasta que se complete el cambio de fase. Luego de esto, vuelve a producirse el almacenamiento en forma de calor sensible.

3.1.2 PCM Orgánicos

Estos PCM son químicamente estables, no corrosivos, no tóxicos, y tienen un elevado calor latente de fusión. Dentro de los PCM orgánicos se pueden encontrar tres grupos de sustancias diferentes: parafinas, ácidos grasos, y mezclas orgánicas. Los PCM orgánicos (O-PCM) poseen características que los hacen muy útiles en aplicaciones de almacenamiento de calor. Cuentan con una alta estabilidad química en comparación con las sustancias



inorgánicas, funden y solidifican convenientemente, sin necesidad de adicionar agentes nucleantes (sustancia química que se utiliza para crear núcleos y formar cristales), por otro lado no sufren subenfriamiento o histéresis (enfriamiento por debajo del punto de solidificación pero sin solidificar, lo que ocurre por la formación de estructuras cristalinas durante un estado termodinámicamente metaestable).

Tabla N°3.1. Ventaja y Desventaja de los PCM Orgánicos (Mehling H., 2008)

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Fáciles de usar	Calor latente y entalpía más bajos
Estabilidad térmica y química	Baja conductividad térmica
No sufren de Subenfriamiento	Amplio rango de fusión*
No necesitan agente nucleador para solidificar	Grandes cambios de volumen durante el cambio de fase
No son corrosivos	Reacción potencial con hormigón
Reciclables y ecológicamente inocuos	Potencialmente combustibles
	Más caros

**Especialmente las parafinas, por las diferentes longitudes de sus cadenas de carbono.*

De todas formas estos materiales tienen algunas desventajas. La más importante es que son inflamables y emiten gases nocivos durante su combustión, además, sufren envejecimiento por oxidación, cambios de olor y de volumen apreciables. Aunque estos inconvenientes se han eliminado con el tiempo, por ejemplo se ha visto que el envejecimiento por oxidación de los PCM puede ser disminuido usando un oxidante adecuado. La Tabla N°3.1 resume ventajas y desventajas de los PCM orgánicos.



3.1.3 Parafinas

Las parafinas son básicamente alcanos sólidos refinados, que muestran por lo general dos rangos de enfriamiento, uno más estrecho para un breve periodo de tiempo, y otro más extenso que ocurre durante un periodo más amplio. Ambos se conciben como una transición de líquido a pastoso y pastoso a sólido, respectivamente y parte del calor latente total de fusión se almacena en la sustancia durante cada una de estas transiciones.

La mayoría de las investigaciones centran su enfoque en materiales orgánicos del tipo alcanos, ceras o parafinas, lo que ha proporcionado una amplia información sobre sus propiedades termofísicas, ya que desde el punto de vista práctico, cuentan con mayor grado de utilización debido a su temperatura de fusión lo que se ejemplifica en la siguiente *Tabla N°3.2*:

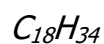
Tabla N°3.2. Temperatura y calor de fusión de algunos PCMs

PCM	Temperatura de fusión (K)	Q de fusión (KJ/kg)
Hexadecano	291	236
Heptadecano	295	214
Octadecano	301	244
Parafina	293-333	200
RT25	298	147

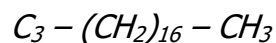


3.1.4 Octadecano

El octadecano es un hidrocarburo parafínico lineal de la familia de los alcanos. Líquido incoloro, soluble en alcohol, acetona y éter e insoluble en agua. Se utiliza principalmente como disolvente y en síntesis de compuestos orgánicos. Su fórmula química molecular es:



O bien:



Su estructura consiste en una cadena lineal de 18 átomos de carbono, con tres hidrógenos unidos a cada uno de los dos átomos de carbonos extremos y dos hidrógenos (*Figura N°3.2*) unidos a los restantes 16 átomos de carbono como lo muestra la *Figura N°3.1*. El peso molecular del octadecano es de 226,41 g/mol.

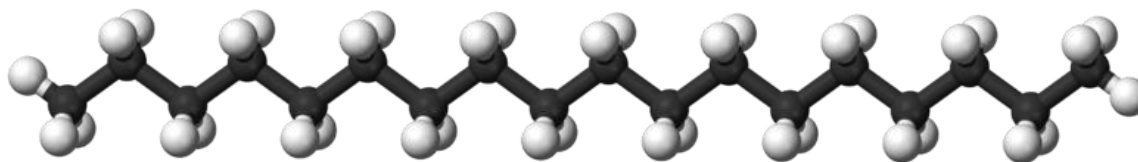


Figura N°3.1. Molécula de octadecano



Figura N°3.2. Forma estructural del octadecano

El octadecano a temperatura ambiente de 300 K (27 [°C]) es un líquido incoloro insoluble en agua. En la *Tabla N°3.3* se muestran algunas propiedades físicas del octadecano. Los valores aquí mencionados sirven de referencia para el desarrollo experimental, en el que se utiliza octadecano de 99% de pureza.

Tabla N°3.3 Propiedades del Octadecano

Propiedades	Unidad
Punto de Fusión	301-303 [K] (28-30[°C])
Punto de Ebullición	590 [K] (317[°C])
Punto de Inflamabilidad	438 [K] (165[°C])
Temperatura de Ignición Espontánea	508 [K] (235[°C])
Densidad	0,777 [g/ml]
Calor Especifico	1,712 [kJ/kg K]

3.2 MADERA

La madera es un material orgánico, no homogéneo, compuesto de células conformadas fundamentalmente, por celulosa y lignina. La celulosa constituye la estructura de las paredes celulares, mientras que la lignina es el material ligante entre las células. Las

células de madera son huecas y en las coníferas tienen una longitud comprendida entre 3 a 5 [mm] de longitud y 0,030 a 0,045 [mm] de espesor (*Figura N°3.3*). Esta conformación celular es la responsable de las diferentes respuestas estructurales dadas por la madera, según sea el sentido y dirección en que se examine.

Para la investigación la madera a utilizar corresponde al tipo de *Pinus Radiata*.

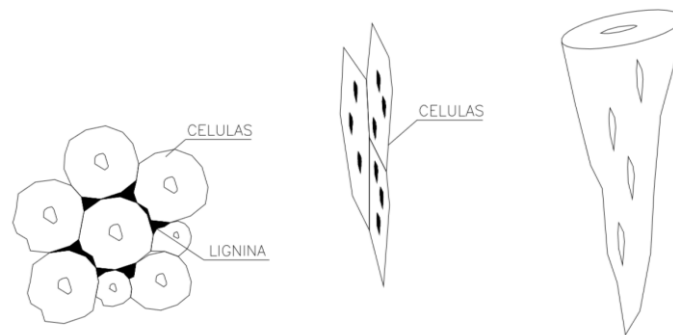


Figura N°3.3. Formas de las células de la madera

3.2.1 Estructura de la Madera, *Pinus Radiata*

Al analizar a simple vista la sección transversal de un tronco de un árbol de conífera, como se muestra en la *Figura N°3.4*, es posible distinguir sectores bien definidos.

- **Corteza Exterior:** Capa exterior que cumple una labor de protección a los agentes climáticos, patológicos, etc.

- **Corteza interior:** Tejido comprendido entre el cambium y la corteza. Su labor principal es transportar la savia elaborada de las hojas hacia el resto de los tejidos.
- **Cambium:** También denominado Cambio. Se encuentra adyacente al xilema y es el tejido generador de nuevas células. Hacia el interior del leño se forman células xilemáticas, mientras que hacia la corteza, células del floema. Constituye una capa muy delgada, difícilmente distinguible a simple vista.
- **Albura:** Zona exterior de la madera, constituida por tejido vivo, encargado de la translocación del agua, con nutrientes hacia las hojas. Corresponde al xilema activo y en muchas especies es distinguible por tener un color más claro.

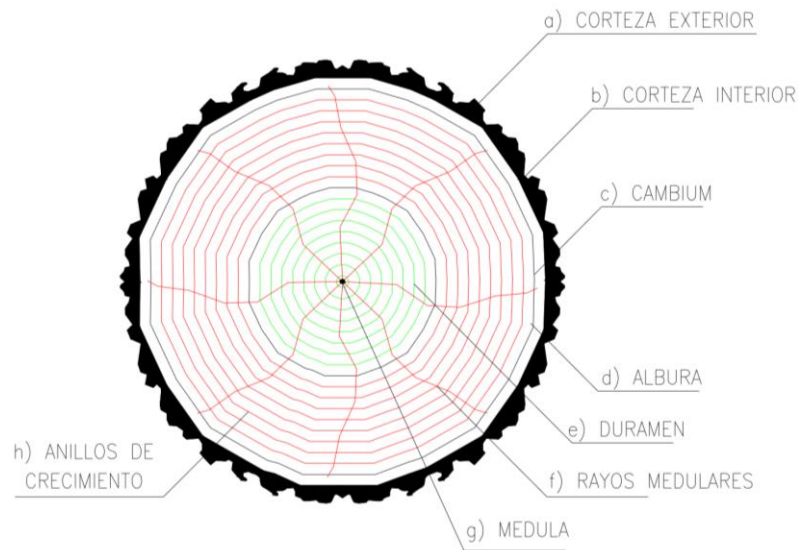


Figura N°3.4. Sección transversal de un árbol

- **Duramen:** Zona más interna del tronco, constituida por tejido similar a la albura, pero que está inactivo y ha sufrido un proceso de deposición de diversas sustancias en sus células, llamado duramenización.

- **Médula:** Tejido inactivo en el árbol adulto, que normalmente ocupa una posición central. Tiene escasas cualidades mecánicas.

- **Anillos de Crecimientos:** Anillos concéntricos a la médula, presentes en especie donde las estaciones climáticas son marcadas. Cada anillo está compuesto por una zona más clara y otra más oscura. Registra el crecimiento estacional.

Para estudiar la estructura tanto macroscópica como microscópica de la madera, dada su heterogeneidad, se establecen sentidos anatómicos para distintas direcciones. Como se indica en la *Figura N°3.5*, mostrándose direcciones longitudinal, radial y tangencia de una troza.

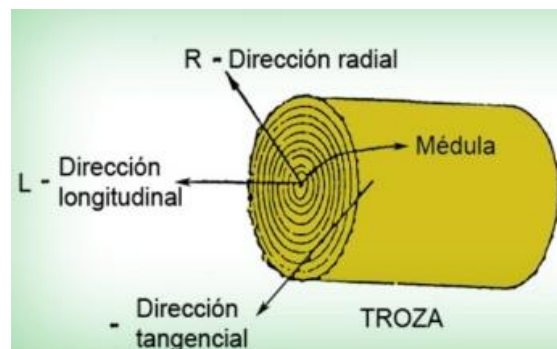


Figura N°3.5. Sentidos anatómicos



De misma manera se establecen planos de corte para identificar las caras en una pieza de madera (*Figura N°3.6*):

- **Cara tangencial:** Tangencial a los anillos de crecimiento o perpendicular a los radios
- **Cara radial:** Paralelo a los radios o perpendicular a los anillos de crecimiento
- **Cara longitudinal o transversal:** Perpendicular al eje del árbol

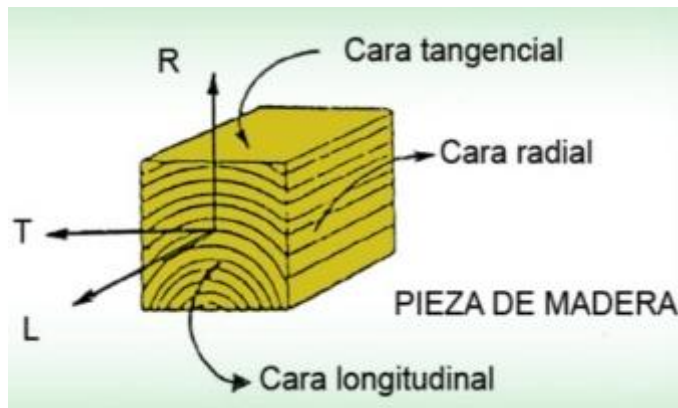


Figura N°3.6. Planos de corte

Las especies leñosas que constituyen el grupo de las coníferas presentan un plano leñoso ordenado y simple, constituido principalmente por traqueidas longitudinales y radios leñosos. En particular el pino radiata, presenta además de las anteriores, células epiteliales de canales resiníferos y radio traqueidas (*Figura N°3.7*).

Las traqueidas longitudinales son elementos alargados de gran longitud y diámetros de aproximadamente 100 veces menores que el largo. Las paredes celulares son delgadas en la madera temprana, y gruesas en madera tardía, los factores que influyen en el espesor de la pared celular son: heredabilidad, condiciones ambientales en que crecen y madurez del cambium. Las condiciones de crecimiento están directamente relacionadas con las condiciones ambientales en donde el árbol se desarrolla.

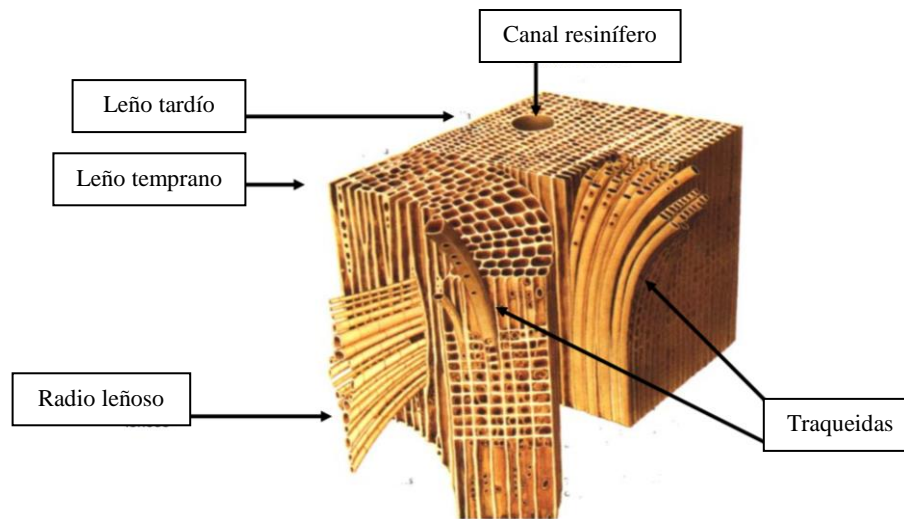


Figura N°3.7. Estructura microscópica tridimensional de la madera de coníferas.

