UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

Alternativas del uso de maderas en fortificación minera, mediante la caracterización de Resistencia a la Flexión.

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autora:

DAISY JEANETH NUGRA YANEZ

Director:

GIL TARQUINO ÁLVAREZ PACHECO

Cuenca, Ecuador

2019

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a mis seres queridos con mucho amor y cariño, quienes no se cansaron de apoyarme durante el trascurso de mi vida.

A mis padres Luis y Leonor, porque dieron todo su esfuerzo, sacrificio y paciencia para que logre culminar con mi carrera y pueda tener un mejor futuro. Nunca me dejaron sola siempre con sus consejos supieron animarme para que no desmaye ante los diferentes obstáculos que se fueron presentando.

A mis hermanos Matías, Marcos, Andrea y Joselin, porque a pesar de nuestra dura infancia logramos estar unidos, son mi inspiración para seguir cumpliendo metas.

A mis tíos Hernán y Margarita, porque son personas valiosas enviadas por Dios, nos supieron apoyar durante momentos duros de mi familia; son una excelente pareja y el espejo de vida que quiero seguir.

Les amo con todo mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero expresar mi gratitud a Dios por haberme dado existencia y sabiduría para que culmine con esta meta tan deseada.

A mis padres Luis y Leonor, porque me dieron su confianza y apoyo para que pudiera estudiar.

A mi tutor de tesis Ing. Gil Álvarez, por guiarme durante esta etapa, quien con sus conocimientos, enseñanza y paciencia permitió el desarrollo de mi tesis. Así mismo de manera muy especial al Ing. Patricio Feijoo por su colaboración y motivación para que logre culminar con este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

ÍNDICE DE CONTENIDOS iv

ÍNDICE DE FIGURAS vii

ÍNDICE DE TABLAS ix

ÍNDICE DE ANEXOS x

RESUMEN xii

ABSTRACT xiii

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO 3

1.1 Fortificación en minas 3

1.1.1 Tipos de fortificación 4

1.2 Características generales de las maderas usadas en fortificación 4

1.3 Propiedades de las maderas usadas en fortificación 8

1.3.1 Propiedades físicas de la madera 8

1.3.2 Propiedades Mecánicas de las maderas 9

1.3.3 Resistencia a la Flexión de las maderas 13

1.3.3.1 Ecuación para determinar el esfuerzo en el ensayo de flexión a realizar 14

1.3.4 Deflexión en vigas 18

1.4 Humedad 21

1.5 Influencia de la humedad 23

CAPÍTULO II: DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN 25

2.1 Descripción de muestras 25
2.1.1 Caracterización de muestras 25
2.1.1.1 Muestras en estado natural para determinar la Resistencia a la Flexión 26
2.1.1.2 Muestras sumergidas en agua por 1 semana para determinar la Resistencia a la Flexión 26
2.1.1.3 Muestras sumergidas en agua por 2 semanas para determinar la Resistencia a la Flexión 27
2.1.1.4 Muestras sumergidas en agua por 4 semanas para determinar la Resistencia a la Flexión 27
2.1.1.5 Muestras sumergidas en agua por 8 semanas para determinar la Resistencia a la Flexión 28
2.1.1.6 Muestras sumergidas en agua por 12 semanas para determinar la Resistencia a la Flexión 28
2.1.1.7 Muestras para determinar el contenido de humedad natural 29
2.2 Descripción de métodos de experimentación 29
2.2.1 Equipos para medir los ensayos de resistencia 29
2.2.2 Ejecución experimental en las muestras 33

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y ANÁLISIS 38

3.1 Análisis de resultados 38
3.2 Interpretación de Resultados 38
3.2.1 Resultados del Eucalipto 39
3.2.2 Resultados del Pino 39
3.2.3 Resultados de Teca 40
3.2.4 Resultados de módulo de elasticidad respecto a la humedad 42
3.2.4.1 Eucalipto 42
3.2.4.2 Pino 43
3.2.4.3 Teca 44
3.2.5 Resultados del límite elástico 44
3.2.5.1 Eucalipto 44
3.2.5.2 Pino y Teca 45
3.3 Tabla general de resultados 46
3.4 Gráficas de resultados 47
3.4.1 Gráficas del incremento de humedad 47

3.4.1.1 Eucalipto.....47
3.4.1.2 Pino.....48
3.4.1.3 Teca.....48
3.4.2 Gráficas de esfuerzo máximo de flexión y el contenido de humedad..49
3.4.2.1 Eucalipto.....49
3.4.2.2 Pino.....50
3.4.2.3 Teca.....51

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....52

BIBLIOGRAFÍA.....54

ANEXOS.....58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Entibación con madera 5
Figura 1.2 Sostenimiento con madera mediante mono o peón..... 6
Figura 1.3 Defectos estructurales y naturales de la madera 7
Figura 1.5 Principales direcciones de la madera 8
Figura 1. 6 Probeta de corte paralelo a las fibras.....10
Figura 1.7 Probeta de compresión perpendicular a las fibras 11
Figura 1.8 Probeta de compresión paralelo a las fibras 11
Figura 1.9 Probeta para la determinación de la dureza de Janka.....12
Figura 1.10 Viga simplemente apoyada.....13
Figura 1.11 Viga en voladizo 13
Figura 1.12 Viga con voladizo 14
Figura 1.13 Diagrama de distribución de fuerzas en las fibras de la viga 14
Figura 1.14 Viga simplemente apoyada sometida a una carga en su centro.....15
Figura 1.15 Análisis de diagrama esfuerzo cortante y momento flector 15
Figura 1.16 Deflexión en el centro de la viga 19
Figura 1.17 Deflexión en el extremo de la viga 19
Figura 1.18 Diagrama esfuerzo-deformación.....21
Figura 1.19 Determinación de humedad por el método gravimétrico 22
Figura 1.20 Determinación de humedad por el método eléctrico 23
Figura 2.1 Prensa Hidráulica de Humboldt…….30
Figura 2.2 Utillaje construido de acero.....31
Figura 2.3 Medidas del utillaje vista frontal 31
Figura 2.4 Medidas del utillaje vista lateral 31
Figura 2.5 Medidas del utillaje vista superior 32
Figura 2.6 Medidas del rodillo 32
Figura 2.7 Base metálica y Micrómetro.....33
Figura 2.8 Pruebas en la Prensa para ensayos CBR de Humboldt 35
Figura 2.9 Pruebas en la Prensa Electro Hidráulica de Humboldt 36
Figura 2.10 Muestra E12P en su máxima deflexión.....37
Figura 3.1 Incremento del contenido de humedad del Eucalipto……47
Figura 3.2 Incremento del contenido de humedad del Pino.....48
Figura 3.3 Incremento del contenido de humedad de Teca 49

Figura 3.4 Esfuerzo y contenido de humedad del Eucalipto.....50
Figura 3.5 Esfuerzo y contenido de humedad del Pino 50
Figura 3.6 Esfuerzo y contenido de humead de Teca 51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Principales propiedades físico-mecánicas del Eucalipto 17
Tabla 1.2 Propiedades mecánicas del Pino 18
Tabla 1.3 Propiedades mecánicas en condición verde y seca al 12% de contenido de humedad de Teca 18
Tabla 1.4 Módulo de elasticidad (E) y Relaciones de Poisson (ν) 20
Tabla 1.5 Cambios de dimensiones de las maderas según la humedad 24
Tabla 2.1 Características de Eucalipto, Pino y teca en estado natural 26
Tabla 2.2 Características de Eucalipto, Pino y Teca, tiempo de inmersión 1 semana. 26
Tabla 2.3 Características de Eucalipto, Pino y Teca, tiempo de inmersión 2 semanas. 27
Tabla 2.4 Características de Eucalipto, Pino y Teca, tiempo de inmersión 4 semanas 27
Tabla 2.5 Características de Eucalipto, Pino y Teca, tiempo de inmersión 8 semanas 28
Tabla 2.6 Características de Eucalipto, Pino y Teca, tiempo de inmersión 12 semanas 28
Tabla 2.7 Características de Eucalipto, Pino y Teca para determinar la humedad natural 29
Tabla 2.8 Denominación de las probetas de Eucalipto 34
Tabla 2.9 Denominación de las probetas de Pino 34
Tabla 2.10 Denominación de las probetas de Teca 34
Tabla 3.1 Resultados de esfuerzo, deflexión y humedad del Eucalipto.....39
Tabla 3.2 Resultados de esfuerzo, deflexión y humedad del Pino 40
Tabla 3.3 Resultados de esfuerzo, deflexión y humedad de Teca 41
Tabla 3.4 Módulo de elasticidad y humedad del Eucalipto 43
Tabla 3.5 Módulo de elasticidad y humedad del Pino 43
Tabla 3.6 Módulo de elasticidad y humedad de Teca.....44
Tabla 3.7 Límite elástico del Eucalipto 45
Tabla 3. 10 Resultados finales de Eucalipto, Pino y Teca 46

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Medición de peso de las probetas en estado natural 59
Anexo 2: Medición del peso de las muestras sumergidas en agua 59
Anexo 3: Pruebas de Resistencia a la Flexión y deflexión en maderas 60
Anexo 4: Muestra de T12F sometida a carga máxima 60
Anexo 5: Probeta de E1F sometida a la carga máxima 61
Anexo 6: Probeta de P1F sometida a la carga máxima 61
Anexo 7: Probeta de T1F sometida a la carga máxima 61
Anexo 8: Prueba de flexión ENF 62
Anexo 9: Gráfica de esfuerzo-deflexión de ENF 62
Anexo 10: Prueba de flexión PNF 63
Anexo 11: Gráfica de esfuerzo-deflexión de PNF 63
Anexo 12: Prueba de flexión TNF 64
Anexo 13: Gráfica esfuerzo-deflexión TNF 64
Anexo 14 Prueba de flexión en E1F 65
Anexo 15: Gráfica de esfuerzo-deflexión de E1F 65
Anexo 16: Prueba de flexión en P1F 66
Anexo 17: Gráfica de esfuerzo-deflexión de P1F 66
Anexo 18: Prueba de flexión en T1F 67
Anexo 19: Gráfica de esfuerzo-deflexión de T1F 67
Anexo 20: Prueba de flexión en E2F 68
Anexo 21: Gráfica de esfuerzo-deflexión de E2F 68
Anexo 22: Prueba de flexión en P2F 69
Anexo 23: Gráfica de esfuerzo-deflexión de P2F 69
Anexo 24: Prueba de flexión en T2F 70
Anexo 25: Gráfica de esfuerzo-deflexión de T2F 70
Anexo 26: Prueba de flexión en E4F 71
Anexo 27: Gráfica de esfuerzo-deflexión de E4F 71
Anexo 28: Prueba de flexión en P4F 72
Anexo 29: Gráfica de esfuerzo-deflexión de P4F 72
Anexo 30: Prueba de flexión en T4F 73
Anexo 31: Gráfica de esfuerzo-deflexión de T4F 73
Anexo 32: Prueba de flexión en E8F 74

Anexo 33: Gráfica de esfuerzo-deflexión de E8F 74
Anexo 34: Prueba de flexión en P8F 75
Anexo 35: Gráfica de esfuerzo-deflexión de P8F 75
Anexo 36: Prueba de flexión en T8F 76
Anexo 37: Gráfica de esfuerzo-deflexión de T8F 76
Anexo 38: Prueba de flexión en E12F 77
Anexo 39: Gráfica de esfuerzo-deflexión de E12F 77
Anexo 40: Prueba de flexión en P12F 78
Anexo 41: Gráfica de esfuerzo-deflexión de P12F.....78
Anexo 42: Prueba de flexión en T12F 79
Anexo 43: Gráfica de esfuerzo-deflexión de T12F 79

ALTERNATIVAS DEL USO DE MADERAS EN FORTIFICACIÓN MINERA, MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo caracterizar diferentes tipos de maderas adecuadas para el uso en fortificación minera, mediante ensayos de Resistencia a la Flexión, bajo diferentes condiciones de humedad. Para lo propuesto se planteó un análisis en 3 especies de madera más utilizadas en minería: Eucalipto, Pino y Teca. Los ensayos se realizaron en vigas con carga puntual perpendicular a las fibras, aplicada en el punto medio de dos apoyos fijos. Para obtener los diferentes grados de humedad de las probetas se procedió a sumergirlas en agua en distintos tiempos. Con los resultados obtenidos de las pruebas se tabuló, se realizó los cálculos de Resistencia a la Flexión y deflexión, y el análisis de las maderas que presentaron mejores resultados.

Palabras clave: Resistencia, flexión, deflexión, fortificación, humedad.

Gil Tarquino Álvarez Pacheco

Director del Trabajo de Titulación

Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela

Daisy Jeaneth Nugra Yanez

Autora

ALTERNATIVES OF THE USE OF WOODS IN MINING FORTIFICATION THROUGH THE CHARACTERIZATION OF FLEXURAL STRENGTH.

ABSTRACT

The objective of this project was to characterize different types of woods suitable for mining fortification through tests of flexural resistance under different humidity conditions. For this, an analysis was proposed in the 3 most commonly used wood species in mining: Eucalyptus, Pine and Teak. The tests were carried out on beams with a point load perpendicular to the fibers, and applied at the midpoint of two fixed supports. To obtain the different degrees of humidity of the specimens, they were immersed in water at different times. The results obtained from the tests were tabulated and the calculations of Resistance to Flexion and Deflection were made. The analysis of the woods to show the best results was also performed.

Keywords: Resistance, flexion, deflection, fortification, humidity.

Gil Tarquino Álvarez Pacheco

Thesis Director

Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Faculty Coordinator

Daisy Jeaneth Nugra Yanez

Author

UNIVERSIDAD DEL AZUAY
Dpto. Idiomas

Translated by

Ing. Paúl Arpi

Nugra Yanez Daisy Jeaneth

Trabajo de Titulación

Ing. Gil Tarquino Álvarez Pacheco

Marzo, 2019

ALTERNATIVAS DEL USO DE MADERAS EN FORTIFICACIÓN MINERA, MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la actividad minería es de gran relevancia, debido a que mejora el desarrollo económico de nuestro país; generando nuevas tecnologías en las industrias y creando fuentes de trabajo para la población ecuatoriana.

El proceso de extracción está comprendido por medio de minería a cielo abierto y subterránea. Mediante la explotación subterránea se hace la excavación del suelo, con el objetivo de encontrar los depósitos de minerales profundos que sean inclinados y de alta ley, pudiendo ser estos metálicos y no metálicos.

A medida que se avance con la extracción del material el túnel que se crea necesita de estabilidad, esta labor puede realizarse por distintos tipos, dentro de ellos los más relevantes son: marcos de acero, marcos de madera y hormigón lanzado; la utilización de cada uno de estos depende de los estudios geotécnicos que se tengan del suelo.

En nuestro país el uso de ademes construidos con distintos tipos de maderas, en minería subterránea es de gran importancia, ya que es de fácil construcción, manipulación, de bajo costo, y se lo hace para evitar el deslizamiento de rocas y material fracturado, salvaguardando la vida los trabajares.

Para ejecutar la estabilidad de las labores mineras y tener excelentes resultados se deben tomar en cuenta tanto las propiedades físicas como mecánicas de los materiales, es por esta razón que se considera en este trabajo encontrar la especie de madera que presente las mejores ventajas.

