



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**MADERA DE EUCALIPTO Y TECA: ANÁLISIS DEL  
COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO FRENTE A  
LA EXPOSICIÓN AL FUEGO**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

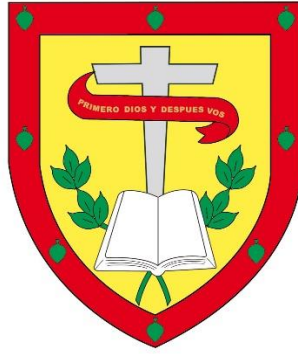
**AUTOR: WILSON FAVIAN ACOSTA CHILPE**

**DIRECTOR: CARLOS JULIO CORDERO CABRERA**

**CUENCA - ECUADOR**

**2024**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,  
INDSUTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

MADERA DE EUCALIPTO Y TECA: ANÁLISIS DEL  
COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO FRENTE A LA  
EXPOSICIÓN AL FUEGO

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: WILSON FAVIAN ACOSTA CHILPE**

**DIRECTOR: CARLOS JULIO CORDERO CABRERA**

**CUENCA - ECUADOR**

**2024**


**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

**Wilson Favian Acosta Chilpe** portador de la cédula de ciudadanía N.º **0105191464**. Declaro ser autor de la obra: "**MADERA DE EUCALIPTO Y TECA: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO FRENTE LA EXPOSICIÓN AL FUEGO**", sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas.

Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 18 de marzo de 2024

F: .....  ..... 010519146-4

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de titulación con el tema “**MADERA DE EUCALIPTO Y TECA: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO FRENTE A LA EXPOSICIÓN AL FUEGO**” fue desarrollado por, **WILSON FAVIAN ACOSTA CHILPE**, estudiante de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Cuenca, bajo supervisión del suscrito; trabajo que reúne los requisitos necesarios para su presentación y sustentación ante el tribunal que se disponga.

F: .....  


**Msc. ING. CARLOS JULIO CORDERO CABRERA**

**C.I. 0103382958**

**DIRECTOR DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

## **DEDICATORIA**

Este logro dedico especialmente a mis dos hijas, Valentina y Amy, que son la motivación para seguir avanzado y superándome tanto económicamente, como personalmente, y no puede faltar mi esposa que ha estado desde que inicié con esta meta de terminar mis estudios y en otros proyectos más.

También le dedico este gran logro a mi madre y mi padre que ya no nos acompaña que gracias a su esfuerzo y dedicación supieron inculcarme que en la vida hay que tener metas y esforzarse para poder superarse.

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme cumplir esta meta tan importante en mi vida, por darme fortaleza en momentos que uno ha llegado a tener ganas de no avanzar más.

De una manera muy especial doy agradecimiento a mi esposa Sara Naranjo que, gracias a su apoyo incondicional, ha sabido darme en todo el trayecto de mi jornada de estudio y trabajo.

Agradezco a mi director de tesis, el Ing. Carlos Cordero. Que gracias a su experiencia, comprensión y paciencia contribuyeron a mi desempeño en el complejo y gratificante camino de la investigación. Su guía constante y su fe inquebrantable en mis habilidades me han motivado a culminar este trabajo. No tengo palabras para expresar mi agradecimiento por su apoyo durante la elaboración de este proyecto.

De la misma manera, quisiera expresar mi gratitud a los laboratoristas que aportaron con el desarrollo de mi trabajo de titulación, a todos los que me ayudaron a recopilar datos y a aquellos que dedicaron su tiempo a revisar mi trabajo, dando sugerencias o críticas de mejora, formas de buscar buenas bibliografías, como redactar técnicamente.

Además, me gustaría agradecer a la Universidad Católica de Cuenca por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de avanzar en mi carrera profesional. Agradezco especialmente a la Facultad de Ingeniería Industria y Construcción por su constante apoyo. Su fe en mis habilidades y su disposición para ayudarme han sido fundamentales para la finalización de esta tesis.

## RESUMEN

El objetivo del proyecto es analizar las propiedades físicas y mecánicas de dos especies de madera (Teca y Eucalipto) antes y después de su exposición al fuego controlado, para determinar su resistencia y predecir su comportamiento después de ser sometido a fuego en diferentes periodos de tiempo.

Para alcanzar los resultados esperados, se realizó ensayos de laboratorio como: compresión, flexión, emisión de gases, contenido de humedad, transmisión térmica, que consistieron en diseñar probetas con medidas según lo especifica la Norma ASTM D 143, para luego colocar en un horno refractario a tiempos de 5, 10, y 15 minutos.

Los resultados reportan que, las probetas al ser sometidas al fuego pierden más del 30% de resistencia a compresión al compararlas con la muestra patrón. El Eucalipto tuvo un mayor contenido de humedad, con una diferencia del 30% al compararlo con la Teca. El Eucalipto expuesto a 15 minutos al fuego emitió 330 PPM de CO; mientras que, la Teca registró 420 PPM; sin embargo, no se detectó la liberación de otros gases tóxicos. Los resultados del módulo de elasticidad reportaron que las muestras incineradas a 15 minutos perdieron más del 50% de elasticidad comparado con las muestras patrón. La transmisión térmica reportó que conforme pasa el tiempo se incrementa la temperatura, debido a la evaporación del agua de las fibras. En el ensayo de flexión se determinó que las muestras expuestas al fuego pierden más de 25% de capacidad de resistencia para soportar cargas frente a las muestras en condiciones normales.

*Palabras clave:* Eucalipto, Teca, exposición al fuego, propiedades físicas y mecánicas, resistencia a compresión y flexión

## **ABSTRACT**

This project aims to analyze the physical and mechanical properties of two wood species (Teak and Eucalyptus) before and after exposure to controlled fire to determine their strength and predict their behavior after being exposed to fire in different periods.

In order to achieve the expected results, laboratory tests were conducted, such as compression, flexural, gas emission, moisture content, and thermal transmission, which consisted of designing specimens with the measurements specified in ASTM D 143 and then placing them in a refractory oven at times of 5, 10, and 15 minutes.

The results reveal that when the specimens are exposed to fire, they lose more than 30% of compression strength compared to the standard sample. Eucalyptus had a higher moisture content, with a difference of 30% compared to Teak. Eucalyptus exposed to fire for 15 minutes emitted 330 PPM of CO, while Teak emitted 420 PPM; however, the release of other toxic gases was not detected. Elastic modulus results revealed that samples exposed to fire for 15 minutes lost more than 50% of elasticity compared to the standard samples. Thermal transmission showed that, over time, the temperature increases due to water evaporation from the fibers. The flexural test determined that samples exposed to fire lost more than 25% of their load-bearing capacity compared to samples under normal conditions.

*Keywords:* Eucalyptus, Teak, fire exposure, physical and mechanical properties, compression and flexural strength

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN .....	V
ABSTRACT .....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
<b>1. CAPÍTULO I. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. ANTECEDENTES .....	2
1.2.1. Internacionales.....	2
1.2.2. Nacionales.....	3
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	4
1.4. JUSTIFICACIÓN .....	5
1.5. OBJETIVOS .....	6
1.5.1. Objetivo General.....	6
1.5.2. Objetivos Específicos.....	6
<b>2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1. ESTADO DEL ARTE .....	7
2.2. INCENDIOS .....	8
2.3. REACCIÓN Y RESISTENCIA AL FUEGO .....	8
2.4. PREVENCIÓN Y CONTROL DE INCENDIOS .....	9
2.5. LA MADERA .....	11
2.5.1. Estructura del tronco del árbol.....	11
2.5.2. Composición de la madera .....	12
2.6. ESPECIES: TECA Y EUCALIPTO .....	13
2.6.1. Teca ( <i>Tectona Grandis</i> ).....	13
2.6.2. Eucalipto ( <i>Eucalyptus Globulus</i> ) .....	14
2.7. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA .....	15
2.7.1. Propiedades físicas de la madera Teca .....	15
2.7.2. Propiedades físicas de la madera Eucalipto .....	16
2.7.3. Propiedades mecánicas de la madera.....	17
2.8. COMPORTAMIENTO DE LA MADERA FRENTE AL FUEGO .....	18
2.8.1. Pirólisis.....	18
2.8.2. Combustión .....	18
2.8.3. Carbonización superficial .....	18
2.8.4. Temperatura de ignición.....	19

2.8.5.	<i>Velocidad de llama superficial</i> .....	19
2.8.6.	<i>Velocidad de carbonización</i> .....	19
2.9.	CARBONIZACIÓN DE LA MADERA .....	20
2.10.	COMBUSTIÓN DE LA MADERA SEGÚN SU VOLUMEN .....	20
2.10.1.	<i>Estructuras pesadas</i> .....	20
2.10.2.	<i>Estructuras ligeras</i> .....	21
2.11.	IGNIFUGACIÓN DE LA MADERA.....	21
2.11.1.	<i>Definición de la ignifugación</i> .....	21
2.11.2.	<i>Procedimientos de la ignifugación de la madera</i> .....	22
2.12.	ENSAYOS .....	23
2.12.1.	<i>Ensayo de resistencia a la compresión de la madera</i> .....	23
2.12.2.	<i>Ensayo de resistencia a la flexión de la madera</i> .....	23
2.12.3.	<i>Ensayo para determinar el contenido de humedad de la madera</i> .....	23
2.12.4.	<i>Módulo de elasticidad</i> .....	24
2.13.	NORMATIVAS EMPLEADAS.....	25
2.13.1.	<i>Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) - SE – MD</i> .....	25
2.13.2.	<i>Norma ASTM D 143</i> .....	25
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>26</b>
3.1.	CARACTERIZAR LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DE LOS DOS TIPOS DE MADERA.....	26
3.1.1.	<i>Selección de muestras de madera</i> .....	26
3.1.2.	<i>Procedimiento previo a la aplicación de los ensayos</i> .....	29
3.1.3.	<i>Caracterización de las propiedades físico mecánicas de la muestra patrón de la madera de Eucalipto y Teca</i> .....	34
3.2.	PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LAS PROPIEDADES DE TRASMISIÓN TÉRMICA DE LA MADERA.....	37
3.3.	PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LA EMISIÓN DE GASES DE LA MADERA .....	38
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS</b> .....	<b>40</b>
4.1.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS .....	40
4.1.1.	<i>Ensayos de incineración de las muestras en el horno refractario en los diferentes periodos de tiempo</i> .....	40
4.1.2.	<i>Resultados de ensayos de resistencia a compresión paralela a la fibra a muestras de madera de Eucalipto</i> .....	42
4.1.3.	<i>Resultados de ensayos de resistencia a compresión paralela a la fibra de las muestras de madera Teca</i> .....	45
4.1.4.	<i>Resultados de ensayos de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de las muestras de madera de Eucalipto</i> .....	48
4.1.5.	<i>Resultados de ensayos de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de las muestras de madera Teca</i> .....	51
4.1.6.	<i>Resultados del Contenido de Humedad</i> .....	55

4.1.7.	<i>Resultados de gases emitidos por los paneles sometidos al fuego</i> .....	57
4.1.8.	<i>Resultados del ensayo de transmisión de calor</i> .....	58
4.1.9.	<i>Resultados de carbonización</i> .....	61
4.1.10.	<i>Resultados de ensayos de resistencia a flexión</i> .....	62
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>69</b>
5.1.	CONCLUSIONES .....	69
5.2.	RECOMENDACIONES .....	70
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>72</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1</b> PROPIEDADES FÍSICAS DE <i>TECA</i> .....	16
<b>TABLA 2</b> PROPIEDADES FÍSICAS DE <i>EUCALIPTO</i> .....	16
<b>TABLA 3</b> PROPIEDADES MECÁNICAS DE <i>TECA</i> .....	17
<b>TABLA 4</b> PROPIEDADES MECÁNICAS DE <i>EUCALIPTO</i> .....	17
<b>TABLA 5</b> PROBETAS DE MUESTRA PATRÓN PARA ENSAYOS A FLEXIÓN .....	27
<b>TABLA 6</b> PROBETAS DE ENSAYO PERPENDICULAR A LA FIBRA .....	27
<b>TABLA 7</b> PROBETAS DE ENSAYO PARALELO A LA FIBRA .....	28
<b>TABLA 8</b> CONCENTRACIONES DE CO Y EFECTO EN EL SER HUMANO.....	39
<b>TABLA 9</b> ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA DE LAS MUESTRAS DE MADERA DE <i>EUCALIPTO</i> .....	42
<b>TABLA 10</b> ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA DE LA MUESTRA DE MADERA <i>TECA</i> .....	45
<b>TABLA 11</b> MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS PROBETAS ENSAYADAS PARALELAS A LAS FIBRAS <i>EUCALIPTO</i> .....	48
<b>TABLA 12</b> MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS PROBETAS ENSAYADAS PARALELAS A LAS FIBRAS <i>TECA</i> .....	48
<b>TABLA 13</b> ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA DE LAS MUESTRAS DE MADERA DE <i>EUCALIPTO</i> .....	49
<b>TABLA 14</b> ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA DE LAS MUESTRAS DE MADERA <i>TECA</i> .....	52
<b>TABLA 15</b> MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS PROBETAS ENSAYADAS PERPENDICULAR A LAS FIBRAS .....	54
<b>TABLA 16</b> MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS PROBETAS ENSAYADAS PERPENDICULAR A LAS FIBRAS <i>TECA</i> .....	54
<b>TABLA 17</b> CONTENIDO DE HUMEDAD EN MADERA <i>EUCALIPTO</i> .....	56
<b>TABLA 18</b> CONTENIDO DE HUMEDAD EN MADERA <i>TECA</i> .....	56
<b>TABLA 19</b> CARBONIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE <i>EUCALIPTO</i> Y <i>TECA</i> EXPUESTAS AL FUEGO DURANTE 5, 10 Y 15 MINUTOS.....	61
<b>TABLA 20</b> ENSAYO A FLEXIÓN EN LA MUESTRA PATRÓN .....	62
<b>TABLA 21</b> ENSAYO A FLEXIÓN EN LA MADERA <i>EUCALIPTO</i> AL EXPONER AL FUEGO 5 MINUTOS .....	62
<b>TABLA 22</b> ENSAYO A FLEXIÓN EN LA MADERA <i>EUCALIPTO</i> AL EXPONER AL FUEGO 10 MINUTOS .....	63
<b>TABLA 23</b> PROMEDIO DE ENSAYO A FLEXIÓN DE LA MADERA DE <i>EUCALIPTO</i> .....	63
<b>TABLA 24</b> MÓDULO DE FLEXIÓN DE LA MADERA DE <i>EUCALIPTO</i> .....	65
<b>TABLA 25</b> ENSAYO A FLEXIÓN EN LA MUESTRA <i>TECA</i> PATRÓN.....	66
<b>TABLA 26</b> ENSAYO A FLEXIÓN EN LA MADERA <i>TECA</i> AL EXPONER AL FUEGO 5 MINUTOS .....	66
<b>TABLA 27</b> ENSAYO A FLEXIÓN EN LA MADERA <i>TECA</i> AL EXPONER AL FUEGO 10 MINUTOS.....	66
<b>TABLA 28</b> PROMEDIO DE ENSAYO A FLEXIÓN DE LA MADERA <i>TECA</i> .....	67
<b>TABLA 29</b> MÓDULO DE FLEXIÓN DE LA MADERA <i>TECA</i> .....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> DATOS ESTADÍSTICOS DEL RECUENTO DE INCENDIOS .....	5
<b>FIGURA 2</b> ÍNDICE DE INCENDIOS EN LA CIUDAD DE CUENCA EN LOS ÚLTIMOS 3 AÑOS .....	10
<b>FIGURA 3</b> ÍNDICE DE INCENDIOS EN LA CIUDAD DE CUENCA EN LOS ÚLTIMOS 3 AÑOS .....	10
<b>FIGURA 4</b> CAPAS QUE COMPONEN EL TRONCO DE UN ÁRBOL .....	12
<b>FIGURA 5</b> AMBIENTE NATURAL TECA ( <i>TECTONA GRANDIS</i> ) .....	14
<b>FIGURA 6</b> AMBIENTE NATURAL <i>EUCALYPTUS GLOBULUS</i> .....	15
<b>FIGURA 7</b> PIEZAS DE MADERA DE EUCALIPTO Y TECA .....	26
<b>FIGURA 8</b> PROBETAS CODIFICADAS PARA ENSAYO .....	27
<b>FIGURA 9</b> PRENSA DE COMPRESIÓN DE HORMIGÓN SHIMADZU CONCRETO 2000X .....	28
<b>FIGURA 10</b> PRENSA DE CBR .....	28
<b>FIGURA 11</b> HORNO REFRACTARIO .....	29
<b>FIGURA 12</b> SIMULACRO DEL HORNO .....	30
<b>FIGURA 13</b> PIEZAS DE MADERA DE EUCALIPTO Y TECA .....	31
<b>FIGURA 14</b> CORTE DE MADERA DE EUCALIPTO Y TECA .....	31
<b>FIGURA 15</b> MEDIDAS DE LAS PROBETAS SEGÚN NORMA ASTM D 143-94 .....	32
<b>FIGURA 16</b> CODIFICACIÓN DE LAS PROBETAS .....	33
<b>FIGURA 17</b> QUEMA DE PROBETAS EN DIFERENTES TIEMPOS .....	33
<b>FIGURA 18</b> ENFRIAMIENTO DE LAS MUESTRAS QUEMADAS PARA ENSAYO .....	34
<b>FIGURA 19</b> ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARALELO A LA FIBRA .....	35
<b>FIGURA 20</b> ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA .....	36
<b>FIGURA 21</b> ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN .....	37
<b>FIGURA 22</b> LADO DE LA MADERA EXPUESTA Y NO EXPUESTA AL FUEGO .....	38
<b>FIGURA 23</b> GASES EMITIDOS POR LA MADERA .....	38
<b>FIGURA 24</b> ENSAYO DE EXPOSICIÓN AL FUEGO DE PROBETAS DE FLEXIÓN .....	40
<b>FIGURA 25</b> ENSAYO DE EXPOSICIÓN AL FUEGO DE PROBETAS DE COMPRESIÓN .....	41
<b>FIGURA 26</b> ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA DE LAS MUESTRAS DE MADERA DE EUCALIPTO .....	43
<b>FIGURA 27</b> DIFERENCIA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA DE LAS MUESTRAS DE MADERA DE EUCALIPTO EXPUESTAS AL FUEGO DURANTE 0, 5, 10 Y 15 MINUTOS .....	44
<b>FIGURA 28</b> ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA DE LA MUESTRA DE MADERA TECA .....	46
<b>FIGURA 29</b> DIFERENCIA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA DE LAS MUESTRAS DE MADERA TECA EXPUESTAS AL FUEGO DURANTE 0, 5, 10 Y 15 MINUTOS .....	47
<b>FIGURA 30</b> ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA DE LAS MUESTRAS DE MADERA DE EUCALIPTO .....	49
<b>FIGURA 31</b> DIFERENCIA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA DE LAS MUESTRAS DE MADERA DE EUCALIPTO EXPUESTAS AL FUEGO DURANTE 0, 5 Y 10 MINUTOS .....	51
<b>FIGURA 32</b> ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA DE LAS MUESTRAS DE MADERA TECA .....	52
<b>FIGURA 33</b> DIFERENCIA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA DE LAS MUESTRAS DE MADERA TECA EXPUESTAS AL FUEGO DURANTE 0, 5 Y 10 MINUTOS .....	53

<b>FIGURA 34</b> ENSAYO DE HUMEDAD.....	55
<b>FIGURA 35</b> CARA EXPUESTA Y NO EXPUESTA DIRECTAMENTE AL FUEGO EN MADERA DE EUCALIPTO A LOS 5 MINUTOS .....	58
<b>FIGURA 36</b> CARA EXPUESTA Y NO EXPUESTA DIRECTAMENTE AL FUEGO EN MADERA DE EUCALIPTO A LOS 10 MINUTOS .....	59
<b>FIGURA 37</b> CARA EXPUESTA Y NO EXPUESTA DIRECTAMENTE AL FUEGO EN MADERA DE EUCALIPTO A LOS 15 MINUTOS .....	59
<b>FIGURA 38</b> CARA EXPUESTA Y NO EXPUESTA DIRECTAMENTE AL FUEGO EN MADERA TECA A LOS 5 MINUTOS.....	60
<b>FIGURA 39</b> CARA EXPUESTA Y NO EXPUESTA DIRECTAMENTE AL FUEGO EN MADERA TECA A LOS 10 MINUTOS.....	60
<b>FIGURA 40</b> CARA EXPUESTA Y NO EXPUESTA DIRECTAMENTE AL FUEGO EN MADERA TECA A LOS 15 MINUTOS.....	61
<b>FIGURA 41</b> PROMEDIO DE ENSAYO A FLEXIÓN DE LA MADERA DE EUCALIPTO .....	64
<b>FIGURA 42</b> MÓDULO DE FLEXIÓN DE LA MADERA DE EUCALIPTO .....	65
<b>FIGURA 43</b> PROMEDIO DE ENSAYO A FLEXIÓN DE LA MADERA TECA.....	67
<b>FIGURA 44</b> MÓDULO DE FLEXIÓN DE LA MADERA TECA.....	68

# 1. CAPÍTULO I. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1. Introducción

La madera, un recurso renovable con propiedades y características destacadas para aplicaciones estructurales, se encuentra en el tronco de un árbol debajo de su corteza. A lo largo de milenios, ha sido utilizada como combustible y material de construcción, proveniente de árboles y arbustos con una estructura de fibras. La diversidad notable de propiedades físicas y mecánicas que posee la madera despierta un gran interés para su estudio (Sánchez et al., 2018).

En el pasado, la madera era más común en el ámbito de la construcción. No obstante, en el transcurso del tiempo, surgió una mayor incertidumbre en su uso como solución constructiva, debido a los grandes incendios en las ciudades. La aparición del hormigón, un material más accesible, económico, rápido y que no requería mano de obra especializada, también influyó en la reducción del uso de la madera en el sector de la construcción (Burgos, 2016). Hoy en día, con el avance de nuevas tecnologías y productos, la madera ha recuperado su importancia y su uso en la construcción a nivel mundial, gracias al empleo de productos ignífugos a base de fosfatos y sulfatos de amonio, boratos de sodio, ácido bórico, silicatos de sodio y potasio, compuestos clorados, entre otros, siendo altamente efectivo para mantener la ignifugación (Jiménez, s.f.).

Para efectos de investigación, este trabajo investigativo tiene como principal objetivo analizar las propiedades físicas y mecánicas de las dos especies de madera: Teca y Eucalipto, antes y después de su exposición al fuego controlado, con el propósito de determinar su resistencia y predecir su comportamiento con una mayor certeza.

Primeramente, se realizó una revisión bibliográfica en las diferentes bases de datos electrónicas acerca de las propiedades físicas y mecánicas de la madera e información relevante del uso del Eucalipto y la Teca. Además, se realizaron múltiples ensayos de laboratorio a través de la utilización de las Normas ASTM D 143-94, ASTM D4442-92 y NEC - SE – MD, las cuales ayudaron a determinar la pérdida de resistencia de la madera Eucalipto y Teca durante la exposición al fuego controlado a diferentes etapas de tiempo (5, 10 y 15 minutos), mediante pruebas sistemáticas con la finalidad de identificar patrones de degradación y establecer correlaciones con la duración de la exposición.

Al analizar los resultados obtenidos en este estudio y compararlos con las investigaciones realizadas en la Universidad Católica de Cuenca, se pone de manifiesto la importancia de seguir

investigando la utilización de diversas especies tropicales en este sistema constructivo de madera. Esto se debe a que, dada la diversidad de especies existentes en el Ecuador, es factible determinar qué especie de madera ofrece una mayor resistencia, en el caso de que ocurra un incendio.

## **1.2. Antecedentes**

En el presente apartado se detallan los estudios internacionales y nacionales con temas similares a la investigación, los cuales, sirven de aporte teórico científico para el desarrollo del mismo.

### **1.2.1. Internacionales**

En Colombia, Vargas (2020) publicó un proyecto titulado: “Análisis descriptivo del comportamiento de la madera para resistir al fuego y los procedimientos conexos para su protección eficiente ante la flamabilidad”, cuyo objetivo se centró en describir el comportamiento mecánico y físico de la madera a ser expuesta al fuego. La metodología que utilizó se basó en una investigación descriptiva, de corte transversal, con un enfoque cualitativo, por cuanto recolectaron datos de diferentes artículos publicados en revistas científicas indexadas que han sido publicadas desde el 2010 al 2016. De los 55 estudios seleccionados, el 38,2% se refieren a procedimientos de protección efectiva de la madera contra el fuego, 35,5% hacen referencia al comportamiento de la madera al fuego, el 18,8% muestran la resistencia de la madera al fuego y el 9,1% están basadas al comportamiento de la madera frente a la resistencia al fuego. En conclusión, se puede establecer que existe relación directa y significativa entre la resistencia de la madera y la exposición al fuego; por cuanto, recomiendan utilizar la nanotecnología para la creación de maneras resistentes al fuego.