En un anillo de crecimiento, las traqueidas longitudinales formadas en la primavera y a principios del verano (madera temprana) son más cortas, más anchas en su dirección radial, de paredes más delgadas y lúmenes más anchos lo que la hace más porosa al tener células más grandes y de menor densidad que la madera formada a mediados y fines de verano madera tardía (*Figura N°3.8*).

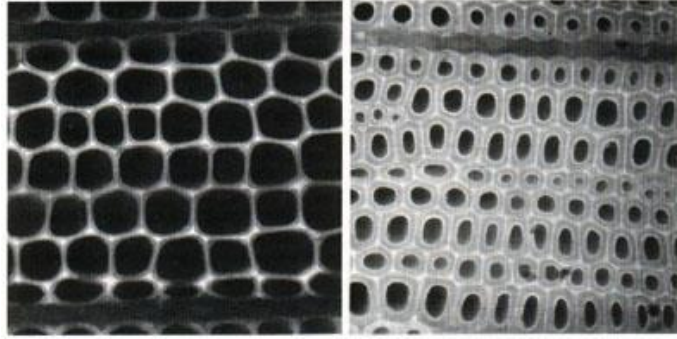


Figura N°3.8. Diferencia de espesor entre madera temprana (Izquierda) y madera tardía (Derecha).

Para contenidos de humedad equivalentes, las propiedades mecánicas de la albura y duramen no tienen diferencias significativas y la madera proveniente de ambas zonas, tienen pesos específicos similares. Sin embargo si la madera ha de ser tratada, es preferible la presencia de albura, debido a que el movimiento del preservante hacia el interior es mejor que en el duramen, confiriendo mayor penetración y retención de éste. En la Figura 3.9 muestra las diferentes estructuras a nivel microscópico presentes en la madera.

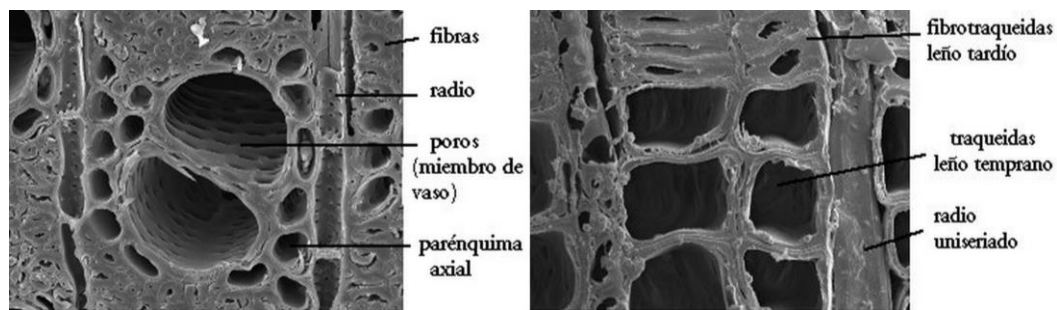


Figura N°3.9. Esquema microscópico de un trozo de madera



3.2.2 Contenido de Humedad

La madera es un material higroscópico. Absorbe o entrega agua según sean las condiciones de temperatura y humedad relativa del ambiente. En una primera etapa la madera se encuentra con sus cavidades y paredes celulares llenas de agua (savia). Esta propiedad hace que el contenido de humedad de la madera sea variable, dependiendo del ambiente en que se encuentre. Al iniciarse un proceso de pérdida de humedad, la madera entrega al ambiente el agua libre contenida en sus cavidades, hasta alcanzar un punto denominado como “punto de saturación de la fibra” (PSF).

El contenido de humedad de la madera en el PSF es 28 % - 30 % en promedio. Por debajo del PSF y al continuar el proceso de evaporación, se alcanza un punto en el cual el proceso se detiene, llamado “Humedad de Equilibrio”. La pérdida de humedad por debajo de este estado de equilibrio sólo podrá conseguirse por medio de tratamientos de secado en hornos o estufas.

3.2.3 Densidad

La madera es un material poroso, celular y por lo tanto la cantidad de sustancia sólida que tiene un volumen de madera, es un buen indicador de sus propiedades físicas, térmicas e higroscopicidad. Debido a que tanto la masa como el volumen de la madera varían significativamente de acuerdo con el contenido de humedad, es importante expresar la condición bajo la cual la densidad es obtenida.



La *Tabla N° 3.4* muestra los valores obtenidos para la densidad anhidra, básica y nominal de las especies madereras de pino crecidas en Chile, de acuerdo a ensayos realizados por los diferentes laboratorios del país.

Tabla N°3.4. Densidad para madera de especies de Pino crecidos en Chile

ESPECIE	DENSIDAD [kg/m ³]		
	Anhidra	Básica	Nominal
Pino Radiata	454	429	459
Pino Oregón	412	344	477

3.2.4 Contracción

La norma NCh 176/3 define la “contracción normal”, como la disminución de dimensiones que sufre la madera al perder humedad bajo el PSF, expresada como porcentaje de la dimensión de la madera en estado verde. También define el “colapso”, como la disminución irregular de dimensiones que sufre la madera al perder humedad en las primeras etapas de secado, se caracteriza por el aplastamiento de las paredes celulares. La suma de la contracción normal más el colapso, es la “contracción total” (*Gráfico N°3.2*).

La determinación de las dimensiones que alcanza una pieza de madera a contenidos de humedad inferiores a 20 % se obtiene mediante los coeficientes de contracción lineal (k). Para la especie de Pino Radiata se determinó de forma experimental¹ el coeficiente de contracción (k), con una variación del 1% del contenido de humedad, tomando valores de 0,29 para contracción tangencial y 0,20 para contracción radial.

¹ *Ensayos Realizados por Universidad de Chile, Departamento Tecnología de la Madera.*

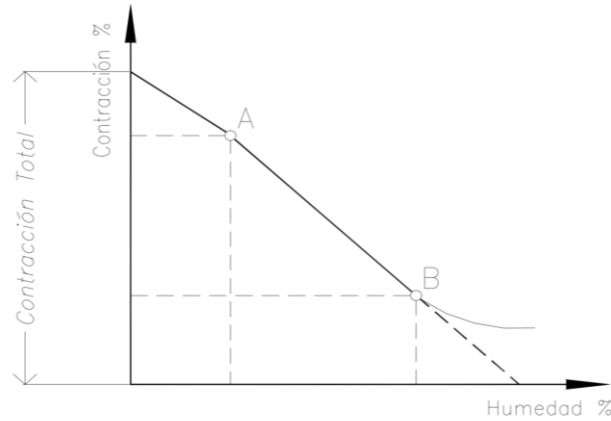


Gráfico N°3.2. Curva de contracción lineal

AB = Porción recta de la curva, cuya pendiente corresponde al coeficiente de contracción lineal k (comprendida aproximadamente entre 5 % y 20 % de humedad).

La contracción longitudinal provocada por una variación en el contenido de humedad de la madera alcanza valores reducidos y es despreciable en términos prácticos. La *Figura 3.10* muestra la deformación de la madera al secarse según su corte.

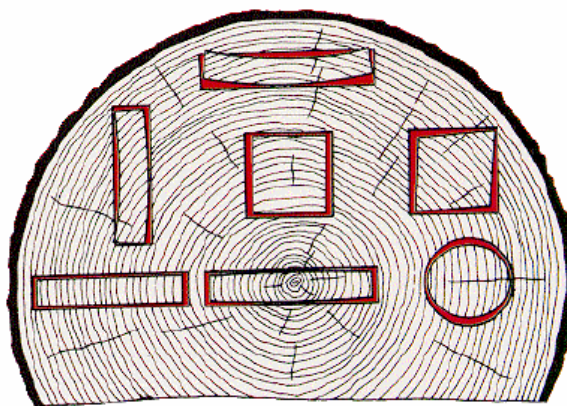


Figura N°3.10. Diferencias entre las contracciones



3.2.5 Propiedades Térmicas

Las principales propiedades térmicas de la madera son: conductividad, calor específico y dilatación térmica.

- a) **Conductividad:** Es la capacidad para transmitir el calor y se representa por el coeficiente de conductividad térmica. Las maderas con baja densidad conducen menos calor que las de densidad alta. La conductividad térmica es afectada también por el contenido de humedad de la madera. La conductividad térmica a lo largo de las fibras es dos a tres veces mayor que en el sentido perpendicular a las fibras. Para el *Pinus Radiata* la conductividad térmica es del orden de 0,16 [W/(m K)]

- b) **Calor Específico de la madera:** Se define como la cantidad de calor necesaria para aumentar en 1 [°C] la temperatura de 1 kilogramo de madera. Indica la mayor o menor capacidad que presenta una sustancia para almacenar energía. Existen estudios que han demostrado que el calor específico de la madera no depende de las especies madereras, ni de su densidad, pero sí varía con la temperatura. Además, el calor específico se incrementa cuando la madera contiene agua (mayor humedad).

- c) **Dilatación Térmica:** La madera se dilata o contrae al aumentar o disminuir la temperatura. La dilatación es menor que la de otros materiales pero no es despreciable. El coeficiente de dilatación para la madera seca, en dirección paralela a las fibras, varía entre 30 y 50 [nanómetros] por cada grado Celsius.



3.3 PROCESO DE IMPREGNACIÓN DE LA MADERA

Numerosas investigaciones afirman, que los efectos de los tratamientos de la madera, sobre la resistencia de ella, se deben principalmente al método de aplicación del preservante y no a las sales de impregnación usadas. El debilitamiento que se origina en la resistencia se debe a las altas temperaturas y presiones inherentes a algunos procesos de tratamientos, a fin de obtener una satisfactoria impregnación.

En este caso la madera es impregnada con octadecano, de la familia de los alcanos, con características similares a la de los preservantes solubles en líquidos orgánicos, de las cuales se destacan que son resistentes a la lixiviación con agua y es posible pintar la madera tratada después de cierto periodo.

3.3.1 Método de Célula Vacía

Es uno de los métodos más antiguos de impregnación de madera, el cual consiste en introducir la madera dentro de un autoclave de impregnación cerrado herméticamente. Luego se hace funcionar una bomba de vacío para extraer el aire del cilindro y de la madera, para facilitar el ingreso del líquido impregnante. En general el vacío aplicado es de 0,8 [Bar].

Aprovechando el vacío realizado, se llena el cilindro con el impregnante cuidando que no entre aire, se debe llenar cuando la bomba de vacío está en funcionamiento, por lo tanto, la bomba debe contar con un depósito de intercalado para evitar que penetre impregnante en la bomba. El *Gráfico N° 3.3* explica el proceso de este método, como varía la presión en el tiempo.

Método Brethell o Célula Vacía

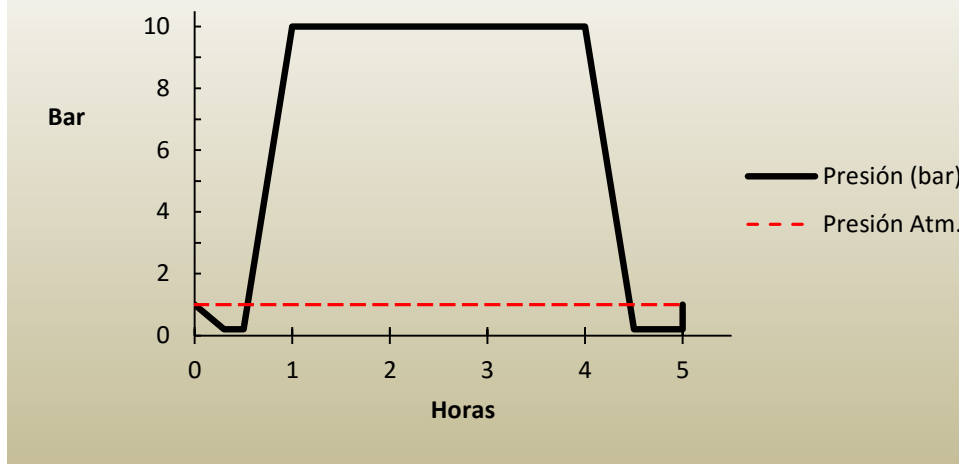


Gráfico N°3.3. Diagrama Método Brethell o Célula vacía

Una vez lleno el cilindro, se aplica alta presión hasta 10 [Bar], para promover el ingreso al poro de una cantidad adicional de impregnante. Esta presión debe ser mantenida el tiempo necesario hasta que el preservante penetre en la madera.

Luego, el impregnante pasa al tanque de almacenamiento y finalmente se hace un nuevo vacío para extraer el exceso de preservante y dejar secar la madera para facilitar su manipulación.

Existe un procedimiento llamado método Lowry (Gráfico N° 3.4) en el cual no se usa el vacío inicial. El tanque se llena directamente a la presión atmosférica y luego se aplica presión, siguiendo los mismos pasos anteriores. Este método se utiliza en maderas semipermeables, para obtener retenciones y penetraciones intermedias. (*DOCUMENTO TÉCNICO N°2, Preservación de la madera, p. 59*)

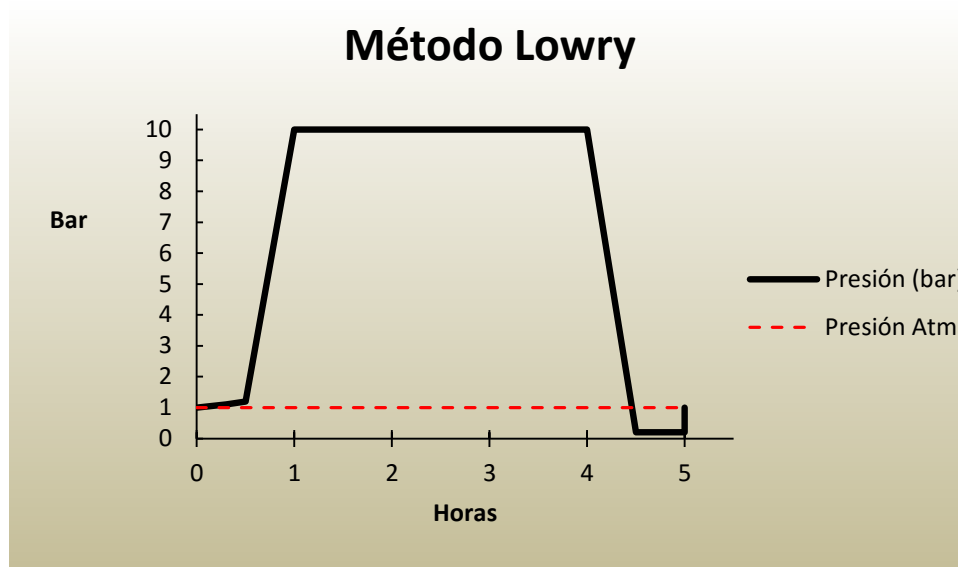


Gráfico N°3.4. Diagrama Método Lowry

3.4 ESTRUCTURA ANATÓMICA Y PERMEABILIDAD

Uno de los problemas más complejos en relación al tratamiento, es que la madera ofrece una resistencia variable al paso de un fluido, incluso para trozos distintos de una misma especie. Estas diferencias están asociadas, en parte al menos, a diferencias anatómicas precisas entre las maderas en cuestión; como la porción albura/duramen, madera temprana/tardía o madera juvenil y adulta. También es posible que las características físicas y químicas influyan en la facilidad de impregnación o secado de la madera.