Es así que, se ha visto la necesidad de analizar la propiedad de Resistencia a la Flexión en varias probetas de distintos tipos de maderas y con diferentes porcentajes de humedad, para lo cual se procedió a sumergirlos en agua por varios periodos, en el que se determinó el incrementó de la humedad. Esta variable altera las fibras de las maderas haciendo unas más débiles que otras, al ser sometidas a cargas puntuales. Además, es un factor ambiental que está presente en minería subterránea, es decir que los ademes mineros están expuestos directamente a escorrentía subterránea.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

En este primer capítulo se hace una recopilación de información en base a los temas de fortificación minera, propiedades físicas y mecánicas de las maderas y la influencia de la humedad con el propósito de entender y tomar en cuenta cada parámetro para los posteriores ensayos.

1.1 Fortificación en minas

La fortificación es una práctica de la minería subterránea, la cual está formada por un conjunto de procedimientos que permiten mantener estables las labores cuando su condición no es auto soportante en una mina subterránea (Gonzales, 2013). La función que tiene esta actividad es prevenir el deslizamiento de las rocas circundantes y preservar las dimensiones de la sección transversal (Fortificación de minas, 2008).

Para poder definir mejor la fortificación a emplearse se deben considerar algunos aspectos (Clunes, 2006):

- Parámetros geológicos y geotécnicos.
- Esfuerzos actuantes y comportamiento de la roca.
- Uso y duración de las labores mineras.
- Experiencia del diseñador.

Es importante la fortificación porque permite (Cancino, s.f.):

- Brindar protección para trabajadores y equipos.
- Mantener continua la producción.
- Prevenir y evitar el movimiento de rocas.

El diseño consiste en encontrar el tamaño apropiado para cabezales, postes laterales y partes auxiliares como cuñas o revestimientos (Birön & Arioğlu, 1982). En faenas mineras de corta vida, la fortificación en caso de requerirse, será tan sencilla como sea posible, pero debe asegurar la estabilidad de la labor. En faenas de mayor duración, la tendencia es diseñar fortificaciones de carácter más permanente (Sernageomin, 2013).

1.1.1 Tipos de fortificación

Cuando el terreno es muy inestable debe fortificarse, instalando estructuras de hormigón, de madera o de metal en el espacio generado por la excavación. Así, la galería estará en mejores condiciones de resistir la presión del cerro (Pinto, s.f.).

La fortificación se realiza para evitar derrumbes no planificados y se clasifica:

Desde el punto de vista de su función:

Fortificaciones rígidas: Sostienen sin permitir ningún movimiento de la roca y deben ser bastante resistentes para sujetar los bloques que puedan caerse. En la actualidad solo se usan en las bocas de las minas o sectores de mala calidad de la roca o explotaciones hundidas antiguas donde se ha perdido las propiedades resistentes de la roca. Los sistemas más usados para estas fortificaciones son los marcos de madera o acero (Panilla, 2010).

Fortificaciones flexibles: Permiten deformaciones de la roca con lo que se alivian los esfuerzos y al deformarse mejoran sus propiedades resistentes. Las fortificaciones modernas son: marcos deslizantes, cintas, marcos noruegos, y la mayor parte tienen pernos de anclajes y cables (Panilla, 2010).

Desde el punto de vista del tiempo:

Fortificación de corto tiempo: Se instalan inmediatamente después del disparo del frente, es un sostenimiento de aberturas de corto tiempo, entre estos tenemos los pernos con anclaje (Cancino, s.f.).

Fortificación definitiva: Son los elementos que deben instalarse para asegurar la estabilidad del diseño minero y sus particularidades para toda la vida útil de la mina, además, debe permitir extraer la tasa de producción programada. Ejemplos: cables de acero, barras corrugadas con resina o cementada (Cancino, s.f.).

1.2 Características generales de las maderas usadas en fortificación

La forma más antigua y sencilla de soporte es el entibado mediante vigas de madera, actualmente apenas tiene repercusión frente a los avances que ha habido en las técnicas de estabilidad del terreno (Madariaga, 2015).

La razón para considerar a la madera como material de estabilidad es que aún se usa en minas a pequeña escala, tanto de carbón como metálicas (Birön & Arioğlu, 1982).

Los distintos tipos de cuadros de galería difieren en la posición y el tamaño de las trabancas y los postes laterales, pudiéndose utilizar una trabanca y uno o dos postes como se muestra en la figura 1.1. Se eligen unos u otros dependiendo de factores como la presión del terreno si es mayor en techo o en hastiales, inclinación y potencia de la capa de avance. Es importante que se ejecuten correctamente las uniones entre los diferentes elementos del cuadro y el pie del cuadro con el piso de la galería (Madariaga, 2015).

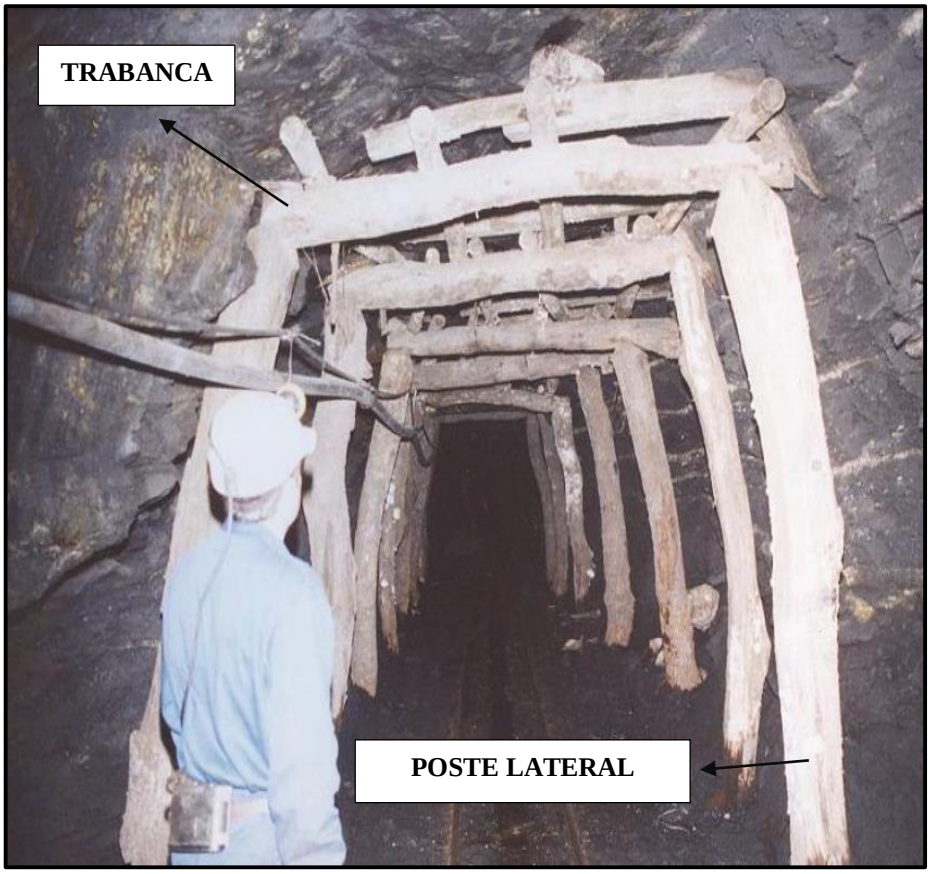


Figura 1.1 Entibación con madera
Fuente: (Madariaga, 2015)

En la figura 1.2 se muestra la utilización de madera en aquellos lugares que requieran una fortificación puntual, se usa el "mono" o "peón", en yacimientos en forma de capas (mantos), estos se colocan en dirección a la presión y en yacimientos horizontales o muy tendidos, se colocan en forma vertical y a distancias variables (Sernageomin, 2013).

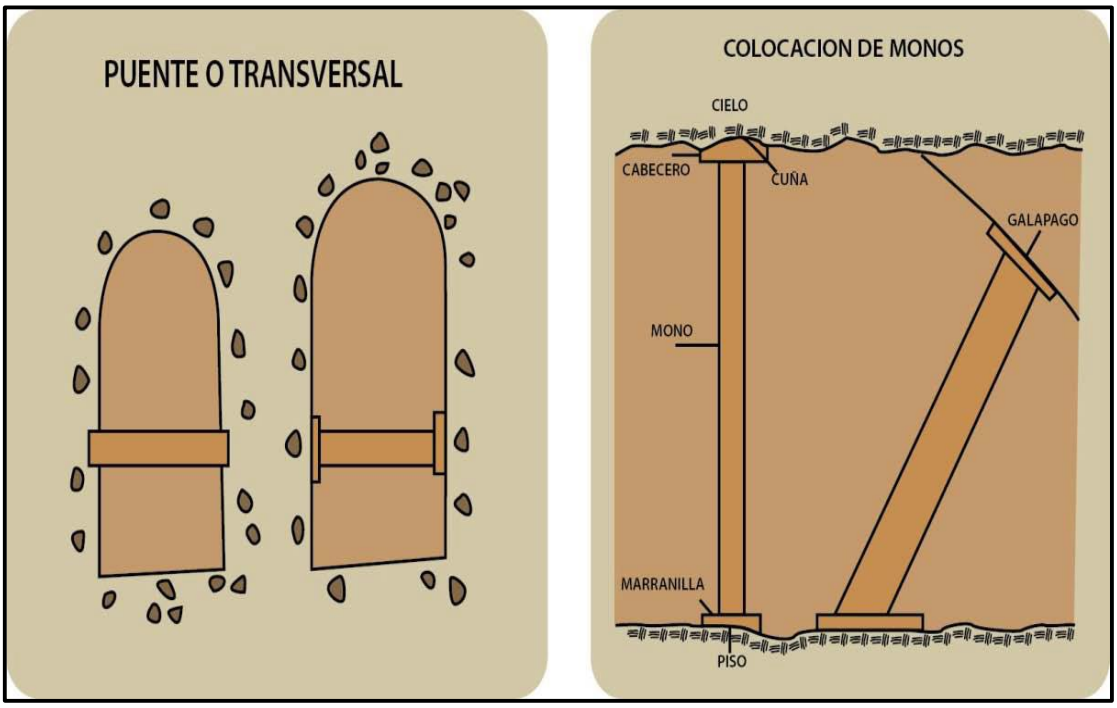


Figura 1.2 Sostenimiento con madera mediante mono o peón
Fuente: (Sernageomin, 2013)

Para elegir correctamente la madera a usar, deben considerarse dos factores (Sernageomin, 2013):

- Las condiciones ambientes a las que estará expuesta, que puede ser desde húmedo hasta seco, debido a que influye en la variación de peso, propiedades mecánicas y durabilidad.
- Los esfuerzos a las que puede estar sometida como: pandeo, tracción, flexión y esfuerzo de corte.

Se sabe que la madera es un material natural que viene con defectos producidos por crecimiento, por ejemplo, los nudos a lo largo de los árboles afectan la resistencia a la flexión, además, los anillos de crecimiento pueden no estar concéntricos debido a las condiciones del viento y del sol, y las condiciones de secado pueden formar grietas. Para una mejor explicación en la figura 1.3 se puede observar algunos defectos (Ramírez, 2009).

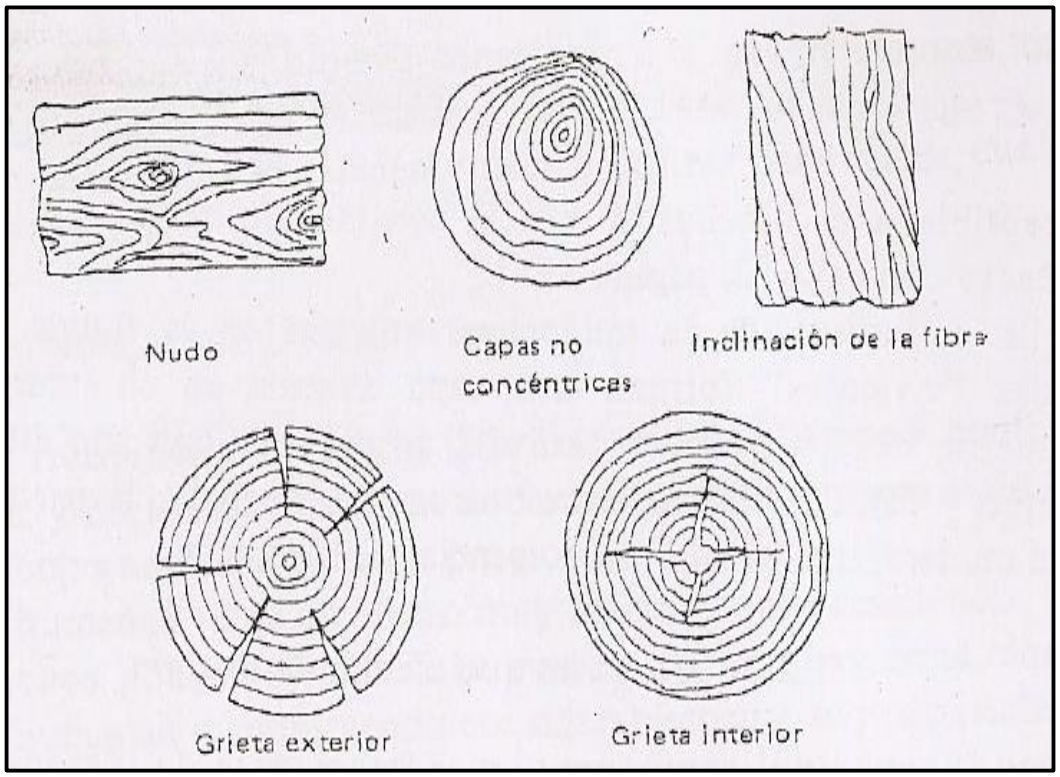


Figura 1.3 Defectos estructurales y naturales de la madera

Fuente: (Ramírez, 2009)

La utilización de la madera en minería tiene las siguientes ventajas y desventajas (Clunes, 2006):

Ventajas:

- Es fácil de cortar.
- Es fácil de transportar e instalar.
- Da señales audibles y visibles de su situación de estabilidad.

Desventajas:

- Su resistencia depende de sus estructuras fibrosas, sus defectos naturales y su humedad.
- Baja resistencia a los empujes de la roca.
- Se degrada fácilmente con los parásitos (hongos, insectos).
- Es de corta vida.
- Difícil adaptación a las irregularidades del perímetro de la labor.
- Disminuye el espacio útil de la galería.

1.3 Propiedades de las maderas usadas en fortificación

1.3.1 Propiedades físicas de la madera

Higroscopicidad: La madera es higroscópica cuando pierde y toma humedad con los cambios de humedad y temperatura atmosférica circundante. Debido a esto se producen cambios en las dimensiones de la pieza de madera, es decir contracción e hinchamiento que no son iguales en las 3 direcciones axial, radial o tangencial (Mastrandea & Martínez, 2007).

Anisotropía: Presenta diferentes comportamientos físicos y mecánicos a lo largo de tres direcciones diferentes: axial, radial y tangencial (Mastrandea & Martínez, 2007). De tal manera que por su naturaleza la madera tiene la capacidad de absorber la humedad, dependiendo del tipo de madera y de su punto de saturación, el exceso de humedad produce hinchazón (Tecnología de la Madera, 2007).

La dirección axial es la dirección de crecimiento del árbol (dirección de las fibras). La radial es perpendicular a la axial, es la dirección de los radios y corta al eje del árbol. La dirección tangencial es paralela a la radial, en la dirección de la fibra y cortando los anillos anuales (Tecnología de la Madera, 2007).