Por otro lado, Césaire (2019) realizó un estudio en México titulado: “Efecto de termotratamiento en aceite en las propiedades físicas y mecánicas de la madera *Acrocarpus fraxinifolius*”, el cual pretende analizar las propiedades físicas (densidad y absorción) y mecánicas (compresión, dureza y flexión estática) al someter a madera a tres diferentes temperaturas de termotratamiento, con la utilización del calor de aceite a 180, 200 y 220° C. La metodología empleada fue un diseño experimental con un enfoque cuantitativo, en donde se empleó varias normas ISO (International Organization for Standardization). Los resultados mostraron que la madera al ser sometida a diferentes temperaturas se veía igual a las maderas tropicales, presentando un incremento de 4,48% de densidad (200°C), disminuyendo la absorción del agua en 200° C; en cuanto a la dureza, presentó una disminución de 6,82, 0,30 y

2,40% respectivamente y por último la resistencia a la compresión mostró un aumento de 39,39, 31,66 y 35,07% respectivamente.

Sotomayor (2018) publicó un artículo en México titulado: “Comportamiento de cinco maderas mexicanas expuestas al fuego. Evaluación por ultrasonido”, cuyo objetivo fue comparar la velocidad de onda, la densidad aparente y el módulo dinámico entre cinco tipos de maderas, antes y después de ser sometidas al fuego. Entre la metodología empleada estuvo la recolección de las piezas de maderas (*T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus spp* y *C. elaeagnoides*) en los aserraderos en México, posteriormente fueron sometidas a dos pruebas: resistencia al fuego y de ultrasonido. Los resultados mostraron que todas las piezas tuvieron un comportamiento distinto, la densidad aparente de la madera se relaciona de manera positiva con la disminución de su masa. Después de ser expuesta al fuego, la densidad aparente de la madera muestra una fuerte correlación con su densidad inicial. Sin embargo, no se observa una correlación significativa entre la velocidad de onda y el módulo dinámico. Estos resultados son específicos para las condiciones experimentales de este estudio en particular.

### ***1.2.2. Nacionales***

Un estudio publicado por Chicaiza (2022) en Riobamba-Ecuador titula: “Comparación de las propiedades físicas y mecánicas entre las especies arbóreas estudiadas: Platuquero, Pino Caribe y Pino Patula”, tiene como objetivo principal comparar las propiedades físicas y mecánicas entre los diferentes tipos de madera seleccionados para el ensayo. La metodología que utilizó fue en base a una revisión bibliográfica a fin de comparar las propiedades de las maderas y establecer la resistencia de la dureza, la humedad, la elasticidad, el cizallamiento radial, el volumen, la densidad, la compresión y el peso. Los resultados indicaron que el pino del caribe tiene mejor elasticidad y resistencia frente a las demás especies, asimismo, el platuquero tiene mayor peso y densidad frente al pino patula y pino caribe. En conclusión, las tres especies de madera sirven para la construcción de puertas, muebles, postes, biombos, entre otros.

Por otro lado, Sánchez J. (2021) realizó una investigación en Ambato-Ecuador sobre “Análisis de las propiedades mecánicas de la madera de eucalipto (*eucalyptus*), provenientes de la provincia de Tungurahua y su factibilidad como material estructural de acuerdo a la norma ecuatoriana de la construcción 2015 (NEC 2015)”, cuyo objetivo se centró en determinar las propiedades mecánicas del eucalipto y establecer los valores de elasticidad en la madera, mediante la flexión y tracción paralelo a la fibra. La metodología empleada se basó en una revisión bibliográfica y observación directa del comportamiento de la madera; además, los

ensayos se realizaron bajo las normativas ASTM D 143-94 (módulo de elasticidad) y la NEC 2015. Los resultados reportaron que el módulo de elasticidad promedio de madera de eucalipto es de 9450 MPa, el esfuerzo máximo a flexión promedio es de 63.79 MPa, el esfuerzo máximo a tracción paralelo a la fibra promedio es de 98.05 MPa y el promedio de humedad fue de 15.80%. En conclusión, el contenido de humedad, tuvo influencia en la flexibilidad, elongaciones y deformaciones de la madera de eucalipto.

En Cuenca-Ecuador, Nugra (2019) realizó un estudio titulado: “Alternativas del uso de maderas en fortificación minera, mediante la caracterización de Resistencia a la Flexión”, cuyo objetivo fue caracterizar varios tipos de madera (Pino, Teca y Eucalipto) a través de ensayos de resistencia a la flexión en varias condiciones de humedad. La metodología que se utilizó fue en base a ensayos en vigas en carga puntual y para determinar los grados de humedad, sumergieron las piezas en distintos tiempos. Los resultados mostraron que los mejores esfuerzos de flexión se consiguieron con menor humedad y a mayor humedad existe mayor flexibilidad y viceversa; además, el módulo de elasticidad en el Eucalipto disminuye cuando las probetas contienen mayor humedad; mientras que la teca y el pino por falta de datos de los ensayos no se determinó el límite de elasticidad. En conclusión, el Eucalipto tuvo mayor resistencia a la flexión con 105,86 MPa en estado natural.

### **1.3. Formulación del problema**

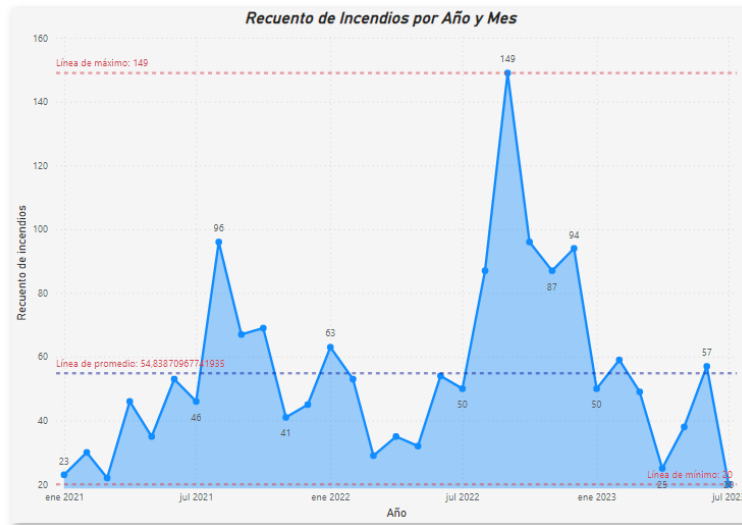
En su mayoría los incendios estructurales implican una situación problemática, debido a los riesgos que estos representan, en principio lo que tiene que ver con la vida de las personas; daños materiales, pérdida de propiedades, deterioro urbano, pérdidas económicas. Los incendios son causados directamente o indirectamente por el hombre, debido a su falta de precaución o descuido en el uso del fuego, por falta de mantenimiento del sistema eléctrico y de gas, o por falta de conocimiento en las instalaciones eléctricas.

Durante un periodo de 5 años desde el 2015 hasta el 2020 se ha recolectado datos de incendios que han dado como resultados de hasta 2278 incendios estructurales en la ciudad de Cuenca como observamos en la Figura 1 (Bomberos Cuenca, 2023).

Datos estadísticos de la ocurrencia de incendios en la ciudad de Cuenca, Ecuador, pueden ser consultados en la página oficial del Cuerpo de Bomberos de la ciudad, de donde se tomó la siguiente gráfica ilustrativa del fenómeno en los últimos años.

## Figura 1

### Datos estadísticos del recuento de incendios



*Nota.* Tomado de Bomberos Cuenca (2023)

En lo que va del año 2023 hasta el mes Junio se han reportado 275 incendios (Figura 1), es decir, en apenas 6 meses se ha documentado la cantidad de 298 incendios lo que redunda en 1.52 incendios por día como mínimo, determinando a más de un incendio por día, con lo que se demuestra la necesidad de incrementar las previsiones y mejoras en la concepción de las estructuras y los materiales a utilizar (Bomberos Cuenca, 2023).

#### 1.4. Justificación

La madera es ampliamente utilizada en la construcción debido a sus múltiples propiedades beneficiosas, como su capacidad térmica y acústica, resistencia, belleza, calidad y beneficios para la salud. Aunque se seca antes de su uso, la madera conserva cierta humedad entre sus fibras. Al exponerla al calor directo, esta humedad disminuye y se puede observar la "sudoración" en su superficie cuando el agua alcanza su punto de ebullición. Aproximadamente a los 270°C, comienza el pirólisis, que es el proceso de descomposición de la madera en gases. Debido a su baja conductividad térmica, el pirólisis ocurre principalmente en la superficie de la madera y solo se produce una llama cuando se alcanzan los 400°C aproximadamente. Después de la combustión, se forma una capa carbonizada en el exterior de la madera que protege su interior, dejándola intacta. Dependiendo del grosor de la pieza de madera, puede tardar mucho tiempo en quemarse por completo y perder su capacidad de soporte y carga.

La relevancia de esta investigación radica en abordar la escasa información local sobre el comportamiento de dos especies de madera, la Teca (*Tectona Gandis*) y el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) ante la exposición al fuego, una cuestión crítica dada la creciente utilización de la madera en la construcción. Sin embargo, la falta de datos locales específicos sobre el comportamiento de estas especies ante incendios limita la capacidad de diseñar estructuras seguras.

Este estudio, al abordar esta laguna de conocimiento mediante ensayos de laboratorio, se presenta como un paso crucial para comprender el impacto del fuego en las propiedades de la madera Teca y Eucalipto. Además, la factibilidad de esta investigación se respalda por la disponibilidad de recursos necesarios para la ejecución de los ensayos, la viabilidad temporal establecida y la relevancia práctica en el contexto actual de construcción sostenible y segura. Asimismo, el conocimiento generado permitirá avances significativos en el diseño de estructuras resistentes al fuego, promoviendo así la seguridad y eficiencia en la utilización de la madera como recurso constructivo.

## **1.5. Objetivos**

### ***1.5.1. Objetivo General***

Analizar el comportamiento físico y mecánico de elementos de madera Eucalipto y Teca, durante la exposición a fuego para evaluar el cambio que experimenta en sus propiedades.

### ***1.5.2. Objetivos Específicos***

- Caracterizar las propiedades físico mecánicas de la muestra patrón de la madera de Eucalipto y Teca, mediante ensayos de resistencia a compresión y a flexión a fin de compararla con las muestras después de la exposición al fuego.
- Evaluar las propiedades de transmisión térmica de la madera al exponerla al fuego en los diferentes periodos de tiempo para determinar transmisibilidad de calor.
- Evaluar la emisión de gases de la madera al someterla al fuego en los diferentes periodos de tiempo para determinar la cantidad de gases tóxicos que puede emanar la madera.

## 2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Estado del Arte

Durante la era del hombre primitivo, se tenía un conocimiento directo sobre cómo se comportaba la madera cuando se exponía al fuego. A nivel doméstico, se utilizaba como combustible para calentarse y cocinar alimentos. A nivel industrial, se empleaba en forma de carbón vegetal en la fabricación de metales desde el sexto milenio antes de Cristo. Sin embargo, siglos más adelante nació la necesidad de estudiar el comportamiento de la madera al fuego, a raíz de la catástrofe que sucedió en la ciudad romana Pompeya por la erupción del Vesubio en el año 79 d.C., en donde se observaron restos arqueológicos de madera que solo sufrieron una carbonización superficial, a pesar de soportar altas temperaturas que alcanzaron entre 3000 a 6000 °C (AITIM, 2018).

Hasta la actualidad, se ha observado algunos autores interesados en el estudio del comportamiento de la madera expuesta al fuego, como es el caso de Vargas (2020), quien se interesó por investigar el comportamiento mecánico y físico de la madera expuesta al fuego, en donde determinó que existe una relación directa y significativa entre la resistencia de la madera y la exposición al fuego; por cuanto, recomiendan utilizar la nanotecnología para la creación de maneras resistentes al fuego.

Por otro lado, Césaire (2019) publicó un estudio sobre el análisis del efecto de termotratamiento en aceite en las propiedades físicas (densidad y absorción) y mecánicas (compresión, dureza y flexión estática) de la madera al ser sometidas al calor del aceite a 180, 200 y 220° C, demostrando que, un incremento de 4,48% de densidad (200°C), disminuyendo la absorción del agua en 200° C; en cuanto a la dureza, presentó una disminución de 6,82, 0,30 y 2,40% respectivamente y por último la resistencia a la compresión mostró un aumento de 40, 32 y 35% respectivamente.

Otro de los estudios realizados por Sánchez J. (2021) acerca de las propiedades mecánicas de la madera de Eucalipto, se ha constatado que a través del uso de las normativas ASTM D 143-94 (módulo de elasticidad) y la NEC 2015 se determinó que el módulo de elasticidad promedio fue de 9450 MPa, el esfuerzo máximo a flexión promedio de 63.79 MPa, el esfuerzo máximo a tracción paralelo a la fibra promedio es de 98.05 MPa y el promedio de humedad fue de 15.80%. Por lo tanto, este estudio demostró que el contenido de humedad, tuvo influencia en la flexibilidad, elongaciones y deformaciones de la madera.

Para concluir se puede mencionar que, diversos autores han llevado a cabo pruebas y desarrollado modelos numéricos para analizar cómo se comporta la madera frente al fuego. Estos estudios recomiendan que se realicen análisis caso por caso. Entre los principales parámetros que se estudian se encuentran el tiempo de ignición, la pérdida de masa y la velocidad de carbonización. Sin embargo, en estos informes no se mencionan mediciones directas de la disminución de los módulos dinámicos de las muestras de madera (Sotomayor, 2018).

## **2.2. Incendios**

Un incendio es un fuego no controlado cuya intensidad está determinada por los materiales presentes en un edificio, y su duración depende de los elementos estructurales con los que se construye dicho edificio. Esto implica que la calidad de los productos y estructuras que conforman el edificio, considerados en conjunto, está condicionada por su respuesta al fuego (Elvira, 1984).

Por otro lado, según la Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la madera (2014) manifiesta que un incendio ocurre cuando los elementos constructivos, el mobiliario y la decoración se queman, y se desarrolla de manera impredecible en el espacio y en el tiempo, dependiendo de la cantidad y tipo de materiales presentes. La estructura de un edificio tiene un papel secundario en el desarrollo del fuego, a excepción de la madera y en la fase final del incendio. El incendio implica el comportamiento de todos los materiales y elementos que forman parte del fuego, interactuando de manera completamente aleatoria.

## **2.3. Reacción y resistencia al fuego**

En la etapa de un incendio, tanto la reacción como la resistencia desempeñan un papel fundamental. La reacción de cada material se refiere a su capacidad para proporcionar combustible al fuego y permitir su expansión. La reacción es especialmente relevante al inicio de un incendio, ya que depende de la composición de los materiales presentes. Es importante tener en cuenta tanto la reacción como la resistencia de los materiales al evaluar el impacto de un incendio (Elvira, 1984).

La resistencia a un incendio de una estructura es el tiempo que esta logra mantenerse cumpliendo sus funciones para la cual fue diseñada. Representa el tiempo con que se cuenta para realizar una evacuación y por último un salvamiento de bienes en razón a esta estructura (Bascañán, 2021).

## 2.4. Prevención y control de incendios

La ciudad de Cuenca cuenta con un Cuerpo de Bomberos que desde 1945 que presta un servicio de prevención y control de contingencias de todo tipo, que en realidad es el espíritu de esas instituciones a lo largo de la historia. Con el correr de los años el Benemérito Cuerpo de Bomberos de la ciudad de Cuenca ha experimentado cambios y mejoras en sus métodos y procedimientos, debido a la creciente profesionalización de sus integrantes y la aparición de normas técnicas de obligatorio cumplimiento (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2023).

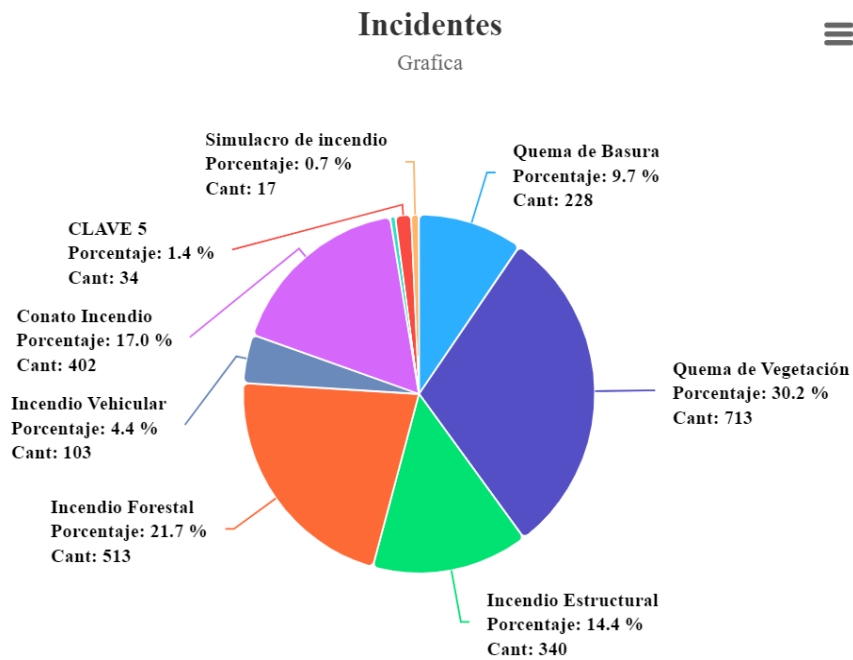
En tal sentido hoy día la Institución exhibe una serie de servicios técnicos que repercuten directamente en el control de incendios, los cuales se resumen en:

- Inspección en sitio de los sistemas contra incendio de locales, industrias y edificaciones residenciales.
- Asesoramiento técnico para la elaboración y puesta en marcha de sistemas contra incendios.
- Revisión y sellado de proyectos contra incendio presentados por profesionales proyectistas y constructores.
- Inspección en obra terminada de sistemas contra incendio para otorgar permiso de habitabilidad.
- Capacitación y asesoramiento técnico para profesionales y empresas sobre temas de detección, extinción y medios de escape en edificaciones.
- Atención de denuncias relacionadas con el tema de fuego, explosiones y accidentes.
- Realizar las investigaciones correspondientes a siniestros para determinar sus causas y emitir informe final, que serviría para mejorar los códigos de prevención existentes (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2023).

En condiciones normales, el Cuerpo de Bomberos tiene en la ciudad de Cuenca, tiene una capacidad de respuesta bastante rápida, no siendo más de 15 minutos el tiempo de llegada al lugar del siniestro, lo que nos da un parámetro importante para nuestra investigación. Como se mencionó en párrafos anteriores, en la región de Cuenca ocurren incendios de forma reiterada, y el cuerpo de bomberos se ha dado a la tarea de documentar sus estadísticas y publicarlas en su sitio web como material de consulta del público en general. A continuación, se presentan gráficas de incendios en Cuenca para los últimos tres años:

**Figura 2**

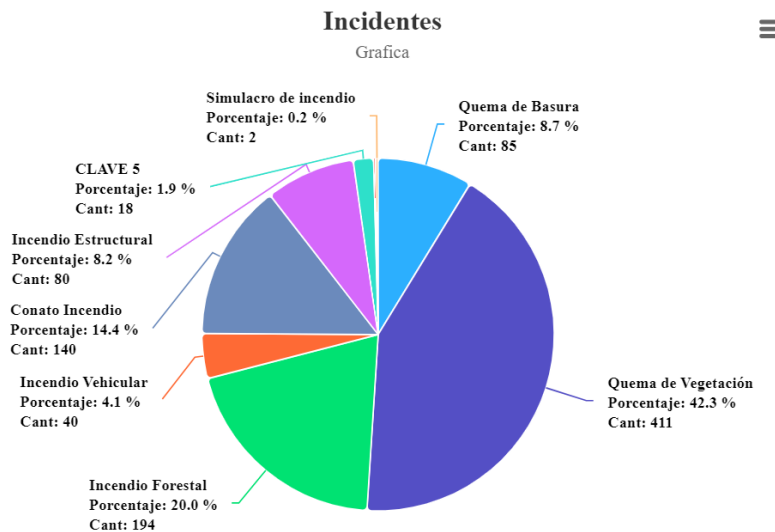
Índice de incendios en la ciudad de Cuenca en los últimos 3 años



Nota. Tomado de Bomberos Cuenca (2023)

**Figura 3**

Índice de incendios en la ciudad de Cuenca en los últimos 3 años



Nota. Tomado de Bomberos Cuenca (2023)

La observación de estas gráficas menciona que en lo que va del año 2023 (enero-octubre), han ocurrido 80 incendios estructurales, por lo cual hay que seguir incrementando las medidas de

prevención, y también profundizar en el estudio de la resistencia al fuego del material madera, y en especial la teca y el eucalipto, como objeto del presente estudio.

## **2.5. La Madera**

La madera, en su estado natural, es susceptible de arder y prenderse fuego, pero es factible eliminar por completo esta inflamabilidad mediante tratamientos ignífugos, lo que da como resultado un material de construcción fiable frente al fuego. Los bomberos conocen bien este efecto y prefieren intervenir en incendios en edificios con estructura de madera en lugar de hierro o hormigón (Martin, 2005). Asimismo, el autor considera que esto se debe principalmente a las siguientes propiedades:

- La conductividad térmica de las fibras de madera es muy baja, lo que ralentiza y dificulta la transmisión de calor hacia el interior de la madera, creando una capa carbonizada que actúa como protección en profundidad.
- El grosor es otro factor favorable en las vigas u otros elementos gruesos; la madera comienza a arder superficialmente después de un tiempo, lo que le permite secarse. El carbón formado en la superficie protege el interior, que, debido a la baja conductividad térmica, permanece intacto.

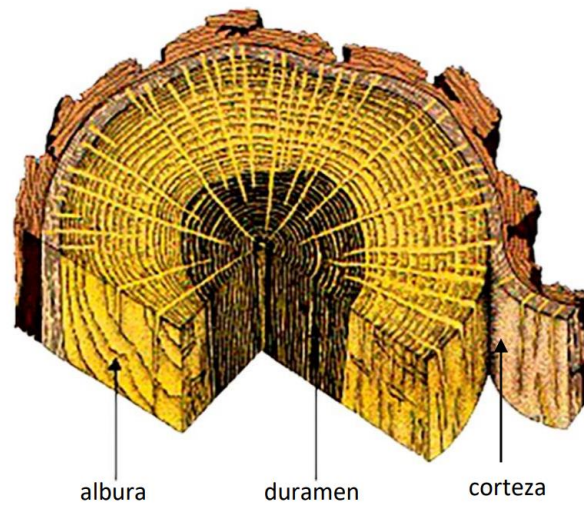
Es importante considerar que al reducir la sección de la madera se disminuye su resistencia mecánica, pero el proceso de secado aumenta ligeramente su resistencia, compensando en parte la pérdida por la reducción de sección.

### **2.5.1. Estructura del tronco del árbol**

La madera, a medida que envejece y deja de actuar como tejido de conducción, experimenta cambios visibles que incluyen la pérdida de sustancias almacenadas y la penetración de sustancias como aceites y resinas, lo que le confiere color y aroma. Estas células mueren y pasan a funcionar exclusivamente como estructura del tronco. La madera que ya no conduce, generalmente más oscura, se conoce como duramen, mientras que la madera conductora, que es típicamente más clara, se conoce como albura (Villalba y Gómez, 2022).

## Figura 4

*Capas que componen el tronco de un árbol*



*Nota.* Tomado de Villalba y Gómez (2022)

La disposición de las plantas leñosas se forma, desde el exterior hacia el interior (Figura 4), en primer lugar, con la corteza, que constituye la capa externa compuesta por células sin vida. En segundo lugar, encontramos la albura, que actúa como la capa conductora del tronco. En esta región funcional se localizan las fibras y venas encargadas tanto de la conducción de fluidos como de la estructura del árbol. Por último, se encuentra el duramen, que cumple exclusivamente una función estructural.