La permeabilidad depende fundamentalmente de las características anatómicas; tamaños de cavidades celulares, lúmenes, punteaduras, placas de perforación de los vasos entre otros. En las coníferas las aberturas en la pared celular son los conductos de flujo más importantes, su número, tamaño y grado de obstrucción determina el rango de permeabilidad.



Las coníferas son maderas blandas relativamente homogéneas y consisten esencialmente de dos elementos principales de formas celulares: **traqueidas**, que desempeñan la función de conducción de savia y soporte mecánico en el árbol vivo, y **radios** que sirven para almacenar y conducir en sentido horizontal los nutrientes. Ciertas maderas de este grupo se caracterizan por la presencia de canales verticales y radiales, llamados **canales resiníferos**, en otras especies existe también **células de parénquima**, diferentes de las que rodean, que limitan los conductos de resinas, pero se desarrollan más bien de manera aislada. (*Hunt et al., 1962*).

La eficacia de los canales, para el transporte de fluidos depende de su tamaño, número y distribución, así como de su continuidad. Para las maderas de canales resiníferos normales, el transporte eficaz depende no solo de la permeabilidad de los canales, sino además de la permeabilidad de las células que lo rodean. Al impregnar la madera, en la *albura*, el fluido se mueve a través de los canales resiníferos longitudinales y radiales, al igual que por algunas traqueidas de la madera temprana y tardía, siendo la conducción no solo por los radios de traqueidas, sino que también por traqueidas adyacentes a las punteaduras bordeadas. La mayoría de las traqueidas conductivas, se encuentran adyacentes a los radios. En tanto en el *duramen* el transporte del fluido se presenta mediante los canales resiníferos y las traqueidas que rodean los canales. Se explica que la vía primaria de flujo en la *albura* son los canales resiníferos. Además se confirma que la conducción por radios uniseriados, es tan buena como en radios fusiformes, en la albura del *pino radiata*.

La permeabilidad en la madera de las coníferas es afectada por el secado, ya sea natural o artificial. Sin embargo el efecto del secado sobre la permeabilidad estriba en el efecto de aspiración de las punteaduras. Las llamadas punteaduras de la madera, son los conductos de flujo más importantes en las especies coníferas, su número, tamaño y grado de obturación determina el rango de permeabilidad.



La permeabilidad es diferente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal. Se ha determinado que la permeabilidad tanto en la albura como en el duramen es mayor en sentido longitudinal que en sentido radial, siendo significativa la diferencia en la albura. Uribe, 2001, determinó que en *Pinus radiata D.Don* crecido en Chile, la permeabilidad es mayor en el sentido radial en comparación con la dirección tangencial.

3.5 PARAMETROS MACROSCÓPICOS Y MICROSCÓPICOS.

Un medio poroso se define como aquel compuesto por dos fases: una matriz sólida y en su interior un sistema de huecos (poros), pudiendo estar interconectados o no. Estos últimos pueden tener geometrías, tamaños y tipologías variadas.

La geometría de un sistema poroso describe las formas y tamaños de sus poros así como la rugosidad de la superficie. Mientras que la topología describe el modo en que dichos poros están conectados entre sí.

Se definen ciertas cantidades útiles para describir la morfología de los materiales porosos, las que se dividen en macroscópicas y microscópicas. Las propiedades macroscópicas más importantes son la porosidad, el área superficial específica y la permeabilidad.



3.5.1 Parámetros macroscópicos

Porosidad

Quizás la propiedad más simple de un sistema poroso sea su porosidad φ , la cual se define como la fracción de volumen ocupada por los poros. Es importante distinguir entre esta porosidad y la porosidad accesible φ_A , la cual es la fracción de φ a la cual puede llegarse desde la superficie externa del sistema. Dependiendo del tipo de medio poroso, la porosidad puede variar desde prácticamente 0 hasta un valor cercano a 1. La porosidad de un sistema puede ser medida por diversos métodos, siendo el más simple el método directo.

Área Superficial Específica

El área superficial específica de un material, S_m , es definida como el área intersticial de la superficie de los poros por unidad de masa² y es uno de los principales parámetros para evaluar la capacidad adsorptiva de los materiales.

Tortuosidad

La tercera característica importante de un medio poroso es la tortuosidad τ , la que es usualmente definida como la razón entre la longitud real que debe recorrer una partícula de fluido para unir dos puntos del medio poroso y la distancia en línea recta entre dichos puntos.

² Indistintamente se define como unidad de peso, volumen o masa

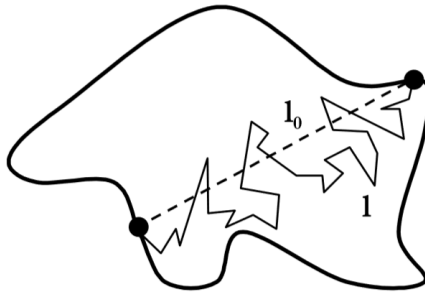


Figura N°3.11. Longitud real recorrida (por una partícula) comparada con distancia en línea recta.

A partir de la *Figura N°3.11*, se define la tortuosidad como: $\tau = l/l_0$. Como es de esperar, τ depende de φ . Si φ es muy baja, τ es muy grande. Generalmente τ no puede ser medido experimentalmente y en la mayoría de los modelos clásicos de flujo y transporte en medios porosos lo tratan como un parámetro ajustable.

3.5.2 Parámetros Microscópicos

La estructura microscópica de un medio poroso es difícil de tratar debido a las irregularidades que se encuentran en la geometría de los poros y en la forma en que se conectan entre sí. Los trabajos recientes en este campo están ayudando a explicar y correlacionar varios fenómenos en medios porosos. Hablar del “diámetro” de un poro o de su “tamaño” es una simplificación que está muy lejos de la realidad, ya que los poros naturales de formas geométricas simples y regulares son la excepción. En años recientes, y en contraste a esto último, se han logrado sintetizar nuevos materiales porosos de geometrías muy simples, en forma de cilindros, de esferas, etc.



Poros

La prueba directa de la existencia de pequeños espacios vacíos en el interior de la materia es obtenida a partir de las fotografías tomadas a secciones del material con microscopios ópticos, electrónicos o de fuerza atómica, dependiendo del tamaño del poro.

Si se efectúa un examen cuidadoso de un medio poroso, es común encontrarse con dos tipos de entidades dentro de lo que usualmente se denomina como poro. Ellas son las cavidades, donde reside la mayor parte de la porosidad del medio, y los canales o gargantas, que conectan a las cavidades entre sí. Para representar este intrincado espacio se asigna una geometría a las cavidades y otra a los canales (*Figura N°3.12*).

Todo el volumen de una cavidad porosa puede asignarse al nodo correspondiente o, alternativamente, puede repartirse entre sus enlaces. El primer modo de reparto es comúnmente usado en el modelado de fenómenos de catálisis y adsorción, mientras que la segunda opción es la más usada en los procesos de transporte de fluidos en medios porosos. Por supuesto, también existen modelos en los que tanto los sitios como los enlaces pueden tener un volumen asociado.

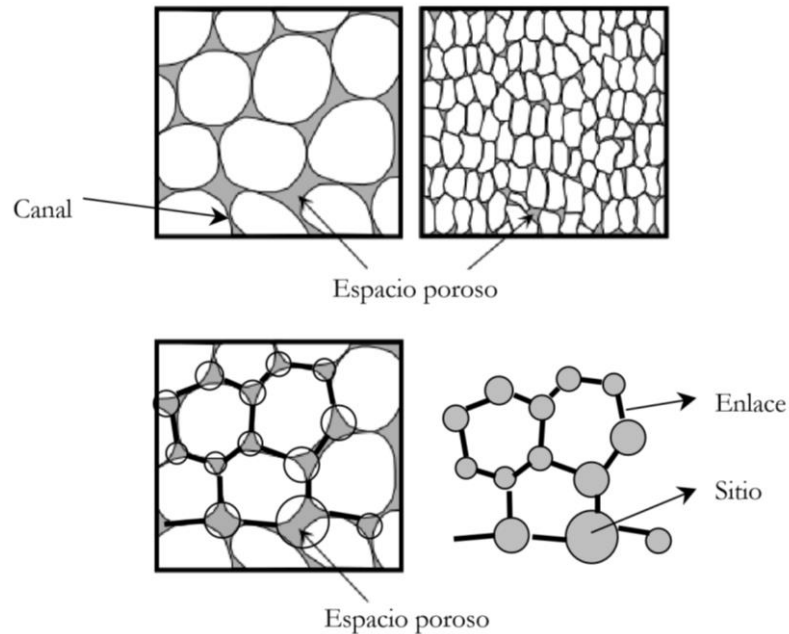


Figura N°3.12. Esquema de espacios porosos

3.6 SISTEMAS PASIVOS DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO.

Los problemas actuales de suministro de energía y la necesidad de proteger el medio ambiente hacen necesario el uso de los recursos energéticos. Dado el alto consumo energético asociado al acondicionamiento térmico de edificaciones, es necesario desarrollar nuevos materiales y alternativas de generación energética para disminuir dicho consumo y el impacto ambiental.

El diseño pasivo es un método utilizado en arquitectura con el fin de obtener edificaciones que logren su acondicionamiento ambiental mediante procesos naturales. Utilizando el sol, los vientos, las características propias de los materiales de construcción, la orientación, entre otras.



Dado que un edificio se construye con el fin de proteger a las personas del clima exterior creando un clima interior. Cuando las condiciones del exterior impiden el confort del espacio interior se recurre a sistemas de calefacción o refrigeración. El diseño pasivo busca minimizar el uso de estos sistemas.

Las dificultades a vencer para extender el uso del diseño pasivo de acondicionamiento térmico, son dos: el que la radiación sea baja y por lo tanto la superficie de colección resulta en general el factor económico de mayor peso, y la intermitencia de su disponibilidad que hace necesario el uso de acumuladores de consumo para satisfacer una demanda continua.

Hacia 1956 Félix Trombe abrió el campo de los sistemas pasivos con su pared colectora, luego perfeccionada como pared Anvar–Trombe–Michel, la cual tiene un efecto calefactor en invierno y refrigeración en verano. *(Díaz V., 2005)*

Aceptando que la tecnología del acondicionamiento térmico tiene verdadera importancia para conformar espacios arquitectónicos confortables y que el uso de la energía solar puede cambiar mucho dicha tecnología, es claro que el diseño de las edificaciones, puede sufrir grandes modificaciones en los próximos años.

De los muchos casos de viviendas ejecutadas y donde han estado presentes criterios de sistemas pasivos se destacan los siguientes aspectos:

- a) Recolección de la energía a través de grandes superficies vidriadas que resultan expuestas en invierno y cubiertas en verano por el lado exterior, con elementos que evitan la incidencia de la radiación sobre estos “colectores”
- b) Acumulación de energía en la masa de la construcción. Los muros gruesos de adobe se aíslan térmicamente por el lado exterior y los pisos de ladrillo cerámico se asientan sobre una capa de adobe aislada en su parte inferior. Para incrementar el poder de acumulación de la estructura se adosan en partes expuestas a los rayos solares, bidones de agua embutidos en elementos de adobe.



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
DEPTO. INGENIERIA EN MECANICA

- c) El uso de aislaciones móviles livianas que durante la noche de invierno cubren internamente las superficies vidriadas, conservando dentro de la vivienda el calor que se desprende de los muros y pisos. Estos elementos son asociados por mecanismos manuales de gran sencillez.
- d) El aprovechamiento de la convección natural para producir en verano corrientes que permiten la entrada de aire exterior. La gran inercia térmica de los elementos de construcción contribuyen a este efecto, absorbiendo el calor del ambiente en verano.



IV. MATERIALES Y METODOLOGÍA DE IMPREGNACIÓN

Se realizaron ensayos de impregnación de probetas de madera de “Pinus Radiata” con material de cambio de fase (PCM), en particular con octadecano. Los principales equipamientos utilizados en los experimentos son: 1) Calderín de mediana presión (4 bar), 2) Cámara de climatización, 3) Estufa, 4) Compresor de aire, 5) Balanza de precisión ($\pm 0,1g$) y 6) Equipamientos de corte (sierra circular de mesa). Los equipamientos son mostrados en el *ANEXO A*. La caracterización de la cinemática de la impregnación ha sido realizada durante un periodo de 24 horas, bajo cuatro niveles de presión (1,2 ,3 y 4 bar), dos direcciones de flujo (radial y tangencial) y a temperatura constante (50°C). También, se monitorearon visualmente frentes de impregnación en base a la pigmentación con anilina del PCM.

4.1 OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE PROBETAS

La madera utilizada para los ensayos de impregnación es Pinus Radiata, obtenida de la albura de un árbol de aproximadamente 10 años de edad (*Figura N°4.1*), crecido en la región del Bío-Bío. El dimensionamiento de la madera ha sido realizado en el Pabellón Tecnológico de la Madera (PTM) de la Universidad del Bío-Bío.



Figura N°4.1. Rollizo de Pinus Radiata

En base a la norma chilena Nch631.of2003, *Madera Preservada- Extracción de muestras*, se determinaron las dimensiones de las piezas de maderas a impregnar (25x25x100 mm), ver *Figura N°4.2*. Las piezas de madera seleccionadas tienen superficies sanas, fibras rectas y uniformes, ubicadas a una distancia de 150 mm de nudos u otros defectos que pueden influir en la absorción.