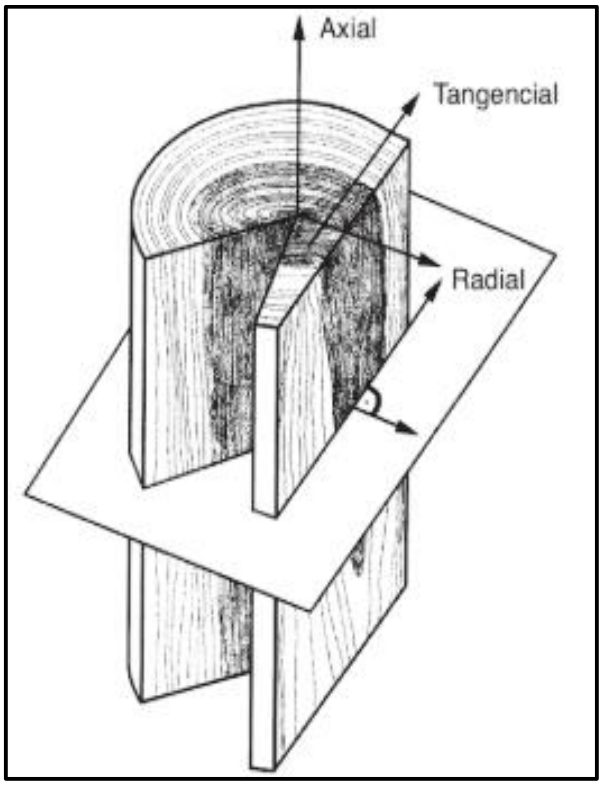


Figura 1.4 Principales direcciones de la madera

Fuente: (Vignote & Martínez, 2006)

Densidad: Cuanto más leñoso sea el tejido de una madera y compactas sus fibras, tendrá menos espacio dentro de sus fibras, por lo tanto, la densidad se incrementa.

La densidad de la madera varía con la humedad (12% es la humedad normal al abrigo y climatizada). La madera verde tiene valores de 50% a 60%. Las maderas se clasifican según su densidad aparente, en pesadas, ligeras y muy ligeras. Las maderas duras son más densas (Tecnología de la Madera, 2007).

Dureza: Es la resistencia que opone la madera a la penetración de ciertos cuerpos extraños como ciertas herramientas, clavos, tornillos entre otros. Está relacionada con la densidad y tiene una marcada importancia en su relación con la dificultad de su trabajo (Umerez, 2015).

Según su dureza, la madera se clasifica en:

- Maderas duras: Son aquellas que proceden de árboles de un crecimiento lento, de hoja caduca, por lo que son más densas.
- Maderas blandas: Las maderas de coníferas son más livianas y menos densas que las duras.
- Maderas semiduras: Muchas maderas no se las puede clasificar en las categorías anteriores por tener una densidad y resistencia variadas (Tecnología de la Madera, 2007).

Olor: Se debe a compuestos químicos almacenados principalmente en la parte central, más seca y compacta, del tronco y de las ramas gruesas de un árbol. Pueden diferenciarse por su olor (Tecnología de la Madera, 2007).

Polaridad: La madera tiene carácter polar y por tanto tiene afinidad con los productos polares, como puede ser el agua, los pegamentos de carácter polar, los barnices, etc. (Umerez, 2015).

1.3.2 Propiedades Mecánicas de las maderas

Una de las características importantes de las maderas son las propiedades mecánicas, estas definen la aptitud y capacidad para resistir cargas externas, excluyendo los esfuerzos debidos a las tensiones internas producto de los cambios que produce la humedad a la que están expuestas las maderas (Spavento, Keil & Monteoliva, 2008).

- **Resistencia estática**

Se determina a través de cargas que se van aumentando en forma lenta y regular. La velocidad de aplicación de las cargas tiene por finalidad producir situaciones de características aproximadas a las que presenta una carga estática. Los ensayos de flexión estática, corte paralelo a las fibras, compresión paralela y perpendicular a las fibras pertenecen a esta clasificación (Spavento, Keil & Monteoliva, 2008).

Propiedades de resistencia estática:

Flexión estática: Mide la resistencia que ofrece una viga a una carga puntual aplicada en el centro de luz o distancia entre apoyos (Spavento, Keil & Monteoliva, 2008).

Corte paralelo a la dirección de las fibras: Es la capacidad que tiene la madera de resistir fuerzas que tienden a causar el deslizamiento de una sección sobre otra adyacente a la anterior. Se puede presentar tanto en sentido paralelo como perpendicular a las fibras (Spavento, Keil & Monteoliva, 2008).

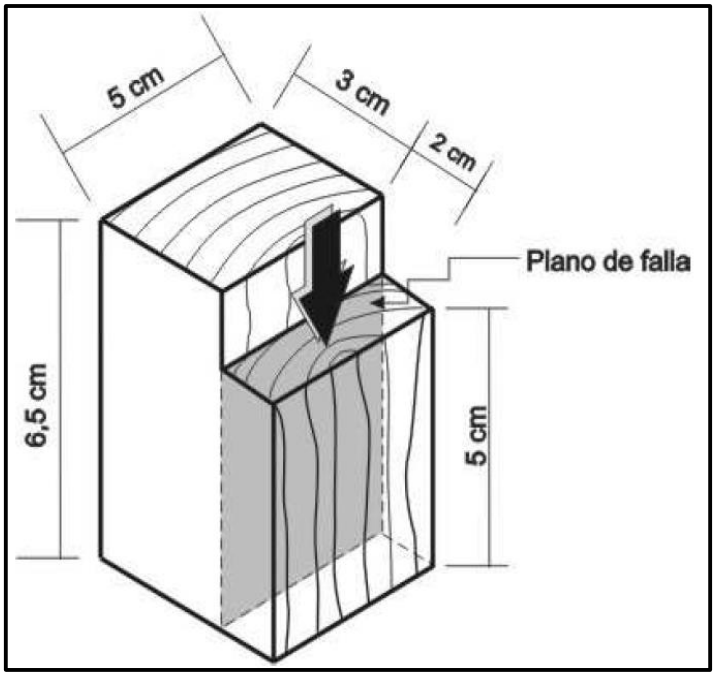


Figura 1. 5 Probeta de corte paralelo a las fibras
Fuente: (Spavento, Keil & Monteoliva, 2008)

Compresión perpendicular a las fibras: Es la resistencia que opone la madera a una carga repartida aplicada en sentido perpendicular a la dirección de las fibras en una de las caras radiales de la probeta (Spavento, Keil & Monteoliva, 2008).

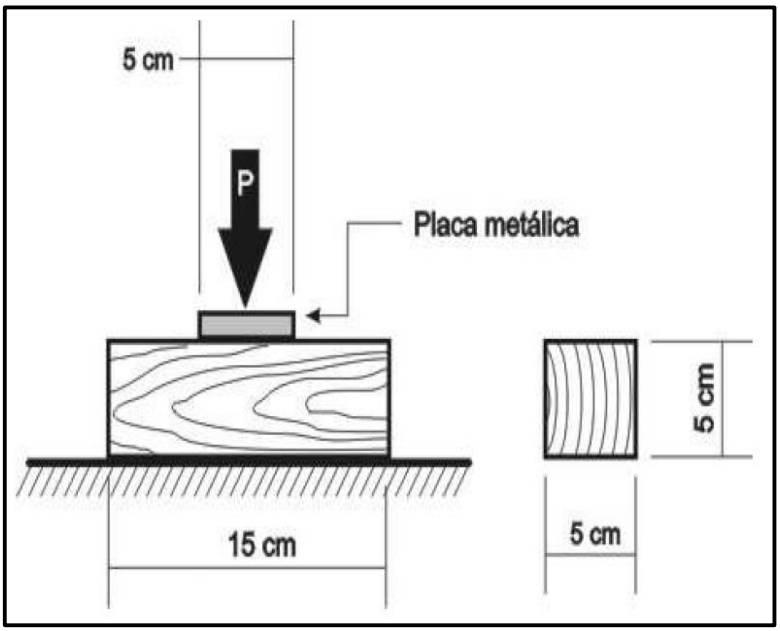


Figura 1.6 Probeta de compresión perpendicular a las fibras

Fuente: (Spavento, Keil & Monteoliva, 2008)

Compresión paralela a las fibras: Es la resistencia que ofrece una columna a una carga aplicada en el mismo sentido de la dirección de las fibras (Spavento, Keil & Monteoliva, 2008).

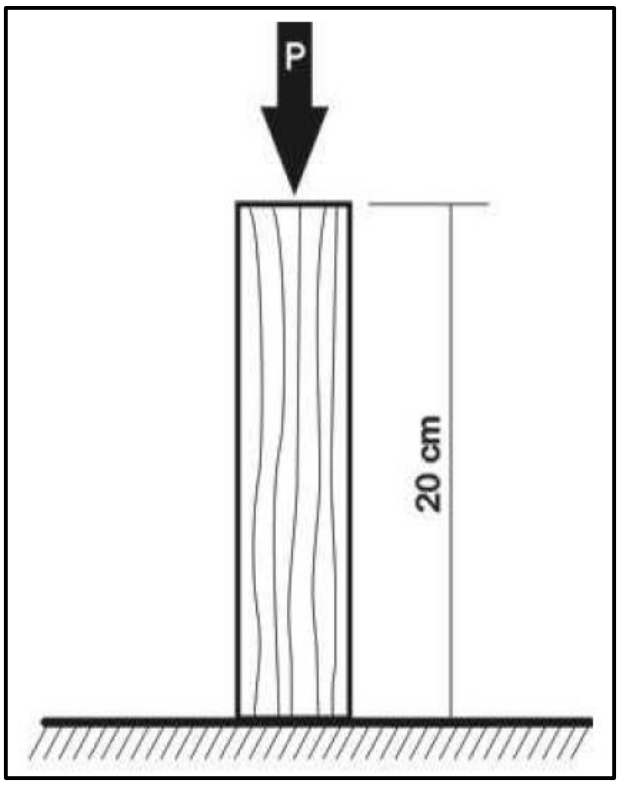


Figura 1.7 Probeta de compresión paralelo a las fibras

Fuente: (Spavento, Keil & Monteoliva, 2008)

- **Resistencia dinámica**

Flexión dinámica o tenacidad: es la capacidad que tiene la madera de absorber energía al aplicarse una carga que actúa en forma instantánea sobre ella. Dicha carga tiene una energía formado por su peso y ángulo de caída. Para comparar la resistencia de distintas maderas, se determina la energía absorbida, es decir, la energía necesaria para producir la rotura de la muestra (Spavento, Keil & Monteoliva, 2008).

- **Dureza y desgaste**

Dureza Janka: La dureza determina la resistencia que ofrece la madera a la penetración de cuerpos de mayor rigidez. Para la realización de este ensayo se utiliza una prensa universal a la cual se le conecta un dispositivo con una esfera de acero de 1.13 cm de diámetro. La esfera se introduce hasta la mitad de su diámetro en cada una de las seis caras de la probeta. Este trabajo se lo realiza en dirección a las fibras en cuatro caras de la probeta y las otras restantes en dirección paralela (Spavento, Keil & Monteoliva, 2008).

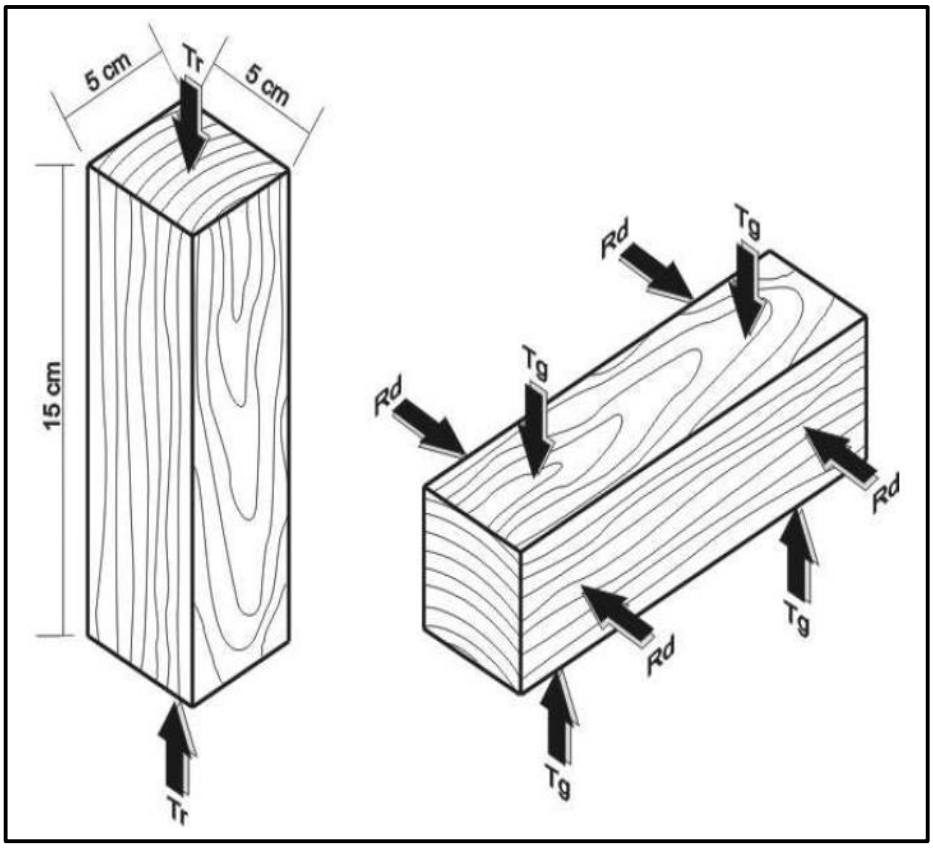


Figura 1.8 Probeta para la determinación de la dureza de Janka
Fuente: (Spavento, Keil & Monteoliva, 2008)

1.3.3 Resistencia a la Flexión de las maderas

La Resistencia a la Flexión se produce en cuerpos de gran longitud en relación a las dimensiones de su sección transversal, cuando estos son sometidos a la acción de cargas transversales o normales de su eje longitudinal, el cual tienden a producir arqueo al elemento, como ejemplo se tienen las vigas (Díaz, 2005).