### **2.5.2. Composición de la madera**

La madera tiene una composición promedio que consiste en aproximadamente un 50% de carbono (C), un 42% de oxígeno (O), un 6% de hidrógeno (H) y el 2% restante de nitrógeno (N) y otros elementos. Sus elementos principales son la celulosa, que representa alrededor de la mitad del material total, la lignina (aproximadamente un 25%), que proporciona dureza y protección, y la hemicelulosa (alrededor de un 25%) que actúa como unión de las fibras. Además, existen otros componentes minoritarios como resinas, ceras, grasas y otras sustancias (Valverde et al., 2020).

El examen químico de la madera revela los niveles de holocelulosa, lignina, extractivos y ceniza, los cuales se forman a lo largo de la vida de cada árbol. Estos elementos influyen de manera importante en otras cualidades de la madera, como sus propiedades físicas, organolépticas y mecánicas.

## **2.6. Especies: Teca y Eucalipto**

### **2.6.1. Teca (*Tectona Grandis*)**

La *Tectona Grandis* o Teca, es un tipo de madera bastante trabajable y de apariencia agradable, de peso medio y blanda. Es muy apreciada en la construcción y mueblería, en estado natural tiene una albura (capa posterior a la corteza) de unos 50 mm de color blanco o pardo – amarillenta y el duramen (corazón) es de color amarillento opaco cuando verde y ya seca se oscurece un poco su color y le aparecen bandas de color más oscuro, generalmente dorado, las cuales se desvanecen con el paso del tiempo. Es una madera de fácil secado y alta durabilidad con una densidad de 0.5 y 0.82 (Basantez, 2003).

La teca es una madera de densidad media, relativamente suave, con una apariencia muy distintiva. Es de alta calidad y altamente valorada para aplicaciones estructurales y decorativas, sin embargo, su uso está limitado debido a su alto costo. La albura tiene un color blanco-amarillento o pardo-amarillento claro y puede llegar a tener hasta 50 mm de ancho. El duramen suele ser opacamente amarillento cuando está fresco, pero una vez expuesto se vuelve pardo-amarillento o pardo-dorado pálido, a veces de manera menos uniforme, con frecuentes bandas de color oscuro que con el tiempo se desvanecen. La madera tiene una sensación aceitosa al tacto y, cuando está fresca, tiene un olor parecido al cuero, ligeramente desagradable, el cual puede intensificarse al humedecer o calentar la madera. La veta suele ser recta, a veces ondulada o ligeramente entrecruzada, con una textura más bien gruesa e irregular (Solano et al., 2019).

Este tipo de madera es muy usada en la construcción, tanto de estructuras como en tablas y accesorios, también es usada en la construcción naval, así como en elementos decorativos, mueblería y accesorios diversos. También es usada frecuentemente en la fabricación de pisos de parquet, puertas y ventanas (Rodríguez et al., 2014).

Su rápido crecimiento y desarrollo ha hecho de la Teca una especie cultivable y objeto de explotación intensiva, debido a que una vez cortada sus raíces permanecen vivas y se pueden sacar varias cosechas con el mismo sembradío, permitiendo así aminorar los costos de producción. Su alta calidad estética le permite ser usada en gran cantidad de techos de machimbrado, su rectitud la hace muy apta para vigas y columnas de sección circular, pero también rectangular al ser sometidas a procesos de aserrío (Basantez, 2003).

## Figura 5

*Ambiente natural TECA (Tectona Grandis)*



*Nota.* Tomado de Botina (2019)

### 2.6.2. *Eucalipto (Eucalyptus Globulus)*

El *Eucalyptus globulus* pertenece a la familia de las mirtáceas, aunque oriunda de Australia y Nueva Guinea, se ha extendido por gran parte del mundo, incluyendo América latina, en donde se explota de manera intensiva, más que todo como materia prima de la industria papelera (Resquin et al., 2012; Sánchez J. L., 2021).

Son árboles de tallo recto y alto, llegando a medir hasta 60 mts., de corteza exterior marrón claro con aspecto de piel. Es de rápido crecimiento cuyas raíces vuelven a crecer y desarrollarse después de ser cortada, haciendo de esta especie un tipo adecuado para explotación intensiva. A las hojas y corteza del eucalipto se le atribuyen propiedades medicinales, pero también su madera es utilizada para la elaboración de pulpa de papel. Entre sus características principales la madera de eucalipto presenta una buena resistencia a la descomposición por su alto contenido de aceite, esta propiedad la hace alta para ser utilizada en postes para cercas (Basantez, 2003).

## Figura 6

*Ambiente natural Eucalyptus Globulus*



*Nota.* Tomado de Sánchez (2021)

Otros usos del Eucalipto en la actualidad aparte de la fabricación de pulpa de papel y madera estructural, se puede mencionar los postes de madera, fabricación de tableros aglomerados de madera, chapas decorativas y carpintería en general. También se obtienen de esta especie productos químicos para la industria farmacéutica (Moreno et al., 2022).

### **2.7. Propiedades físicas y mecánicas de la madera**

#### **2.7.1. Propiedades físicas de la madera Teca**

A continuación, se detalla las características físicas de la madera Teca:

- **Color.** La madera cortada recientemente muestra un tono verde-oliva que cambia a marrón cuando la parte exterior, de color amarillento, se seca, diferenciándose claramente del núcleo (Ficha técnica No. 12, 2010).
- **Durabilidad natural.** Esta madera es altamente resistente, si bien la parte exterior no cuenta con las mismas propiedades duraderas que el núcleo (Ficha técnica No. 12, 2010).
- **Secado.** Se seca rápidamente y de forma sencilla, aunque puede presentar ligeras deformaciones (Ficha técnica No. 12, 2010).
- **Trabajabilidad.** Es fácil de trabajar, aunque a veces puede complicarse debido a la presencia de sílice. Además, no se ve afectada por el contacto con el hierro ni causa cambios en dicho material (Ficha técnica No. 12, 2010).

**Tabla 1***Propiedades físicas de Teca*

<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>			
	<b>Verde</b>	<b>Seco al aire</b>	<b>Básica</b>
DENSIDAD Gr/C m <sup>3</sup>	0.8	0.61	0.53
CONTRACCIÓN NORMAL %	Tangencial	Radial	Relación
	2.69	1.61	T/R 1.67

*Nota.* Tomado de Ficha técnica No. 12 (2010)

### **2.7.2. Propiedades físicas de la madera Eucalipto**

A continuación, se detalla las características físicas de la madera Eucalipto:

- **Color.** La albura presenta un tono crema con escasa diferencia en comparación con el duramen, el cual tiene un tono crema oscuro con matices grisáceos (Ficha técnica No. 10, 2010).
- **Durabilidad natural.** La madera es moderadamente duradera y resistente al ataque de hongos (Ficha técnica No. 10, 2010).
- **Secado.** Se seca rápidamente, alcanzando un contenido de humedad del 20% en 75 días. Además, es sensible al clavado, pero seca sin problemas de defectos mediante el uso de un horno suave (Ficha técnica No. 10, 2010).
- **Trabajabilidad.** Presenta defectos muy leves al ser cepillada, moldeada y taladrada, y es sensible al clavado, lo que puede ocasionar rajaduras. Por esta razón, se recomienda realizar un pretaladro (Ficha técnica No. 10, 2010).

**Tabla 2***Propiedades físicas de Eucalipto*

<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>			
	<b>Verde</b>	<b>Seco al aire</b>	<b>Básica</b>
DENSIDAD Gr/C m <sup>3</sup>	1.16	0.73	0.55
CONTRACCIÓN NORMAL %	Tangencial	Radial	Relación
	10.8	4.4	T/R 15.2

*Nota.* Tomado de Ficha técnica No. 10 (2010)

### 2.7.3. Propiedades mecánicas de la madera

Las características mecánicas de la madera están estrechamente vinculadas a la cantidad de humedad presente y la orientación de las fibras. Cualquier anomalía en la madera afecta negativamente su resistencia, durabilidad o utilidad; los nudos, grietas, astillas, deterioro, y el grano transversal, entre otros, son ejemplos de tales irregularidades que pueden surgir (Sánchez et al., 2018). A continuación, se presentan las propiedades mecánicas de la madera Teca (Tabla 3) y de la madera de Eucalipto (Tabla 4).

**Tabla 3**

*Propiedades mecánicas de Teca*

<b>PROPIEDADES MECÁNICAS CH = 12%</b>			
Flexión Elástica	EPL	633	Kg/cm <sup>2</sup>
	MOR	1005	Kg/cm <sup>2</sup>
	MOE	0.108	Kg/cm <sup>2</sup>
Compresión Paralela	EPL	336	Kg/cm <sup>2</sup>
	MOR	458	Kg/cm <sup>2</sup>
Compresión Perpendicular	MOE	75	Kg/cm <sup>2</sup>
Dureza Janka	Lado	111	Kg
	Extremo	481	Kg

*Nota.* Tomado de Ficha técnica No. 12 (2010).

**ELP:** Esfuerzo en el índice proporcional; **MOR:** Módulo de ruptura; **MOE:** Módulo de elasticidad.

**Tabla 4**

*Propiedades mecánicas de Eucalipto*

<b>PROPIEDADES MECÁNICAS CH = 12%</b>				
		<b>Verde</b>	<b>Seco al aire</b>	
Flexión Elástica	EPL	383	509	Kg/cm <sup>2</sup>
	MOR	702	1068	Kg/cm <sup>2</sup>
	MOE x 10	104	138	Kg/cm <sup>2</sup>
Compresión Paralela	EPL	232	337	Kg/cm <sup>2</sup>
	MOR	288	470	Kg/cm <sup>2</sup>
Compresión Perpendicular	MOE	58	80	Kg/cm <sup>2</sup>
Dureza Janka	Lado	478	480	Kg
	Extremo	442	557	Kg

*Nota.* Tomado de Ficha técnica No. 10 (2010)

## **2.8. Comportamiento de la madera frente al fuego**

No existen materiales estructurales que no sufran daños al estar expuestos al fuego, lo que hace imposible diseñar y construir edificaciones a prueba de fuego. Hay varios casos de incendios graves en construcciones hechas con materiales incombustibles donde las estructuras colapsaron destructivamente, considerando que, la madera es un material combustible que, al estar expuesto a temperaturas superiores a los 120 °C, experimenta un proceso de deterioro químico, produciendo carbón y gases inflamables. Sin embargo, debido a su baja conductividad térmica, la carbonización avanza lentamente a un promedio de 0,6 mm/min, lo que le otorga una importante resistencia al fuego cuando las secciones de los elementos de madera son de un tamaño considerable, como ocurre con la madera laminada (Garay y Henríquez, Comportamiento frente al fuego de tableros y madera de pino radiata con y sin pintura retardante de llama, 2010).

Por otro lado, según Cantos et al. (2018) en el proceso de quema de la madera, participan diversos conceptos que alteran la estructura del material a medida que la temperatura aumenta, siendo los principales los que se mencionan a continuación:

### **2.8.1. Pirólisis**

El movimiento desordenado de las moléculas de un material al aumentar la temperatura provoca vibraciones violentas en los átomos y la ruptura de sus uniones químicas, lo que genera moléculas más pequeñas. Este fenómeno se repite a medida que la temperatura sigue aumentando, dando lugar a la formación de líquidos y gases, conocido como pirólisis, que representa la etapa de ignición y posterior combustión del elemento (Iparraguirre, 2009). Dado que la superficie de contacto es la parte externa del material, es lógico deducir que el proceso de descomposición avanza desde el exterior hacia el interior de la madera.

### **2.8.2. Combustión**

La combustión puede compararse a un proceso de oxidación exotérmica rápida y en cadena, la cual se sostiene e incluso aumenta en función de la presencia o ausencia de oxígeno y material combustible en cantidades apropiadas (Hitado, 2015).

### **2.8.3. Carbonización superficial**

La madera expuesta al fuego experimenta un aumento gradual de temperatura y, eventualmente, comienza a arder, sufriendo un deterioro evidente en la cara expuesta y formando una capa de carbón con una baja conductividad térmica. Esta capa funciona como

una barrera protectora para la parte interna de la pieza, manteniendo las capas interiores a una temperatura mucho más baja que las capas externas expuestas. Como resultado, el núcleo de la pieza se mantiene intacto, preservando la capacidad de carga de la madera, aunque la carbonización continuará reduciendo la sección y, por ende, su capacidad de soporte hasta su eventual falla. Estos aspectos indican la necesidad de utilizar elementos de madera lo suficientemente robustos para resistir un incendio prolongado, así como tomar precauciones de protección a nivel de diseño (Luve, 2020).

#### ***2.8.4. Temperatura de ignición***

La temperatura de ignición de la madera es el punto en el que las llamas comienzan a aparecer, y esta temperatura se mantendrá y aumentará debido a la presencia de oxígeno. Esta temperatura se sitúa en torno a los 250°C como valor promedio, aunque puede variar según el tipo de madera, su densidad, la fuente de calor, las dimensiones de la pieza expuesta, el contenido de humedad, el suministro de oxígeno y la presencia o ausencia de una chispa inicial (Hitado, 2015).

Hay materiales con una temperatura de ignición superior a la de la madera, lo que sugiere un comportamiento más seguro. Sin embargo, esta característica puede provocar incendios mucho más intensos, lo que resulta en pérdidas mucho mayores que si se tratara de una estructura de madera.

#### ***2.8.5. Velocidad de llama superficial***

La rapidez con la que las llamas se expanden a lo largo de la pieza expuesta al fuego es un factor crucial que está directamente relacionado con los materiales que forman el revestimiento. Esta característica es esencial para poder apagar el fuego a tiempo y para garantizar una evacuación segura de los espacios cubiertos por la estructura. Se evalúa esta propiedad utilizando túneles de fuego siguiendo las directrices de la Norma ASTM-E84-50T. Al igual que en el proceso de carbonización, la velocidad de propagación de las llamas depende directamente de la ubicación relativa de la pieza y su ventilación (Luve, 2020).

#### ***2.8.6. Velocidad de carbonización***

Esta cualidad despierta un gran interés entre los investigadores del tema, ya que su mayor o menor grado implica la reducción de las dimensiones de las piezas estructurales, lo que a su vez impacta su capacidad de carga y estabilidad. Se han desarrollado métodos experimentales de medición en condiciones de incendio normalizadas para determinar su valor en cada tipo de

madera, lo que posibilita predecir su comportamiento con bastante precisión. Se ha establecido un valor promedio de esta velocidad entre 0.5 y 2.00 mm/min, lo que permite anticipar un avance de la carbonización de 5 mm en 10 minutos desde la ignición. Este valor, como se mencionó anteriormente, depende del tipo de madera y sus parámetros; las maderas más permeables y menos densas experimentan una mayor velocidad de carbonización (Rodas, 2014).

## **2.9. Carbonización de la madera**

El proceso de carbonización implica la exposición de la madera a altas temperaturas y baja concentración de oxígeno (Valverde et al., 2019), lo cual provoca su descomposición y la formación de una capa de carbón que actúa como protección contra el fuego, ralentizando su deterioro. Es relevante destacar que cuando la madera se expone directamente al fuego, puede sufrir una pérdida de entre 0.5 a 2 mm de material por minuto, dependiendo del tipo de madera, debido al proceso de carbonización (Garay y Henríquez, 2010).

La velocidad de carbonización de la madera es de aproximadamente 0,07 mm por minuto. Esto significa que cuando la madera se quema, su proceso de carbonización es previsible, a diferencia de otros materiales cuya respuesta al fuego es aleatoria. De hecho, esta velocidad de carbonización se utiliza en el cálculo de las estructuras de madera en situaciones de incendio. Además, se conoce que la madera emite crujidos antes de romperse, lo cual sirve como una señal de advertencia. Esta característica permite planificar las acciones de extinción y evacuación de manera más ordenada y segura durante un incendio, lo cual es de vital importancia (AITIM, 2018).

## **2.10. Combustión de la madera según su volumen**

La madera se incinera mediante procesos químicos (combustión) de exterior a interior, disminuyendo progresivamente su tamaño en relación a su exposición al fuego. En el proceso de incineración de la madera, su grosor es crucial: las piezas delgadas arden con facilidad, mientras que las gruesas son más duraderas. Por este motivo, las estructuras pesadas pueden permanecer al descubierto, mientras que las ligeras se protegen con materiales que no arden (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la madera, 2014).

### ***2.10.1. Estructuras pesadas***

La estructura se va quemando y debilitando de manera progresiva y lenta debido a las siguientes razones:

- Su baja conductividad térmica provoca que la temperatura aumente solo en la superficie, manteniendo el interior más estable, lo que retrasa el proceso de combustión.
- La carbonización superficial que ocurre impide la salida de gases y la penetración del calor. De manera similar al caso anterior, esto retrasa el proceso de combustión al proteger la parte interior de las piezas estructurales con las capas superficiales carbonizadas.
- Debido a su mínima dilatación térmica, no desestabiliza ni deforma las estructuras **(Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la madera, 2014)**.

### ***2.10.2. Estructuras ligeras***

La madera se quema y debilita velozmente, lo que provoca un colapso rápido y la necesidad de protegerla con métodos externos. Esta protección no solo es fácil, sino que también es parte integral del sistema, dado que las estructuras ligeras requieren revestimientos con tableros para su correcto funcionamiento. El uso de tableros de yeso para proteger la estructura no altera el sistema en sí (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la madera, 2014).

## **2.11. Ignifugación de la madera**

### ***2.11.1. Definición de la ignifugación***

La ignifugación es una técnica de larga data, que se remonta al siglo I a.C., cuando una torre de madera impregnada con alumbre (sulfato doble de potasio y aluminio hidratado -  $\text{SO}_4 \text{K}_2 (\text{SO}_4)_3 \text{Al}_2 24\text{H}_2\text{O}$ ) no pudo incendiarse. Consiste en someter la madera y sus derivados a un tratamiento que los hace menos inflamables (clase M-2) o incluso no inflamables (clase M-1). Para llevar a cabo esta ignifugación, hoy en día se utilizan principalmente productos a base de fosfatos y sulfatos de amonio, boratos de sodio, ácido bórico, silicatos de sodio y potasio, compuestos clorados, entre otros (Jiménez, s.f.).

De acuerdo con Castañeda et al. (2007) existen muy pocos estudios que hagan referencia a los impactos que los tratamientos ignífugos pueden tener en las propiedades mecánicas de la madera tienen poca documentación. Teóricamente, los cambios en la resistencia se asocian principalmente con factores como la especie, tamaño, contenido de humedad, método de impregnación (temperatura y presión) y la duración del período de presión, en lugar del tipo de sales utilizadas. La variación de este contenido en las diferentes especies puede influir en las propiedades físicas y mecánicas.

### ***2.11.2. Procedimientos de la ignifugación de la madera***

Jiménez et al. (s.f.) manifiestan que la ignifugación no cambia la resistencia al fuego de la madera, pero sí mejora considerablemente su "inflamabilidad", es decir, su reacción al fuego.

A continuación, se detallan los procedimientos:

- **Ignifugación en profundidad:** Este método implica la incorporación de sales ignífugas a la masa de madera, siendo altamente efectivo para mantener la ignifugación, aunque costoso.
  - **Madera maciza:** La porosidad de la madera facilita la introducción de productos ignífugos en forma de soluciones acuosas, generalmente a alta temperatura y concentración.
  - **Contrachapado:** La ignifugación puede realizarse después de que las chapas hayan sido encoladas y formado el tablero, o mediante la impregnación de cada chapa antes del encolado.
  - **Tablero de fibras:** La ignifugación de estos tableros es muy difícil mediante el método convencional de vía húmeda.
  - **Tablero de partículas:** Su ignifugación se basa en la adición de ignífugos poco hidrosolubles al mezclar las partículas en estado pulverulento o incluso en la cola misma.
- **Ignifugación superficial:** Tiene la ventaja de poder aplicarse a la madera ya encolada en la obra. Puede realizarse con una variedad de productos según el propósito deseado.
  - **Acabados, enlucidos y revestimientos de cierto grosor:** El yeso es uno de los revestimientos más conocidos. La protección que ofrece depende del espesor de la capa aplicada, siendo interesante a partir de 1 mm.
  - **Pinturas y barnices:** Su acción retardante del fuego depende principalmente del espesor de la capa de pintura sólida sobre el sustrato, independientemente de su composición.
  - **Soluciones salinas:** Consiste en la aplicación de ciertas sales ignífugas en la superficie del material, las cuales deben ser disueltas en agua. La aplicación sobre la madera se realiza por pulverización o inmersión, secándose rápidamente, ya que la humificación es solo superficial.

## 2.12. Ensayos

### 2.12.1. Ensayo de resistencia a la compresión de la madera

La organización de las fibras que componen la madera produce la anisotropía de su estructura, por lo tanto, al delimitar sus propiedades mecánicas es crucial considerar la disparidad entre la dirección perpendicular y paralela a la fibra (Suárez, 2021; Sánchez et al., 2018).

- **Compresión perpendicular a la fibra.** Cuando se ejerce presión perpendicular al eje longitudinal de la madera, esta se comporta como un conjunto de fibras alargadas, lo que provoca que sus secciones transversales sean aplastadas y, en consecuencia, experimenten una reducción en sus dimensiones bajo esfuerzos lo suficientemente altos.
- **Compresión paralela a la fibra.** Durante un ensayo de compresión en esta orientación, las fibras reciben la carga a lo largo de su eje longitudinal. La ruptura a menudo ocurre debido al colapso de las fibras.

### 2.12.2. Ensayo de resistencia a la flexión de la madera

La capacidad de la madera para resistir fuerzas que la doblan cuando se aplican en dirección perpendicular a las fibras se conoce como el "módulo de ruptura" (MOR). Cuando una viga es sometida a carga, experimenta tensiones, compresiones y esfuerzos de cizalladura, y la medición de estos esfuerzos en el momento de la falla se conoce como el módulo de ruptura (Suárez, 2021).

Para determinar la resistencia de flexión de la probeta se tomará en consideración la ecuación de carga de anillo, con el fin de lograr identificar la carga máxima que representa la prensa de CBR, como expresa la siguiente ecuación:

$$\text{Carga máxima (libras)} = 5,7069 x + 20,29 \quad (1)$$

Donde:

x = cantidad que marca el anillo de carga

### 2.12.3. Ensayo para determinar el contenido de humedad de la madera

La relación entre la resistencia mecánica de la madera y su contenido de humedad (CH) provoca que la madera responda de forma diferente a las tensiones, independientemente de la orientación de las fibras con respecto a la carga. A medida que la madera verde pierde humedad,

sus propiedades mecánicas permanecen casi constantes hasta que desaparece el agua libre, lo que se conoce como Punto de Saturación de la Fibra (PSF) (Suárez, 2021).

Según Sotomayor et al. (2015) el CH de la madera se determina como la proporción del peso del agua contenida en la probeta en el momento del ensayo y el peso de la probeta en su estado seco, utilizando la siguiente fórmula:

$$CH = \frac{(P - Psh)}{Psh} * 100\% \quad (2)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad

P = Masa húmeda

Psh = Masa Anhidra o masa seca

El CH influye en la capacidad mecánica de la madera. Dicho en otras palabras, a medida que el CH disminuye por debajo del punto de saturación de las fibras, se incrementa la capacidad mecánica significativamente. Este aumento se refleja en una mayor resistencia de la madera en flexión estática, compresión paralela y compresión perpendicular (Suárez, 2021).

#### **2.12.4. Módulo de elasticidad**

La prueba del módulo de elasticidad es una manera efectiva de determinar la resistencia de los materiales a la deformación elástica. Cuando los materiales son sometidos a fuerza o estrés, pueden experimentar deformaciones, lo cual puede resultar en productos defectuosos, desperdicio innecesario y clientes insatisfechos. El módulo de flexión ( $E_f$ ) es la relación entre el esfuerzo máximo que el material puede soportar y su deflexión máxima en la región elástica (Sotomayor, 2019). Para lo cual, se necesita de la siguiente fórmula:

$$E_f = \frac{L^3 F}{4bh^3 \delta} \quad (3)$$

Donde:

$E_f$  = Módulo de flexión (MPa)

F = Fuerza aplicada (N)

L = Longitud de apoyos (mm)

b = Ancho de probeta (mm)

h = Espesor de probeta (mm)

§ = Deflexión de la probeta (mm)

## **2.13. Normativas empleadas**

### ***2.13.1. Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) - SE – MD***

Las normativas de Estructuras de Madera definen los criterios relativos a la morfología, tamaño, calidad y diversidad, además de los estándares mínimos de empleo de la madera, con el propósito de garantizar una mayor resistencia y un nivel elemental de protección para los ocupantes de los edificios (NEC, 2014).