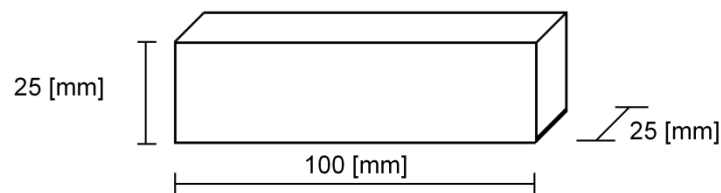


Figura N°4.2. Dimensiones de probeta

Una vez obtenidas las piezas de madera, estas han sido marcadas, pesadas y posteriormente sumergidas en agua durante 72 horas aproximadamente.



Para efectos de alcanzar la saturación de sus fibras y determinar su peso saturado, el agua utilizada para este fin ha sido previamente clorada, para evitar de esta manera formaciones de colonias de microorganismos (como algas y bacterias), los cuales pueden producir daños en la estructura de la madera, perjudicando la calidad de las probetas.

Luego, las piezas de madera han sido secadas en una estufa (ver *Figura N°4.3*) para efectos de determinar su peso seco según indica la norma chilena Nch176/1.of2003, *Madera-Parte 1: Determinación del contenido de humedad*. Se estima que bajo estas condiciones la madera tenga un contenido de humedad (C.H.) del orden de 6% p/p.



Figura N°4.3. Secado de probeta en estufa según norma chilena

A continuación, a cada probeta se le sellan cuatro de sus caras con silicona para alta temperatura (ver *Figura N°4.4*), a fin de propiciar un flujo unidireccional de impregnante, sentido radial para todos los casos. Para realizar este paso ha sido necesaria la utilización de guantes de látex desechables y una espátula, con el fin de lograr una aplicación óptima de la silicona en las probetas. Finalmente, las piezas listas son pesadas para obtener la masa de madera seca con material sellante.

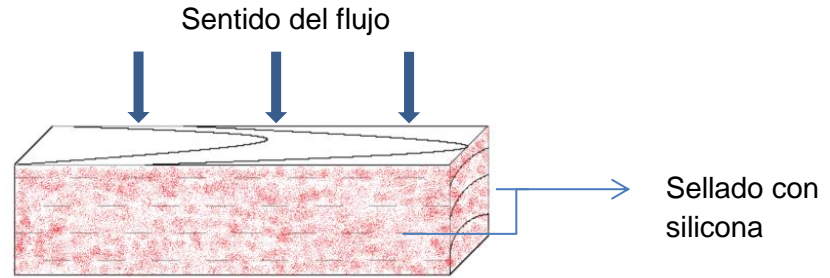


Figura N°4.4. Sellado de probetas

4.2 PROCESO DE IMPREGNACIÓN

La metodología empleada consiste en someter dos o cuatro piezas de madera a impregnación de octadecano bajo el *método Lowry* (célula vacía), con condiciones de presión y temperatura controladas. La temperatura ha sido de 50 ± 2 [°C] para todos los casos. Las presiones se han establecido en 1, 2, 3 y $4 \pm 0,1$ [bar]. Por lo que se han realizado cuatro ensayos, cada uno con una duración de 24 horas.

Para lograr la temperatura deseada, se ha utilizado un climatizador o cámara de climatización, con el cual se precalentaba el octadecano con grado reactivo de 99% de pureza (*Figura N°4.5*) hasta su estado líquido y obtener una temperatura de operación uniforme para todos los elementos que se encontraban dentro de la cámara. La temperatura ha sido monitoreada con termocuplas, tanto dentro de la cámara de clima como en su exterior.

Alcanzado una temperatura de equilibrio dentro de la cámara de clima, el O-PCM se introduce al calderín junto con dos probetas para cada uno de los ensayos (a excepción de la presión de 3 bar, en la cual se han introducido cuatro probetas). Las probetas han sido



previamente selladas con silicona para alta temperatura y pesadas antes de iniciar el proceso de impregnación. A determinados tiempos de impregnación las probetas han sido retiradas cuidadosamente del calderín, quitando todo exceso de impregnante en la superficie de las piezas con papel absorbente, y posteriormente pesadas. Los tiempos de muestreo han sido 10 minutos, 1, 3 y 24 horas. Finalmente, las piezas de madera ya impregnadas deben ser protegidas con una película de material plástico para evitar la interacción con el ambiente.



Figura N°4.5. Botella de Octadecano



4.3 RESULTADOS DEL PROCESO DE IMPREGNACIÓN

La *Tabla N°4.1* muestra el resultado del control de variación de masa que presenta cada una de las probetas impregnadas a tiempos determinados. El sentido del flujo de impregnación para todas las probetas es radial (*R*). En la *Tabla N°4.2* se puede observar que el contenido de impregnante de cada probeta sometida a diversas presiones a diferentes tiempos de impregnación.

El porcentaje de concentración se determina según la cantidad de O-PCM que cada pieza de madera contiene, expresada como porcentaje del peso anhidro o seco al horno de la pieza de madera, según *Ecuación N°4.1*. Las piezas que presentan más de 100% de concentración, se debe a que retienen más Octadecano que su propio peso.

$$\text{Concentracion (\%)} = \frac{\text{Peso madera impregnada} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100 \quad \text{Ecuación N°4.1}$$

De forma similar, en términos gráficos, son mostradas por las *Gráficas N°4.1 a)-d)*, representando cada una de las curvas de adsorción que caracterizan la cinética de la impregnación de la madera con PCM.

Cabe señalar que a las probetas se le asignaron números para diferenciarlas unas de otras en la misma evaluación y letras para distinguir a qué presión fueron sometidas (A=4 bar; B=2 bar; etc.). Además, en las *Gráficas N°4.1* se observa en la descripción de las leyendas se identifican las probetas con (*R*) (ej.: 1A (*R*), 3A (*R*), etc.) la cual se refiere que el flujo de impregnación es en sentido radial.

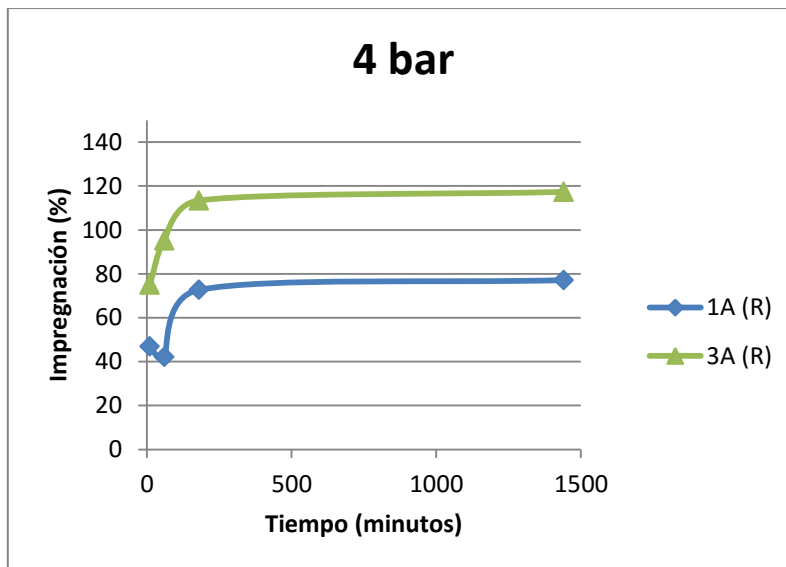


Tabla N°4.1. Gravimetría de experimentos de impregnación de flujo radial (gramos)

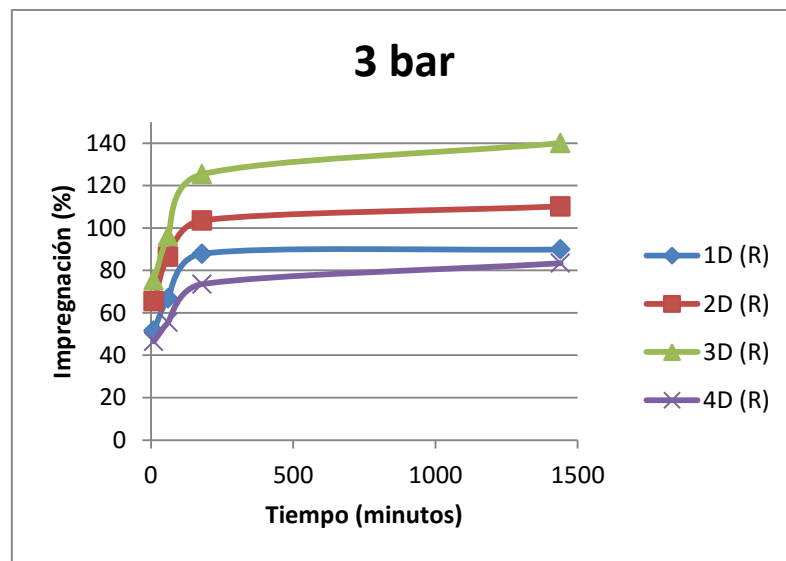
Probeta	Peso (gramos)								
	Presión (bar)	Saturado	Seco		Diferencia	Tiempo de Impregnación			
			Sin Silicona	Con Silicona		10 min	1 h	3 h	24 h
1A	4	69,31	19,47	20,87	1,40	32,06	31,06	37,44	38,37
3A		67,00	25,03	26,37	1,34	47,52	52,81	57,62	58,65
1B	2	71,10	20,32	24,62	4,30	31,76	32,66	35,74	36,16
3B		69,41	19,52	23,36	3,84	30,26	31,09	33,86	34,89
1C	1	65,17	19,23	22,52	3,29	26,45	27,02	27,80	28,88
3C		66,00	25,35	28,38	3,03	34,33	34,89	35,66	36,95
1D	3	65,78	20,26	22,71	2,45	33,18	36,27	40,52	40,92
2D		68,41	19,96	22,80	2,84	35,86	40,05	43,48	44,80
3D		63,30	22,97	25,57	2,60	42,88	47,65	54,37	57,74
4D		67,95	20,37	23,35	2,98	32,83	34,67	38,33	40,34

Tabla N°4.2. Concentración vs tiempo de impregnación (%)

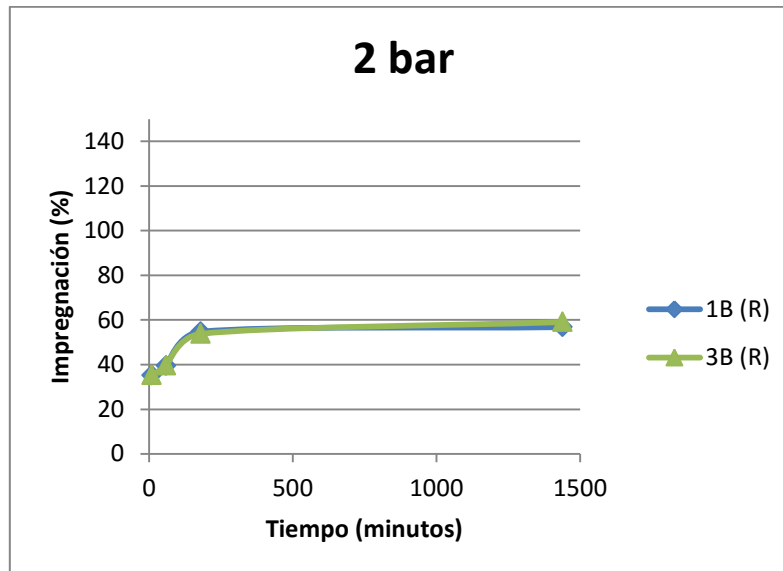
Probetas	Contenido de Impregnante (%)			
	Tiempo (minutos)			
	10	60	180	1440
1A	46,91	42,12	72,69	77,14
3A	75,12	95,18	113,42	117,33
1D	51,68	66,93	87,91	89,88
2D	65,43	86,42	103,61	110,22
3D	75,36	96,13	125,38	140,05
4D	46,54	55,57	73,54	83,41
1B	35,14	39,57	54,72	56,79
3B	35,35	39,60	53,79	59,07
1C	20,44	23,40	27,46	33,07
3C	23,47	25,68	28,72	33,81



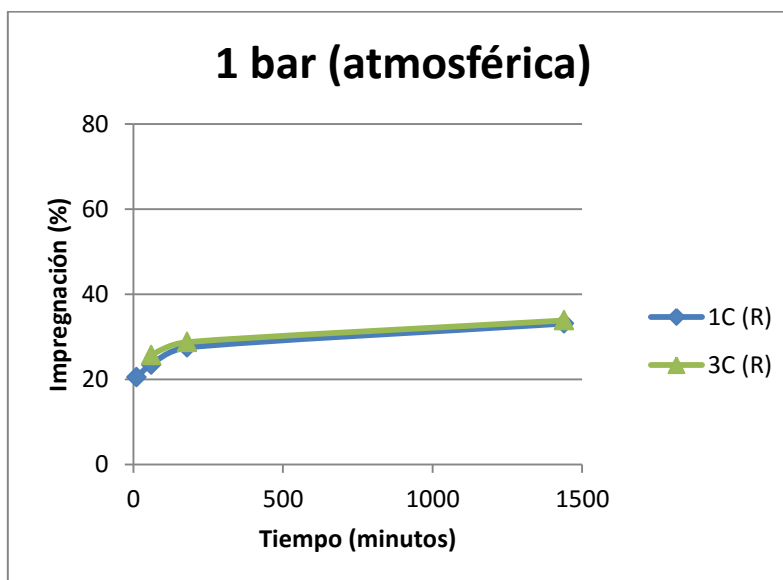
a) Curva característica para presión de impregnación de 4 [bar]



b) Curva característica para presión de impregnación de 3 [bar]



c) Curva característica para presión de impregnación de 2 [bar]



d) Curva característica para presión de impregnación de 1 [bar]

Gráficas N°4.1 Curvas de adsorción que caracterizan la cinética de impregnación de la madera con PCM (a. 4 bar, b. 3 bar, c. 2 bar y d. 1 bar)

Al analizar los datos de las tablas anteriores, *Tablas N°4.1 y N°4.2*, y compararlos entre si se observa que a una presión de 3 [bar] se produce la mayor cantidad de retención de PCM por parte de las probetas (*Figura N°4.7*).