Las vigas son barras rectas y largas que tienen secciones transversales generalmente constantes, estas se clasifican según el modo en que estén soportadas, por ejemplo (Hibberler, 2006):

Una viga simplemente apoyada esta soportada por un pasador en un extremo y por un rodillo en el otro:

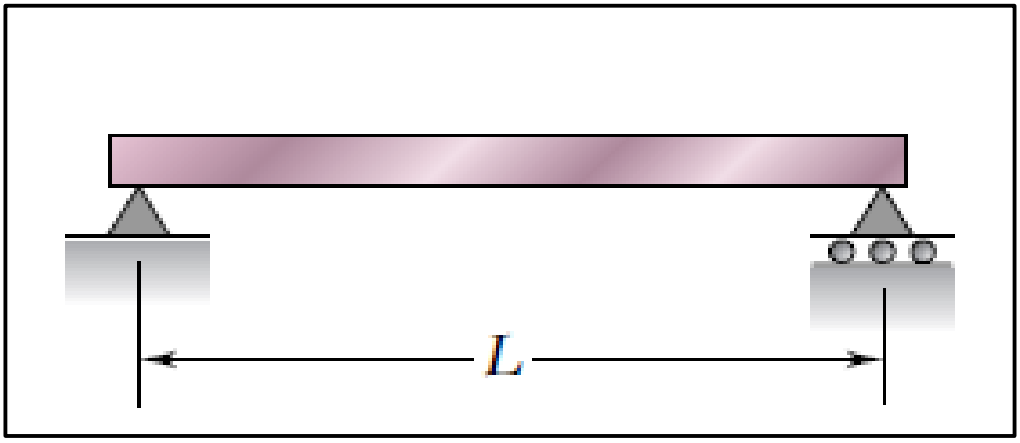


Figura 1.9 Viga simplemente apoyada
Fuente: (Beer & Johnston, 2009)

Una viga en voladizo empotrada en un extremo y libre en el otro:

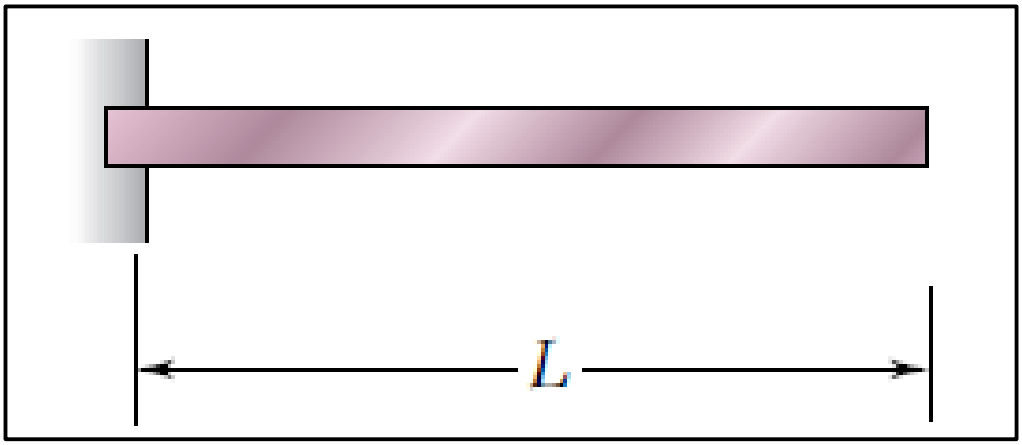


Figura 1.10 Viga en voladizo
Fuente: (Beer & Johnston, 2009)

Por último, una viga mixta con un tramo simplemente apoyado y otro en voladizo:

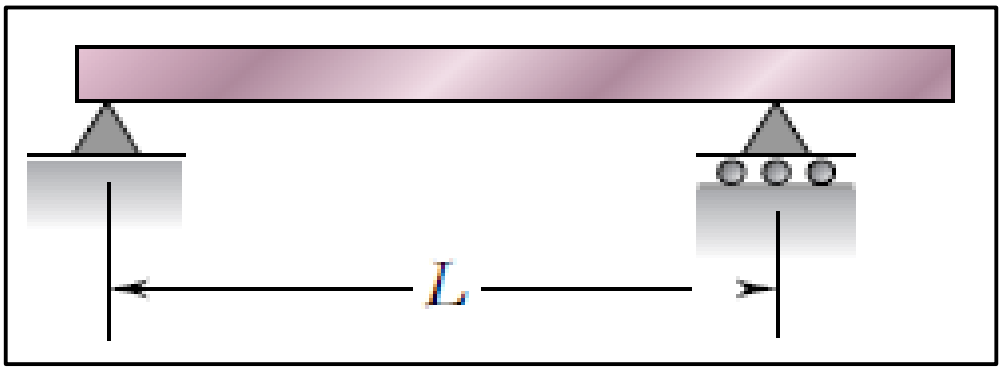


Figura 1.11 Viga con voladizo

Fuente: (Beer & Johnston, 2009)

1.3.3.1 Ecuación para determinar el esfuerzo en el ensayo de flexión a realizar

Los esfuerzos de flexión, se analizan en una viga que está formada por fibras longitudinales. Cuando se flexiona la viga, las fibras de la parte superior se comprimen, mientras que las de la parte inferior se alargan. En este caso hay una superficie donde se verifica la transición entre compresión y tensión. Dicha superficie se la denomina eje neutro, se localiza en el centro de la gravedad de la sección transversal en el que sufre un esfuerzo nulo.

En la figura 1.13 se puede observar un diagrama de cuerpo libre que muestra como las fuerzas se distribuyen en las fibras de la madera (Fitzgerald, 1996).

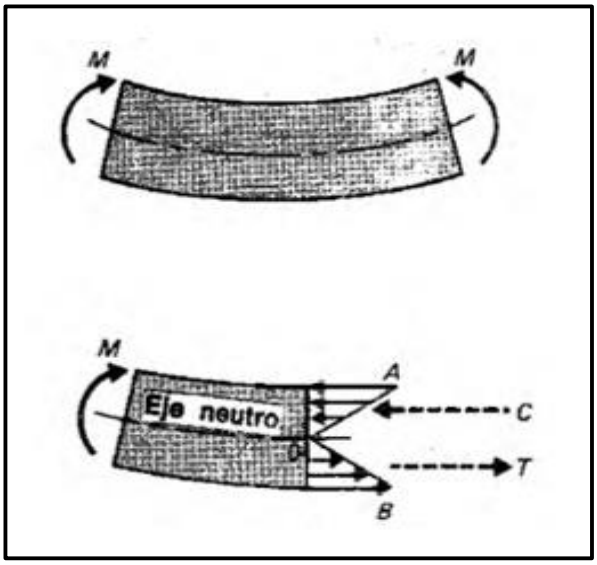


Figura 1.12 Diagrama de distribución de fuerzas en las fibras de la viga

Fuente: (Fitzgerald, 1996)

Así mismo, debido a las cargas aplicadas las vigas desarrollan una fuerza cortante (V) y un momento flexionante (M) internos que varían a lo largo de la viga. Esas funciones pueden trazarse por medio de gráficas llamadas diagramas de cortante y momento, el cual puede obtenerse información sobre la variación y valores máximos de la fuerza cortante y momento flexionante a lo largo de la viga (Hibberler, 2006).

A continuación, se muestra y analiza el diagrama de fuerza cortante y momento aplicado una carga en el punto medio (C) de la sección de la viga simplemente apoyada:

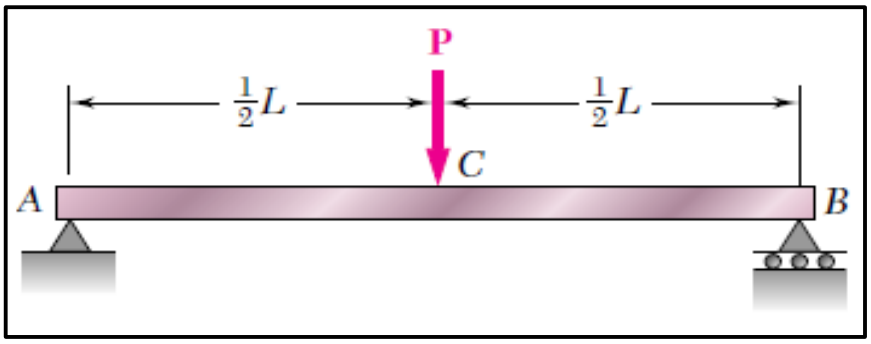


Figura 1.13 Viga simplemente apoyada sometida a una carga en su centro

Fuente: (Beer & Johnston, 2009)

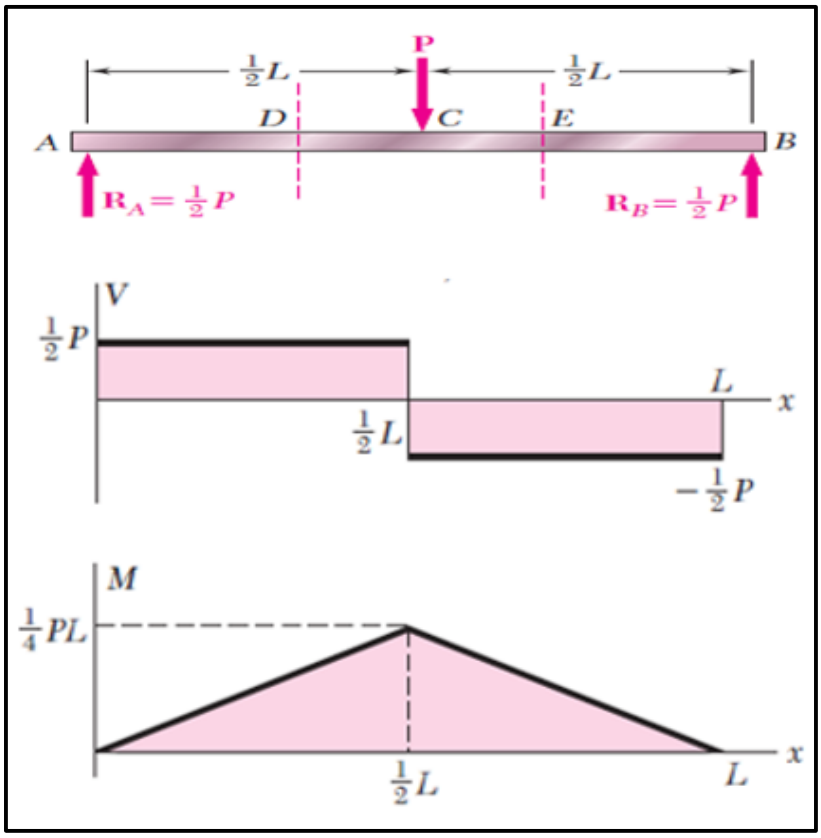


Figura 1.14 Análisis de diagrama esfuerzo cortante y momento flector

Fuente: (Beer & Johnston, 2009)

Para partir con la deducción de la fórmula de flexión se considera la fórmula de esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$\tau = \frac{P/2}{A}$$

Donde:

τ: Esfuerzo cortante que deberá ser menor al esfuerzo permisible (MPa).
P: Carga aplicada (N).
A: Sección de la viga (mm^2).
V: Fuerza Cortante (N).

Para el esfuerzo normal de flexión (σ_{max}), es decir la tensión máxima en flexión que soporta un material antes que se produzca la falla se determina con la siguiente fórmula (Fitzgerald, 1996):

$$\sigma_f = \frac{Mf_{max} * c}{I}$$

Donde:

$\sigma_{f:}$ Esfuerzo normal máximo (MPa).
$Mf_{máx}$: Momento flector máximo (N. m)
c: Distancia de la fibra más alejada al eje neutro (m).
I: Momento de Inercia de la sección transversal respecto al eje neutro (m^4).

La fórmula anterior se puede usar para determinar los esfuerzos máximos en las fibras de vigas en los cuales se conocen M, c e I, estos se pueden determinar a partir de las cargas dadas y dimensiones (Fitzgerald, 1996).

Basada en la anterior fórmula y analizando el diagrama de esfuerzo y momento se deduce la fórmula de flexión (Fitzgerald, 1996):

$$\sigma_f = \frac{Mf_{max}}{W}$$

Si se trata de sección transversal cuadrada de lado "a", el módulo de sección será igual a $W = \frac{I}{C} = \frac{a^4}{12} x \frac{2}{a} = \frac{a^3}{6}$, dando como resultado la siguiente ecuación de flexión:

$$\sigma_f = \frac{P * L/4}{a^3/6}$$

Donde:

Para una sección cuando es de una viga dada, "a" es la altura menor de la sección transversal.

W: Módulo de sección o momento resistente (m^3).
W = I/c
L: Longitud de la viga (mm).
a: Dimensión de la sección cuadrada (mm).

Los límites permisibles para el cálculo de la resistencia a la flexión y otras propiedades del Eucalipto, Pino y Teca se muestran en las posteriores tablas:

- **Propiedades mecánicas del eucalipto**

Tabla 1.1 Principales propiedades físico-mecánicas del Eucalipto

Propiedades	**Media**	**Rango**	**Coeficiente de variación**	**Resultado**
Peso específico	0.75	0.42 – 1.07	11% a 20%	Medio
Dureza	6	3 – 10.1	22% a 28%	Medio - Alto
Contracción radial total (%)	7.5	2.9 – 11.6	13% a 30%	Alto
Contracción tangencial total (%)	13.8	6.9 - 20	8% a 27%	Alto
Módulo de elasticidad (GPa)	20.58	6.5 - 33	17% a 31%	Alto
Resistencia a la Compresión (MPa)	71	39 - 107	12% a 20%	Alto
Resistencia a la Flexión (MPa)	130	48 - 181	12% a 23%	Alto

Fuente: (Bermúdez, 2002)

- **Propiedades mecánicas del Pino**

Tabla 1.2 Propiedades mecánicas del Pino

Material	**Esfuerzo de fluencia σ*y***		**Esfuerzo último σ*u***	
	ksi	**MPa**	**ksi**	**MPa**
Madera (Flexión) Pino del sur	6 - 9	40 - 60	8 - 14	50 - 100
Madera (Compresión paralela a la veta) Pino del sur	4 - 8	30 - 50	6 - 10	40 - 70

Fuente: (Gere & Goodno, 2009)

- **Propiedades mecánicas de Teca**

Tabla 1.3 Propiedades mecánicas en condición verde y seca al 12% de contenido de humedad de Teca

Prueba	**Valor**
Peso específico básico	0.35
Flexion Módulo de ruptura (MPa)	76.7 - 99.1
Módulo de Elasticidad (GPa)	9.96 - 11.24
Compresión resistencia máxima (MPa)	34.6 - 49.1
Cortante esfuerzo máximo (MPa)	10.2 - 12.3

Fuente: (Castro & Raigosa, 2000)

1.3.4 Deflexión en vigas

La deflexión es el desplazamiento en dirección del eje “y” en cualquier punto de la viga, como resultado de una carga externa que se encuentra actuando sobre ella (Díaz, 2005).

La deformación máxima $\delta_{máx}$ ocurre en el punto C (figura 1.16) donde la curva de la deflexión tiene una tangente horizontal (Gere & Goodno, 2009).

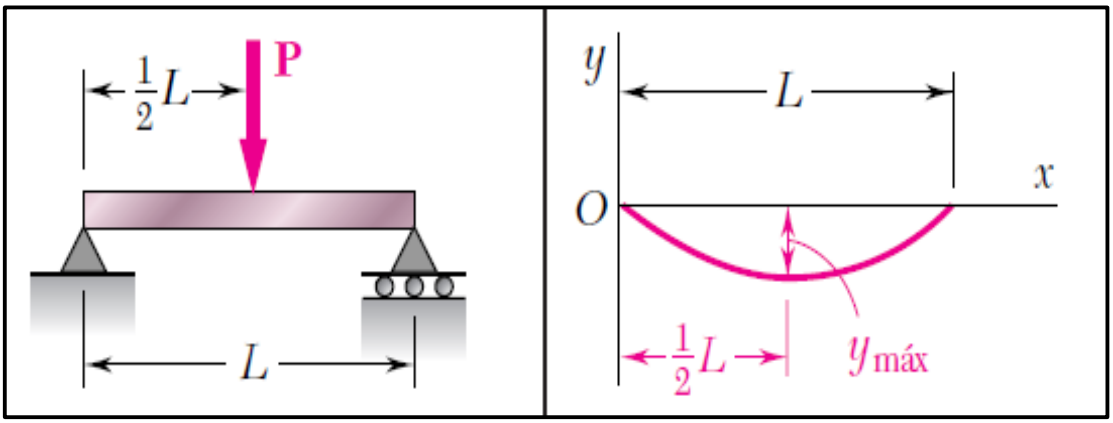


Figura 1.15 Deflexión en el centro de la viga

Fuente: (Beer & Johnston, 2009)

Como caso especial de una carga aplicada en el centro de la viga la ecuación a utilizar es la siguiente (Gere & Goodno, 2009):

$$\delta_{máx} = -\frac{P * L^3}{48 * E * I}$$

Donde:

$\delta_{máx}$: Deflexión máxima (mm).