### ***2.13.2. Norma ASTM D 143***

Esta norma está destinada para muestras pequeñas de madera transparentes, la cual es requerida en ensayos para dar a conocer sobre los tipos de madera que existen y a la vez permite determinar las propiedades físicas y mecánicas de estas maderas para darle un uso adecuado. En las directrices de las ASTM D143, se describen dos tipos de muestras: una primaria de 50x50x760 mm y una secundaria de 25x25x410 mm. Para efectos de esta investigación, se eligió utilizar las dimensiones secundarias. La muestra estuvo apoyada a 710 mm en el ensayo primario y a una distancia libre de 360 mm en el ensayo secundario. Se prevé que, al recibir la carga, se produzcan fallas, las cuales se compararon visualmente de acuerdo al tipo de falla especificado en la Norma. La aplicación de las cargas se establece de la siguiente manera: para el ensayo primario, a una velocidad de 2.5 mm/min y para el secundario, a 1.3 mm/min (Norma ASTM D 143, 2010).

### 3. CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

Para lograr determinar los objetivos plateados se siguió la siguiente metodología que se describe a continuación:

#### 3.1. Caracterizar las propiedades físico mecánicas de los dos tipos de madera

Para determinar las propiedades físico mecánicas de las probetas se realizaron una serie de procedimientos, previo a la ejecución de los ensayos, entre estos esta la recolección de las muestras de madera en aserraderos, ya que están listos para su venta al público.

##### 3.1.1. Selección de muestras de madera

Se adquirió la madera de Eucalipto en un aserradero, ya preparada y secada al aire o natural en la ciudad de Cuenca, según datos del vendedor tenía un secado aproximado de 8 a 12 meses; de igual manera, la madera de Teca se consiguió en el cantón Naranjal, debido a que en el cantón Cuenca los precios eran muy altos, según datos del vendedor tenían un secado aproximado al natural de 18 meses (Figura 7).

#### Figura 7

*Piezas de madera de Eucalipto y Teca*



**Figura 8***Probetas codificadas para ensayo***Tabla 5***Probetas de muestra patrón para ensayos a flexión*

<b>Probetas de ensayo a flexión</b>			
<b>N.º de probeta</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>
M1.P. T	410	25	25
M2.P. T	410	25	25
M3.P. T	410	25	25
M1.P. E	410	25	25
M2.P. E	410	25	25
M3.P. E	410	25	25

**Tabla 6***Probetas de ensayo perpendicular a la fibra*

<b>Probetas de ensayo perpendicular a la fibra</b>			
<b>N.º de probeta</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>
M1.P. T +	150	50	50
M2.P. T +	150	50	50
M3.P. T +	150	50	50
M1.P. E +	150	50	50
M2.P. E +	150	50	50
M3.P. E +	150	50	50

**Tabla 7**

*Probetas de ensayo paralelo a la fibra*

<b>Probetas de ensayo paralelo a la fibra</b>			
<b>N.º de probeta</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>
M1. P.T.=	200	50	50
M2. P.T.=	200	50	50
M3. P.T.=	200	50	50
M1. P.E.=	200	50	50
M2. P.E.=	200	50	50
M3. P.E.=	200	50	50

Asimismo, se utilizaron equipos para realizar los ensayos, entre ellos se enumeran los siguientes: Para realizar los ensayos de compresión en las muestras se utilizó la Prensa de Compresión de Hormigón SHIMADZU CONCRETO 2000X (Figura 9).

**Figura 9**

*Prensa de Compresión de Hormigón SHIMADZU CONCRETO 2000X*



Para realizar los ensayos de flexión se utilizó la Prensa de CBR (Figura 10).

**Figura 10**

*Prensa de CBR*



### **3.1.2. Procedimiento previo a la aplicación de los ensayos**

Se realizó la recolección de muestras de madera en aserraderos, ya que están listos para su distribución y venta al público. Cabe destacar que, la Teca proviene de un aserradero del cantón Naranjal y el Eucalipto del cantón Cuenca. Estas muestras sirvieron para elaborar probetas de madera de acuerdo a la norma ASTM D 143-94, posteriormente se trasladaron al laboratorio de ensayo de materiales de la Universidad Católica de Cuenca y se realizaron los ensayos de laboratorio respectivos. A continuación, se detalla paso a paso cada uno de los procesos que se llevaron a cabo, previo a la aplicación de los ensayos.

#### **a) Preparación del horno refractario**

Para dar inicio a los ensayos se preparó el horno refractario, a fin de observar si resiste altas temperaturas, lo cual debido a eso fue construido con materiales refractarios (Figura 11).

#### **Figura 11**

*Horno refractario*



#### **b) Simulacro del horno**

Se ha realizado un simulacro del horno para comprobar el funcionamiento con sus debidos implementos, colocando como muestra pedazos de madera más grandes (Figura 12).

## Figura 12

### Simulacro del horno



#### c) Selección de muestras de madera

Se adquirió la madera de Eucalipto en un aserradero, ya preparada y secada al aire o natural en la ciudad de Cuenca, según datos del vendedor tenía un secado aproximado de 8 a 12 meses; de igual manera, la madera de Teca se consiguió en el cantón Naranjal, debido a que en el cantón Cuenca los precios eran muy altos, según datos del vendedor tenían un secado aproximado al natural de 18 meses (Figura 13).

### Figura 13

*Piezas de madera de Eucalipto y Teca*



### d) *Corte de madera de Eucalipto y Teca*

La madera se distingue por el lugar donde se realiza el corte: si el corte está más cerca del centro, la muestra será más dura, pero si el corte está más cerca de la corteza, será más blanda. En el caso de muestras obtenidas en un aserradero, no fue posible determinar con certeza la ubicación del corte en el tronco. En la carpintería se procedió al corte de las probetas (Figura 14).

### Figura 14

*Corte de madera de Eucalipto y Teca*





#### e) Elaboración de las probetas con medidas de ASTM

En esta etapa se prepararon las probetas en una carpintería de acuerdo a las medidas de la Norma ASTM D 143-94. A partir de las piezas aserradas, se prepararon dos grupos de probetas uno para la Teca y otro para el Eucalipto: contando con un total de 36 probetas por grupo para realizar los ensayos de flexión y compresión; según las medidas que especifica la norma ASTM para ensayos de madera (Figura 15).

#### Figura 15

*Medidas de las probetas según norma ASTM D 143-94*



#### f) Codificación de las probetas

Una vez elaboradas las probetas se codificaron para un mejor control antes de ser sometidas a los ensayos correspondientes (Figura 16).

**Figura 16**

*Codificación de las probetas*

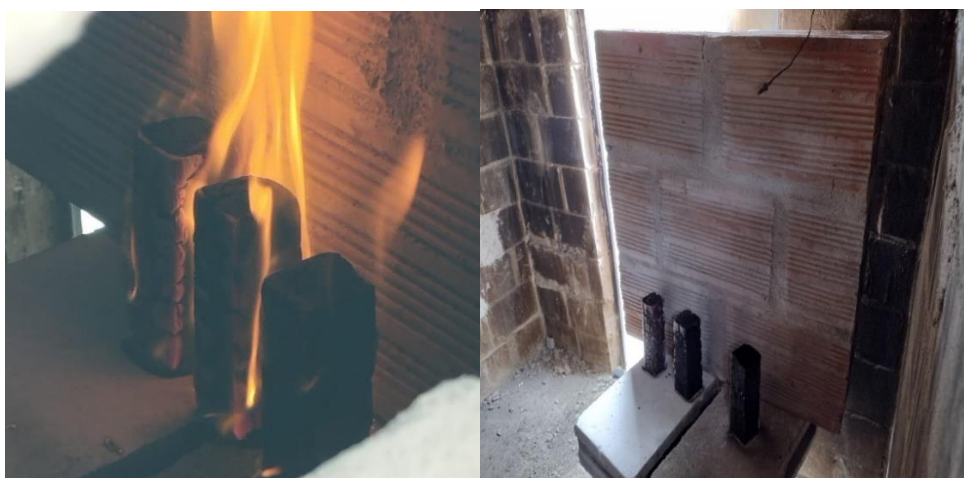


**g) Quemar las probetas**

Para lograr determinar las propiedades deseadas de las dos especies de madera, se ingresaron las muestras para exponerlas al fuego simulando un incendio, se les colocó a diferentes periodos de tiempo; es decir, tres probetas de cada tipo de madera a un tiempo de 5, 10 y 15 minutos, para luego realizar los respectivos ensayos de laboratorio y lograr determinar la afectación del fuego en sus propiedades mecánicas, en comparación con la muestra patrón; en total se quemaron 27 probetas a temperaturas de hasta 800 °C (Figura 17).

**Figura 17**

*Quema de probetas en diferentes tiempos*





### **h) Enfriamiento de la muestra**

Una vez quemada cada una de las muestras se ha dejado 24 horas para que se enfríen completamente para poder realizar los ensayos, se envolvió con cinta para no confundir las muestras y se los separó por grupo según su tiempo de quemado (Figura 18).

### **Figura 18**

*Enfriamiento de las muestras quemadas para ensayo*



### **3.1.3. Caracterización de las propiedades físico mecánicas de la muestra patrón de la madera de Eucalipto y Teca**

#### **a) Procedimiento para ensayo de resistencia a compresión**

Para realizar el ensayo de compresión se utilizó la Prensa de compresión de hormigón “SHIMADZU CONCRETO 2000X”, la cual pertenece a los laboratorios de la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción de la Universidad Católica de Cuenca. Los ensayos de compresión sirven para determinar la resistencia máxima a compresión que los elementos tienen por unidad de área.

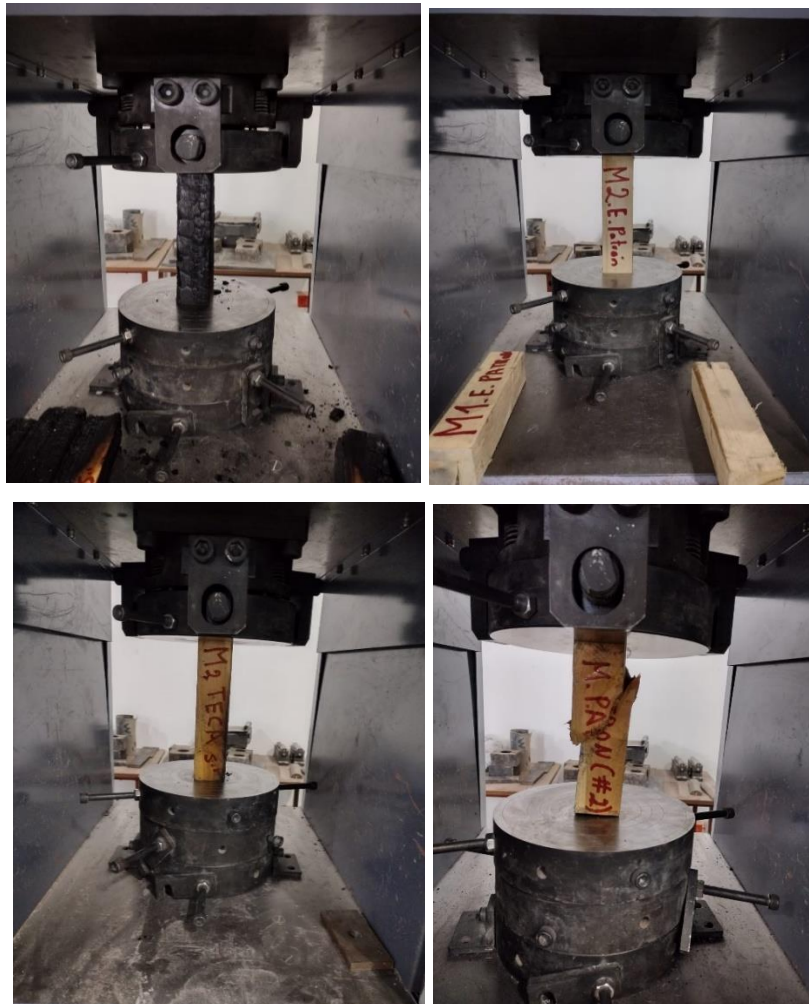
Las muestras usadas para el ensayo a compresión perpendicular a sus fibras son las probetas las medias de 5x5x15 cm, a diferencia de las paralelas a sus fibras que cambia su longitud a 20

cm, en lo referente a muestras de hormigón se ha usado probetas en forma de rectángulos con medidas según lo especifica la norma ASTM D 143-94. La prensa hidráulica japonesa aplica una fuerza de compresión constante, con una velocidad que especifica la norma citada de 1,3 mm/min para los ensayos de flexión y de 0.305 mm/min para ensayos a compresión.

Primeramente, se calibra la máquina con la velocidad con la que se va a trabajar el ensayo y se ingresa las dimensiones de la probeta; sin embargo, las muestras patrón ya tienen dimensiones establecidas. Para las muestras quemadas se ha tomado nuevamente medidas y se ha obtenido un promedio debido a la pérdida de sección por la quema.

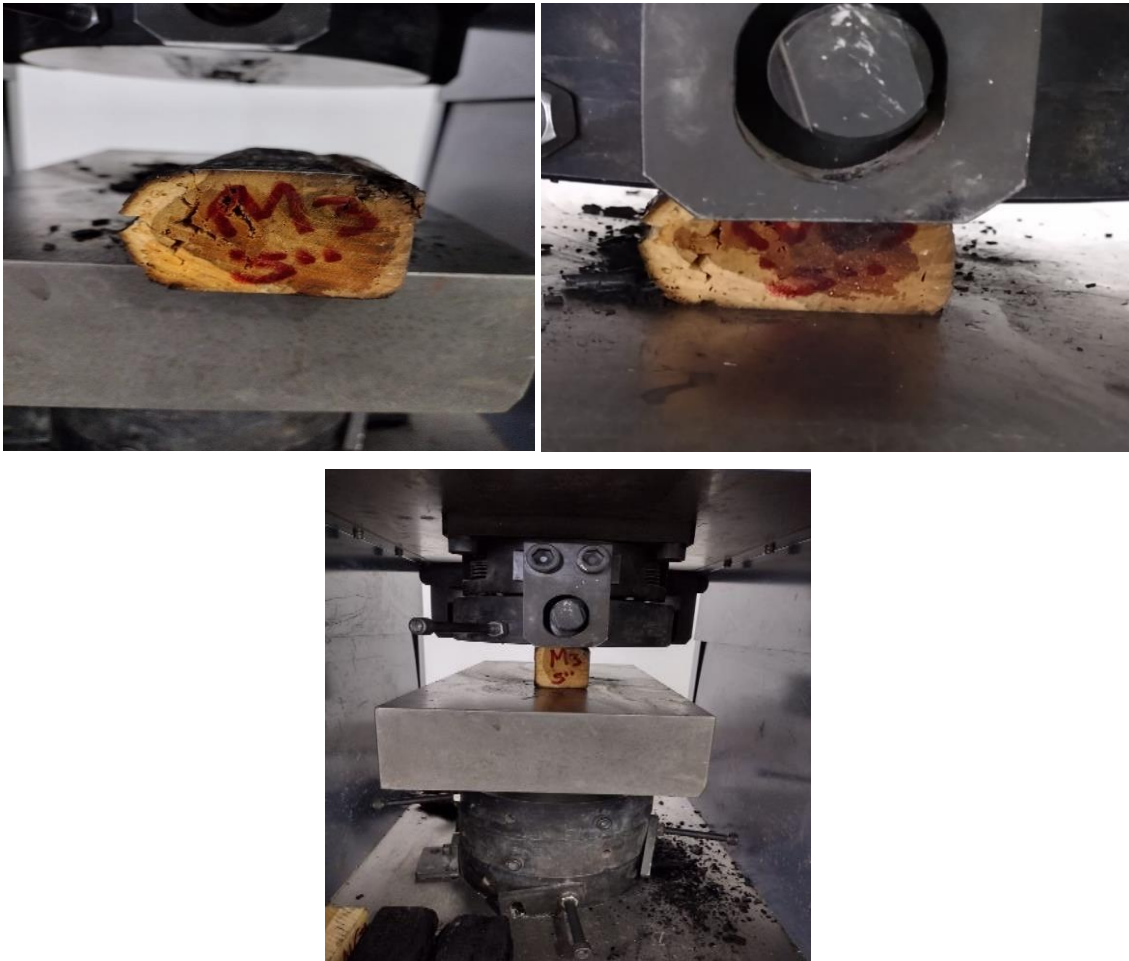
### Figura 19

*Ensayo de resistencia a la compresión paralelo a la fibra*



**Figura 20**

*Ensayo de resistencia a la compresión perpendicular a la fibra*



**b) Procedimiento para ensayo de resistencia a la flexión**

Para realizar los ensayos de flexión se utilizó la Prensa de CBR, la cual pertenece a los laboratorios de la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción de la Universidad Católica de Cuenca. Para este ensayo se tiene muestras tipo viguetas, las cuales deben tener una luz libre de 36 cm, y tener marcado su centro dejando un sobrante de 2.5 cm para cada lado que se pondrá sobre unas barras metálicas como se visualiza en la Figura 21. La prensa CBR cuenta con un medidor de presión ubicado en el centro de sus anillos que va marcando cada lectura de carga y se puede medir mediante su ecuación la carga máxima soportada por el elemento.

## Figura 21

*Ensayo de resistencia a la flexión*



### 3.2. Procedimiento para evaluar las propiedades de transmisión térmica de la madera

Para tomar la transmisión de calor de las muestras, se ha cortado probetas de 30 cm de longitud y de 13.3 x 13.3 cm de área, tratando de asemejar las dimensiones de una probeta estándar de hormigón. Se ha usado un medidor tipo láser, donde se ha tomado temperaturas en sus bordes y en el centro de la muestra de ambos lados de la madera, además se toma medidas de temperaturas en la parte expuesta al fuego directamente y la cara que no está expuesta para determinar la capacidad del material de transmitir calor de una cara a la otra., tal como se observa en la Figura 22.

## Figura 22

*Lado de la madera expuesta y no expuesta al fuego*



*Nota.* A: lado de la madera que está expuesta directo al fuego; B: lado de la madera que no está expuesta directo al fuego

### 3.3. Procedimiento para evaluar la emisión de gases de la madera

Se realiza una toma del monóxido de carbono (MO), cada vez que se termina el tiempo de quemado de cada muestra, para poder verificar el grado de concentración de CO en el ambiente, para lo cual se utilizó un instrumento para medir los gases (Figura 22).

## Figura 23

*Gases emitidos por la madera*



Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), se ha determinado un límite aceptable de CO en el ambiente, en el caso de 8 horas expuestos a CO, el límite es de 9 PPM, para 1 hora de exposición es de 25 PPM. Sin embargo, se establece que no debería de pasar de 25 PPM para cuidar el estado de salud de las personas. En la Tabla 8 se presentan los grados de concentración del CO y los efectos que generan en los seres humanos (Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades, 1996).

**Tabla 8**

*Concentraciones de CO y efecto en el ser humano*

<b>Concentración CO (ppm)</b>	<b>Efectos</b>
50	Nivel de exposición admisible durante 8 horas
200	Dolor de cabeza moderado después de 2 horas.
400	Dolor de cabeza y náuseas después de 1 o 2 horas
800	Dolor de cabeza, mareos y náuseas después de 45 minutos. Descompensación y riesgo de muerte después de 2 horas.
1600	Dolor de cabeza, mareos y náuseas después de 20 minutos. Descompensación y riesgo de muerte después de 1 hora
3200	Dolor de cabeza y mareos después de 5 a 10 minutos. Pérdida de conciencia y riesgo de muerte después de 30 minutos.
6400	Dolor de cabeza y mareos después de 1 a 2 minutos. Pérdida de conciencia y riesgo de muerte después de 10 a 15 minutos.
12800	Efectos inmediatos, pérdida de conciencia. Riesgo de muerte después de 1 a 3 minutos.

*Nota.* Tomado de Acurio (2024)

## 4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS

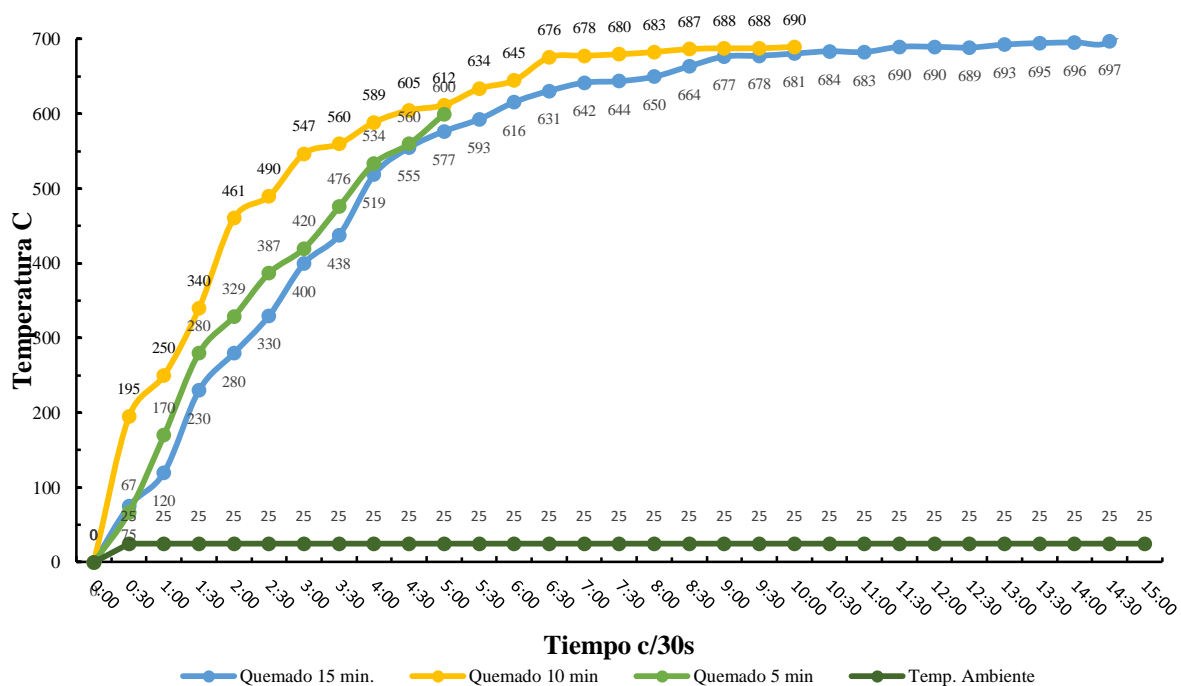
### 4.1. Resultados de los ensayos

#### 4.1.1. Ensayos de incineración de las muestras en el horno refractario en los diferentes periodos de tiempo

Para lograr las temperaturas requeridas para los ensayos, se ingresó las muestras en un horno construido con materiales refractarios, cada muestra se incineró en los tiempos de 5, 10 y 15 minutos, debido a que se investigó que es el tiempo de respuestas de los bomberos de la ciudad de Cuenca. Para poder realizar las curvas se tomó datos de temperatura vs tiempo, donde para tomar la temperatura se usó la termocupla. En la incineración se tomó datos como la transmisibilidad de calor en la cara expuesta al fuego y la que no pega directamente, además se tomó los gases que expulsa la madera, y que tanto se vio afectada la parte física de la madera, y posteriormente realizar los ensayos mecánicos.