Lógicamente se pensaría que a mayor presión mayor penetración, pero se infiere que al someterse las piezas de madera sobre la presión de 3 [bar] ocurre una rotura de los capilares, impidiendo una buena penetración y retención del impregnante, que es el caso de lo ocurrido en las probetas sometidas a 4 [bar] que presentan una retención menor de la esperada.

De esta forma, la anatomía juega un rol preponderante al momento de evaluar el ensayo de impregnación y se establece que la presión de 3 [bar] es el punto donde la impregnación de madera con octadecano presenta una mejor retención.

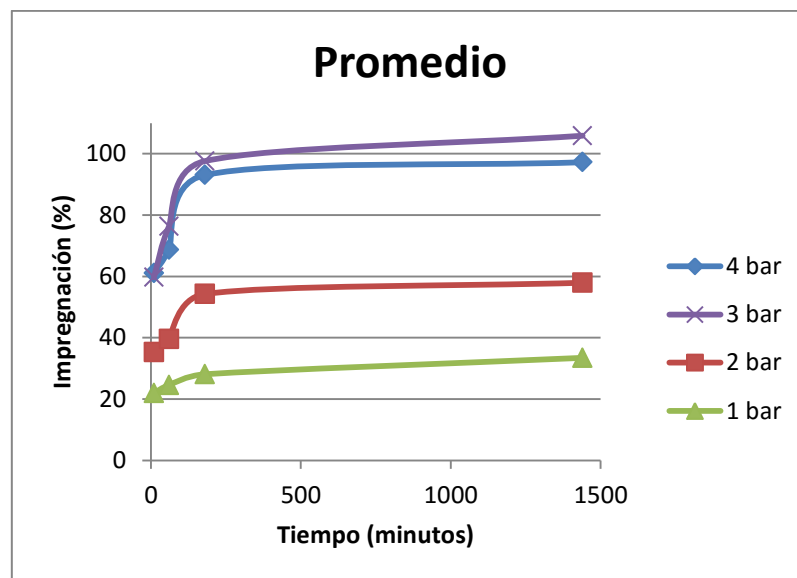


Figura N°4.7. Impregnación promedio para cada presión de ensayo.



V. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS MACROSCÓPICO

Este análisis consiste en un análisis visual, sin ayuda de un microscopio, que tiene como finalidad evaluar si la estructura macroscópica de la madera tiene influencia significativa en el proceso de impregnación, comparando el porcentaje de impregnación de las probetas con las estructuras presentes observadas en ellas.

Este análisis ha sido realizado en las probetas ya impregnadas, de esta manera se ha determinado la cantidad de anillos presente en cada pieza de madera. Además midiendo sobre la superficie transversal de la probeta, se ha determinado aproximadamente que cantidad de madera temprana y tardía estaba presente en cada una de ellas.

Tabla N°5.1. Análisis Macroscópico de probetas impregnadas

Probeta	N° anillos	milímetros		M. Temprana V/S M. Tardía
		M. Tardía	M. Temprana	
1B	2	5	20	80% - 20%
3C	2	7	18	72% - 28%
3B	1	4	21	84% - 16%
1C	2	6	19	76% - 24%
1A	1	3	22	88% - 12%
4D	2	4	21	84% - 16%
1D	2	6	19	76% - 24%
2D	2	5	20	80% - 20%
3A	2	7	18	72% - 28%
3D	3	7	18	72% - 28%



Con este análisis no es posible determinar si la madera de las probetas es joven, adulta o de transición. En la *Tabla N°5.1* se observa la cantidad de madera temprana y madera tardía presente en cada pieza de madera.

Con los resultados obtenidos luego del análisis macroscópico, se ha determinado cuales probetas presentan una mayor proporción de madera tardía, que es la madera donde ocurre mejor la impregnación. Al ser comparados estos resultados con los obtenidos anteriormente (cantidad de impregnación de cada probeta) se puede dar una explicación a los casos de aquellas piezas que han presentado una mayor cantidad de retención del impregnante al ser sometidas a las mismas condiciones de impregnación.

Al observar la *Tabla N° 5.1* las probetas impregnadas a 4 [bar] se observa que la probeta “1A” presenta solo 12% de madera tardía, alcanzando un nivel de retención menor (77,14%) que el caso “3A”, en el cual la probeta presenta 28% de madera tardía y alcanza una retención del impregnante mucho mayor (117,33%).

Tabla N°5.2. Contenido de Impregnante en las probetas

Contenido de Impregnante (%)				
Probetas	Tiempo (minutos)			
	10	60	180	1440
1A	46,91	42,12	72,69	77,14
3A	75,12	95,18	113,42	117,33
1D	51,68	66,93	87,91	89,88
2D	65,43	86,42	103,61	110,22
3D	75,36	96,13	125,38	140,05
4D	46,54	55,57	73,54	83,41
1B	35,14	39,57	54,72	56,79
3B	35,35	39,60	53,79	59,07
1C	20,44	23,40	27,46	33,07
3C	23,47	25,68	28,72	33,81



5.1.1 Resultados análisis macroscópico

Tras este análisis, se han identificado piezas de madera impregnadas que no han presentado los resultados esperados, como es el caso de 1D, 2D y 3C. Al presentar mayor cantidad de madera tardía no tuvieron la retención esperada. Preliminarmente, se podría que es importante considerar si la madera de las probetas corresponde a madera joven, de transición o adulta, lo cual no pudo ser determinado en este análisis, sin embargo se infiere que dichas piezas corresponden a madera de transición.

5.2 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS

La realización de la evaluación de propiedades térmicas se ha llevado a cabo en el laboratorio de Materiales de Almacenamiento Térmico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Santiago de Chile.

Las piezas de madera impregnada utilizadas para los análisis térmicos son descritas en el capítulo anterior, con dimensiones y tratamientos en base a la norma chilena Nch631.of2003, Madera Preservada- Extracción de muestras. Se utilizaron 12 piezas impregnadas con octadecano, cada una rotulada de acuerdo a la concentración de octadecano (*Figura N°5.1*). Cabe destacar que el sello de silicona que presentaban las piezas en sus caras al momento de impregnarlas es removido para efectuar las evaluaciones de mediciones térmicas.

Las mediciones de la conductividad térmica han sido efectuadas con un instrumento llamado *KD2-Pro (Figura N°5.2)*, el cual permite realizar análisis tanto en laboratorio como



en terreno. Este instrumento utiliza el método de la fuente lineal de calor transiente para la determinación de las propiedades térmicas de materiales de baja conductividad.



Figura N°5.1. Piezas de Pinus Radiata impregnadas en Octadecano

Teniendo las piezas de maderas es necesario prepararlas para las mediciones, para ello, además de remover la silicona de alta temperatura, se deben perforar con un taladro, dos orificios de 1.5 [mm] de diámetro aproximadamente. con una separacion de 6 [mm] y una profundidad de 30 [mm]. En estos orificios se introduce el sensor *SH-1* (sensor de doble aguja) del equipo *KD2-Pro* y posteriormente se realizan las mediciones (*Figura N°5.3*).



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
DEPTO. INGENIERIA EN MECANICA



Figura N°5.2. KD2-Pro. Medidor de propiedades térmicas



Figura N°5.3. Sensor SH-1 de doble aguja puesto en pieza de madera

La metodología empleada consiste en introducir las piezas impregnadas a un equipo de refrigeración (*Anexo A.5 Equipo de Refrigeración*), el cual mantiene la temperatura constante, inicialmente 20 [°C], y al momento en que las probetas alcanzado el equilibrio térmico se toman las mediciones de sus propiedades con el equipo *KD2-Pro*. El



error asociado a las mediciones no es superior al 1% y la temperatura varía de 2 [°C] máximo en las mediciones.

Para el caso de las mediciones a una temperatura de 30 [°C] se utiliza la misma metodología anterior con la diferencia que ésta se realiza en una estufa (*Anexo A.6 Estufa Heraeus serie 6000*), la cual permite alcanzar la temperatura alta deseada. Las probetas impregnadas son puestas en la estufa y al momento de alcanzar el equilibrio térmico se toman las mediciones de las propiedades. El error asociado a las mediciones no es superior al 1% y la temperatura varía 2 [°C] máximo en las mediciones.

5.2.1 Resultados evaluación de propiedades térmicas a 20 [°C]

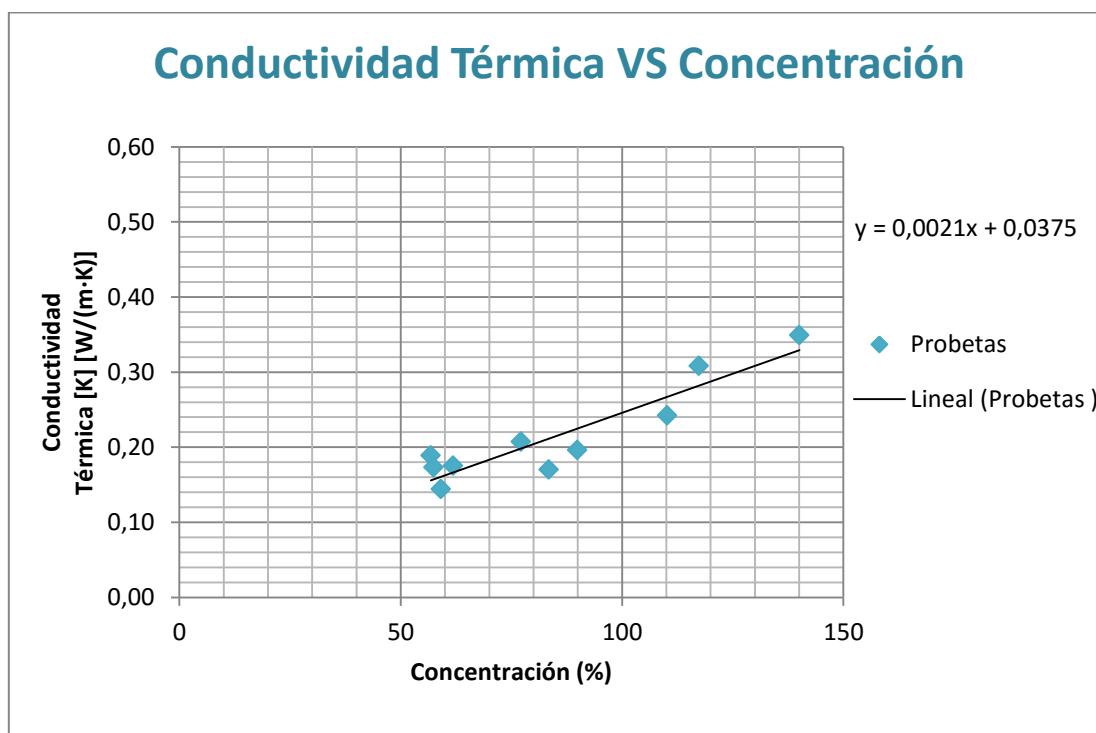
Los resultados obtenidos tras la evaluación de la conductividad térmica a 20 [°C] de las probetas impregnadas se muestran en la *Tabla N°5.3*, resultados con los cuales se ha realizado distintos gráficos de dispersión para las diferentes propiedades térmicas evaluadas (*Gráficos N°5.1 a)-d)*).

Se observa en las gráficas que la regresión lineal determinada por los puntos es de carácter fuerte para todos los casos, para la conductividad térmica y el calor específico son gráficas positivas, en el caso de la Resistividad térmica la regresión lineal negativa y en cuanto a la difusividad es ligeramente positiva. Además se puede decir que existe correlación entre las variables (Contenido de impregnante y las diferentes propiedades térmicas evaluadas).

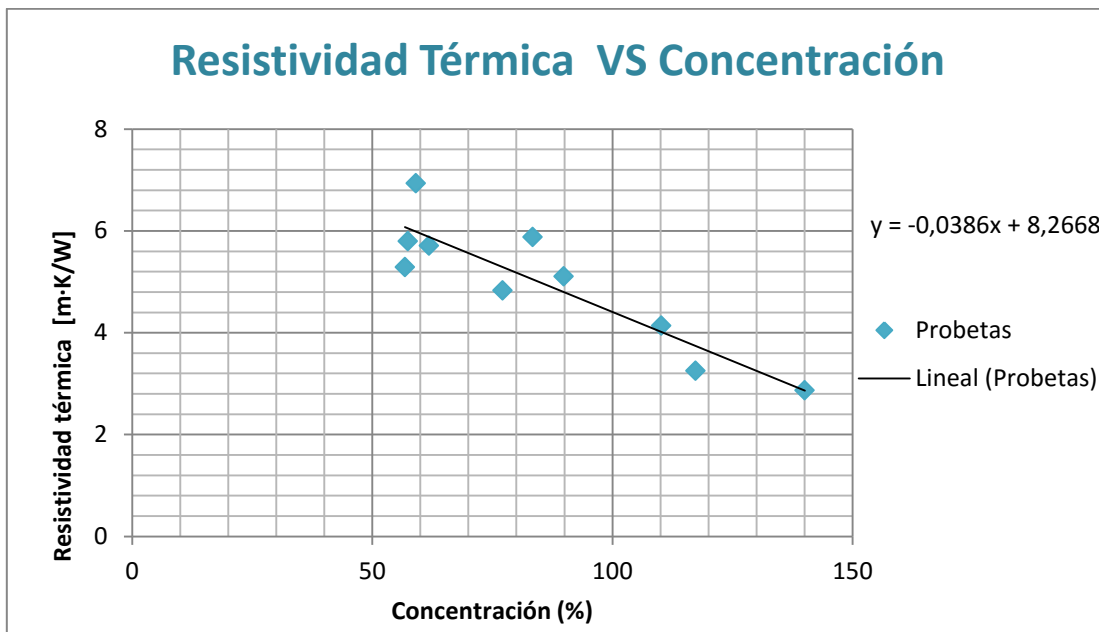


Tabla N°5.3. Datos obtenidos de evaluación térmica a 20[°C]