P: Carga puntual (N).

I: Momento de Inercia (m^4).

E: Módulo de Elasticidad (GPa).

L: Longitud de la viga (mm).

Pero cuando la carga es aplica a un extremo de una viga la deflexión máxima se calcula de la siguiente manera:

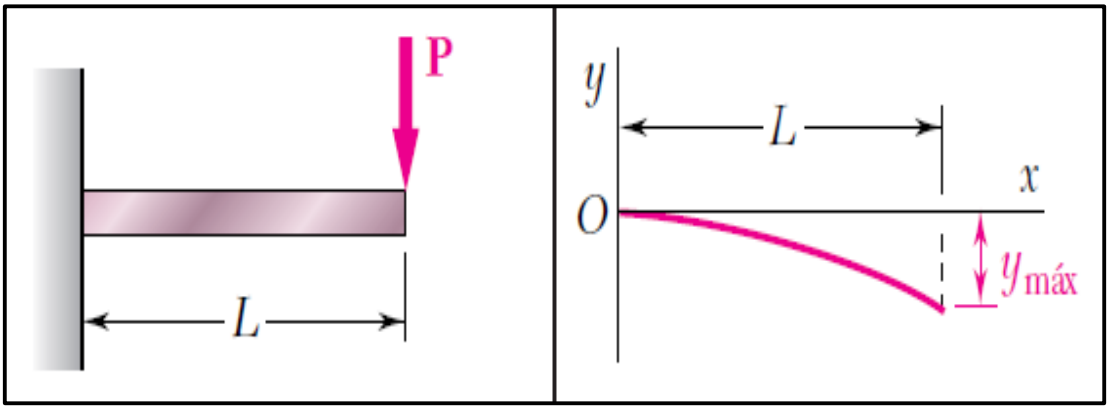


Figura 1.16 Deflexión en el extremo de la viga

Fuente: (Beer & Johnston, 2009)

Fórmula para deflexión máxima (Gere & Goodno, 2009):

$$\delta_{máx} = -\frac{P * L^3}{3 * E * I}$$

En la tabla 1.4 se muestra el Módulo de elasticidad (E) y las Relaciones de Poisson (ν) de varios materiales, útiles para el cálculo de la deflexión teórica con las fórmulas antes mencionadas:

Tabla 1.4 Módulo de elasticidad (E) y Relaciones de Poisson (*v*)

Material	**Módulo de elasticidad E**		**Módulo de elasticidad G**		**Relación de Poisson (v)**
	ksi	**GPa**	**ksi**	**GPa**	
Acero	28000-30000	190-210	10800-11800	75-80	0.27-0.30
Aleaciones de aluminio	10000-1400	70-79	3800-4300	26-30	0.33
2014-T6	10600	73	4000	28	0.33
6061-T6	10000	70	3800	26	0.33
7075-T6	10400	72	3900	27	0.33
Aleaciones de magnesio	15000-17000	100-120	5600-6400	39-44	0.33
Aleaciones de titanio	6000-6500	41-45	2200-2400	15-17	0.35
Bronce	14000-17000	96-120	5200-6300	36-44	0.34
Concreto (compresión)	2500-4500	17-31			0.1-0.2
Cobre y aleaciones de cobre	16000-18000	110-120	5800-6800	40-47	0.33-0.36
Caucho	0.1-0.6	0.0007-0.004	0.03-0.2	0.0002-0.001	0.45-0.50
Fundición gris	12000-25000	83-170	4600-10000	32-69	0.2-0.3
Latón	14000-16000	96-110	5200-6000	36-41	0.34
Madera (Flexión)					
Abeto Douglas	1600-1900	11- 13			
Roble	1600-1800	11- 12			
Pino del sur	1600-2000	11- 14			
Monel (67% Ni, 30% Cu)	25000	170	9500	66	0.32
Níquel	30000	210	11400	80	0.31
Plástico					
Nailon	300-500	2.1-3.4			0.4
Polietileno	100-200	0.7-1.4			0.4
Roca (compresión)					
Granito, mármol, cuarzo	6000-14000	40-100			0.2-0.3
Caliza, arenisca	3000-10000	20-70			0.2-0.3
Tungsteno	50000-55000	340-380	21000-23000	140-160	0.2
Vidrio	7000-12000	48-83	2700-5100	19-35	0.17-0.27

Fuente: (Gere & Goodno, 2009)

El diagrama esfuerzo-deformación nos indica la relación que existe entre los incrementos de carga o esfuerzo que se ve sometido un cuerpo (eje de las ordenadas) y sus correspondientes aumentos de deformación (eje de las abscisas).

La línea resultante está formada por una recta hasta el límite elástico del material ensayo, al seguir aumentando la carga se obtiene la ruptura del material (Díaz, 2005).

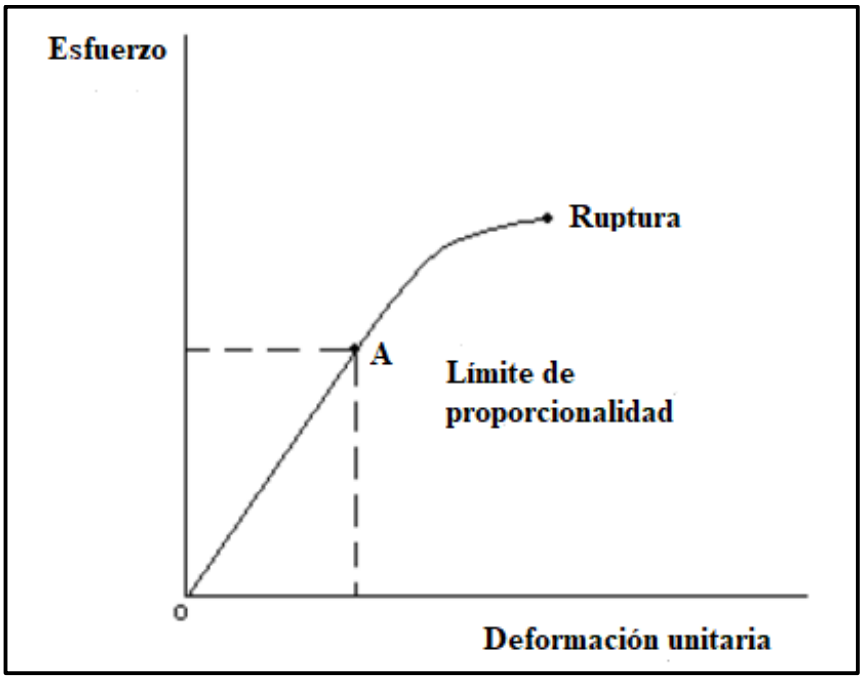


Figura 1.17 Diagrama esfuerzo-deformación
Fuente: (Díaz, 2005)

Cuando un cuerpo es aplastado o es cargado este llega hasta un límite llamado límite de proporcionalidad, hasta este punto el cuerpo puede recuperar su estado original, cuando la carga es suprimida, esta zona es denominada con el nombre de zona elástica (Díaz, 2005).

1.4 Humedad

La humedad en la madera se entiende por la masa de agua contenida en una pieza de madera, expresada como porcentaje de masa de la pieza anhidra. El peso anhidro es el peso que se obtiene cuando se coloca la madera en una estufa de 100 a 120° (Díaz, 2005).

La madera recién cortada contiene del 50 al 110% de agua, proporción que se reduce a valores del orden del 16-18%, por secado del ambiente. Algunas maderas sumergidas durante mucho tiempo, pueden alcanzar del 100 al 200% del contenido de humedad (Gómez de la Pena, 2017).

La resistencia y el módulo de elasticidad de la madera disminuyen cuando al contenido de humedad aumenta y viceversa.

Existen tres métodos para determinar la humedad:

Método gravimétrico o de pesada: Es el más exacto, consiste en pesar un trozo de madera a un contenido de humedad (CH), para posteriormente someterla a temperaturas de 103 +/- 2 °C, hasta obtener un peso constante (Díaz, 2005).

Figura 1.18 Determinación de humedad por el método gravimétrico

Según Teles & Nájera, el contenido de humedad en la madera se puede determinar mediante la siguiente fórmula:

$$CH = \left(\frac{Ph - Po}{Po}\right) * (100)$$

Donde:

CH: Contenido de humedad (%).
Ph: Peso de la madera húmeda (g).
Po: Peso anhidro de la madera (g).

Método de destilación: Se aplica a maderas con cualquier contenido de humedad, consiste en remover el agua de la madera mediante un solvente y su recolección por condensación en una trampa de agua, que permite medir su volumen (Díaz, 2005).

Medidores eléctricos: Las propiedades eléctricas de la madera más importantes son su resistencia al paso de una corriente eléctrica y sus características como material dieléctrico. Estos medidores eléctricos tienen la ventaja de que las lecturas del contenido de humedad son inmediatas; pero presentan ciertas limitantes, principalmente el rango de confiabilidad (6 a 25% CH), se debe corregir la lectura según especie, temperatura y dirección del grano en la madera (Córdova, 2005).

Figura 1.19 Determinación de humedad por el método eléctrico
Fuente: (Córdova, 2005)

1.5 Influencia de la humedad

La humedad en la madera es un factor importante debido a que influye en el aserrado, cepillado, encolado, barnizado, etc. Además, determina su durabilidad, resistencia, peso y sobre todo en sus dimensiones (Vignote & Martínez, 2006).

Los cambios en sus dimensiones se dan debido a que las maderas se hinchan o contraen de acuerdo con la ganancia o pérdida de humedad, y son expresados como un porcentaje del cambio dimensional respecto a la dimensión original (Córdova, 2005).

En la siguiente tabla se muestra los porcentajes del cambio de las dimensiones en cuatro tipos de maderas, según direcciones, especies y porcentajes de humedad (20% y 12%).

Tabla 1.5 Cambios de dimensiones de las maderas según la humedad

Dirección	**CH = 12%**				**CH = 20%**			
	Caoba	Ayous	Pino	Haya	Caoba	Ayous	Pino	Haya
Tangencial	0.7	0.80	0.9	1.7	2.2	2.4	2.8	5.0
Radial	0.4	0.4	0.50	0.9	1.4	1.4	1.6	2.6
Axial	0.04	0.05	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4

Fuente: (Vignote & Martínez, 1995)

CAPÍTULO II

DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se detallan los tipos y cantidades de maderas, las diferentes características, los pasos para la obtención de las probetas, además se define el proceso y los equipos que se utilizaron para la determinación de la Resistencia a la Flexión con el objetivo de verificar los resultados de cada madera bajo distintas condiciones de humedad.

2.1 Descripción de muestras

La madera en fortificación es importante en minería subterránea porque ayuda a la estabilidad de las estructuras de los túneles y a la disminución de accidentes laborales. A medida que transcurre el tiempo este tipo de material se ve afectado en sus diferentes propiedades físicas y mecánicas por varios factores, es por eso que nos hemos enfocado en determinar una de esas propiedades como lo es la Resistencia a la Flexión y a la cuantificación de la deflexión, que consiste en la aplicación de fuerzas externas perpendiculares a las fibras de la madera.

La caracterización del diseño de las muestras para este ensayo se realizó en probetas de forma rectangular de 25 cm de largo, 5 cm de ancho y 5cm espesor, con el corte paralelo a las fibras. En total se utilizaron 21 probetas de tres tipos de maderas más utilizadas en el ámbito de fortificación en nuestro medio, tales como Eucalipto, Pino y Teca. Esas fueron divididas en 7 grupos para los respectivos análisis en distintos tiempos de inmersión y contenido de humedad; comparando las muestras en estado natural con su respectiva humedad.

2.1.1 Caracterización de muestras

Para sintetizar mejor cada muestra se estableció las características de pesos iniciales en estado natural, pesos finales dependiendo del tiempo de sumergimiento, dimensiones, volumen, densidad y el porcentaje de humedad.

A continuación, se definen las características de los tres tipos maderas divididas en siete grupos utilizadas para cada ensayo.

2.1.1.1 Muestras en estado natural para determinar la Resistencia a la Flexión

Tabla 2.1 Características de Eucalipto, Pino y teca en estado natural

Características		Tipo de madera			Unidades
		ENF	PNF	TNF	
Peso inicial		0.612	0.276	0.406	Kg
Peso final		-	-	-	-
Dimensiones	Alto	25	25	25.1	cm
	Ancho	5	5	5	cm
	Espesor	5	5	5	cm
Volumen		625	625	627.5	cm^3
Densidad inicial		979.2	441.6	647.01	Kg/m^3
Densidad final		-	-	-	-
Tiempo sumergido		-			-
Contenido de humedad		-	-	-	-

2.1.1.2 Muestras sumergidas en agua por 1 semana para determinar la Resistencia a la Flexión

Tabla 2.2 Características de Eucalipto, Pino y Teca, tiempo de inmersión 1 semana

Características		Tipo de madera			Unidades
		E1F	P1F	T1F	
Peso inicial		0.689	0.338	0.356	Kg
Peso final		0.741	0.462	0.449	Kg
Dimensiones	Alto	25.1	25.1	25.1	cm
	Ancho	5.1	5	5	cm
	Espesor	5.1	5.1	5.1	cm
Volumen		652.85	640.05	640.05	cm^3
Densidad inicial		1055.37	528.08	556.21	Kg/m^3
Densidad final		1135.02	721.82	701.51	Kg/m^3
Tiempo sumergido		7			días
Contenido de humedad		7.55	36.69	26.12	%

2.1.1.3 Muestras sumergidas en agua por 2 semanas para determinar la Resistencia a la Flexión

Tabla 2.3 Características de Eucalipto, Pino y Teca, tiempo de inmersión 2 semanas

Características		**Tipo de madera**			**Unidades**
		E2F	**P2F**	**T2F**	
Peso inicial		0.599	0.333	0.376	Kg
Peso final		0.687	0.550	0.476	Kg
Dimensiones	Alto	25.1	25.1	25	cm
	Ancho	5	4.9	4.9	cm
	Espesor	5	4.9	5	cm
Volumen		627.50	602.65	612.50	cm^3
Densidad inicial		954.58	552.56	613.88	Kg/m^3
Densidad final		1094.82	912.64	777.14	Kg/m^3
Tiempos sumergido		14			días
Contenido de humedad		14.69	65.17	26.60	%

2.1.1.4 Muestras sumergidas en agua por 4 semanas para determinar la Resistencia a la Flexión

Tabla 2.4 Características de Eucalipto, Pino y Teca, tiempo de inmersión 4 semanas

Características		**Tipo de madera**			**Unidades**
		E4F	**P4F**	**T4F**	
Peso inicial		0.653	0.309	0.339	Kg
Peso final		0.757	0.518	0.513	Kg
Dimensiones	Alto	25	25.1	25.1	cm
	Ancho	5	5	4.9	cm
	Espesor	5	4.9	4.9	cm
Volumen		625	614.95	602.65	cm^3
Densidad inicial		1044.8	502.48	562.52	Kg/m^3
Densidad final		1211.2	842.34	851.24	Kg/m^3
Tiempo sumergido		28			días
Contenido de humedad		15.93	67.64	51.33	%

2.1.1.5 Muestras sumergidas en agua por 8 semanas para determinar la Resistencia a la Flexión

Tabla 2.5 Características de Eucalipto, Pino y Teca, tiempo de inmersión 8 semanas