**Figura 24**

*Ensayo de exposición al fuego de probetas de flexión*

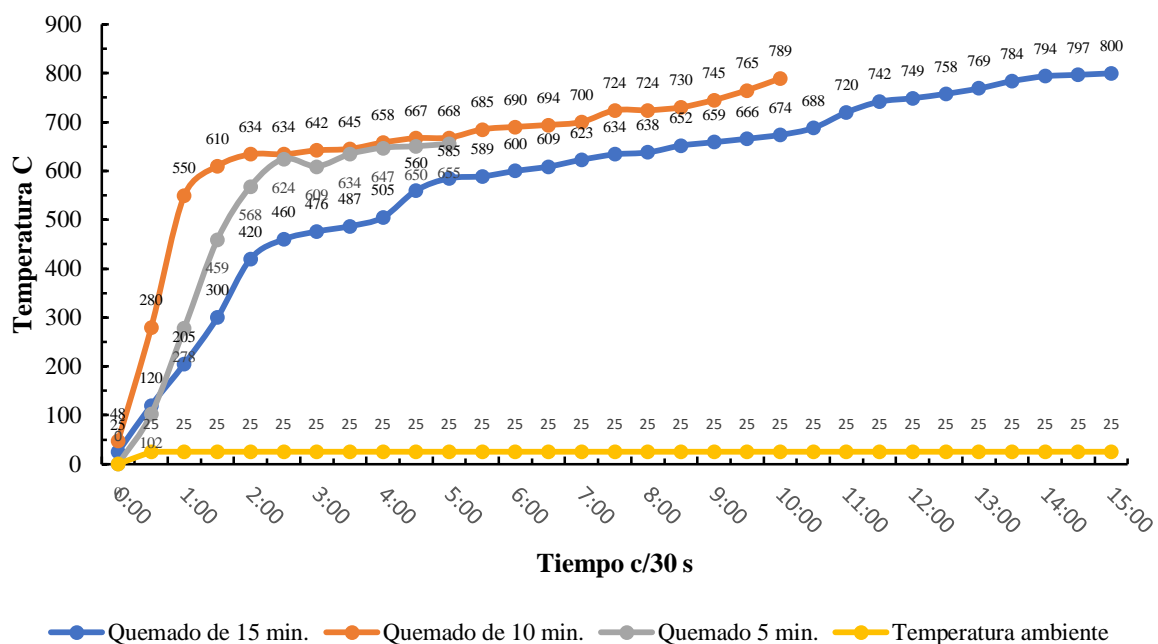


Tal como se observa en la figura 24, las probetas que serán utilizadas para el ensayo de resistencia a flexión fueron expuestas al fuego durante diferentes tiempos y a varias temperaturas. En el caso de las probetas como modelo patrón están a una temperatura aproximadamente de 25°C (temperatura ambiente), las probetas expuestas al fuego durante 5

minutos alcanzaron una temperatura máxima de 577°C, las probetas expuestas al fuego durante 10 minutos alcanzaron una temperatura máxima de 700°C; sin embargo, las probetas expuestas al fuego durante 15 minutos alcanzaron una temperatura máxima de 697°C, es decir, 0,3°C menos que la anterior, esto se debe probablemente a errores de ensayo debido a que la llama no permanecía constante. No obstante, se puede apreciar que, en el minuto 4 alcanzan una temperatura promedio de 550°C, reflejando una pendiente positiva muy pronunciada, de ahí en adelante la temperatura se mantiene casi estacionaria hasta completar los minutos de quema.

### Figura 25

*Ensayo de exposición al fuego de probetas de compresión*



En cuanto a las probetas para el ensayo de resistencia a compresión tanto paralelas como perpendicular a la fibra fueron expuestas al fuego durante diferentes tiempos y a varias temperaturas. En la Figura 25 se observa que las probetas como modelo patrón están a una temperatura aproximadamente de 25°C (temperatura ambiente), las probetas expuestas al fuego durante 5 minutos alcanzaron una temperatura máxima de 655°C, las probetas expuestas al fuego durante 10 minutos alcanzaron una temperatura máxima de 789°C y las probetas expuestas al fuego durante 15 minutos alcanzaron una temperatura máxima de 800°C. Cabe destacar que, la muestra expuesta a 5 minutos alcanza una temperatura de 600°C en los primeros 2 minutos y medio; no obstante, la muestra expuesta a 10 minutos en sus primeros 60 segundos alcanza una temperatura de 610°C, es decir que en menos tiempo alcanza una

temperatura más alta que la anterior, este hallazgo se debe a que el horno no estaba totalmente frío al momento de realizar el ensayo.

#### **4.1.2. Resultados de ensayos de resistencia a compresión paralela a la fibra a muestras de madera de Eucalipto**

Para el ensayo de resistencia a compresión paralela a la fibra se utilizaron 12 muestras de madera de Eucalipto, las cuales fueron expuestas al fuego durante 0, 5, 10 y 15 minutos. Para este ensayo se empleó la Prensa japonesa SHIMADZU CONCRETO 2000X, previo a la incineración de la madera.

##### **a) Ensayo de resistencia a compresión paralela a la fibra de las muestras de madera de Eucalipto expuestas al fuego durante 0, 5, 10 y 15 minutos**

Para determinar la resistencia a compresión paralela a la fibra, se tomaron muestras de madera de Eucalipto expuestas al fuego durante 0, 5, 10 y 15 minutos, las cuales, tuvieron una dimensión aproximada de 50 x 50 x 200mm.

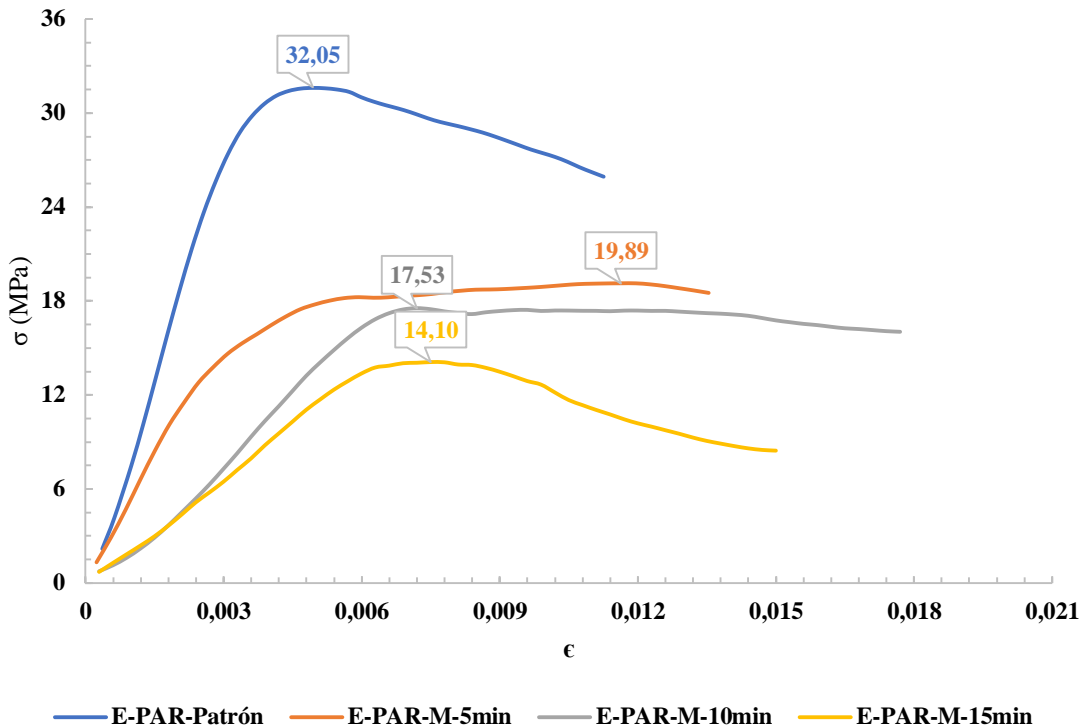
**Tabla 9**

*Ensayo de resistencia a compresión paralela a la fibra de las muestras de madera de Eucalipto*

<b>Muestra</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Máx. fuerza (Kgf)</b>	<b>Área cm<sup>2</sup></b>	<b>ε(def)</b>	<b>σ(N/mm<sup>2</sup>)</b>
P (0 min)	199,07	0,9922083	8185,12	25	0,00496	32,05
5 min	270,10	1,345875	4605,20	22,5	0,00789	19,89
10 min	283,28	1,44	3579,98	20,025	0,00575	17,53
15 min	301,21	1,501375	2913,74	19,99	0,0075	14,10

**Figura 26**

*Ensayo de resistencia a compresión paralela a la fibra de las muestras de madera de Eucalipto*



La muestra de Eucalipto como modelo patrón de una temperatura de 25°C, alcanzó su máximo esfuerzo de 32,05 MPa en tiempo máximo de 199,07 segundos, generando un desplazamiento de 0,9922083 mm y una deformación de 0,00496. Como se puede observar, la pendiente es muy pronunciada hasta que llega a su esfuerzo máximo, para luego decrecer lentamente.

La muestra de Eucalipto incinerada al fuego durante 5 minutos a una temperatura de 655°C, alcanzó su máxima fuerza de 19,89 MPa en tiempo máximo de 270,10 segundos, generando un desplazamiento de 1,345875 mm y una deformación de 0,00789. Como se puede observar, la pendiente es muy pronunciada hasta que llega a 18,04 MPa, de ahí en adelante se mantiene en una recta casi estacionaria hasta que llega al esfuerzo máximo para luego iniciar su deformación con menor esfuerzo, pero manteniendo cierta resistencia.

La muestra de Eucalipto incinerada al fuego durante 10 minutos a una temperatura de 789°C, alcanzó su máximo esfuerzo de 17,53 MPa en tiempo máximo de 283,28 segundos, generando un desplazamiento de 1,44 mm y una deformación de 0,00575. Como se puede observar, la pendiente es pronunciada hasta que llega a su esfuerzo máximo, para posteriormente descender de forma casi estacionaria.

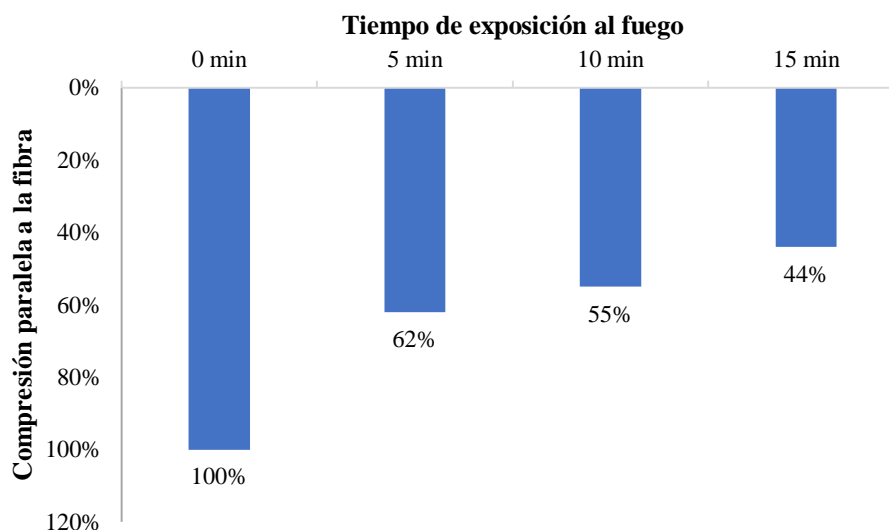
La muestra de Eucalipto expuesta al fuego durante 15 minutos a temperatura de 800°C, alcanzó su máximo esfuerzo de 14,10 MPa en tiempo máximo de 301,21 segundos, generando un desplazamiento de 1,501375 mm y una deformación de 0,0075. Además, se puede observar que la pendiente es muy pronunciada hasta que llega al esfuerzo máximo, para luego iniciar el proceso de deformación de la probeta.

Finalmente, al evaluar de manera conjunta todos los ensayos de las muestras, se observa que, entre más tiempo de incineración a la madera de Eucalipto, menor es el esfuerzo máximo a compresión paralela a fibra; mientras que, este es alcanzada en un mayor tiempo (ver Tabla 9). Lo que indica que, la madera de Eucalipto en temperaturas altas tiene un mayor tiempo de reacción, soportando mayores deformaciones a diferencia de la teca (ver Figura 26). El módulo de elasticidad conforme pasa el tiempo se va reduciendo, aproximadamente un 70% a los 15 minutos de exposición al fuego en comparación de la prueba de la muestra patrón, igualmente se reduce su espesor en un 18% (9mm) en comparación con la muestra a temperatura ambiente.

**b) Diferencia de resistencia a compresión paralela a la fibra entre muestras de madera de Eucalipto expuestas al fuego durante 0, 5, 10 y 15 minutos**

**Figura 27**

*Diferencia de resistencia a compresión paralela a la fibra de las muestras de madera de Eucalipto expuestas al fuego durante 0, 5, 10 y 15 minutos*



La Figura 27 demuestra que, la muestra expuesta al fuego durante 5 minutos alcanzó un 62% su resistencia a compresión con relación con la muestra patrón (32,05 MPa), asimismo, la muestra expuesta al fuego durante 10 minutos alcanzó un 55% y la muestra expuesta a 15 un

44% de la compresión. Lo que indica que, a mayor tiempo de incineración de la madera de Eucalipto, mayor es la resistencia a compresión que pierde.

#### **4.1.3. Resultados de ensayos de resistencia a compresión paralela a la fibra de las muestras de madera Teca**

Para el ensayo de resistencia a compresión paralela a la fibra se emplearon 12 muestras de madera Teca. Para este ensayo se utilizó la Prensa japonesa SHIMADZU CONCRETO 2000X, previo a la incineración de la madera durante 5, 10 y 15 minutos.

##### **a) Ensayo de resistencia a compresión paralela a la fibra de las muestras de madera Teca expuestas al fuego durante 0, 5, 10 y 15 minutos**

Para determinar la resistencia a compresión paralela a la fibra, se tomaron muestras de madera Teca expuestas al fuego durante 0, 5, 10 y 15 minutos, las cuales, tuvieron una dimensión aproximada de 50 x 50 x 200mm.

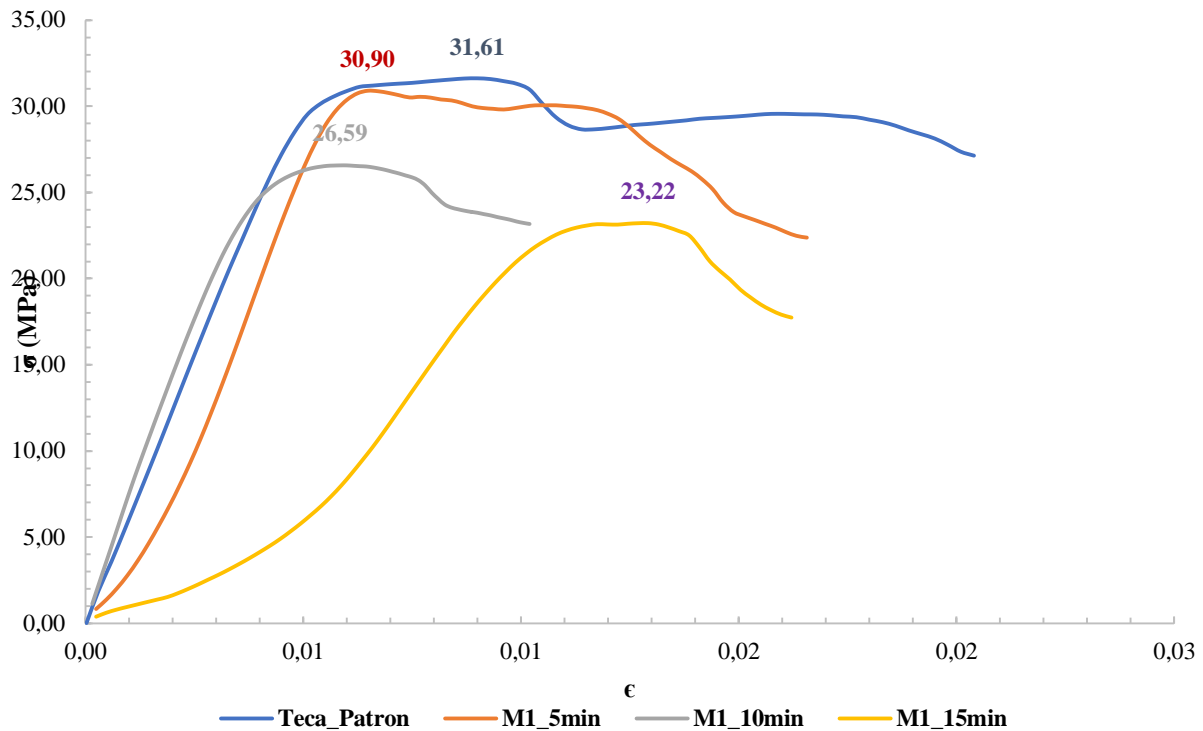
**Tabla 10**

*Ensayo de resistencia a compresión paralela a la fibra de la muestra de madera Teca*

<b>Muestra</b>	<b>Tiempo (seg)</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Máx. fuerza (Kgf)</b>	<b>Área cm<sup>2</sup></b>	<b>ε(def)</b>	<b>σ(N/mm<sup>2</sup>)</b>
P (0 min)	362,89	1,5	8058,14	25	0,007501	31,61
5 min	261,69	1,2	7487,458	23,765	0,00648	30,90
10 min	236,29	1,2	6509,892	24,01	0,006	26,59
15 min	515,69	2,6	5453,425	23,03	0,012925	23,22

**Figura 28**

*Ensayo de resistencia a compresión paralela a la fibra de la muestra de madera Teca*



La muestra de madera Teca como modelo patrón de una temperatura de 25°C, alcanzó su máximo esfuerzo de 31,61 MPa en tiempo máximo de 362,89 segundos, generando un desplazamiento de 1,800125 mm y una deformación de 0,007. Como se puede observar, la pendiente es muy pronunciada hasta que llega a un esfuerzo máximo, luego se detecta una deformación decreciente.

La muestra de madera Teca incinerada al fuego durante 5 minutos a una temperatura de 655°C, alcanzó un máximo esfuerzo de 30,90 MPa en tiempo máximo de 261,69 segundos, generando un desplazamiento de 1,345875 mm y una deformación de 0,00648. Como se puede observar, la pendiente es muy pronunciada hasta llegar a su máximo esfuerzo, de ahí inicia el proceso de deformación.

La muestra de madera Teca incinerada al fuego durante 10 minutos a una temperatura de 789°C, alcanzó su máximo esfuerzo de 26,59 MPa en tiempo máximo de 236,29 segundos, generando un desplazamiento de 1,345875 mm y una deformación de 0,006. Como se puede observar, la pendiente es muy pronunciada hasta llegar a los 25 MPa y de ahí se vuelve casi estacionaria hasta alcanzar su máximo esfuerzo, posteriormente inicia el proceso de deformación de manera lenta.

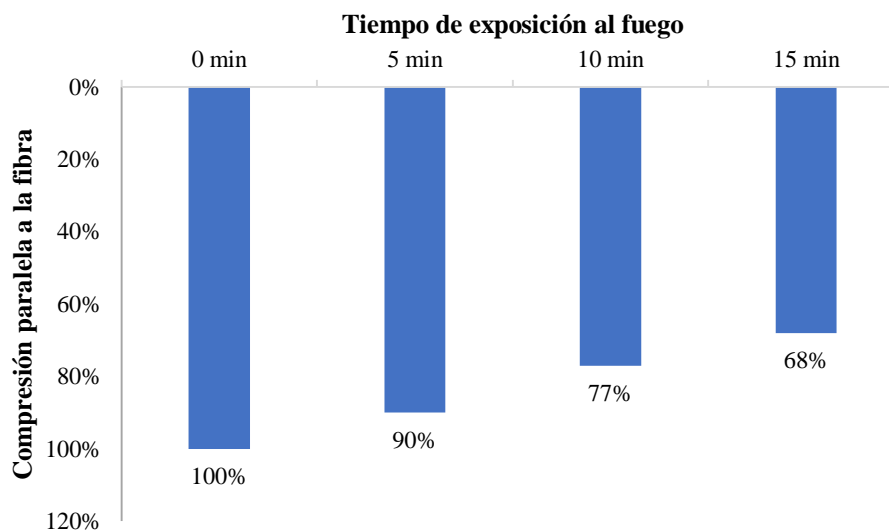
La muestra de madera Teca incinerada al fuego durante 15 minutos a una temperatura de 800°C, alcanzó su máximo esfuerzo de 23,22 MPa en tiempo máximo de 515,69 segundos, generando un desplazamiento de 2,6 mm y una deformación de 0,012925. Como se puede observar en la Figura 34, la pendiente es muy pronunciada hasta llegar al máximo esfuerzo, de ahí inicia el proceso de deformación.

Finalmente, al evaluar de manera conjunta todos los ensayos de las muestras, se observa que, entre más tiempo de incineración a la madera Teca, menor el esfuerzo a compresión paralela a la fibra; mientras que, éste esfuerzo es alcanzada en un mayor tiempo (ver Tabla 10). Por lo tanto, se demuestra que la madera Teca pierde su compresión significativamente al exponerla al fuego, observándose mayores deformaciones.

**b) Diferencia de resistencia a compresión paralela a la fibra entre muestras de madera Teca expuesta al fuego durante 0, 5, 10 y 15 minutos**

**Figura 29**

*Diferencia de resistencia a compresión paralela a la fibra de las muestras de madera Teca expuestas al fuego durante 0, 5, 10 y 15 minutos*



La Figura 29 demuestra que, la muestra expuesta al fuego durante 5 minutos alcanzó un 90% su resistencia a compresión con relación con la muestra patrón (31,65 MPa), asimismo, la muestra expuesta al fuego durante 10 minutos alcanzó un 77% y la muestra expuesta a 15 minutos un 68% de la compresión. Lo que indica que, a mayor tiempo de incineración de la madera Teca, mayor es la resistencia a compresión que pierde.

### c) Módulo de elasticidad de las probetas

**Tabla 11**

*Módulo de elasticidad de las probetas ensayadas paralelas a las fibras Eucalipto*

<b>N de Probeta</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Esfuerzo máximo (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad (MPa)</b>
E_PAR_PATRON	0.1	32,05	10128
E_PAR_M_5min	1.3	19,89	5716
E_PAR_M_10min	1.4	17,53	2698
E_PAR_M_15min	1.5	14,10	2926

Se presentan los datos de módulos de elasticidad de los ensayos realizados a la comprensión paralelo a la fibra de la madera de Eucalipto, notando que la muestra patrón tiene una elasticidad de 10128 MPa, mientras que, al ser expuestas al fuego a varios tiempos, la elasticidad va disminuyendo paulatinamente, en el caso de la muestra expuesta a 15 minutos al ser comparada con la muestra patrón, se observa una reducción de elasticidad de un 71% (Tabla 11).

**Tabla 12**

*Módulo de elasticidad de las probetas ensayadas paralelas a las fibras Teca*

<b>N de Probeta</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Esfuerzo máximo (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad (MPa)</b>
T_PAR_PATRON	1.5	31,65	6241
T_PAR_M_5min	1.2	30,90	6921
T_PAR_M_10min	1.2	26,59	6545
T_PAR_M_15min	2.6	23,22	3581

Se presentan los datos de módulos de elasticidad de los ensayos realizados a la comprensión paralelo a la fibra de la madera Teca, observando que la muestra patrón tiene una elasticidad de 6241 MPa; sin embargo, al ser expuestas al fuego a varios tiempos, la elasticidad tiende a variar (Tabla 12).

#### ***4.1.4. Resultados de ensayos de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de las muestras de madera de Eucalipto***

Para el ensayo de resistencia a compresión perpendicular a la fibra se utilizaron 12 muestras de madera de Eucalipto, las cuales fueron expuestas al fuego durante 0, 5, 10 y 15 minutos. No obstante, la muestra expuesta al fuego durante 15 minutos se incineró en su sección central 20 mm, por tanto, no se realizó el ensayo con esa probeta. Para este ensayo se empleó la Prensa japonesa SHIMADZU CONCRETO 2000X, previo a la incineración de la madera.

**a) Ensayo de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de las muestras de madera de Eucalipto expuestas al fuego durante 0, 5 y 10 minutos**

Para determinar la resistencia a compresión perpendicular a la fibra, se tomaron muestras de madera de Eucalipto expuestas al fuego durante 0, 5 y 10 minutos, las cuales, tuvieron una dimensión aproximada de 150 x 50 x 50mm.