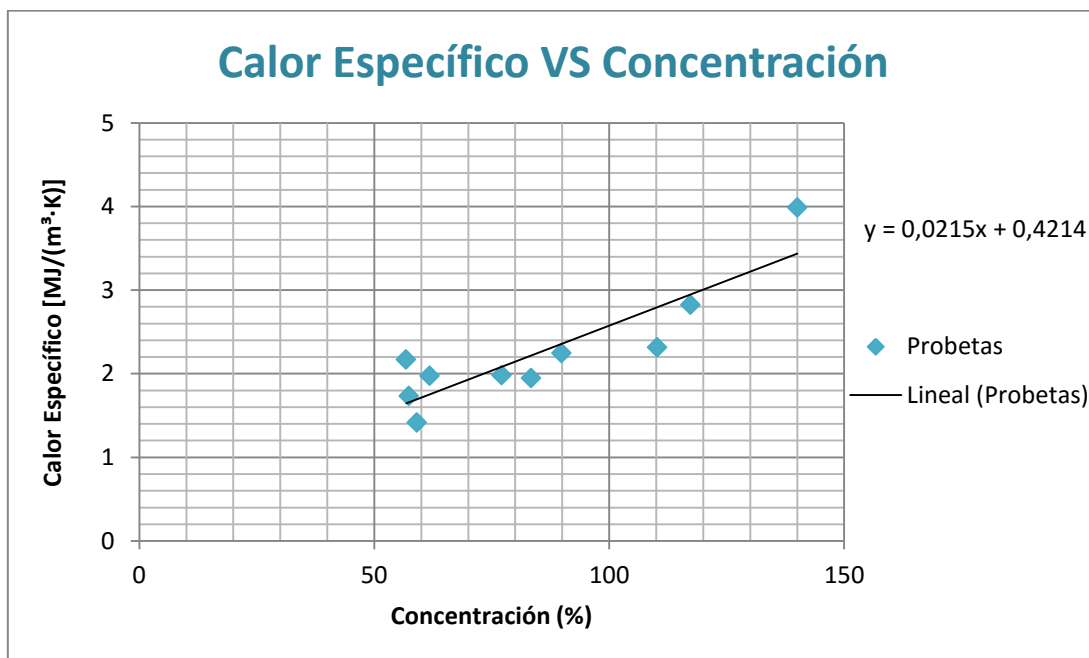
ENSAYO (20°C)								
Probeta		Conductividad Térmica [K]	Resistividad Térmica [rho]	Calor Específico (C)	Difusividad (D)	Error	Temperatura	Conctr.
		[W/(m·K)]	[m·K/W]	[MJ/(m³·K)]	[mm²/s]		[°C]	(%)
1	1B	0,189	5,286	2,167	0,087	0,0034	19,85	56,79
2	3C	0,173	5,793	1,732	0,100	0,0024	20,98	57,40
3	3B	0,144	6,931	1,414	0,102	0,0028	21,07	59,07
4	1C	0,175	5,705	1,975	0,089	0,0029	19,93	61,83
5	1A	0,207	4,826	1,980	0,105	0,0015	21,37	77,14
6	4D	0,170	5,880	1,948	0,087	0,0042	18,12	83,41
7	1D	0,196	5,101	2,245	0,087	0,0049	20,21	89,88
8	2D	0,242	4,136	2,312	0,105	0,0069	19,81	110,22
9	3A	0,308	3,250	2,821	0,109	0,0083	20,00	117,33
10	3D	0,349	2,865	3,987	0,088	0,0061	21,17	140,05



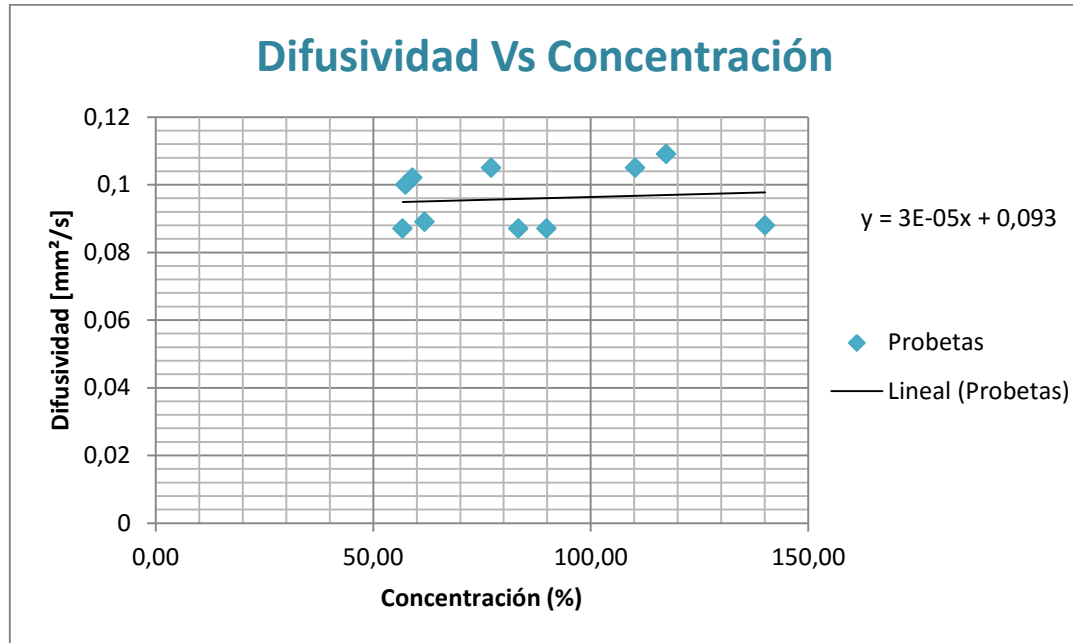
a) Conductividad térmica vs porcentaje de concentración.



b) Resistividad térmica vs porcentaje de concentración.



c) Calor específico vs porcentaje de concentración.



d) *Difusividad vs porcentaje de concentración.*

Gráficos N°5.1. Gráficas de dispersión de las muestras de madera impregnada a 20 [°C].

Al analizar los datos mediante el coeficiente de correlación de Pearson (R), con intervalos de confianza para la media del 95% para todos los casos, se obtiene un valor de $R = 91,94\%$ para los datos de conductividad térmica, lo que implica que existe correlación entre el contenido de impregnante y la conductividad térmica medida. Se estimó un error típico de $0,0274 \text{ [W/m K]}$. Además, se aprecia que aproximadamente el $84,53\%$ de la variabilidad de la conductividad térmica está determinada por la variabilidad del contenido de impregnante en las probetas para la evaluación a 20 [°C] .

En el caso de la Resistividad térmica, se obtiene un valor de $R = 89,28\%$ interpretándose como una buena correlación entre contenido de impregnante y la Resistividad medida. Se calcula un error típico de $0,589 \text{ [m K/W]}$. Aproximadamente el $79,71\%$ de la variabilidad de la Resistividad térmica está determinado por la variación en el contenido de octadecano en las probetas evaluadas a 20 [°C] .



Con respecto al calor específico, el coeficiente de correlación múltiple es $R= 87,69\%$, lo que representa una buena correlación entre el contenido de impregnante y el calor específico medido. Se calcula un error típico de $0,3629 \text{ [MJ/(m}^3\cdot\text{K)]}$ para este caso. Asimismo, el $76,90\%$ de la variabilidad del calor específico está determinado por la variación en el contenido de PCM en las probetas evaluadas a $20[^\circ\text{C}]$.

Finalmente, se calcula un valor de $R= 10,87\%$ lo cual representa un muy mala correlación entre el contenido de impregnante y la difusividad medida. Para este caso se calculó un error típico de $0,0096 \text{ [mm}^2\text{/s]}$. Además el $1,18\%$ de la variabilidad de la difusividad está determinada por la variación de contenido de impregnante en las probetas medida, por lo que se puede decir que no hay relación alguna entre estos dos.

5.2.2 Resultados evaluación de propiedades térmicas a $30 [^\circ\text{C}]$

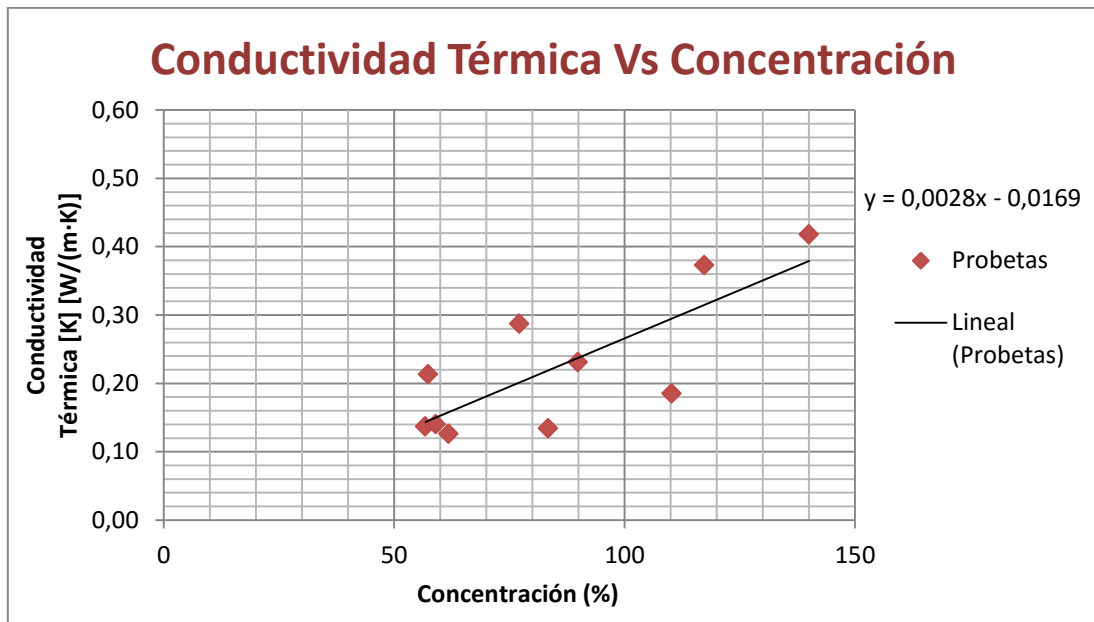
Para el caso de las probetas a $30 [^\circ\text{C}]$, temperatura superior a la temperatura de fusión del octadecano, los datos de las propiedades térmicas medidas se muestran en la *Tabla N°5.4*, con los cuales se han realizado las dispersiones de los *Gráficos N°5.2 a)-d)*.

Se observa que la regresión lineal determinada por los puntos es de carácter fuerte, aunque un poco más débil que las gráficas anteriores. Para la conductividad térmica y el calor específico son positivas, y negativas para la Resistividad térmica y la difusividad, esta última es la que presenta mayor dispersión en los datos. Asimismo se puede decir que existe correlación entre las variables (Contenido de impregnante y las diferentes propiedades térmicas), aunque la dispersión es mayor en todos los casos al comprarlos con la evaluación a $20 [^\circ\text{C}]$.

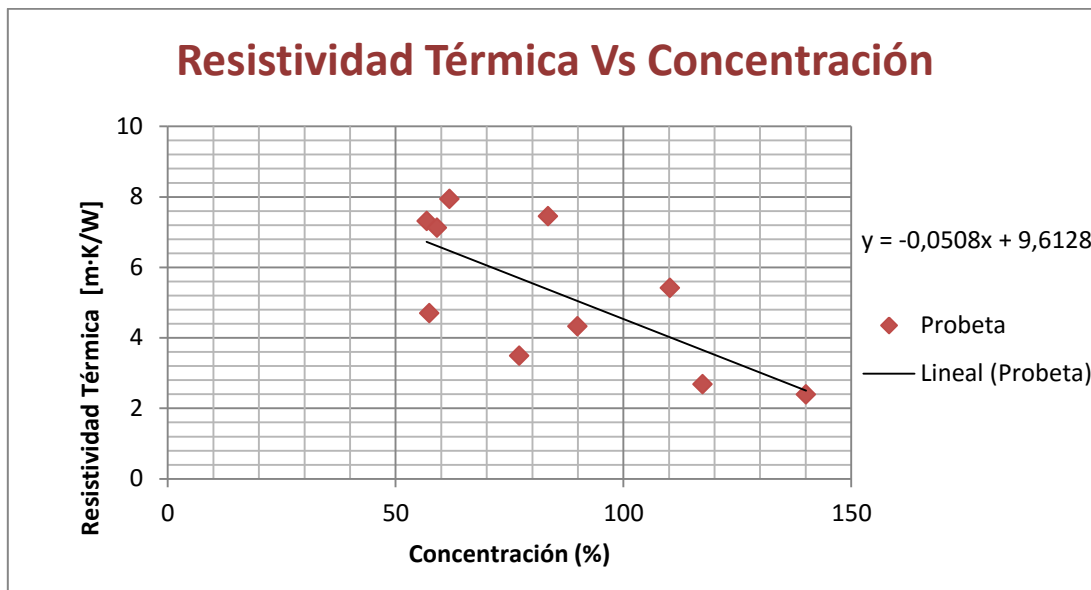


Tabla N°5.4. Datos obtenidos de evaluación térmica a 30[°C]