Características		**Tipo de madera**			**Unidades**
		E8F	**P8F**	**T8F**	
Peso inicial		0.687	0.300	0.379	Kg
Peso final		0.846	0.509	0.539	Kg
Dimensiones	alto	25.1	25.1	25.1	cm
	ancho	5	5	5	cm
	espesor	4.9	5	5	cm
Volumen		614.95	627.5	627.5	cm^3
Densidad inicial		1117.16	478.09	603.98	Kg/m^3
Densidad final		1375.72	811.16	858.96	Kg/m^3
Tiempo sumergido		56			días
Contenido de humedad		23.14	69.67	42.22	%

2.1.1.6 Muestras sumergidas en agua por 12 semanas para determinar la Resistencia a la Flexión

Tabla 2.6 Características de Eucalipto, Pino y Teca, tiempo de inmersión 12 semanas

Características		**Tipo de madera**			**Unidades**
		E12F	**P12F**	**T12F**	
Peso inicial		0.626	0.305	0.373	Kg
Peso final		0.796	0.550	0.551	Kg
Dimensiones	Alto	25.1	25.1	24.9	cm
	Ancho	5	5	5	cm
	Espesor	5	5	5	cm
Volumen		627.5	627.5	622.5	cm^3
Densidad inicial		997.61	486.06	599.19	Kg/m^3
Densidad final		1268.53	876.49	885.14	Kg/m^3
Tiempo sumergido		84			días
Contenido de humedad		27.16	80.33	47.72	%

2.1.1.7 Muestras para determinar el contenido de humedad natural

Tabla 2.7 Características de Eucalipto, Pino y Teca para determinar la humedad natural

Características		**Tipo de madera**			**Unidades**
		EN	**PN**	**TN**	
Peso inicial		0.667	0.309	0.376	Kg
Peso final		0.651	0.286	0.360	Kg
Dimensiones	Alto	25.1	25.1	25.1	cm
	Ancho	5.1	5.1	5.1	cm
	Espesor	5.1	5.1	5.1	cm
Volumen		652.85	652.85	652.85	cm^3
Densidad inicial		1021.67	473.31	575.94	Kg/m^3
Densidad final		997.17	438.08	551.43	Kg/m^3
Tiempo sumergido		-			-
Contenido de humedad		2.46	8.04	4.44	%

2.2 Descripción de métodos de experimentación

El ensayo de la Resistencia a la Flexión en vigas de madera y en otros materiales, consiste en la aplicación de una fuerza en el punto medio de los apoyos, incrementándose hasta que el material se fracture o soporte la carga máxima; en el caso de la madera esa fuerza se aplica perpendicular a las fibras.

2.2.1 Equipos para medir los ensayos de resistencia

Los equipos que se utilizaron en los diferentes ensayos de flexión fueron dos y cumplen con las siguientes características:

- **Prensa Electro Hidráulica de Humboldt**

Especificaciones técnicas:

Modelo: HCM-2500-DIR
Serie número: 100311H
Motor: Eléctrico
Capacidad de carga: 250000 lb (1112kN)

La Prensa Hidráulica está comprendida de una estructura rígida en la parte superior para desplazar la carga; su base esta libre para colocar bloques de acero y ganar altura según las dimensiones del material a fracturar, así mismo cuenta con un marcador digital que indica la carga a la que se someten las probetas y un controlador de velocidad. Todas estas características hacen que este equipo sea ideal para las pruebas de Flexión a pesar de ser un equipo para romper cilindros de hormigón.

Se encuentra disponible en los laboratorios de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencia y Tecnología en la Universidad del Azuay.

Figura 2.1 Prensa Hidráulica de Humboldt

- **Utillaje de acero**

En los ensayos de Resistencia a la Flexión para que las fuerzas actúen y se distribuyan en un solo punto se vio necesario fabricar un utillaje de acero (figura 2.2) comprendido de dos apoyos cilíndricos fijos; ubicados a 2.5 cm de cada extremo de las probetas y de un rodillo móvil; colocado en el punto medio de la viga.

Figura 2.2 Utillaje construido de acero

Las medidas del utillaje se muestran en las siguientes figuras:

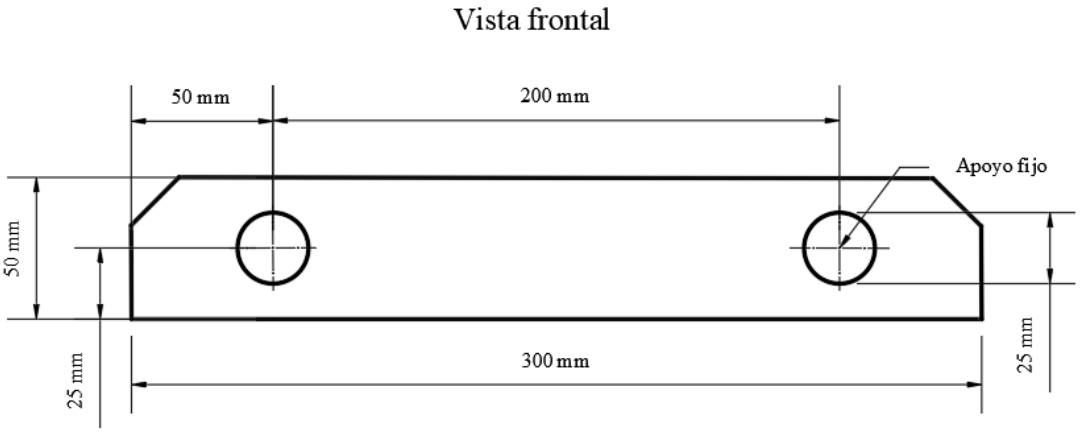


Figura 2.3 Medidas del utillaje vista frontal

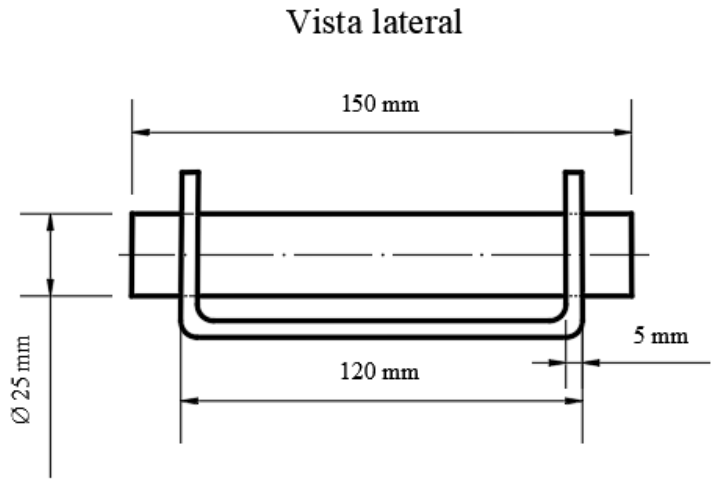


Figura 2.4 Medidas del utillaje vista lateral

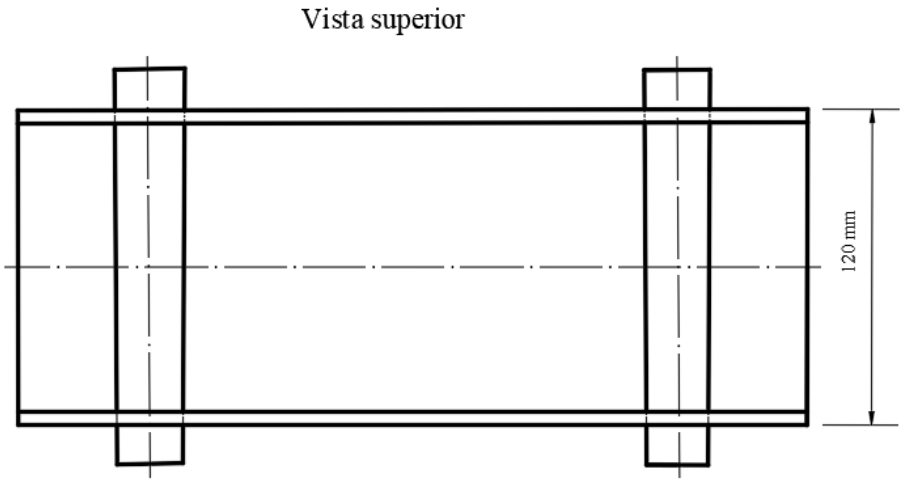


Figura 2.5 Medidas del utillaje vista superior

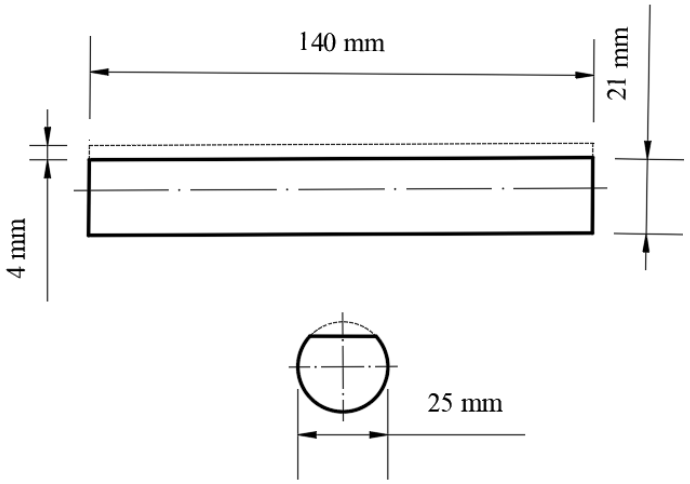


Figura 2.6 Medidas del rodillo

- **Sistemas de medición para deflexión:**

En cuanto a la determinación de la deflexión de vigas se basa en el análisis del desplazamiento de una viga antes de romperse luego de ser sometido a una carga.

Para efectuar la medición de la deflexión se utilizó una base magnética, la misma que se fijó en la estructura exterior de la Prensa Electro Hidráulica de Humboldt y se acopló con un micrómetro hasta el rodillo móvil; la unidad de medida del desplazamiento respecto al eje “y” de las probetas fue en centésimas de milímetros (0.001 mm).

Estos instrumentos están disponibles en los laboratorios de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencia y Tecnología de Universidad del Azuay.

Figura 2.7 Base metálica y Micrómetro

2.2.2 Ejecución experimental en las muestras

Para ejecutar los ensayos se investigó de trabajos anteriores los tres tipos de maderas más utilizadas en fortificaciones mineras subterráneas, dando como resultado el Eucalipto, Pino y Teca (Rivera, 2018).

Una vez obtenidas las maderas se estableció que las dimensiones de las probetas serían de 25 cm de largo, de 5 cm de ancho y 5 cm de espesor para las 21 probetas, 7 de cada especie.

- **Denominación de las probetas de diferentes especies:**

Después de definir la sección se determinaron los tiempos de inmersión en agua. Así mismo, se procedió a designarlos con los siguientes códigos:

Por ejemplo, según la tabla 2.8 la primera muestra de Eucalipto se denominó ENF que significa Eucalipto en estado natural para ensayos de flexión, la segunda muestra E1F que significa Eucalipto sumergido en agua durante 1 semana para ensayos de flexión, así mismo para las muestras E2F, E4F, E8F y E12F tienen el mismo significado anterior con la diferencia de inmersión en agua durante 2, 4, 8 y 12 semanas respectivamente. Por último, la muestra EN significa Eucalipto en estado natural, que fue secada y sirve como referente para sacar el contenido de humedad en las otras por el método de la pesada.

Las otras probetas de distinta especie se denominaron similar a las anteriores con la diferencia de que estas se las anteponen las letras P(pino) y T(Teca), para un mejor detalle y entendimiento se muestran en las tablas 2.9 y 2.10.

Tabla 2.8 Denominación de las probetas de Eucalipto

Tipo de madera	Denominación	
Eucalipto	ENF	
	E1F	
	E2F	
	E4F	
	E8F	
	E12F	
	EN	

Tabla 2.9 Denominación de las probetas de Pino

Tipo de madera	Denominación	
Pino	ENF	
	P1F	
	P2F	
	P4F	
	P8F	
	P12F	
	PN	

Tabla 2.10 Denominación de las probetas de Teca

Tipo de madera	Denominación	
Teca	TNF	
	T1F	
	T2F	
	T4F	
	T8F	
	T12F	
	TN	

Después de etiquetar las probetas, de acuerdo a los 7 grupos formados para los análisis, en una balanza digital se pesaron y se tomaron las dimensiones en estado natural; algunas de las probetas tuvieron variaciones de 1 mm en relación a la sección establecida.

- **Determinación de la máquina de ensayos de Resistencia:**

Antes de iniciar con los ensayos finales de las maderas se realizaron pruebas preliminares con otras probetas en dos máquinas para saber cuál es la más idónea.

Inicialmente se colocaron muestras en la Prensa para ensayos CBR de Humboldt (Figura 2.8), en la cual se obtuvo inconvenientes para fijar el módulo de medición de la deflexión; en vista que este equipo no resultó ser el adecuado, se optó por hacer otras pruebas en la Prensa Electro Hidráulica de Humboldt (figura 2.9) usando los dos apoyos, el rodillo de acero y la base magnética añadida al micrómetro, en el que resultó tener buen contacto con la superficie de la prensa y del rodillo.

Figura 2.8 Pruebas en la Prensa para ensayos CBR de Humboldt

Figura 2.9 Pruebas en la Prensa Electro Hidráulica de Humboldt

- **Descripción del ensayo de flexión:**

Posterior a las pruebas realizadas para ejecutar los ensayos finales se tomaron las probetas del primer grupo ENF, PNF, y TNF, y se colocaron en la Prensa Hidráulica de Humboldt para las pruebas de Resistencia a la Flexión en estado natural.

Las probetas del grupo E1F, P1F, y T1F se sumergieron en agua durante 7 días, después se pesaron y se hicieron las pruebas de Resistencia a la Flexión.

Para las otras probetas de los siguientes 4 grupos se consideró el procedimiento antes mencionado con la diferencia de hundimiento en agua durante 14, 28, 56 y 84 días.

El último grupo de maderas EN, PN y TN se utilizaron para calcular el porcentaje de humedad en estado natural, es decir, sin sumergimiento en agua, se dejaron en el horno a una temperatura de variable de 50 a 100^{o}C, durante unos días hasta que su peso llegue a ser constante.

Al finalizar con los ensayos se procedió a calcular el esfuerzo de flexión máximo, corrección de la deflexión, módulo de elasticidad, y el contenido de humedad en estado natural y la comparación de los resultados según el tiempo de inmersión en agua; todo este procedimiento se obtuvo con las fórmulas establecidas para cada parámetro.

Hay que recalcar que después de la determinación de la deflexión se necesitó de la corrección de todos los datos en cada probeta, debido al aplastamiento ocurrido por la aplicación de la carga puntual en los apoyos y en el rodillo móvil (figura 2.10). La variación y corrección de los datos se muestran en la sección de anexos.

Figura 2.10 Muestra E12P en su máxima deflexión

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este último capítulo se realiza la presentación de cuadros con los resultados de las pruebas, su análisis e interpretación, a fin de verificar la incidencia de la humedad de la madera en su Resistencia a la Flexión, determinando los esfuerzos máximos y el módulo de elasticidad; alcanzado en las especies de maderas más utilizadas en fortificación minera de nuestro medio.

Luego de haber concluido con las pruebas de flexión se presentan los resultados y análisis de los ensayos realizados del Eucalipto, Pino y Teca.

3.1 Análisis de resultados

Según los análisis realizados a partir de los resultados obtenidos, se determinó aquellas probetas que presentaron mayor Resistencia a la Flexión.