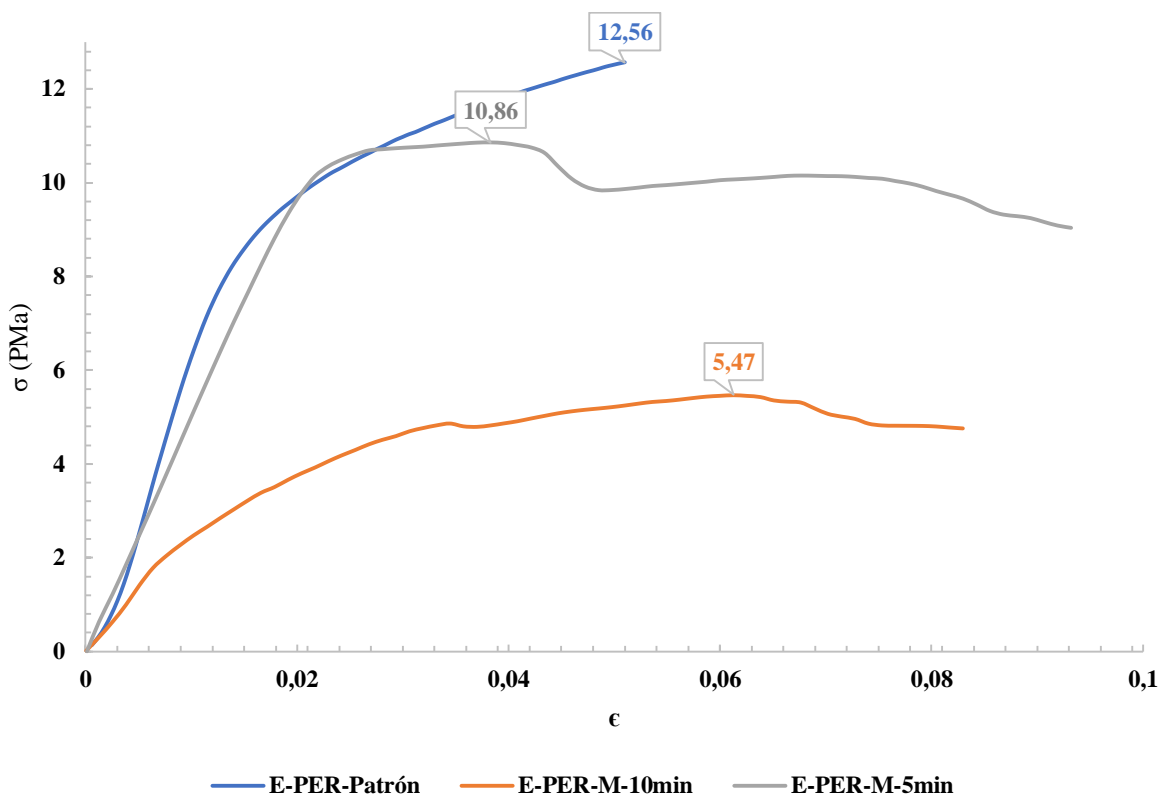
**Tabla 13**

*Ensayo de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de las muestras de madera de Eucalipto*

Muestra	Tiempo (seg)	Desplazamiento (mm)	Máx. fuerza (Kgf)	Área cm <sup>2</sup>	ε (def)	σ(N/mm <sup>2</sup> )
P (0 min)	511,02	2,55	9608	75	0,051	12,56
5 min	412	1,8	8058	74,2	0,038	10,86
10 min	577	2,9	4098	73,5	0,061	5,47

**Figura 30**

*Ensayo de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de las muestras de madera de Eucalipto*



La muestra de Eucalipto como modelo patrón de una temperatura de 25°C, alcanzó su máximo esfuerzo de 12,56 MPa en tiempo máximo de 511,02 segundos, generando un desplazamiento de 2,55 mm y una deformación de 0,051. Como se puede observar, la pendiente es muy pronunciada hasta que llegar a unos 8,76 MPa, desde ese punto la curva sigue ascendiendo moderadamente hasta alcanzar su esfuerzo máx.

La muestra de Eucalipto incinerada al fuego durante 10 minutos a una temperatura de 655°C, alcanzó su máximo esfuerzo de 5,47 MPa en tiempo máximo de 577 segundos, generando un desplazamiento de 2,880625 mm y una deformación de 0,0612899. Como se puede observar, la pendiente es muy pronunciada hasta que llega a 4,86 MPa descendiendo 0,1 MPa y nuevamente sigue su trayectoria hasta llegar al máximo esfuerzo, para posteriormente iniciar su deformación.

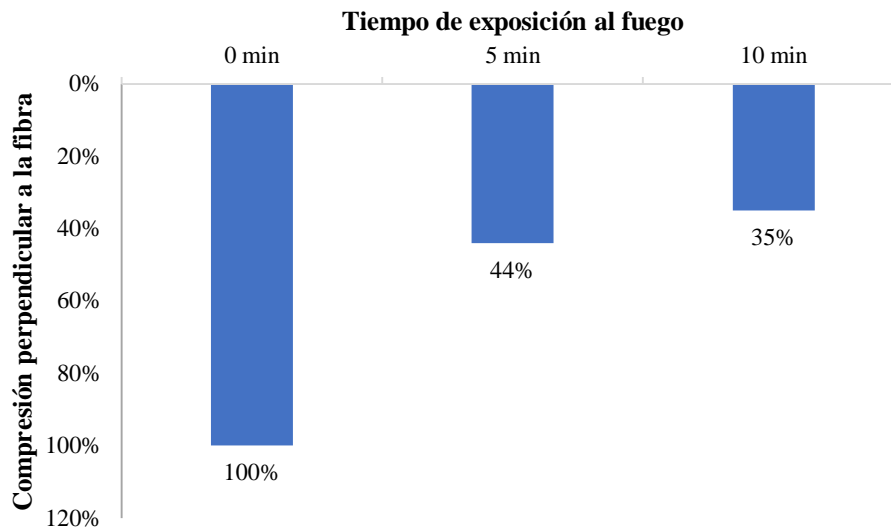
La muestra de Eucalipto incinerada al fuego durante 5 minutos a una temperatura de 789°C, alcanzó su máximo esfuerzo de 10,86 MPa en tiempo máximo de 412 segundos, generando un desplazamiento de 1.8 mm y una deformación de 0,038. Como se puede observar, la pendiente se incrementa moderadamente hasta llegar a su máximo esfuerzo, para luego decrecer.

Finalmente, al evaluar de manera conjunta todos los ensayos de las muestras, se observa notoriamente que, entre más tiempo de incineración a la madera de Eucalipto, menor es el esfuerzo a compresión perpendicular a la fibra. En cuanto al tiempo máximo en el alcanza el esfuerzo máximo no varía de manera significativa, puesto que se cortó de manera manual los datos que reportó la máquina, considerando que este ensayo se extiende por un periodo muy largo de tiempo. Para el corte manual se tomó en cuenta que la velocidad se mantiene de forma constante hasta alcanzar una deformación al 5% del espesor de la muestra; por consiguiente, como la longitud de la probeta mide 50mm, el 5% está representado por 2,5mm. Además, si se compara la compresión paralela a la fibra con la perpendicular, se puede apreciar que la resistencia a compresión perpendicular a la fibra es muy inferior a la de la dirección paralela, la cual debe ser un aproximado de una cuarta parte de la paralela (Figura 30).

**b) Diferencia de resistencia a compresión perpendicular a la fibra entre muestras de madera de Eucalipto expuestas al fuego durante 0, 5 y 10 minutos**

**Figura 31**

*Diferencia de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de las muestras de madera de Eucalipto expuestas al fuego durante 0, 5 y 10 minutos*



La Figura 31 demuestra que, la muestra expuesta al fuego durante 5 minutos alcanzó un 44% de resistencia a compresión con relación a la muestra patrón (12.56 MPa), asimismo, la muestra expuesta al fuego durante 10 minutos alcanzó un 35% de la compresión. Lo que indica que, a mayor tiempo de incineración de la madera de Eucalipto, mayor es la resistencia a compresión que pierde.

**4.1.5. Resultados de ensayos de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de las muestras de madera Teca**

Para el ensayo de resistencia a compresión perpendicular a la fibra se utilizaron 12 muestras de madera Teca, las cuales fueron expuestas al fuego durante 0, 5, 10 y 15 minutos. No obstante, la muestra expuesta al fuego durante 15 minutos se incineró aproximadamente unos 20 mm en la zona central, por tanto, no se realizó el ensayo con esa probeta. Para este ensayo se empleó la Prensa japonesa SHIMADZU CONCRETO 2000X, previo a la incineración de la madera.

**a) Ensayo de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de las muestras de madera Teca expuestas al fuego durante 0, 5 y 10 minutos**

Para determinar la resistencia a compresión perpendicular a la fibra, se tomaron muestras de madera Teca expuestas al fuego durante 0, 5 y 10 minutos, las cuales, tuvieron una dimensión aproximada de 150 x 50 x 50mm.

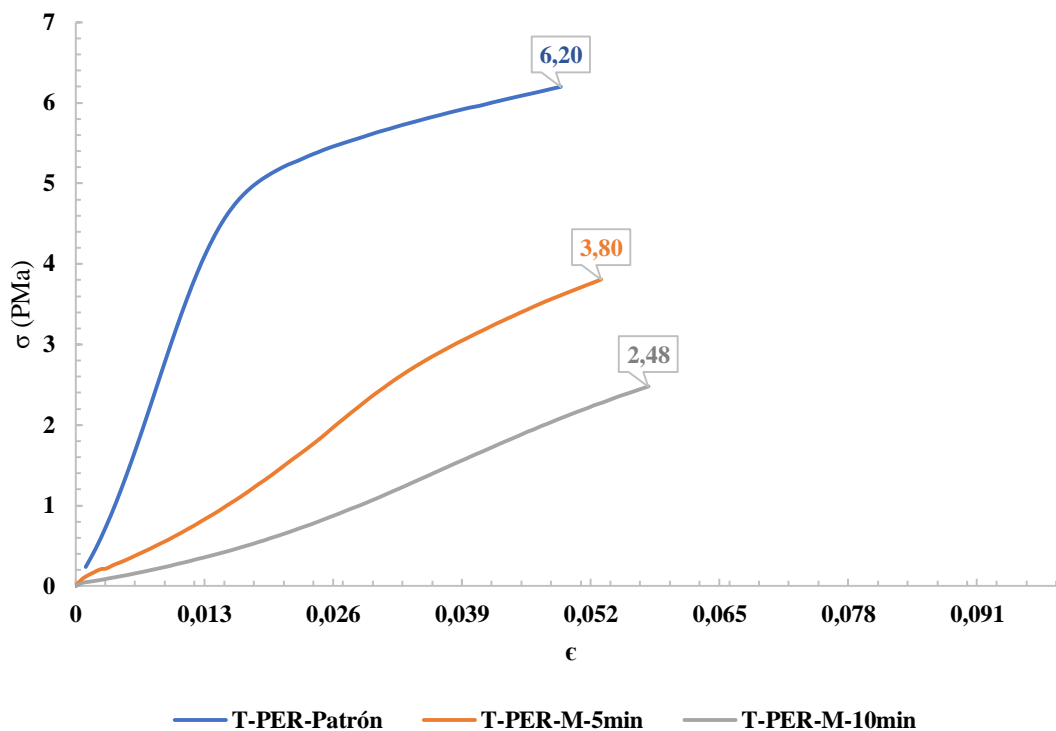
**Tabla 14**

*Ensayo de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de las muestras de madera Teca*

Muestra	Tiempo (seg)	Desplazamiento (mm)	Máx. fuerza (Kgf)	Área cm <sup>2</sup>	ε(def)	σ(N/mm <sup>2</sup> )
P (0 min)	480,95	2,399625	4550,059	73,5	0,0489796	6,20
5 min	504,94	2,52	2822,291	72,75	0,0530527	3,80
10 min	510,95	2,55	1742,258	69	0,057823	2,48

**Figura 32**

*Ensayo de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de las muestras de madera Teca*



La muestra Teca como modelo patrón a una temperatura de 25°C, alcanzó su máximo esfuerzo de 6,20 MPa en tiempo máximo de 480,95 segundos, generando un desplazamiento de 2,399625 mm y una deformación de 0,0489796. Asimismo, la pendiente es muy pronunciada

hasta que llegar a 4,9 MPa, desde ese punto la curva sigue ascendiendo moderadamente hasta alcanzar su máximo esfuerzo.

La muestra de Teca incinerada al fuego durante 5 minutos a una temperatura de 655 °C, alcanzó su máximo esfuerzo de 3,80 MPa en tiempo máximo de 504,94 segundos, generando un desplazamiento de 2,52 mm y una deformación de 0,0530527. Además, se puede observar que, la pendiente se incrementa de manera casi continua hasta llegar al esfuerzo máximo.

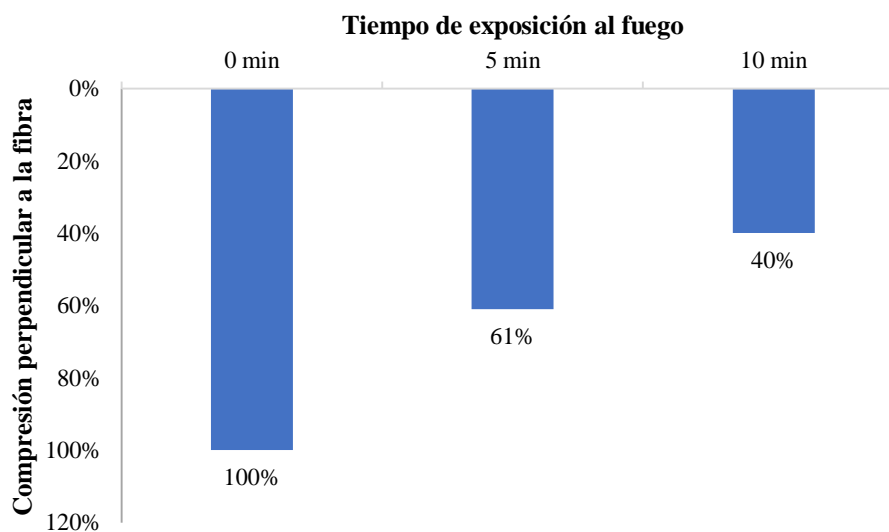
La muestra de Teca incinerada al fuego durante 10 minutos a una temperatura de 789 °C, alcanzó su máximo esfuerzo de 2,48 MPa en tiempo máximo de 510,95 segundos, generando un desplazamiento de 2,55 mm y una deformación de 0,057823. Además, se puede observar que, la pendiente se incrementa de manera continua y constante hasta llegar a su máximo esfuerzo.

La Figura 32, refleja un resultado casi similar al reportado por la madera de Eucalipto, ya que, entre más tiempo de incineración a la probeta, menor será la máxima fuerza a compresión perpendicular a la fibra. En la madera Teca a medida que pasa el tiempo de exposición al fuego se demuestra que se produce una reducción en su módulo de elasticidad de aproximadamente un 80 %, con respecto al valor de la muestra ensayada a temperatura ambiente.

**b) Diferencia de resistencia a compresión perpendicular a la fibra entre muestras de madera Teca expuestas al fuego durante 0, 5 y 10 minutos**

**Figura 33**

*Diferencia de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de las muestras de madera Teca expuestas al fuego durante 0, 5 y 10 minutos*



En la Figura 33 se puede apreciar que, la muestra expuesta al fuego durante 5 minutos alcanzó un 61% de resistencia a compresión perpendicular a la fibra al compararla con relación a la probeta patrón (6,2 MPa); de igual manera, la muestra expuesta al fuego durante 10 minutos alcanzó un 40%. Demostrando que, a mayor tiempo de incineración de la madera Teca, menor es la resistencia a compresión.

**c) Módulo de elasticidad de las probetas ensayadas perpendicular a las fibras.**

**Tabla 15**

*Módulo de elasticidad de las probetas ensayadas perpendicular a las fibras*

<b>N de Probeta</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Esfuerzo máximo (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad (MPa)</b>
E_PER_PATRON	2,55	12,56	763
E_PER_M_5min	2,88	5,47	278
E_PER_M_10min	2,49	4,39	119

En cuanto al módulo de elasticidad, se puede observar que la muestra patrón de la madera de Eucalipto tiene una elasticidad de 763 MPa, mientras que la muestra expuesta a 5 minutos tiene una elasticidad de 278 MPa demostrando una reducción del 64% al compararla con la muestra patrón, asimismo, la muestra expuesta a 10 minutos tiene una diferencia del 85%. Cabe destacar que, las muestras de 15 minutos ya no se pudo realizar ensayos, debido a que fueron carbonizadas aproximadamente unos 20 mm en su parte central, puesto que las muestras se incendiaron por el prolongado tiempo, y se evitó realizar ensayos con estos prototipos. Cabe aclarar que, según investigaciones la velocidad de carbonización aproximada de la madera es de 0,07 mm por minuto (Tabla 15).

**Tabla 16**

*Módulo de elasticidad de las probetas ensayadas perpendicular a las fibras Teca*

<b>N de Probeta</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Esfuerzo máximo (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad (MPa)</b>
T_PER_PATRON	2,4	6,20	340
T_PER_M_5min	2,52	3,80	64
T_PER_M_10min	2,55	2,48	52

En cuanto a la madera Teca, se puede observar que la muestra patrón presenta una elasticidad de 340 MPa, mientras que las muestras sometidas al fuego han reducido su elasticidad. La muestra sometida al fuego por 5 minutos tiene una diferencia de 74% en comparación a la muestra patrón y la expuesta a 10 minutos tienen un 85% (Tabla 16).

#### 4.1.6. Resultados del Contenido de Humedad

Se utilizó el método gravimétrico para secar las probetas, el cual se fundamenta en la variación de peso entre la madera en estado húmedo y en estado seco. Cada probeta fue puesta en el horno (Figura 34) durante 24 horas a  $105\pm 2^\circ\text{C}$ , siguiendo el método ASTM D4442 para disminuir su contenido de humedad. Este método detalla los procesos para evaluar el CH de la madera, especificando el tamaño y la temperatura durante el ensayo.

**Figura 34**

*Ensayo de humedad*



Para revisar el CH se tomó tres muestras de cada tipo de madera (Eucalipto y Teca), para introducirlas al horno por 24 horas y así poder obtener los resultados.

Con la siguiente ecuación se obtuvo el contenido de humedad:

$$CH = \frac{(P - Psh)}{Psh} * 100\% \quad (4)$$

CH: Contenido de humedad

P: Masa húmeda

Psh: Masa Anhidra o masa seca

**Tabla 17**

*Contenido de humedad en madera Eucalipto*

<b>Tipo de muestra:</b>	Eucalipto		
<b>Realizado por:</b>	Wilson Acosta	<b>Revisado por:</b>	Ing. Monge
<b>Tipo de ensayo:</b>	Contenido de humedad		
<b>Temperatura:</b>	105 C	<b>Máquina:</b>	Horno Eléctrico
<b>Fecha de ejecución:</b>	20/11/2023	<b>Fecha de extracción:</b>	21/11/2023
<b>Sitio de la muestra:</b>	Cuenca, sector Santa María		
<b>N. Muestra</b>	<b>Peso húmedo</b>	<b>Peso Seco (horno)</b>	<b>Contenido de humedad (CH) %</b>
M1	160	139.2	14.94
M2	154	128.6	19.75
M3	333	298.9	11.41
<b>PROMEDIO</b>			<b>15.37</b>

**Tabla 18**

*Contenido de humedad en madera Teca*

<b>Tipo de Muestra</b>	Teca		
<b>Realizado por:</b>	Wilson Acosta	<b>Revisado por:</b>	Ing. Monge
<b>Tipo de ensayo</b>	Contenido de humedad		
<b>Temperatura</b>	105 C	<b>Máquina</b>	Horno Eléctrico
<b>Fecha de ejecución</b>	20/11/2023	<b>Fecha de extracción</b>	21/11/2023
<b>Sitio de la muestra:</b>	Cantón Naranjal		
<b>N. Muestra</b>	<b>Peso húmedo</b>	<b>Peso Seco (horno)</b>	<b>Contenido de humedad (CH) %</b>
M1	314	279.7	12.26
M2	165	153.6	7.42
M3	189	167.6	12.77
<b>PROMEDIO</b>			<b>10.82</b>

Tal como se observa en las Tablas 17 y 18, el CH de la madera de Eucalipto es de 15,37, mientras que de la madera Teca es 10,82. Lo que indica que, la madera de Eucalipto tuvo un mayor CH, con una diferencia del 30% al compararla con la madera Teca. Cabe destacar que, a medida que el CH disminuye por debajo del punto de saturación de las fibras, se incrementa la capacidad mecánica significativamente. Este aumento se refleja en una mayor resistencia de la madera en flexión estática, compresión paralela y compresión perpendicular.

#### ***4.1.7. Resultados de gases emitidos por los paneles sometidos al fuego***

Se ha tomado la medición de gases de las muestras en los diferentes periodos de tiempo, para lograr recopilar información de los posibles impactos en la seguridad ambiental en una construcción al momento se sufre algún posible incendio.

La medición de los gases de la madera se llevó a través de un método sistemático, el cual arroja datos en PPM (Partes por millón), únicamente dando datos del monóxido de carbono (CO), se estableció en tres diferentes periodos de tiempo para cada tipo de madera:

##### **a) Gases emitidos por los paneles de madera de Eucalipto sometidos al fuego por 5, 10 y 15 minutos**

- El medidor de gases durante la quema de 5 minutos registro 85 PPM de CO, siendo estos datos no muy altos debido al periodo de tiempo es bajo y la muestra no ha logrado aún quemarse.
- A los 10 minutos el medidor de gases marcó una cantidad de 290 PPM de CO, siendo mucho más que el doble que de la primera quema, debido a que la muestra ya comenzó a quemarse por el prolongado tiempo y al ser un material combustible.
- A los 15 minutos transmitió una cantidad de 330 PPM de CO, no muy distante la muestra de 10 minutos, esto marca una cantidad relevante para la seguridad ambiental.

##### **b) Gases emitidos por los paneles de madera Teca sometidos al fuego por 5, 10 y 15 minutos**

- A diferencia del Eucalipto la Teca tiene un más elevado registro de CO, a lo que se asume que depende del tipo de madera, donde registró a los 5 minutos una cantidad de 117 PPM de CO.
- A los 10 minutos de quema se registró 360 PPM de CO, un valor bastante alto en comparación del periodo de 5 minutos y debido al tiempo más prolongado la muestra ya arde al ser un material combustible.
- Se registró a los 15 minutos un valor de 420 PPM de CO, en comparación del eucalipto es mucho más alto.

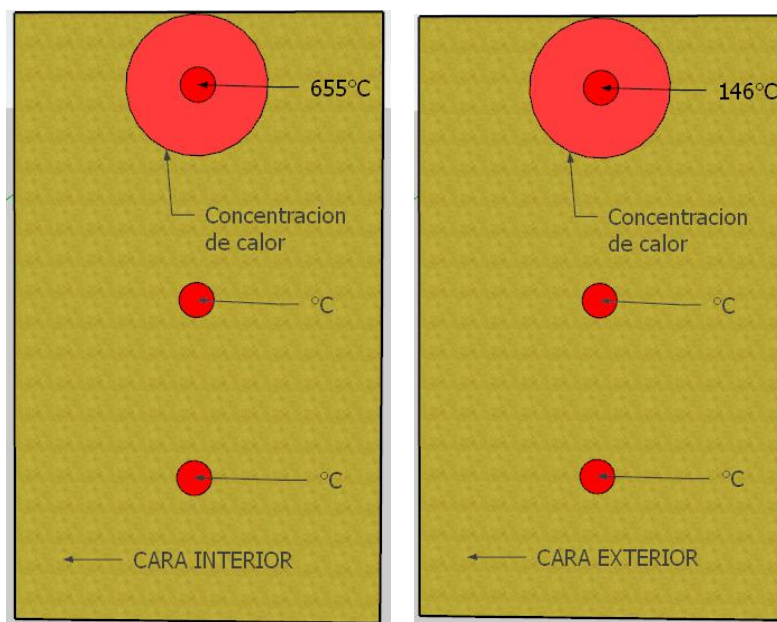
Estos valores más altos del CO de las 2 maderas a la quema de 15 minutos se pueden atribuir a la carbonización de la madera, que debido a las temperaturas altas se evapora el agua, que contiene las fibras. El CO es un gas tóxico que al estar expuestos ha prolongado tiempo puede ser mortal, los datos identificados a periodos altos de quema son de riesgo ambiental.