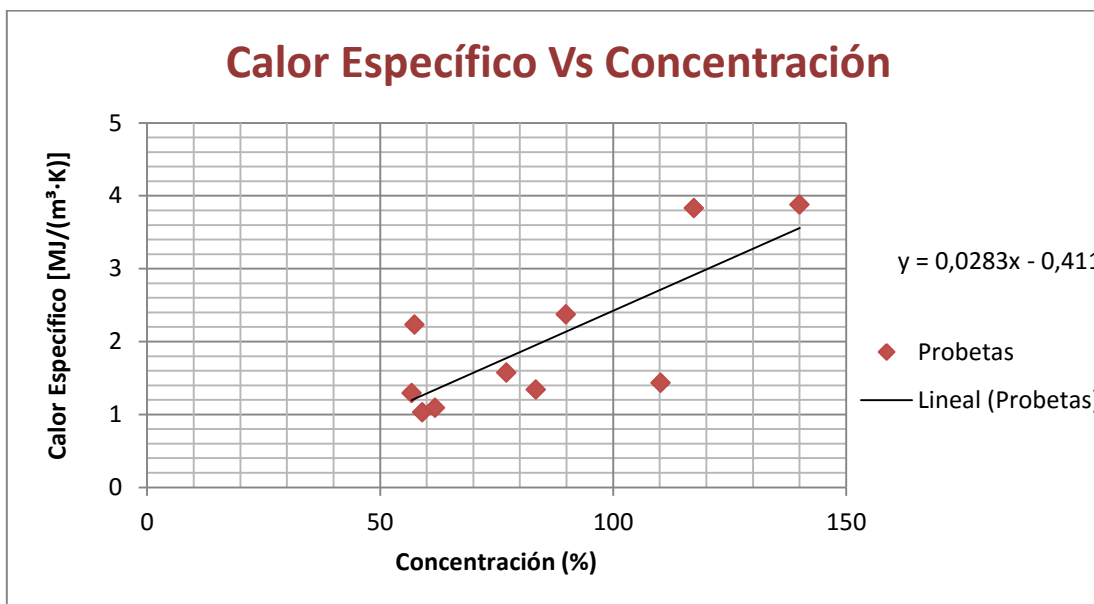
ENSAYO (30°C)								
Probeta	Conductividad Térmica [K]	Resistividad Térmica [rho]	Calor Especifico (C)	Difusividad (D)	Error	Temperatura	Concnt.	
								[W/(m·K)]
1	1B	0,137	7,311	1,289	0,106	0,0013	31,66	56,79
2	3C	0,213	4,699	2,230	0,095	0,0042	29,37	57,40
3	3B	0,140	7,124	1,029	0,136	0,0027	31,08	59,07
4	1C	0,126	7,935	1,091	0,115	0,0005	31,61	61,83
5	1A	0,287	3,486	1,571	0,183	0,0071	28,45	77,14
6	4D	0,134	7,447	1,340	0,100	0,0006	31,24	83,41
7	1D	0,231	4,322	2,370	0,098	0,0025	28,60	89,88
8	2D	0,185	5,417	1,433	0,129	0,0013	29,90	110,22
9	3A	0,373	2,679	3,830	0,097	0,0005	30,06	117,33
10	3D	0,418	2,394	3,877	0,108	0,0023	28,86	140,05



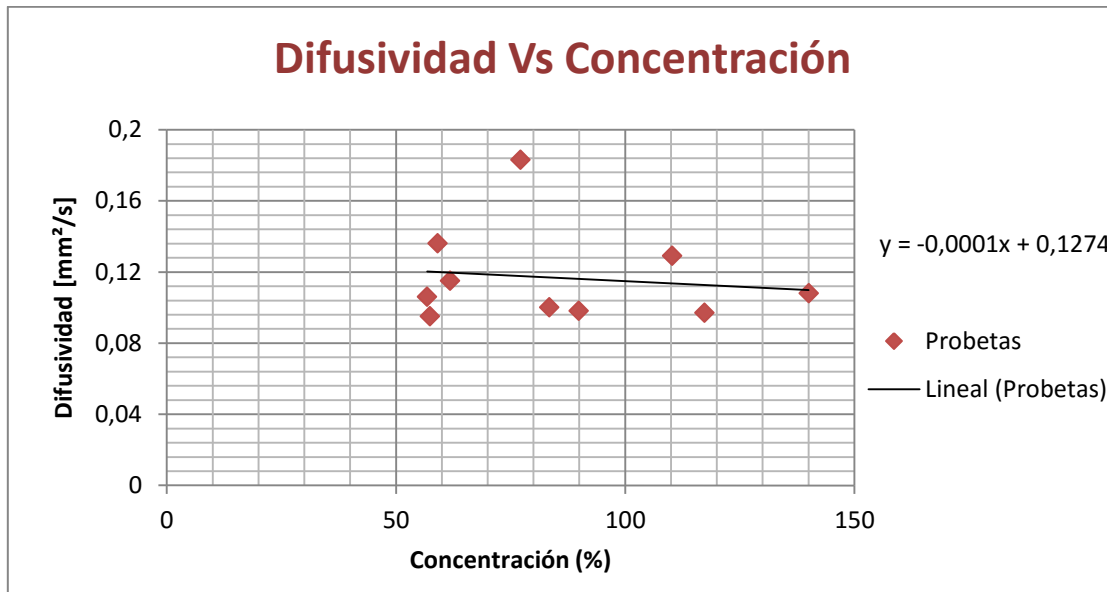
a) Conductividad térmica vs porcentaje de concentración.



b) Resistividad térmica vs porcentaje de concentración.



c) Calor específico vs porcentaje de concentración.



d) *Difusividad vs porcentaje de concentración.*

Gráficos N°5.2. Gráficas de dispersión de las muestras de madera impregnada a 30 [°C]

Al analizar los datos mediante el coeficiente de correlación de Pearson (R), con intervalos de confianza para la media del 95% para todos los casos, se obtiene un valor de $R = 78,67\%$ para los datos de conductividad térmica, lo que implica que existe una buena correlación entre el contenido de impregnante y la conductividad térmica medida. Se estimó un error típico de $0,0683 \text{ [W/m K]}$. Además, se observa que aproximadamente el $61,88\%$ de la variabilidad de la conductividad térmica está determinada por la variabilidad del contenido de impregnante en las probetas para la evaluación a 30 [°C] .

En el caso de la Resistividad térmica, se obtiene un valor de $R = 70,85\%$ interpretándose como una correlación aceptable entre contenido de impregnante y la resistividad medida. Se calcula un error típico de $1,55 \text{ [m K/W]}$. Se aprecia que aproximadamente el $50,19\%$ de la variabilidad de la resistividad está determinado por la variación en el contenido de Octadecano en las probetas evaluadas a 30 [°C] .



Al evaluar el calor específico, el coeficiente de correlación múltiple es $R= 76,87\%$, lo que representa una buena correlación entre el contenido de impregnante y el calor específico medido. Se calcula un error típico de $0,725 \text{ [MJ/(m}^3\cdot\text{K)]}$. Asimismo, el $59,09\%$ de la variabilidad del calor específico está determinado por la variación en el contenido de PCM en las probetas evaluadas a $30[^\circ\text{C}]$.

Finalmente, se calcula un valor de $R= 13,46\%$ lo cual representa una mala correlación entre el contenido de impregnante y la difusividad medida. Para este caso se calculó un error típico de $0,0285[\text{mm}^2/\text{s}]$. Además el $1,81\%$ de la variabilidad de la difusividad está determinada por la variación de contenido de impregnante en las probetas medida.

Para este caso, los datos analizados tenían una mayor dispersión que en el caso de la evaluación a $20 [^\circ\text{C}]$, obteniendo una variabilidad no muy confiable para el caso del calor específico y la resistividad térmica.

5.3 ANÁLISIS DE PENETRACIÓN CON TINTA

Para la determinación de la penetrabilidad del octadecano en las piezas de madera, se ha optado por teñir el PCM en su estado líquido con un colorante para ceras de parafina, dado que el octadecano tiene una estructura molecular similar a las ceras de parafina y es incoloro en estado líquido. Posteriormente se efectúan ensayos de impregnación con el colorante disuelto en el PCM.

Los colorantes usados para velas se llaman comúnmente anilinas a la grasa (*Figura N°5.4*), que pueden disolverse fácilmente en aceites, grasas y parafinas. La solubilidad de la anilina está expresada en porcentaje de solubilidad, que representa el peso del colorante en gramos por cada 100 [ml] de solvente en el cual el colorante permanece disuelto a



temperatura ambiente. La dosis depende en gran parte del resultado que se busque, con una pequeña cantidad es suficiente para obtener un buen rendimiento.

Este tipo de pigmento posee una buena estabilidad térmica, además estos colorantes no modifican la textura y la dureza de la cera.

En este ensayo de penetrabilidad se utilizan 2 probetas, una para flujo radial y otra para flujo tangencial. Ambas piezas de madera han sido selladas con silicona para alta temperatura, sellándose 5 de sus 6 caras y dejando despejada la cara por la cual se realiza la impregnación (radial o tangencial).



Figura N°5.4. Anilina a la grasa de color azul.

5.3.1 Flujo tangencial

Diluida la anilina a la grasa en el octadecano, las probetas tratadas con silicona han sido colocadas a impregnar bajo presión atmosférica (1 bar). Las probetas han sido monitoreadas cada 10 minutos, momento en el cual se le realizan cortes con una sierra

huincha para observar cómo y cuánto había penetrado el impregnante en la probeta. Posteriormente, la probeta es sellada con silicona y sometida a impregnación por un lapso de 10 minutos. Esto se ha realizado tres veces para cada pieza.

Para el caso del flujo tangencial, se ha observado que el frente de penetración del PCM es relativamente uniforme, no se observaron posiciones donde el octadecano no penetrara o haya tenido una acumulación preferente en la pieza de madera. En la *Tabla N°5.5* se muestra la penetración del PCM en la probeta. En los primeros 10 minutos el octadecano, como se muestra en la *Figura N°5.5*, penetra 33 [mm], en la segunda medición 22 [mm] y en la tercera 20 [mm]. Lo anterior se explica porque se van llenando las traqueidas de la madera con el fluido de forma uniforme.

Tabla N°5.5. Monitoreo ensayo de penetración en flujo tangencial.

Tiempo (minutos)	Distancia penetrada (mm)
10	3,3
20	5,5
30	7,5

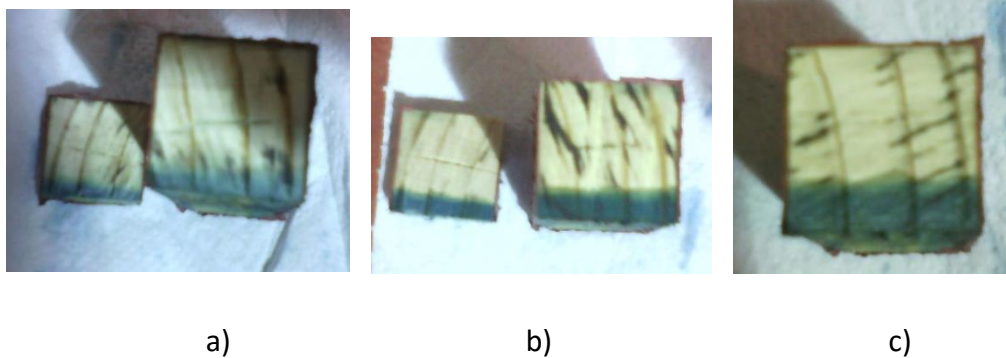


Figura N°5.5. Impregnación con tintura para flujo tangencial. a) 10 min. b) 20 min. c) 30 min

5.3.2 Flujo Radial

Para el caso del análisis de penetrabilidad en flujo radial se ha seguido el mismo procedimiento anterior, donde la probeta tratada y sellada se impregna a presión atmosférica y se monitorea cada 10 minutos. Posteriormente, la pieza es vuelta a sellar y se somete a impregnación.

A diferencia del flujo tangencial, en este caso se ha observado que el PCM penetra en ciertas secciones de forma preferente (*Figura N°5.5*). Esto se interpreta por la disposición de las fibras de la madera. Es posible que el PCM penetre preferentemente a través de los radios (parénquima radial) o canales resiníferos dispuestos en sentido radial.

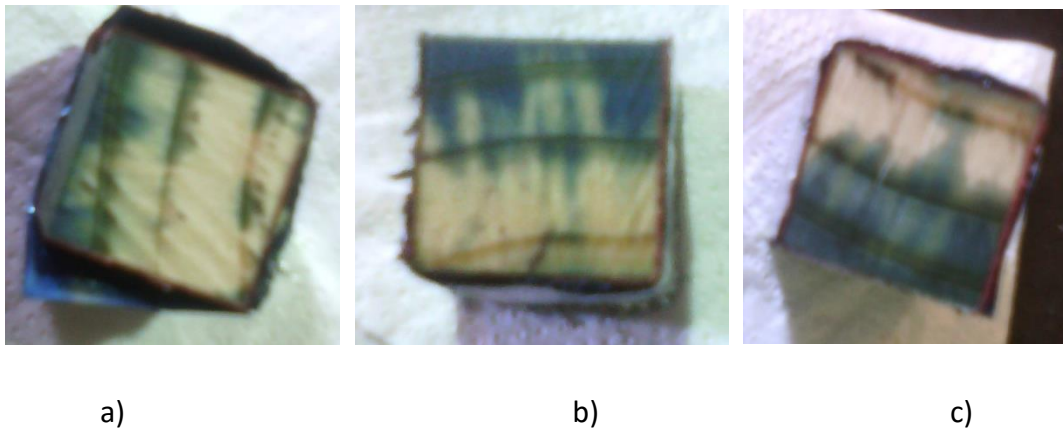


Figura N°5.5. Impregnación con tintura para flujo radial. a) 10 min. b) 20 min. c) 30 min



VI. CONCLUSIONES

En primer lugar, se concluye que es posible la impregnación de la madera *Pinus Radiata* con un material de cambio de fase como el octadecano. De esta manera es posible mejorar las propiedades térmicas de la madera incorporando los atributos del O-PCM.

Tras los ensayos de impregnación, se caracterizó la cinética de impregnación para cuatro (4) niveles de presión, concluyendo que para la presión de 3 [bar] se obtiene la mejor retención de PCM en las probetas. Asimismo, se muestra la proporcionalidad entre presión y la tasa de impregnación con características de decaimiento exponencial de la velocidad de impregnación. También se aprecia alta dispersión de datos (varianza) lo cual se condice con la conocida alta variabilidad de los parámetros que determinan la permeabilidad en la madera.

Con el análisis macroscópico se determinó cuales piezas presentaban mayor cantidad de madera tardía, madera que presenta mejores condiciones de permeabilidad y retención al momento de impregnar, lo cual explica por qué se presentan probetas con mejor retención de PCM bajo las mismas condiciones de presión y temperatura. Cabe señalar que se presentan piezas que no siguieron esta tendencia (3 piezas), por lo que se interpreta que corresponden a madera de transición.

En cuanto a la medición de la conductividad térmica de las probetas impregnadas, realizadas a 20 y 30 [°C], se observó un aumento de la conductividad térmica, correlacionada con el porcentaje de impregnante. En general, a mayor concentración de PCM es mayor la conductividad térmica. La medición a 20 [°C] presentó una menor dispersión en los datos obtenidos, con un 84,5% de confiabilidad.

La penetrabilidad del PCM en la madera se analizó con la ayuda de anilina a la grasa en dos (2) frentes, radial y tangencial, siendo en el tangencial donde se presentó un frente de penetración más uniforme y homogéneo. En comparación, el flujo radial el octadecano



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
DEPTO. INGENIERIA EN MECANICA

pigmentado accedió preferentemente en ciertas secciones, observándose trayectorias de flujo preferente al penetrar el PCM en la madera. Esto se explica por la anatomía de la madera, la presencia de radios (parénquima radial) o canales resiníferos dispuestos en sentido radial son más propicios para que el impregnante ingrese más fácilmente a la matriz porosa de la madera en ciertas posiciones.