En este ensayo se observó que todas las muestras de madera al estar en sentido horizontal, simplemente apoyada y al aplicarse la carga puntual, sufrieron esfuerzos de compresión en las fibras superiores al eje neutro; llegando estas a compactarse. Así mismo, se dieron esfuerzos de tensión en las fibras inferiores al eje neutro; llegando a fallar por tensión produciéndose fracturas; al superar la resistencia máxima y debido a que el esfuerzo es crítico para las fibras sometidas a tensión.

Lógicamente el contenido de humedad también fue un factor influyente para el comportamiento a la prueba de flexión; debiéndose indicar que el porcentaje de agua aumentó a mayor tiempo de permanencia.

3.2 Interpretación de Resultados

Después de la realización de los ensayos se tabula los resultados, considerando las probetas por especie y con diferentes tiempos de inmersión; obteniéndose los siguientes resultados.

3.2.1 Resultados del Eucalipto

A continuación, en la tabla 3.1 se presentan los resultados de los esfuerzos máximos, deflexión máxima y el contenido de humedad de las probetas de Eucalipto.

Tabla 3.1 Resultados de esfuerzo, deflexión y humedad del Eucalipto

Denominación	σ (MPa)	Deflexión máxima (mm)	Contenido de humedad (%)
ENF	105.86	7.30	2.46
E1F	105.86	7.90	7.55
E2F	90.71	5.73	14.69
E4F	101.90	15.74	15.93
E8F	77.96	8.20	23.14
E12F	69.23	16.00	27.16

De las 6 probetas de Eucalipto, aquellas que más resistieron a una carga máxima fueron ENF y E1F, dando esfuerzos iguales de 105. 86 MPa. Observándose que los mejores esfuerzos de flexión se obtuvieron con menores porcentajes de humedad, 2.46% y 7.55% respectivamente.

La deflexión máxima obtenida en el Eucalipto, fue de 16 mm en E12F y menor de 5.73 mm en E2F; así mismo la tabla 3.1 nos muestra que a mayor humedad hay mayor flexibilidad, y viceversa. La diferencia de deformación de los resultados alcanzados de las probetas E2F y E8F, probablemente se debe a la heterogeneidad, que es natural en las maderas, debido a las diferentes direcciones de las fibras; en sentido radial.

Los resultados de los ensayos Resistencia a la Flexión del Eucalipto se encuentran dentro de los rangos consultados de 48 MPa – 181 MPa, los mismos se muestran en la tabla 1.1.

3.2.2 Resultados del Pino

En la tabla 3.2 se presentan los resultados de los esfuerzos máximos, deflexión máxima y contenido de humedad de las probetas del Pino.

Tabla 3.2 Resultados de esfuerzo, deflexión y humedad del Pino

Denominación	σ (MPa)	Deflexión máxima (mm)	Contenido de humedad (%)
PNF	30.79	3.8	8.04
P1F	33.19	10.74	36.69
P2F	30.18	10.03	65.17
P4F	32.93	4.5	67.64
P8F	29.99	13.52	69.67
P12F	27.76	10.4	80.33

En la especie del Pino, la mayor resistencia ocurre en las probetas P1F de 33.19 MPa y menor en P12F de 27.76 MPa; presentándose al igual que el Eucalipto los mejores resultados de esfuerzo con menores porcentajes de humedad.

La humedad aumenta a razón del tiempo de sumergimiento, dicho porcentaje fue menor en ENF de 8.04% en estado natural y mayor porcentaje en P12F de 80.33 %.

El desplazamiento máximo respecto al eje “y”, resultó en P8F de 13.52 mm y menor en PNF de 3.8 mm. La deflexión en esta especie es mayor mientras más humedad tengan las muestras.

La Resistencia a la Flexión para esta especie va de 27.76 MPa a 33.19 MPa, dichos valores no se encuentran dentro de los rangos consultados de 50 MPa – 100 MPa de la tabla 1.2; probablemente el Pino utilizado en el presente trabajo es de producción nacional, el cual puede ser de calidad inferior comparado con aquellas de otros países, además, se observa poco incremento en los esfuerzos al variar la humedad.

3.2.3 Resultados de Teca

En la siguiente tabla 3.3 se presentan los resultados de los esfuerzos máximos de flexión, deflexión máxima y contenido de humedad de las probetas del Teca.

Tabla 3.3 Resultados de esfuerzo, deflexión y humedad de Teca

Denominación	σ (MPa)	Deflexión máxima (mm)	Contenido de humedad (%)
TNF	49.42	2.89	4.44
T1F	42.58	9.7	26.12
T2F	53.45	11.06	26.60
T4F	43.75	11.7	51.33
T8F	55.37	10.3	42.22
T12F	46.93	6	47.72

Se debe aclarar que se observa comportamientos atípicos en las muestras T8F y T12F; en lo referente al porcentaje de humedad, mismo que cae con mayor tiempo de inmersión en agua, por lo que se deduce que, aunque se encargó que las muestras sean del mismo tronco; en realidad es posible que estas dos muestras correspondan a otro espécimen, razón por la que, aunque se trate de manera Teca, provienen de otro árbol más compacto, lo cual ratifica el comportamiento de la madera.

Las probetas de Teca con mayor Resistencia a la Flexión, resultó en T8F de 55.37 MPa y menor en T1F de 42.58 MPa.

La humedad de Teca aumenta mientras más tiempo de inmersión en agua se sometieron a las probetas, las muestras de menor porcentaje de humedad se dan en TNF de 4.44 % y mayor en T4F de 51.33%, lo cual nos hace predecir que estas dos probetas si provienen del mismo tronco.

La deflexión en esta especie es mayor en T4F de 11.7 mm y menor en TNF de 2.89 mm, dicha deformación también es mayor cuando el contenido de humedad es más alto. Las muestras T8F y T12F presentan variaciones en el desplazamiento, debido a sus características de heterogeneidad del comportamiento de la madera y probablemente estas pertenecen a otro espécimen.

La Resistencia a la Flexión de la Teca obtenidos en este trabajo no se encuentra dentro de los rangos consultados de 76.9 MPa y 99.1 MPa de la tabla 1.3. Esta especie es de menor calidad comparando con ensayos realizados en otros países.

3.2.4 Resultados de módulo de elasticidad respecto a la humedad

Para proceder al cálculo del módulo de elasticidad de cada especie de madera fue necesario hacer el análisis y la utilización de la fórmula de deflexión para vigas, donde la carga puntual es aplicada en el centro, dicha fórmula es la siguiente:

$$\delta_{máx} = -\frac{P * L^3}{48 * E * I}$$

Despejando el módulo de elasticidad (***E***) nos queda lo siguiente:

$$E = -\frac{P * L^3}{48 * \delta_{máx} * I}$$

Datos requeridos:

P: Carga puntual aplicada en cada probeta (N).

L: Longitud de la viga 200 mm, distancia entre apoyos.

δmáx: Deflexión real obtenida en cada probeta (mm).

I: Momento de Inercia $5.2x10^5$ mm^4.

La deflexión real y la carga puntual empleadas para este estudio se encuentran en las fichas establecidas en la sección de anexos.

El módulo de elasticidad determinado para cada ensayo de las maderas de Eucalipto, Pino y Teca se presentan en la tabla 3.4, tabla 3.5 y tabla 3.6.

3.2.4.1 Eucalipto

En la tabla 3.4 el módulo de elasticidad del Eucalipto disminuye cuando las probetas tienen mayor contenido de humedad, siendo ENF de 15.67 GPa y E12F de 5.22 GPa con humedad de 2.46% y 27.16% respectivamente.

Tabla 3.4 Módulo de elasticidad y humedad del Eucalipto

Denominación	Módulo de Elasticidad *E* (GPa)	Contenido de humedad (%)
ENF	15.67	2.46
E1F	19.74	7.55
E2F	5.91	14.69
E4F	9.23	15.93
E8F	6.70	23.14
E12F	5.22	27.16

El promedio de *"**E**"* para esta especie es de 10.41 GPa, el cual se hace un análisis comparativo con el módulo de elasticidad consultado en la tabla 1.1, deduciendo que el Eucalipto se encuentra dentro de ese rango de 6.5 GPa – 33 GPa.

3.2.4.2 Pino

El módulo de elasticidad de la especie de Pino mostradas en la tabla 3.5 nos indican las variaciones respecto al contenido de humedad. El *"**E**"* mayor se da en P4F de 13.78 GPa y el mínimo en P1F de 0.44 GPa con humedad de 36.69 % y 69.67 % respectivamente.

Tabla 3.5 Módulo de elasticidad y humedad del Pino

Denominación	Módulo de Elasticidad *E* (GPa)	Contenido de humedad (%)
PNF	6.02	8.04
P1F	0.44	36.69
P2F	0.67	65.17
P4F	13.78	67.64
P8F	0.54	69.67
P12F	0.67	80.33

Las mediciones fueron realizadas con un indicador micrométrico tipo reloj con un rango de recorrido de 10 mm; valor que fue sobrepasado por la deflexión de las probetas; lo cual obligó a suspender la prueba y reinstalar el comparador.

El promedio de *"**E**"* para el Pino es de 3.69 GPa, comparando con el módulo de elasticidad consultado de la tabla 1.4, se determina que ese valor no se encuentra dentro del rango de 11 GPa – 14 GPa.

3.2.4.3 Teca

Los resultados de la madera de Teca mostrados en la tabla 3.6, muestra una variación del módulo de elasticidad con el contenido de humedad, siendo mayor en T8F de 28.07 GPa y menor en TIF de 0.90 GPa, con humedad de 42.22% y 26.12% respectivamente. Se deduce que las probetas T8F y T12F pertenecen a otro árbol de Teca, razón por la cual se ven comportamientos anómalos.

Tabla 3.6 Módulo de elasticidad y humedad de Teca

Denominación	**Módulo de Elasticidad *E* (GPa)**	**Contenido de humedad (%)**
TNF	7.14	4.44
T1F	0.90	26.12
T2F	2.25	26.6
T4F	1.29	51.33
T8F	28.07	42.22
T12F	1.96	47.72

El promedio de *"**E**"* de Teca es de 6.93 GPa, prácticamente este resultado no se encuentra dentro del rango del módulo de elasticidad consultado de 9.96 GPa – 11.24 GPa de la tabla 1.3.

Haciendo una comparación de *"**E**"* entre las tres especies, la madera que mostró mayor rigidez fue el Eucalipto con 10.41 GPa, debido a que esta especie es de mejor calidad.

3.2.5 Resultados del límite elástico

3.2.5.1 Eucalipto

En la tabla 3.7 se establece el limite elástico para cada probeta de Eucalipto según el esfuerzo y deflexión obtenidos en cada ensayo.

Tabla 3.7 Límite elástico del Eucalipto

Denominación	Deflexión (mm)	σ (MPa)
ENF	0.02	11.8
E1F	0.02	11.8
E2F	0.1	11.76
E4F	0.09	47.05
E8F	0.17	23.52
E12F	0.07	11.76

Se sabe que el límite de elasticidad es la tensión máxima que las probetas están sometidas sin sufrir deformaciones permanentes. Para el caso del Eucalipto se pudo apreciar en los anexos 9, 15, 21, 27, 33 39.

3.2.5.2 Pino y Teca

Al no contar con un número suficiente de datos de los ensayos en las probetas de Pino y Teca, no se pudo determinar el límite de elasticidad de las gráficas de esfuerzo y deflexión. En la mayoría de las pruebas de Resistencia a la Flexión se tomaron datos de la carga puntual desde los 500 kg, es por esto que se recomienda recopilar más información al iniciar el ensayo.

3.3 Tabla general de resultados

Los valores finales de esfuerzo de flexión máxima, deflexión máxima y contenido de humedad para las 21 probetas se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3. 8 Resultados finales de Eucalipto, Pino y Teca

Especie	Denominación	σ (MPa)	Deflexión máxima (mm)	Contenido de humedad (%)
Eucalipto	ENF	105.86	7.30	2.46
	E1F	105.86	7.90	7.55
	E2F	90.71	5.73	14.69
	E4F	101.90	15.74	15.93
	E8F	77.96	8.20	23.14
	E12F	69.23	16.00	27.16
Pino	PNF	30.79	3.80	8.04
	P1F	33.19	10.50	36.69
	P2F	30.18	10.03	65.17
	P4F	32.93	4.50	67.64
	P8F	29.99	13.52	69.67
	P12F	27.76	10.40	80.33
Teca	TNF	49.42	2.89	4.44
	T1F	42.58	9.70	26.12
	T2F	53.45	11.06	26.60
	T4F	43.75	11.70	51.33
	T8F	55.37	10.30	42.22
	T12F	46.93	6.00	47.72

Una vez expuestos los resultados y las observaciones de las tres especies, la madera más resistente al esfuerzo de flexión es el Eucalipto, dicha resistencia va de 69.23 MPa a 105.85 MPa, presentado menos fracturas y mayor elasticidad; mientras que la especie de más baja resistencia es el Pino, obteniéndose valores de 27.76 MPa a 33.19 MPa. Por último, las muestras que se consideran de resistencia media es la Teca con valores que van desde 42.58 MPa hasta 55.37 MPa.

De las tres especies de madera que presentó una deflexión máxima es el Eucalipto, con una deformación mínima en E2F de 5.73 mm y máxima en E12F de 16 mm. La madera con deformación media resultó ser el Pino, dichos valores se incrementan desde 3.8 mm a 13.52 mm, y con valores menores de deformación se encuentra la Teca de 2.89 mm a 11.70 mm. Se puede observar que mientras más contenido de humedad presentan las probetas ocurre mayor flexibilidad.

La especie que absorbió porcentajes de humedad altos es el pino, iniciando en 8.04 % en estado natural y llegando hasta el 80.33 % con tiempo de sumergimiento en agua durante 12 semanas.

En la sección de anexos se adjunta fichas sobre los datos técnicos de cada probeta y los diferentes cálculos para la obtención de la Resistencia a la Flexión.

3.4 Gráficas de resultados

3.4.1 Gráficas del incremento de humedad

Los resultados del aumento de humedad según los tiempos de sumergimiento del Eucalipto, Pino y Teca se exponen en las siguientes gráficas.

3.4.1.1 Eucalipto

En la figura 3.1 se determina el aumento del contenido de humedad del Eucalipto según el tiempo de inmersión, es decir que las probetas que más tiempo estuvieron sumergidas en agua, obtuvieron como resultado mayor contenido de humedad, cuyos resultados se presentan a continuación.

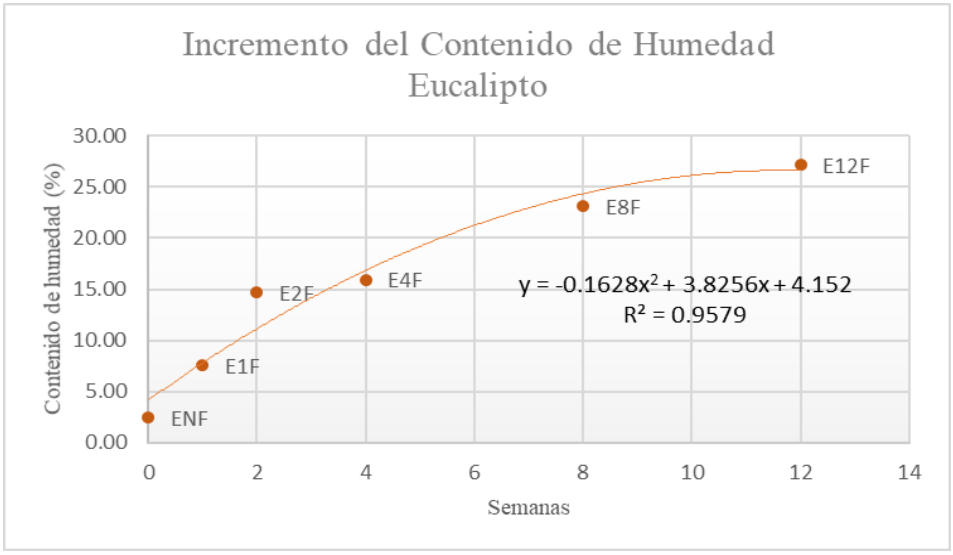


Figura 3.1 Incremento del contenido de humedad del Eucalipto

De la gráfica se obtiene la ecuación de la curva y = -0.1628x^2 + 3.8256x + 4.152 y el coeficiente de correlación R^2, este coeficiente posee una aproximación a 1 de 0.96, el cual nos indica que la ley de absorción de humedad es aceptable.