#### 4.1.8. Resultados del ensayo de transmisión de calor

Para tomar la transmisión de calor de las muestras, se ha cortado probetas más grandes, debido a que las muestras de los ensayos mecánicos son muy pequeñas para identificar los puntos de calor. Se ha elaborado muestras de 30 cm de longitud y de 13.3 x 13.3 cm de área, tratando de asemejar las dimensiones de una probeta estándar. Se ha usado un medidor tipo láser, donde se ha tomado temperaturas en sus bordes y en el centro de la muestra de ambos lados de la madera. A continuación, se muestran los resultados en las siguientes figuras:

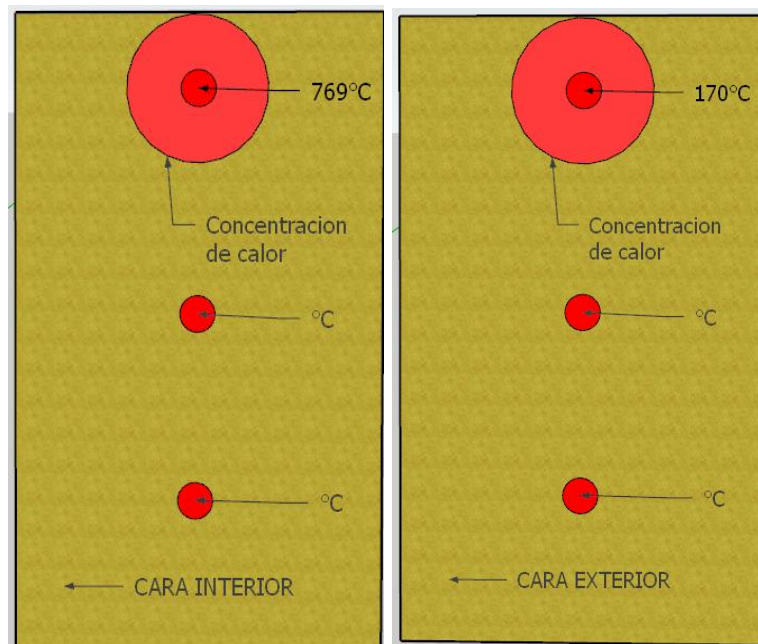
**Figura 35**

*Cara expuesta y no expuesta directamente al fuego en madera de Eucalipto a los 5 minutos*



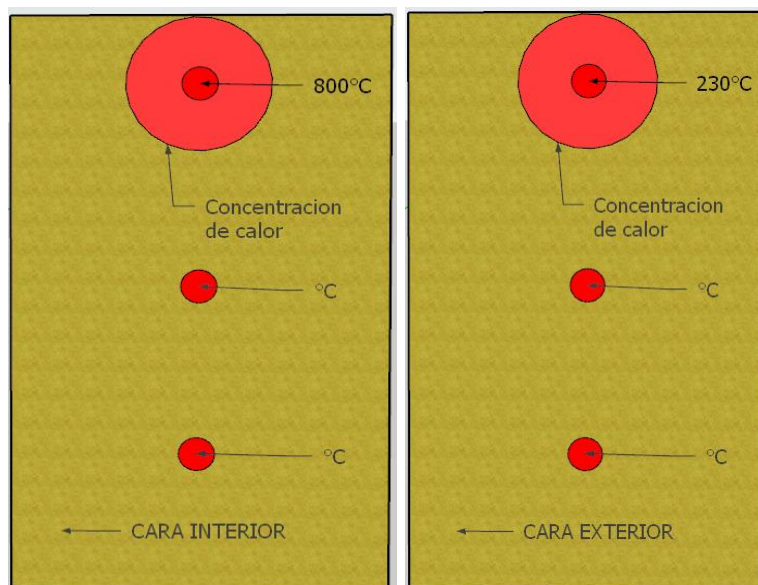
**Figura 36**

*Cara expuesta y no expuesta directamente al fuego en madera de Eucalipto a los 10 minutos*



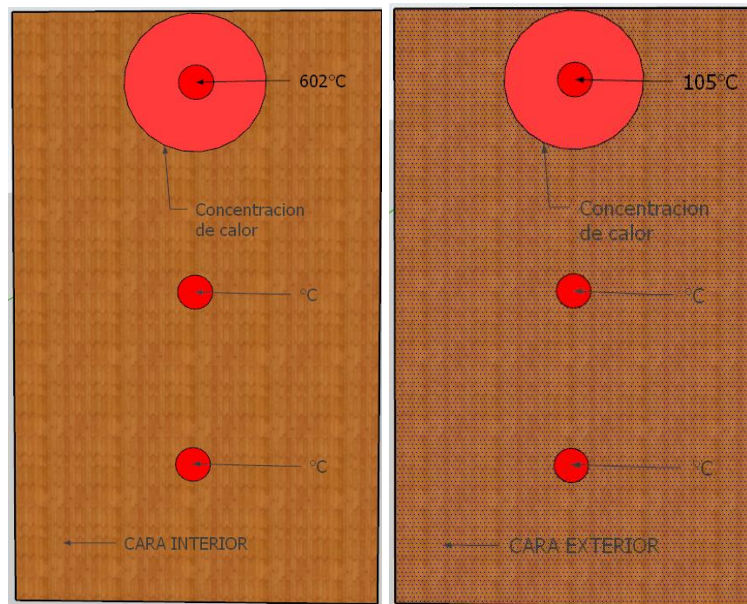
**Figura 37**

*Cara expuesta y no expuesta directamente al fuego en madera de Eucalipto a los 15 minutos*



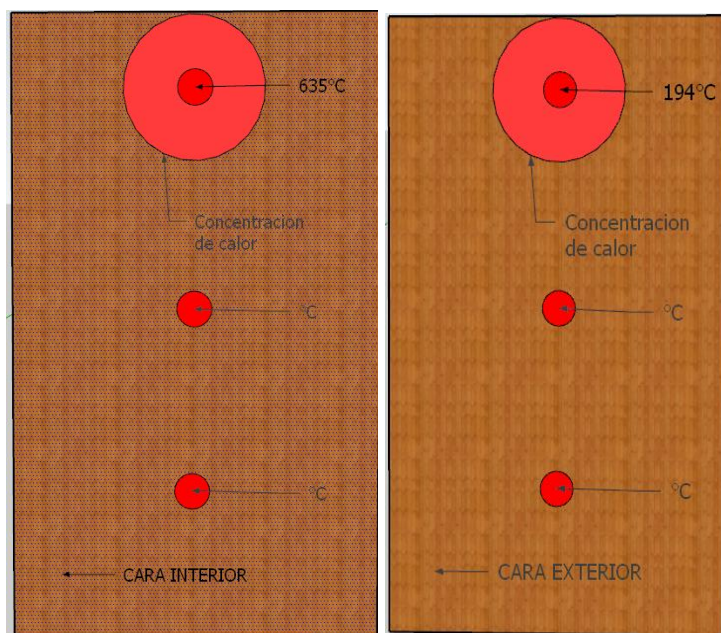
**Figura 38**

*Cara expuesta y no expuesta directamente al fuego en madera Teca a los 5 minutos*



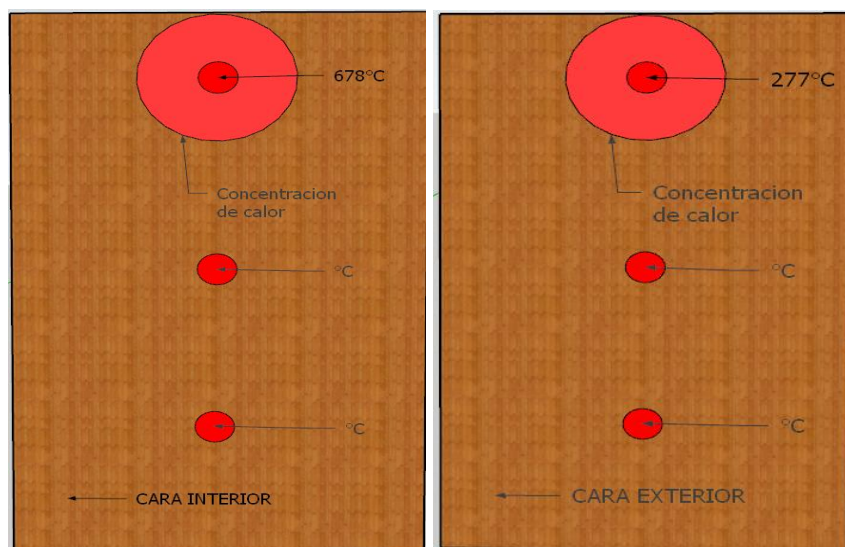
**Figura 39**

*Cara expuesta y no expuesta directamente al fuego en madera Teca a los 10 minutos*



**Figura 40**

*Cara expuesta y no expuesta directamente al fuego en madera Teca a los 15 minutos*



Se ha puesto la temperatura más alta, que es en la zona superior de la probeta, esto es debido a que al realizar el ensayo en el horno, el fuego estaba con dirección a la parte superior de la probeta, además, se identifica conforme pasa el tiempo va subiendo la temperatura, lo cual se puede decir es que debido a la evaporación del agua de las fibras de la madera y al tiempo más prolongado sube la temperatura.

#### **4.1.9. Resultados de carbonización**

**Tabla 19**

*Carbonización de las muestras de Eucalipto y Teca expuestas al fuego durante 5, 10 y 15 minutos*

<b>Probeta Código</b>	<b>Sección residual transversal (mm)</b>	<b>Promedio carbonizado (mm)</b>	<b>Porcentaje (%) carbonizado</b>	<b>Peso ensayado (Gramos)</b>
E_PATRON	50	0	0	438
E_M_5MIN_PAR	47,3	2.7	5,4	384
E_M_10MIN_PAR	43,3	6.7	13,2	342
E_M_15MIN_PAR	41	9	18	314
T_PATRON	50	0	0	424
T_M_5MIN_PAR	47,5	2.5	5	419
T_M_10MIN_PAR	44,4	5.6	11,2	385
T_M_15MIN_PAR	42	8	15,5	306

Estos resultados se han realizado conforme ha perdido sección las probetas. La Tabla 19 expone la sección que ha ido perdiendo cada probeta en los diferentes periodos de tiempo, según las

investigaciones realizadas la velocidad de carbonización de la madera es aproximadamente 0.7 mm/min. Los datos que se describen en la tabla anterior de carbonización estamos en un rango de 0,5 mm/min a 1 mm/min.

#### 4.1.10. Resultados de ensayos de resistencia a flexión

Se realizaron los ensayos en la prensa de CBR, donde se muestra los resultados presentados en la madera de Eucalipto y Teca.

##### a) Ensayo de resistencia a flexión a madera de Eucalipto

Para este ensayo se utilizó 3 probetas de madera de Eucalipto de dimensiones 25 x 25 x 140mm, las cuales, fueron expuestas al fuego durante 5, 10 y 15 minutos. No obstante, la muestra expuesta al fuego durante 15 minutos fue carbonizada en su parte central aproximadamente unos 14 mm, por lo tanto, no se realizó el ensayo con esta probeta. Para calcular la carga máxima de anillo se aplicó la siguiente ecuación:

$$Carga\ Max(lbs) = 5.7069 * x + 20.29 \quad (5)$$

**Tabla 20**

*Ensayo a flexión en la muestra patrón*

<b>Análisis de las propiedades mecánicas de la madera Eucalipto</b>				
<b>Tipo de ensayo:</b>	Flexión		<b>Máquina:</b>	Prensa de CBR
<b>Norma:</b>	ASTM D 143		<b>Dimensiones:</b>	25*25*410 mm
<b>Muestra:</b>	Patrón		<b>Longitud libre:</b>	36 cm
<b>Revisado por:</b>	Ing. Monge		<b>Realizado:</b>	Wilson Acosta
<b>TABLA DE RESULTADOS</b>				
<b>N. de Probeta</b>	<b>x</b>	<b>peso (g)</b>	<b>Carga máxima (Lbs)</b>	<b>Carga máxima (Kg)</b>
<b>M1.P.E</b>	209	241	1213.0321	550.2221
<b>M2.P.E</b>	200	239	1161.67	526.9246
<b>M3.P.E</b>	197	227	1144.5493	519.1588
	<b>PROMEDIO</b>		<b>1173.0838</b>	<b>532.1019</b>

**Tabla 21**

*Ensayo a flexión en la madera Eucalipto al exponer al fuego 5 minutos*

<b>Análisis de las propiedades mecánicas de la madera Eucalipto al exponerlo al fuego</b>				
<b>Tipo de ensayo:</b>	Flexión		<b>Máquina:</b>	Prensa de CBR
<b>Norma:</b>	ASTM D 143-94		<b>Dimensiones:</b>	25*24,5*410 mm
<b>Muestra:</b>	expuesto al fuego 5 minutos		<b>Longitud libre:</b>	36 cm
<b>Revisado por:</b>	Ing. Monge		<b>Realizado:</b>	Wilson Acosta
<b>TABLA DE RESULTADOS</b>				

N. de Probeta	x	peso(g) antes	peso (g) después	Carga máxima (Lbs)	Carga máxima (Kg)
M1.E.5''	210	240	227.2	1218.739	552.8107
M2.E.5''	155	241	224.9	904.8595	410.4374
M3.E.5''	190	242	226.5	1104.601	501.0386
<b>PROMEDIO</b>				<b>1076.0665</b>	<b>488.0956</b>

**Tabla 22**

*Ensayo a flexión en la madera Eucalipto al exponer al fuego 10 minutos*

<b>Análisis de las propiedades mecánicas de la madera Eucalipto al exponerlo al fuego</b>					
<b>Tipo de ensayo:</b>	Flexión		<b>Máquina:</b> Prensa de CBR		
<b>Norma:</b>	ASTM D 143-94		<b>Dimensiones:</b> 24,5*24,5*410 mm		
<b>Muestra:</b>	expuesto al fuego 10 minutos		<b>Longitud libre:</b> 36 cm		
<b>Revisado por:</b>	Ing. Monge		<b>Realizado:</b> Wilson Acosta		
<b>TABLA DE RESULTADOS</b>					
N. de Probeta	x	peso(g) antes	peso (g) después	Carga máxima (Lbs)	Carga máxima (Kg)
M1.E.10''	45	240	151.2	277.1005	125.6907
M2.E.10''	30	241	112.7	191.497	86.8616
M3.E.10''	.....	237	57		
<b>PROMEDIO</b>				<b>234.29875</b>	<b>106.2761</b>

**Ensayo de resistencia a flexión a madera de Eucalipto expuesto al fuego 0, 5 y 10 minutos**

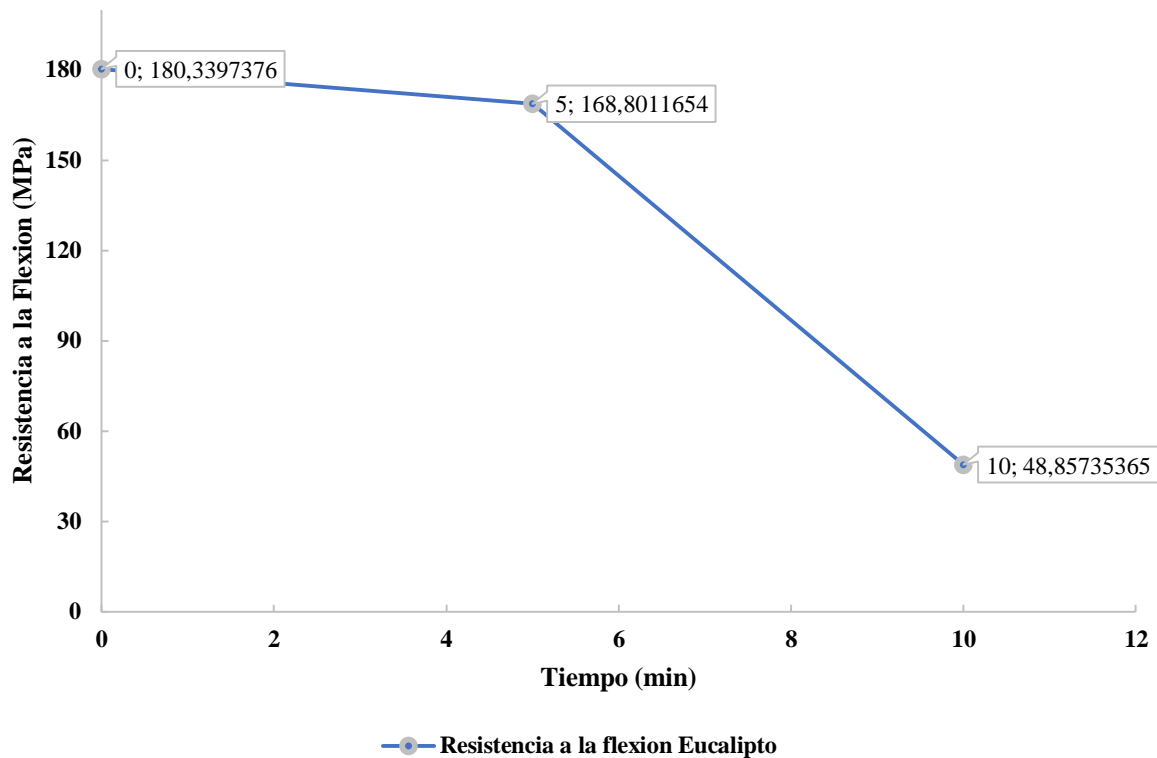
**Tabla 23**

*Promedio de ensayo a flexión de la madera de Eucalipto*

Tiempo	Longitud (mm)	Longitud libre	b	h	área	P(N)	Resistencia a la flexión (MPa)
<b>0 min</b>	410	360	25	25	625	5218.16	180.34
<b>5min</b>	410	360	24.5	25	612.5	4786.61	168.80
<b>10 min</b>	400	360	23.8	22	523,6	1042.22	48.85

**Figura 41**

*Promedio de ensayo a flexión de la madera de Eucalipto*



Según los resultados del ensayo de resistencia a flexión de las muestras de madera de Eucalipto, se observa una diferencia mínima entre la probeta patrón (180,34 MPa) y la expuesta al fuego durante 5 minutos, en un 6% (168,8 MPa). No obstante, al compararla con la muestra expuesta a 10 minutos, existe una diferencia del 74% (48,85 MPa). Esta diferencia muestra una degradación estructural gradual, es decir que, la madera de Eucalipto al exponerla al fuego durante  $\geq 10$  minutos reduce la capacidad de resistencia para soportar cargas. Cabe destacar que, la madera se consume a una velocidad de 0,5 mm/min a 1 mm/min (Figura 41).

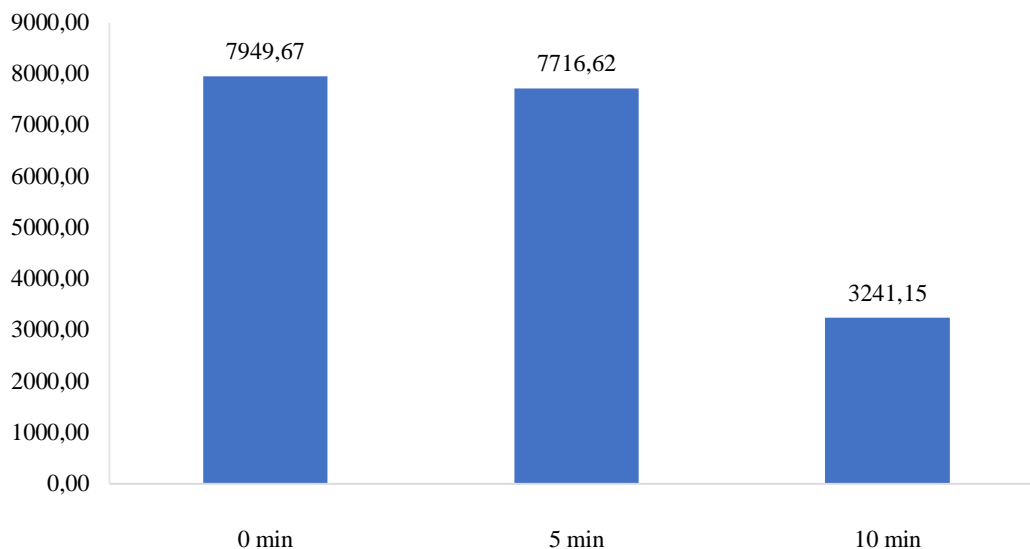
### **Módulo de flexión**

El módulo de flexión ( $E_f$ ) es la relación que existe entre el esfuerzo máximo que puede soportar el material con respecto a su deflexión máxima en la región elástica. Para lo cual, se utilizó la siguiente fórmula:

$$E_f = \frac{L^3 F}{4bh^3 \delta} \quad (6)$$

**Tabla 24***Módulo de flexión de la madera de Eucalipto*

Tiempo	Deflexión (mm)	l	b	h	F(N)	E <sub>f</sub> (MPa)
0 min	19,6	360	25	25	5218,16	7949,6
5min	18,9	360	24,5	25	4786,61	7716,62
10 min	14,8	360	23,8	22	1042,22	3241,15

**Figura 42***Módulo de flexión de la madera de Eucalipto*

De acuerdo con los resultados del módulo de flexión de la madera de Eucalipto, se puede apreciar que existe una mínima diferencia mínima entre la probeta patrón (7949,67 MPa) y la expuesta al fuego durante 5 minutos, en un 3% (7716,62 MPa). No obstante, al compararla con la muestra expuesta a 10 minutos, existe una diferencia del 59% (3241,15 MPa). Lo que indica al ser sometidas a un tiempo más alto de fuego, pierden sección las probetas en un rango de 0,5 mm/min a 1 mm/min (Figura 42).

#### **b) Ensayo de resistencia a flexión a madera Teca**

Para este ensayo se utilizó 3 probetas de madera de Teca de dimensiones 25 x 25 x 140mm, las cuales, fueron expuestas al fuego durante 5, 10 y 15 minutos. No obstante, la muestra expuesta al fuego durante 15 minutos se incineró demasiado, por lo tanto, no se realizó el ensayo con esa probeta. Para calcular la carga máxima de anillo se aplicó la misma ecuación anterior

**Tabla 25**

*Ensayo a flexión en la muestra Teca patrón*

<b>Análisis de las propiedades mecánicas de la madera Teca</b>				
<b>Tipo de ensayo:</b>	Flexión		<b>Máquina:</b>	Prensa de CBR
<b>Norma:</b>	ASTM D 143		<b>Dimensiones:</b>	25*25*410 mm
<b>Muestra:</b>	Patrón		<b>Longitud libre:</b>	36 cm
<b>Revisado por:</b>	Ing. Monge		<b>Realizado:</b>	Wilson Acosta
<b>TABLA DE RESULTADOS</b>				
<b>N. de Probeta</b>	<b>x</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Carga máxima (Lbs)</b>	<b>Carga máxima (Kg)</b>
<b>M1.P. T</b>	94		556.7	252.5
<b>M2.P. T</b>	102		602.3	273.2
<b>M3.P. T</b>	97		573.9	260.2
	<b>PROMEDIO</b>		<b>577.6</b>	<b>262.0</b>

**Tabla 26**

*Ensayo a flexión en la madera Teca al exponer al fuego 5 minutos*

<b>Propiedades mecánicas de la madera Teca al exponerlas al fuego</b>						
<b>Tipo de ensayo:</b>	Flexión			<b>Máquina:</b>	Prensa de CBR	
<b>Norma:</b>	ASTM D 143			<b>Dimensiones:</b>	24,5*25*10 mm	
<b>Muestra:</b>	expuesto al fuego 5 minutos			<b>Longitud libre:</b>	36 cm	
<b>Revisado por:</b>	Ing. Monge			<b>Realizado:</b>	Wilson Acosta	
<b>TABLA DE RESULTADOS</b>						
<b>N. de Probeta</b>	<b>x</b>	<b>peso(g) antes</b>	<b>peso (g) después</b>	<b>Carga máxima (Lbs)</b>	<b>Carga máxima (Kg)</b>	
<b>M1.T.5"</b>	84			499.7	226.6	
<b>M2.T.5"</b>	107			630.9	286.2	
<b>M3.T.5"</b>	96			568.2	257.7	
	<b>PROMEDIO</b>			<b>566.3</b>	<b>256.8</b>	

**Tabla 27**

*Ensayo a flexión en la madera Teca al exponer al fuego 10 minutos*

<b>Propiedades mecánicas de la madera Teca al exponerlas al fuego</b>						
<b>Tipo de ensayo:</b>	Flexión			<b>Máquina:</b>	Prensa de CBR	
<b>Norma:</b>	ASTM D 143			<b>Dimensiones:</b>	24*24,5*409 mm	
<b>Muestra:</b>	expuesto al fuego 10 min			<b>Longitud libre:</b>	36 cm	
<b>Revisado por:</b>	Ing. Monge			<b>Realizado:</b>	Wilson Acosta	
<b>TABLA DE RESULTADOS</b>						
<b>N. de Probeta</b>	<b>x</b>	<b>peso (g) antes</b>	<b>peso (g) después</b>	<b>Carga máxima (Lbs)</b>	<b>Carga máxima (Kg)</b>	
<b>M1.T.10"</b>	51			311.3	141.2	
<b>M2.T.10"</b>	53			322.8	146.4	
<b>M3.T.10"</b>	49			299.9	136.0	
	<b>PROMEDIO</b>			<b>311.3</b>	<b>141.2</b>	

## Ensayo de resistencia a flexión a madera Teca expuesta al fuego 0, 5 y 10 minutos

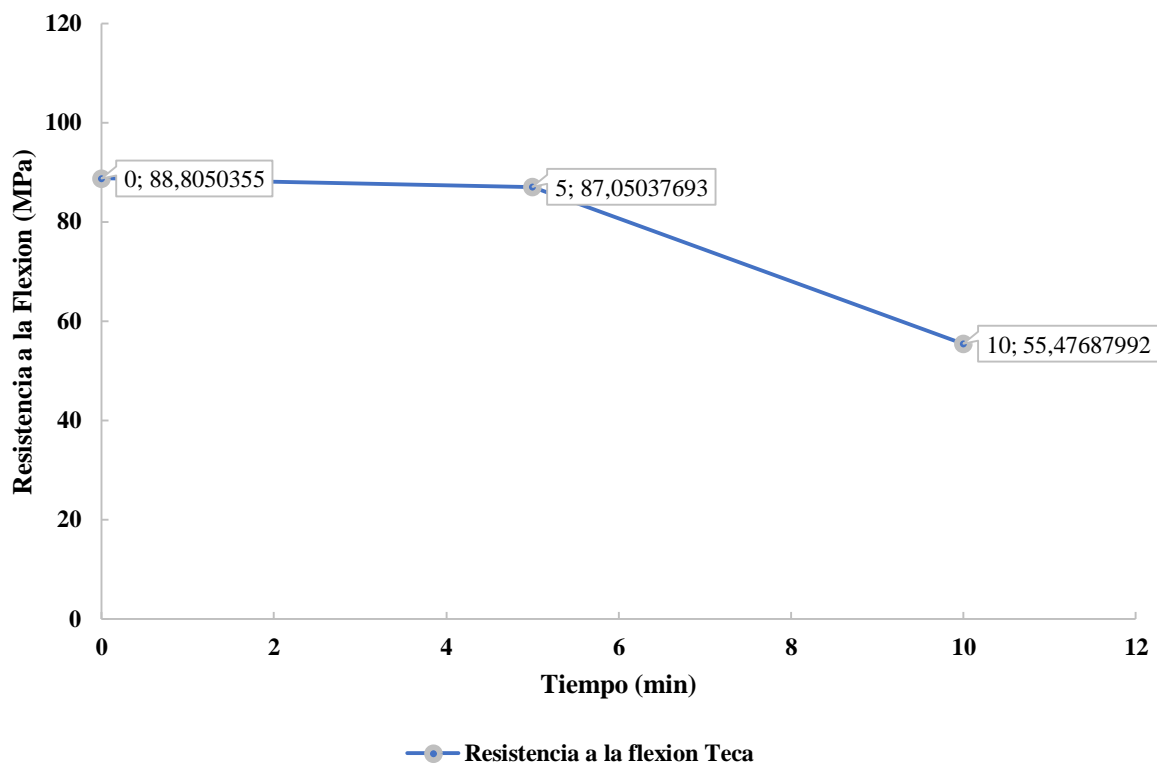
**Tabla 28**

*Promedio de ensayo a flexión de la madera Teca*

Tiempo	Longitud (mm)	Longitud libre	b	h	área	P(N)	Resistencia a la flexión (MPa)
0 min	410	360	25	25	625	2569.59	88.81
5min	409	360	25	25	625	2518.82	87.05
10 min	403	360	24	23.7	568.8	1384.92	55.48

**Figura 43**

*Promedio de ensayo a flexión de la madera Teca*



De acuerdo con el resultado del ensayo de resistencia a flexión de las muestras de Teca, refleja una variación mínima entre la probeta patrón (88,81 MPa) y la expuesta al fuego durante 5 minutos, con una diferencia del 2% (87,05 MPa), considerando que a este tiempo la muestra no sufrió muchos cambios mecánicos; sin embargo, se aprecia que existe una diferencia significativa entre la muestra patrón y la expuesta a 10 minutos, con una diferencia del 38% (55,48 MPa). El decrecimiento observado en la gráfica de barras indica una degradación estructural gradual, demostrando que, la madera Teca expuesta al fuego  $\geq 10$  minutos no tiene la capacidad de resistencia para soportar cargas (Figura 43).