Finalmente, cabe destacar que la anatomía de la madera es importante en los resultados obtenidos e influye considerablemente al momento de tratar la madera con PCM.



VII. BIBLIOGRAFÍA

- JUAN EDUARDO DIAZ-VAZ OLMEDO, Anatomía de la Madera. Valdivia 2003. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, 1ª Edición.
- Keil, G. D., M. E. Otaño, R. M. Marlats & M. L. Luna. Impregnación de maderas de Pinus radiata, P. pinaster, P. pinea y P. halepensis: relación entre la absorción de preservantes hidrosolubles y sus características físicas y anatómicas. Revista de la Facultad de Agronomía. La Plata, Argentina 104 (1), 1999.
- DÍAZ, Víctor S. y Barreneche, Raúl O. Acondicionamiento térmico de edificios. Buenos Aires, Nobuko, 2005. 445p
- SALVO Sepúlveda, Linette P. Relación de la estructura anatómica con la permeabilidad y tasa de secado de la madera de Pinus radiata D. Don. Tesis (Magíster en Ciencia y Tecnología de la Madera). Concepción, Chile. Universidad del Bío-Bío, Depto. de Ingeniería en Maderas, 2004. 79h.
- GARCÍA Gonzales, Fabián E. Determinación experimental de propiedades termo físicas de un material orgánico de cambio de fase y simulación computacional del proceso de carga y descarga de un dominio cilíndrico. Tesis (Ingeniero Civil Mecánico). Concepción, Chile. Universidad del Bío-Bío. Depto. De Ingeniería Mecánica. 2014. 88h.
- FERNÁNDEZ, Ana María y Salvo, Linette. Variación del área de pared celular en Pinus radiata D. Don. En: Congreso Iberoamericano de investigación en productos forestales (II), Curitiba. Brasil. Madera, ciencia y tecnología, Vol. 5, n°1. Concepción, Chile. Universidad del Bío-Bío. Depto. De Ingeniería en Maderas, 2003
- MINISTERIO de Educación. Documento Técnico N°2, Preservación de la madera. Talca, Chile, Red de Manufactura de la Región del Maule, Octubre 2005. 148p.

VIII. APÉNDICE

APÉNDICE.1 Análisis estadísticos de regresión y varianza de la conductividad térmica para evaluación a 20 [°C]

Tabla P.1.1. Estadísticas de regresión de dispersión para contenido de impregnante vs conductividad térmica para medición a 20 [°C]

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	91,94%
Coefficiente de determinación R ²	84,53%
R ² ajustado	82,60%
Error típico	0,0274
Observaciones	10

Tabla P.1.2. Análisis de varianza para contenido de impregnante vs conductividad térmica para medición a 20 [°C]

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0,0329	0,0329	43,72	0,0002
Residuos	8	0,0060	0,0008	74	
Total	9	0,0389			

Tabla P.1.3. Análisis estadístico para contenido de impregnante vs conductividad térmica para medición a 20 [°C]

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	0,0375	0,0282	1,3286	0,2206	-0,0276	0,1027	-0,0276	0,1027
(%)	0,0021	0,0003	6,6127	0,0002	0,0014	0,0028	0,0014	0,0028



APÉNDICE.2 Análisis estadísticos de regresión y varianza de la resistividad térmica para evaluación a 20 [°C]

Tabla P.2.1. Estadísticas de regresión de dispersión para contenido de impregnante vs resistividad térmica para medición a 20 [°C]

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	89,28%
Coefficiente de determinación R ²	79,71%
R ² ajustado	77,17%
Error típico	0,5983
Observaciones	10

Tabla P.2.2. Análisis de varianza para contenido de impregnante vs resistividad térmica para medición a 20 [°C]

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	11,2493	11,2493	31,4218	0,0005
Residuos	8	2,8641	0,3580		
Total	9	14,1134			

Tabla P.2.3. Análisis estadístico para contenido de impregnante vs resistividad térmica para medición a 20 [°C]

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	8,2668	0,6166	13,4074	0,0000	6,8450	9,6887	6,8450	9,6887
Variable X 1	-0,0386	0,0069	-5,6055	0,0005	-0,0544	-0,0227	-0,0544	-0,0227

APÉNDICE.3 Análisis estadísticos de regresión y varianza del calor específico para evaluación a 20 [°C]

Tabla P.3.1. Estadísticas de regresión de dispersión para contenido de impregnante vs calor específico para medición a 20 [°C]

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	87,69%
Coefficiente de determinación R ²	76,90%
R ² ajustado	74,02%
Error típico	0,3629
Observaciones	10

Tabla P.3.2. Análisis de varianza para contenido de impregnante vs calor específico para medición a 20 [°C]

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	3,5070	3,5070	26,6361	0,0009
Residuos	8	1,0533	0,1317		
Total	9	4,5603			

Tabla P.3.3. Análisis estadístico para contenido de impregnante vs calor específico para medición a 20 [°C]

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	0,4214	0,3739	1,1270	0,2924	-0,4409	1,2837	-0,4409	1,2837
Variable X 1	0,0215	0,0042	5,1610	0,0009	0,0119	0,0311	0,0119	0,0311



APÉNDICE.4 Análisis estadísticos de regresión y varianza de la difusividad para evaluación a 20 [°C]

Tabla P.4.1. Estadísticas de regresión de dispersión para contenido de impregnante vs difusividad para medición a 20 [°C]

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	10,87%
Coefficiente de determinación R ²	1,18%
R ² ajustado	-11,17%
Error típico	0,0096
Observaciones	10

Tabla P.4.2. Análisis de varianza para contenido de impregnante vs difusividad para medición a 20 [°C]

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	8,7247E-06	8,7247E-06	9,5591E-02	7,6509E-01
Residuos	8	7,3018E-04	9,1272E-05		
Total	9	7,3890E-04			

Tabla P.4.3. Análisis estadístico para contenido de impregnante vs difusividad para medición a 20 [°C]

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	0,0930	0,0098	9,4467	0,0000	0,0703	0,1157	0,0703	0,1157
Variable X 1	0,0000	0,0001	0,3092	0,7651	-0,0002	0,0003	-0,0002	0,0003

APÉNDICE.5 Análisis estadísticos de regresión y varianza de la conductividad térmica para evaluación a 30 [°C]

Tabla P.5.1. Estadísticas de regresión de dispersión para contenido de impregnante vs conductividad térmica para medición a 30 [°C]

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	78,67%
Coefficiente de determinación R ²	61,88%
R ² ajustado	57,12%
Error típico	0,0683
Observaciones	10

Tabla P.5.2. Análisis de varianza para contenido de impregnante vs conductividad térmica para medición a 30 [°C]

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0,0605	0,0605	12,9886	0,0069
Residuos	8	0,0373	0,0047		
Total	9	0,0978			

Tabla P.5.3. Análisis estadístico para contenido de impregnante vs conductividad térmica para medición a 30 [°C]

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-0,0169	0,0704	-0,2404	0,8160	-0,1791	0,1453	-0,1791	0,1453
(%)	0,0028	0,0008	3,6040	0,0069	0,0010	0,0046	0,0010	0,0046



APÉNDICE.6 Análisis estadísticos de regresión y varianza de la resistividad térmica para evaluación a 30 [°C]

Tabla P.6.1. Estadísticas de regresión de dispersión para contenido de impregnante vs resistividad térmica para medición a 30 [°C]

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	70,85%
Coefficiente de determinación R ²	50,19%
R ² ajustado	43,97%
Error típico	1,5554
Observaciones	10

Tabla P.6.2. Análisis de varianza para contenido de impregnante vs resistividad térmica para medición a 30 [°C]

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	19,5036	19,5036	8,0621	0,0218
Residuos	8	19,3534	2,4192		
Total	9	38,8569			

Tabla P.6.3. Análisis estadístico para contenido de impregnante vs resistividad térmica para medición a 30 [°C]

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	9,6128	1,6028	5,9975	0,0003	5,9167	13,3089	5,9167	13,3089
Variable X 1	-0,0508	0,0179	-2,8394	0,0218	-0,0920	-0,0095	-0,0920	-0,0095



APÉNDICE.7 Análisis estadísticos de regresión y varianza del calor específico para evaluación a 30 [°C]

Tabla P.7.1. Estadísticas de regresión de dispersión para contenido de impregnante vs calor específico para medición a 30 [°C]

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	76,87%
Coefficiente de determinación R ²	59,09%
R ² ajustado	53,98%
Error típico	0,7249
Observaciones	10

Tabla P.7.2. Análisis de varianza para contenido de impregnante vs calor específico para medición a 30 [°C]

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	6,0729	6,0729	11,5553	0,0094
Residuos	8	4,2044	0,5255		
Total	9	10,2772			

Tabla P.7.3. Análisis estadístico para contenido de impregnante vs calor específico para medición a 30 [°C]

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-0,4110	0,7471	-0,5501	0,5973	-2,1337	1,3118	-2,1337	1,3118
Variable X 1	0,0283	0,0083	3,3993	0,0094	0,0091	0,0475	0,0091	0,0475



APÉNDICE.8 Análisis estadísticos de regresión y varianza de la difusividad para evaluación a 30 [°C]

Tabla P.8.1. Estadísticas de regresión de dispersión para contenido de impregnante vs difusividad para medición a 30 [°C]

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	13,46%
Coefficiente de determinación R ²	1,81%
R ² ajustado	-10,46%
Error típico	0,0285
Observaciones	10

Tabla P.8.2. Análisis de varianza para contenido de impregnante vs difusividad para medición a 30 [°C]

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0,0001	0,0001	0,1477	0,7108
Residuos	8	0,0065	0,0008		
Total	9	0,0066			

Tabla P.8.3. Análisis estadístico para contenido de impregnante vs difusividad para medición a 30 [°C]

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	0,1274	0,0293	4,3447	0,0025	0,0598	0,1951	0,0598	0,1951
Variable X 1	-0,0001	0,0003	-0,3843	0,7108	-0,0009	0,0006	-0,0009	0,0006



IX. ANEXO

ANEXO A: EQUIPOS UTILIZADOS

Anexo A.1 Compresor de Aire

Para alcanzar las presiones deseadas para cada caso, fue necesaria la utilización de un compresor de aire de al menos 4 [bar]. El compresor usado es de marca INDURA, modelo *Huracan 1520*. Este equipo se conectaba directo al calderín de presión mediante manguera hidráulica con acople rápido. Posee regulador de presión y manómetro de salida.



Figura A.1. Compresor



Anexo A.2 Cámara de Clima

Dado que el octadecano tiene su punto de fusión a los 28 [°C] fue imprescindible la utilización de una cámara de climatización, en la cual se introdujo el calderín para la impregnación. La cámara disponible para este fin es de marca Heraeus.

La temperatura dentro de la cámara y fuera de ella fue monitoreada con termocuplas, manteniéndose en el interior a 50 [°C] \pm 2.



Figura A.2. Cámara de clima Heraeus

Anexo A.3 Balanza de precisión

Para medir la diferencia de peso de las probeta en cada paso del proceso de impregnación fue necesaria la utilización de una balanza de precisión de al menos 0,1 [g] de sensibilidad.



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
DEPTO. INGENIERÍA EN MECÁNICA



Figura A.3. Balanza de precisión

Anexo A.4 Calderín

Como autoclave para la impregnación se utilizó un calderín, de hierro fundido, con capacidad de 8 litros. El calderín tiene la capacidad de trabajar a presiones de 80 Psi (5,52 bar) como máximo, posee una tapa con sello hermético y cierre con 4 prensas. Además tiene conexión para manguera con acople rápido para conectar a un compresor.



Figura A.4. Calderín a presión



Anexo A.5 Equipo de Refrigeración

Para alcanzar las temperaturas deseadas de $20\text{ [}^{\circ}\text{C]} \pm 2$ se utiliza un equipo de refrigeración, el cual contaba con un controlador de temperatura. Este equipo cuenta con un orificio por el cual se introduce el sensor *SH-1* y así medir las propiedades térmicas de las piezas de madera.



Figura A.5. Equipo de Refrigeración



Anexo A.6 ESTUFA HERAEUS SERIE 6000

Al medir las propiedades térmicas de las probetas a una temperatura de 30 [°C] fue necesaria la utilización de una estufa, con el fin de mantener esta temperatura estable. Para ello se utilizó una estufa Heraeus serie 6000. En Ella se introdujeron las piezas de madera hasta alcanzar el equilibrio térmico.



Figura A.6. Estufa Heraeus Serie 6000

Anexo A.7 KD2-Pro

El KD2 Pro es un analizador de propiedades térmicas totalmente portátil, de uso en campo y laboratorio. Utiliza el método transitorio del hilo caliente para medir la conductividad térmica, la resistividad, la difusividad, y el calor específico. El análisis sofisticado de datos de este equipo se basa en más de 30 años de experiencia en investigación en transferencia de calor y masa en los suelos y otros materiales porosos.



El equipo compacto KD2-Pro es mucho más que una lectura simple de tiempo y temperatura. Un algoritmo patentado ajusta los datos de tiempo y temperatura con funciones exponenciales integrales, usando un método de mínimos cuadrados no lineal. Su solución totalmente matemática proporciona resultados de conductividad térmica/resistividad con una precisión de $\pm 10\%$.

Consta con 3 sensores diferentes; KS-1 (aguja simple pequeña), TR-1 (aguja simple larga) y SH-1 (aguja doble). Para este caso se utilizó el sensor SH-1, que consta con 2 agujas de 30 [mm] de largo, 1,3 [mm] de diámetro y una separación entre las agujas de 6 [mm]. Este sensor de doble aguja es el único sensor que mide la difusividad térmica y el calor específico.



Figura A.7. KD2-Pro junto con sensor de doble aguja.



Anexo A.8 SIERRA CIRCULAR DE MESA

Para el dimensionamiento de las probetas utilizadas en las evaluaciones de impregnación se utilizó una sierra circular de mesa. Ésta posee un carro deslizante integrado que sirve de apoyo, además de contar con reglas para ayudar con el trabajo de corte.



Figura A.8. Sierra Circular de Mesa.