## Módulo de flexión

El módulo de flexión ( $E_f$ ) es la relación que existe entre el esfuerzo máximo que puede soportar el material con respecto a su deflexión máxima en la región elástica. Para lo cual, se utilizó la fórmula anterior.

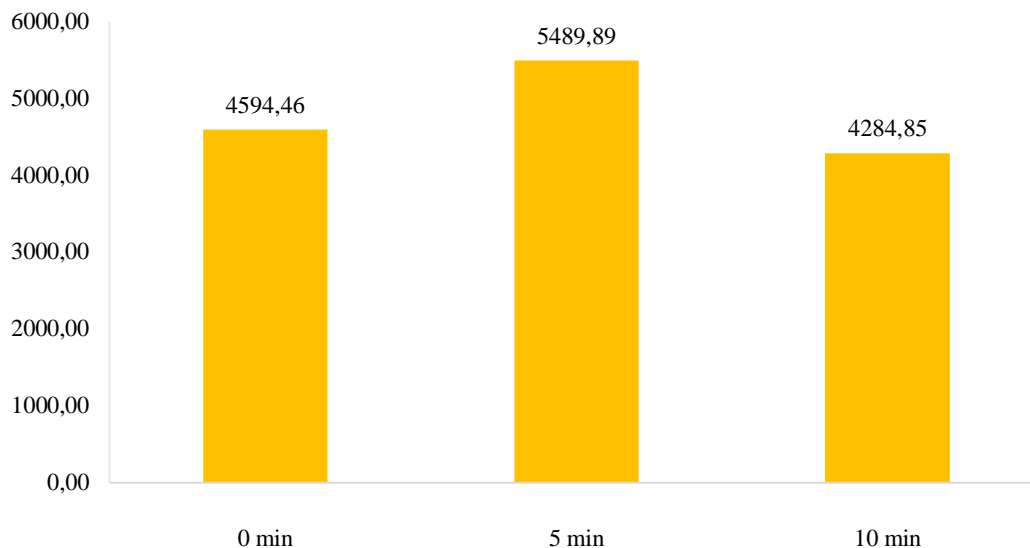
**Tabla 29**

*Módulo de flexión de la madera Teca*

Tiempo	Deflexión (mm)	l	b	h	F(N)	$E_f$ (MPa)
0 min	16,7	360	25	25	2569,59	4594,46
5min	13,7	360	25	25	2518,82	5489,89
10 min	11,8	360	24	23,7	1384,92	4284,85

**Figura 44**

*Módulo de flexión de la madera Teca*



Según con los resultados del módulo de flexión de la madera Teca, se puede observar que la muestra expuesta al fuego durante 5 minutos tiene una mayor elasticidad (5489,89 MPa) frente a la muestra patrón (4594,46 MPa), con una diferencia del 16%; sin embargo, la muestra expuesta a 10 minutos tiene menor elasticidad (4284,85 MPa) que la muestra patrón, con una diferencia del 7%. Este hallazgo puede variar debido a que se necesita más números de probetas de ensayo para tener unos resultados más reales (Figura 44).

## 5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- Se realizó el análisis de las propiedades mecánicas del Eucalipto y Teca, de la cual no pudimos realizar las muestras expuestas al fuego durante 15 minutos debido a que se carbonizaron en una medida de aproximadamente 22 mm de la sección transversal, excepto las muestras paralelas a las fibras.
- En lo concerniente al ensayo de resistencia a compresión paralela a la fibra de la madera de Eucalipto, se aprecia que la muestra expuesta al fuego durante 15 minutos perdió el 56% de compresión con relación a la muestra patrón (32,05 MPa); mientras que, la probeta de madera Teca expuesta al fuego durante 15 minutos disminuyó su compresión en un 32% frente a la muestra patrón (34,005 MPa). En cuanto al ensayo de resistencia a compresión perpendicular a la fibra de la madera de Eucalipto, se puede observar que la muestra expuesta al fuego durante 15 minutos perdió el 65% de compresión al comparar con la muestra patrón (12,56 MPa); sin embargo, la probeta de madera Teca expuesta al fuego durante 15 minutos disminuyó su compresión en un 60% frente a la muestra patrón (6,2 MPa). Al evaluar estos resultados, se determina que la muestra Teca pierde menos resistencia a compresión con relación a la muestra de Eucalipto. Sin embargo, ambas especies pierden más del 30% de resistencia a compresión frente a las muestras patrón. Según el ensayo de resistencia a flexión de la madera de Eucalipto, se aprecia que la muestra expuesta al fuego durante 10 minutos perdió el 74% de resistencia al comparar con la muestra patrón (180,34 MPa); sin embargo, la probeta de madera Teca expuesta al fuego durante 10 minutos disminuyó su resistencia en un 38% frente a la muestra patrón (88,81 MPa). Con estos resultados se puede determinar que, la muestra de la madera Teca expuesta al fuego por 10 minutos tiene mayor capacidad de resistencia para soportar cargas frente a la madera de Eucalipto. Sin embargo, ambas especies pierden más del 25% de resistencia a flexión comparadas a las muestras en condiciones normales. Estos resultados se deben a que la madera al ser expuesta al fuego se carboniza en un rango aproximado de 0,5 mm/min a 1 mm/min.
- De acuerdo con el ensayo de transmisión térmica se observa que la temperatura más alta se encuentra en la zona superior de la probeta, en el caso del Eucalipto llegó a 800 grados Centígrados en la cara expuesta al fuego a los 15 minutos a diferencia de la cara que no pega directamente el fuego alcanza una temperatura de 230 grados C. La probeta

de madera Teca alcanza una temperatura de 678 grados C en la parte superior a los 15 minutos de ser expuesta al fuego, a diferencia de su cara que no pega directamente el fuego alcanza una temperatura de 277 grados C, este hallazgo se debe a que, al realizar el ensayo en el horno refractario, el fuego estaba con dirección a la parte superior de la probeta, además, se identifica conforme pasa el tiempo se incrementa la temperatura, esto sucede por la evaporación del agua de las fibras de la madera y al tiempo más prolongado sube la temperatura.

- Al realizar la prueba de los gases emitidos por la exposición al fuego se puede determinar que, la muestra de Eucalipto a 15 minutos al fuego emitió una cantidad de 330 PPM de CO; mientras que, la muestra Teca registró un valor de 420 PPM. Lo que demostró, que la madera Teca emitió gases en un 21% más que la madera de Eucalipto; sin embargo, estos valores se pueden atribuir, a que la Teca tenía menos tiempo de secado a pesar que contenía menos humedad. El Eucalipto se carbonizo más rápido a pensar que contenía un porcentaje de humedad de 15.37 en comparación con la teca de 10,87. Cabe destacar que, durante la prueba no se registró la liberación de otros gases tóxicos propios de la madera.
- En lo referente al CH se pudo determinar que, la madera de Eucalipto tuvo un mayor CH, con una diferencia del 30% al compararla con la madera Teca. Cabe destacar que, a medida que el CH disminuye por debajo del punto de saturación de las fibras, se incrementa la capacidad mecánica significativamente.
- Finalmente, al evaluar el módulo de elasticidad en los ensayos tanto paralelo como perpendicular a la fibra se puede determinar que, madera de Eucalipto muestra una mayor rigidez que la Teca, debido a que su módulo de elasticidad es aproximadamente el 50 % más alto. Y en comparación con las muestras ensayadas a temperatura ambiente la elasticidad se reduce aproximadamente en un 70% en las muestras expuestas a 15 minutos de exposición al fuego.

## **5.2. Recomendaciones**

- Es recomendable utilizar en la madera procedimientos de ignifugación tanto de profundidad (incorporación de sales ignífugas a la masa de madera), como superficial (pintura, yeso, soluciones salinas), a pesar que no cambia la resistencia al fuego, pero si mejora considerablemente la inflamabilidad.

- Se recomienda realizar más número de probetas para los ensayos de propiedades mecánicas, para tener resultados más reales, y calibrar muy bien sus medidas para que no exista mucha variación al momento que la máquina de ensayo de compresión arroja los datos.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Acurio, A. (2024). Exposición a monóxido de carbono en labores subterráneas en trabajos de remediación Zaruma. *Investigación y Desarrollo*, 17(1), 77-86. doi:10.29166/revfig.v17i1.5719
- AITIM. (2018). El fuego y sus circunstancias. *Boletín de Información Técnica*(313), 21-33. Obtenido de [https://infomadera.net/uploads/publicaciones/pdf\\_321\\_Generalidades.pdf](https://infomadera.net/uploads/publicaciones/pdf_321_Generalidades.pdf)
- Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la madera. (2014). *Área Técnica: Protección de la madera. Estructuras madera y fuego*. Obtenido de [https://www.csaec.com/area\\_tecnica/aitim/enlaces/documentos/AITIM\\_Estructuras\\_de\\_maderayFuego\\_01.09.14.pdf](https://www.csaec.com/area_tecnica/aitim/enlaces/documentos/AITIM_Estructuras_de_maderayFuego_01.09.14.pdf)
- ASTM D4442: Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials*. (2010). doi:10.1520/D4442-92R03
- Barreto, J. (2013). *Estudio de propiedades físico mecánicas (corte y flexión) de la especie de madera tropical teca (tectona grandis) en el sistema de laminado pegado estructural*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Construcción. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11895>
- Basantez, E. (2003). *Silvicultura y fisiología vegetal aplicada*. Universidad del Azuay. Obtenido de <https://www.isbnecuador.com/catalogo.php?mode=detalle&nt=8786>
- Bascuñán, D. (2021). *Tecnologías constructivas para la protección frente al fuego en edificios de madera de mediana y gran altura*. Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya. Obtenido de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/349387/Mem%C3%B2ria\\_Bascu%C3%A1nDiego.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/349387/Mem%C3%B2ria_Bascu%C3%A1nDiego.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Bomberos Cuenca. (1 de marzo de 2023). *Bomberos Cuenca*. Obtenido de Bomberos Cuenca: <https://bomberos.gob.ec/elementor-22537/>
- Botina, Y. (2019). *Alternativa de uso del PET con agregados (arena) en Fortificación Minera, mediante la caracterización de Resistencia a la Flexión*. Tesis de grado, Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8933>
- Burgos, C. (2016). *Análisis del comportamiento de las fachadas de madera de zonas con clima mediterráneo*. Universitat Politècnica de Catalunya. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=156328>

- Cantos, M., Quesada, O., Ross, A., Brito, A., & Casanova, A. (2018). Cinética de la pirólisis de residuos madereros ecuatorianos. *Revista Cubana de Química*, 30(3), 400-422. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v30n3/ind03318.pdf>
- Castañeda, S., Klinger, W., & Sánchez, J. (2007). Incidencia del contenido de humedad en la zona de saturación de las fibras sobre el efecto de algunos ignífugos, concentraciones y métodos de ignifugación en las propiedades mecánicas de la madera. *Revista Colombia Foresta*, 10(20), 207-225. Obtenido de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/2985/4367>
- Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades. (1996). *Prevención de envenenamiento con monóxido de carbono producido por herramientas y equipos con motores pequeños de gasolina*. Obtenido de [https://www.cdc.gov/spanish/niosh/docs/96-118\\_sp/default.html#print](https://www.cdc.gov/spanish/niosh/docs/96-118_sp/default.html#print)
- Césaire, E. (2019). *Efecto de termotratamiento en aceite en las propiedades físicas y mecánicas de la madera Acrocarpus fraxinifolius*. Tesis de grado, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Obtenido de [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB\\_UMICH/1468/1/FIT\\_ECMA-M-2019-0600.pdf](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/1468/1/FIT_ECMA-M-2019-0600.pdf)
- Chicaiza, M. (2022). *Comparación de las propiedades físicas y mecánicas entre las especies arbóreas estudiadas: Platuquero, Pino Caribe y Pino Patula*. Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo, Facultad de Ingeniería. Obtenido de <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/8879/1/1.%20Tesis%20Final.pdf>
- Comunicación institucional. (8 de Octubre de 2020). *¿Qué es la investigación aplicada y cuáles son sus principales características?* Obtenido de IBERO: <https://blogposgrados.tijuana.iberro.mx/investigacion-aplicada/>
- Elvira, L. (1984). Respuesta de la madera ante el fuego en la construcción. *Informes de la construcción*, 35(358), 63-72. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2980120>
- Escobar, R. (2010). De la vida cotidiana al laboratorio: algunos ejemplos de investigación de traducción. *Revista mexicana de análisis de la conducta*, 37(3), 32-50. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmac/v37n3/v37n3a4.pdf>

- Ficha técnica No. 10. (2010). *Eucalipto*. Ecuador Forestal. Obtenido de <https://ecuadorforestal.org/wp-content/uploads/2010/08/EUCALIPTO.pdf>
- Ficha técnica No. 12. (2010). *Teca*. Ecuador Forestal. Obtenido de <https://ecuadorforestal.org/wp-content/uploads/2010/08/TECA.pdf>
- Garay, R., & Henríquez, M. (2010). Comportamiento frente al fuego de tableros y madera de pino radiata con y sin pintura retardante de llama. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 12(1), 11-24. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/maderas/v12n1/ART02.pdf>
- Garay, R., & Henríquez, M. (2010). Comportamiento frente al fuego de tableros y madera de pino radiata con y sin pintura retardante de llama. *Maderas, ciencias y tecnología*, 12(1), 11-24. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/maderas/v12n1/ART02.pdf>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. d. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta ed.). McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. Obtenido de [https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia\\_de\\_la\\_investigacion\\_-\\_roberto\\_hernandez\\_sampieri.pdf](https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf)
- Hitado, P. (2015). *Teoría del fuego*. Grupo Tragsa y CEIS Guadalajara. Obtenido de <https://www.face2fire.com/wp-content/temario%20bomberos%20especifico/1-Incendios/M1-Incendios-v6-01-teoriaFuego.pdf>
- Iparraquirre, L. (2009). *Mecánica básica: fuerza y movimiento*. Buenos Aires: Las ciencias naturales y la matemática. Obtenido de <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL001845.pdf>
- Jiménez, F. (s.f.). *El comportamiento de la madera al fuego*. Laboratorio del Fuego Departamento de Maderas del INIA. Obtenido de [https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf\\_REA%20FREA\\_1985\\_06\\_133\\_140.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_REA%20FREA_1985_06_133_140.pdf)
- Luve, R. (2020). *Fundamentos teóricos de la combustión de la madera*. Obtenido de Revista Protecma: <https://protecciondelamadera.com/fundamentos-teoricos-de-la-combustion-de-la-madera/>
- Martin, L. M. (2005). *Respuesta de la madera ante el fuego en la construcción*. España.
- Método de prueba estándar ASTM C39/C39M. (2010). *Resistencia a la compresión de cilindros de concreto*. IACET. Obtenido de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/3-concreto/3.10-11.pdf>

- Moreno, K., Spavento, E., & Monteoliva, S. (2022). Evolución del color y de la aparición de defectos en la madera de *Eucalyptus globulus* expuesta a intemperismo natural. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 24(1), 1-12. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100426>
- Norma ASTM D 143. (2010). *Métodos normales de prueba. Los pequeños especímenes claros de madera*. Obtenido de [https://www.academia.edu/40321678/Astm\\_c\\_143\\_espa%C3%B1ol](https://www.academia.edu/40321678/Astm_c_143_espa%C3%B1ol)
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2014). *Estructuras de madera*. Ministro de Desarrollo Urbano y Vivienda. Obtenido de <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/11.-NEC-SE-MD-Estructuras-Madera.pdf>
- Nugra, D. (2019). *Alternativas del uso de maderas en fortificación minera, mediante la caracterización de Resistencia a la Flexión*. Tesis de grado, Universidad del Azuay, Escuela de Ingeniería en Minas. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8931/1/14579.pdf>
- Resquin, F., Fariña, I., Rachid, C., Rava, A., & Doldán, J. (2012). Influencia de la edad de corte en el pulpeo de *Eucalyptus globulus* plantado en Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 16(2), 27-38. Obtenido de <http://www.scielo.edu.uy/pdf/agro/v16n2/v16n2a04.pdf>
- Rodas, H. (2014). *Estructuras I: Apuntes de clases*. Cuenca: Universidad de Cuenca. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=693803>
- Rodríguez, R., Zamora, J., Silva, J., Salcedo, E., & Fuentes, F. (2014). Propiedades físico-mecánicas de madera de teca de plantaciones comerciales. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(24), 13-25. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v5n24/v5n24a3.pdf>
- Sánchez, J. (2021). *Análisis de las propiedades mecánicas de la madera de eucalipto (eucalyptus), provenientes de la provincia de Tungurahua y su factibilidad como material estructural de acuerdo a la norma ecuatoriana de la construcción 2015 (NEC 2015)*. Tesis de grado, Universidad Técnica de Machala. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/33541/1/Tesis%20I.%20C.%2015%2023%20-%20S%C3%A1nchez%20Dahua%20Jos%C3%A9%20Luis.pdf>
- Sánchez, J. L. (2021). *Análisis de las propiedades mecánicas de la madera de eucalipto (Eucalyptus), provenientes de la provincia de Tungurahua y su factibilidad como*

- material estructural de acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 (NEC 2015)*. Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Civil. Obtenido de <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/33541>
- Sánchez, Y., Gallardo, Á., & Delgado, R. (2018). Comparación de la resistencia de comprensión en maderas nativas. *Revista de Iniciación Científica*, 4(Especial), 52-56. doi:<https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.0.1820>
- Secretaria de Gestión de Riesgos. (2023). *Gobierno del Ecuador*. Obtenido de <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/en-2021-disminuyo-un-79-la-incidencia-de-incendios-forestales-en-azuay/#:~:text=Mientras%20que%20durante%20el%202021,incendios%20forestales%20en%20la%20Provincia.>
- Solano, E., Belezaca, C., López, R., & Montiel, J. (2019). Diversidad de escolítidos en plantaciones de tectona grandis l. F. (teca) en la provincia del Guayas, Ecuador. *Universidad y Sociedad*, 11(5), 507-512. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v11n5/2218-3620-rus-11-05-507.pdf>
- Sotomayor, J. (2018). Comportamiento de cinco maderas mexicanas expuestas al fuego. Evaluación por ultrasonido. *Revista Ciencia Unemi*, 11(27), 111-120. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5826/582661256010/html/>
- Sotomayor, J. (2019). El módulo de flexión (Ef) es la relación que existe entre el esfuerzo máximo que puede soportar el material con respecto a su deflexión máxima en la región elástica. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 27(2), 280-287. doi:10.4067/S0718-33052019000200280
- Sotomayor, J., Suárez, G., & Olgún, J. (2015). Efecto del tratamiento higo-térmico en las características acústicas de la madera de Quercus scytophylla Liebm. *Madera y bosques*, 21(1), 139-156. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v21n1/v21n1a11.pdf>
- Suárez, E. (2021). *La resistencia a la flexión es máxima a un contenido de humedad, y desde el índice del porcentaje de humedad hasta el punto de saturación de la fibra. ¿Cuál o cuáles serían las dimensiones de resistencia?* Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Facultad de ciencias Agropecuarias. Obtenido de

[https://www.researchgate.net/publication/353274561\\_La\\_resistencia\\_a\\_la\\_flexion\\_en\\_la\\_madera\\_-\\_Trabajo\\_de\\_investigacion\\_recopilatorio](https://www.researchgate.net/publication/353274561_La_resistencia_a_la_flexion_en_la_madera_-_Trabajo_de_investigacion_recopilatorio)

- Valverde, J. C., Arias, D., Campos, R., & Guevara, M. (2019). Caracterización física y química del carbón de tres segmentos de fuste y ramas de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. proveniente de plantaciones dendroenergéticas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15(1), 16-24. doi:10.18845/rfmk.v15i1.3774
- Valverde, J., Jumbo, N., Fernández, P., González, J., Iñiguez, D., & Pucha, D. (2020). Composición química de la madera de *Juglans Neotropica* Diels., y su relación con las propiedades químicas del suelo en la parroquia Valladolid, provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador. *Revista Investigación Agraria*, 2(3), 68-82. doi:<https://doi.org/10.47840/ReInA202120>
- Vargas, A. (2020). *Análisis descriptivo del comportamiento de la madera para resistir al fuego y los procedimientos conexos para su protección eficiente ante la flamabilidad*. Tesis de grado, Universidad Santo Tomás, Facultad de Ciencia y Tecnología. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/22255/2020andresvargas.pdf?sequence=6>
- Villalba, M., & Gómez, J. (2022). *Análisis de la protección anti-fuego en los árboles. Estudio de la geometría pasiva de patrones arbóreos*. E. T. S. De Arquitectura de Madrid. Obtenido de <https://library.carolinau.edu/eds/detail?db=edsbas&an=edsbas.789D70EB>

## AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Wilson Favian Acosta Chilpe portador de la cédula de ciudadanía N.º 0105191464. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación "**MADERA DE EUCALIPTO Y TECA: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO FRENTE A LA EXPOSICIÓN AL FUEGO**" de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 18 de marzo de 2024

F:   
Wilson Favian Acosta Chilpe  
0105191464