3.4.1.2 Pino

La siguiente figura 3.2, también nos indica el aumento del contenido de humedad del Pino, deduciendo como resultado alto porcentaje de humedad en las probetas de mayor tiempo de sumergimiento en agua.

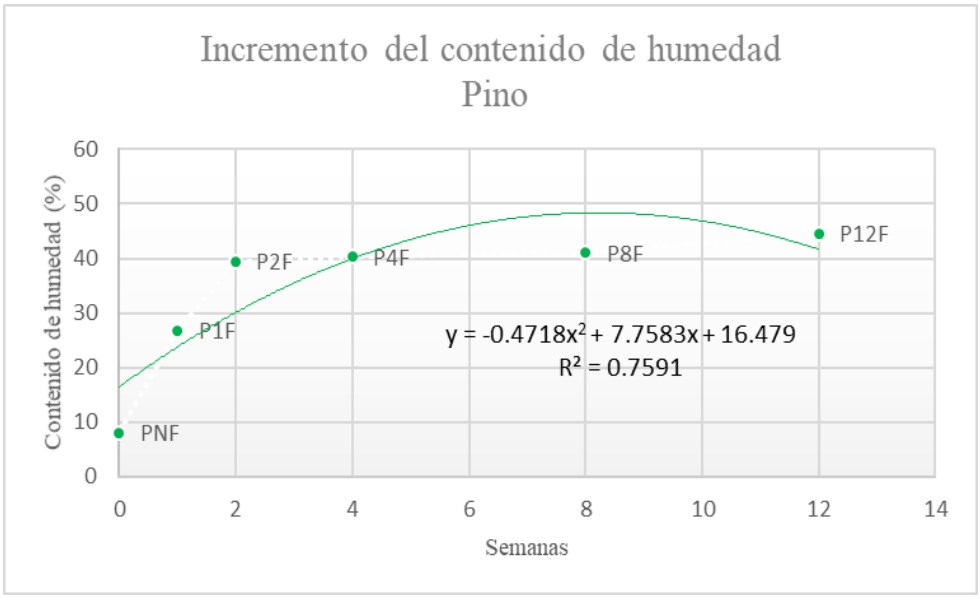


Figura 3. 2 Incremento del contenido de humedad del Pino

De la gráfica se obtuvo la ecuación de la curva $y = -0.4718x^2 + 7.7583x + 16.479$ y el coeficiente R^2, el mismo que da como resultado una aproximación a 1 de 0.76, concluyendo la ley de absorción es admisible.

3.4.1.3 Teca

En la siguiente figura 3.3 de madera Teca el incremento de humedad es similar a las especies de Pino y Eucalipto, es decir que el contenido de humedad crece cuanto más tiempo las probetas se encuentren sumergidas en agua.

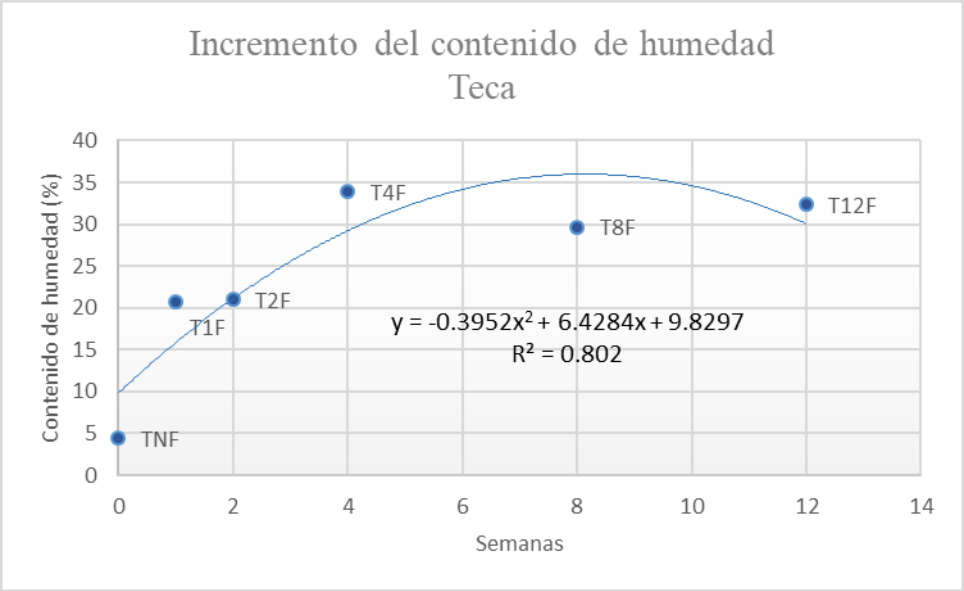


Figura 3. 3 Incremento del contenido de humedad de Teca

En la gráfica se adquirió la ecuación de la curva y = -0.3952x^2 + 6.4284x + 9.8297 y el R^2, dicho coeficiente de correlación es de 0.80, cercano a 1. Por lo que se puede decir los valores se aproximan a la línea de tendencia, siendo la ley de absorción permisible.

3.4.2 Gráficas de esfuerzo máximo de flexión y el contenido de humedad

En las posteriores gráficas se presenta la diferenciación del esfuerzo máximo de flexión según el contenido de humedad en las tres especies.

3.4.2.1 Eucalipto

La figura 3.4 nos indica que el esfuerzo de flexión decrece cuanto más contenido de humedad adquieren las muestras de Eucalipto.

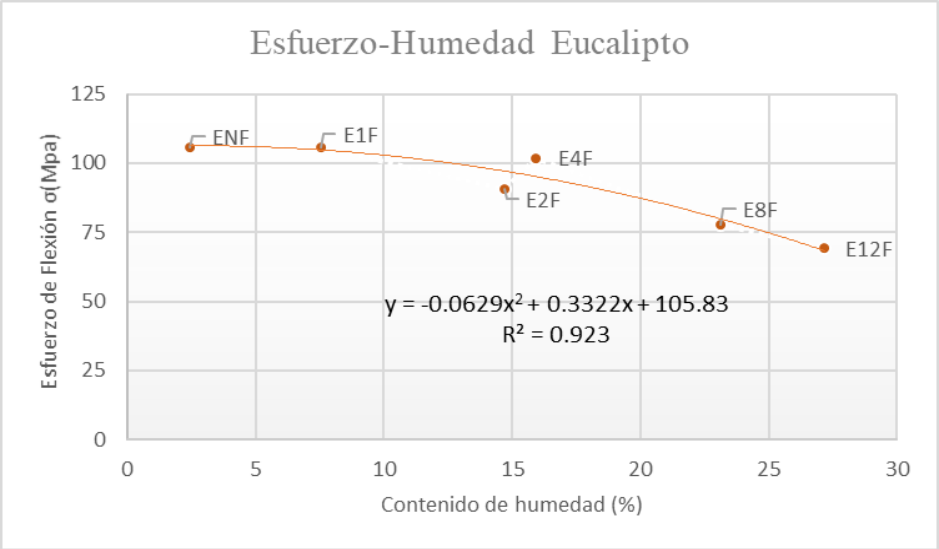


Figura 3. 4 Esfuerzo y contenido de humedad del Eucalipto

Al graficar los datos de esfuerzo respecto el porcentaje de humedad, se determinó la ecuación de la curva y = -0.0629x^2 + 0.3322x + 105.83 y el coeficiente R^2 de 0.92 con aproximación a 1, dicho valor demuestra que la variación de la Resistencia a la Flexión del Eucalipto se aproxima a la línea de tendencia, encontrándose en un rango válido.

3.4.2.2 Pino

En la figura 3.5 existe una variación del esfuerzo respecto al contenido de humedad en la probeta P4F, sin embargo, la última probeta nos muestra una menor flexión con más contenido de humedad.

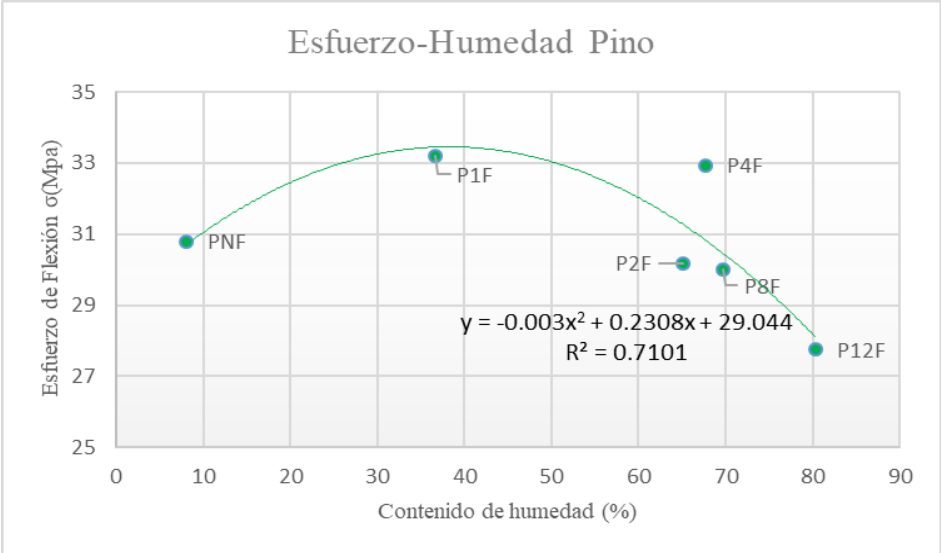


Figura 3.5 Esfuerzo y contenido de humedad del Pino

De la gráfica correspondiente al esfuerzo respecto al contenido de humedad del Pino, se dedujo la ecuación de la curva y = -0.003x^2 + 0.2308x + 29.044 y el coeficiente de correlación de 0.71, cercano a 1, indicándonos que la variación del esfuerzo máximo según el contenido la humedad de cada probeta se aproxima a la línea de tendencia, demostrando que es aceptable.

3.4.2.3 Teca

La teca al igual que las otras especies, presenta disminución en el esfuerzo de flexión cuanto más contenido de humedad muestran las probetas, se puede ver en la figura 3.6 que T12F y T8F son de menor esfuerzo respecto a T4F, debido a que las muestras presentaron diferentes características de heterogeneidad.

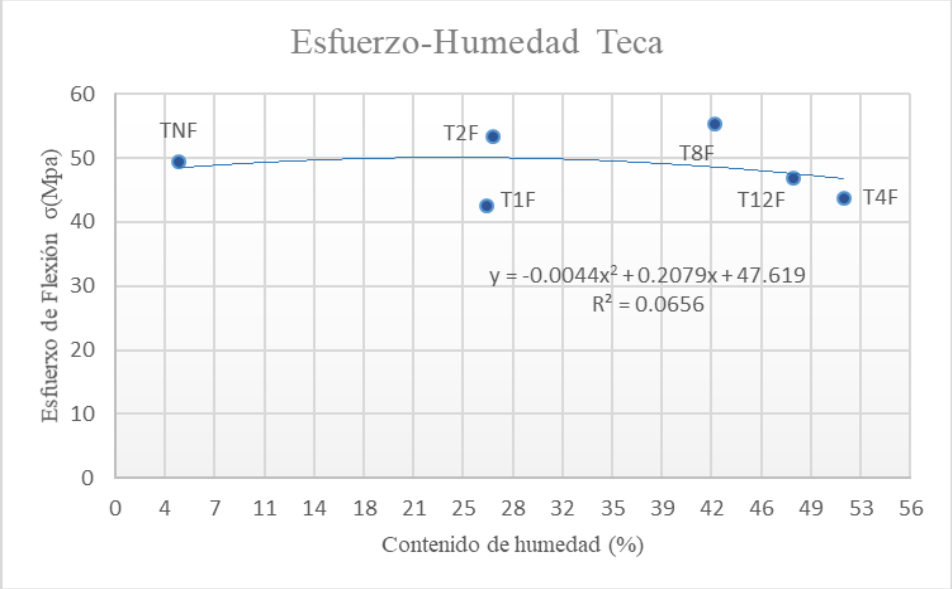


Figura 3.6 Esfuerzo y contenido de humead de Teca

En esta última grafica también se calculó la ecuación de la curva y = -0.0044x^2 + 0.2079x + 47.619 y el coeficiente R^2 de 0.066, este valor nos indica que las pruebas realizadas del esfuerzo respecto al contenido de humedad, no tiene un comportamiento homogéneo, para conseguir mejores cálculos se deberían hacer ensayos con un mayor número de muestras.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- La especie de madera con mayor Resistencia a la Flexión, luego de ser sometida a una carga puntual y a diferentes tiempos de sumergimiento, según la tabla 3.1 resultó ser el Eucalipto con 105, 86 MPa en estado natural.
- Al momento de comparar todos los resultados, la especie que obtuvo resistencia media, según la tabla 3.3, es la Teca con 55.87 MPa. Así mismo, el Pino es la madera de resultados menores de 33.19 MPa, mostrados en la tabla 3.2; comparando con el Eucalipto y Teca.
- La especie con mayor desplazamiento en el eje "y", se obtuvo en el Eucalipto de 16 mm. En cambio, el Pino presentó valores inferiores de deformación respecto a las otras dos especies, llegando a ser hasta de 3.8 mm.
- El cálculo del coeficiente de correlación R^2 en este trabajo se realizó con el objetivo de saber si los valores obtenidos se normalizaron al realizar las curvas de las gráficas de resultados, en este caso las gráficas de Eucalipto y Pino mostraron valores cercanos a 1, aclarando que nuestros ensayos en las dos especies de madera son aceptables; por el contrario la Teca es la especie que mostró variaciones en las curvas, es decir que R^2 es demasiado bajo, por lo que es necesario realizar más ensayos con un número más elevado de probetas.
- Después de hacer un análisis global de los resultados obtenidos en este trabajo, la especie de madera adecuada para la construcción de ademes en fortificación minera de nuestro medio es el Eucalipto, debido a que esta dio mejores resultados comparado con el Pino y Teca.

Recomendaciones:

- Al momento de obtener las probetas de madera hay que mantenerlas en un lugar de temperatura constante para que estas no absorban o pierdan humedad, logrando mantenerlas en su estado natural.
- Para la medición de la deflexión en este trabajo se utilizó un indicador micrométrico tipo reloj, el cual tiene un rango menor a la deformación de las vigas, el mismo no permitió uniformidad en los resultados; es por eso que se recomienda usar un medidor de proximidad para la medición digital.
- Siempre que se vayan hacer este tipo de pruebas hay que fijar bien los apoyos debajo de las vigas y con las medidas adecuadas para que la carga sea distribuida uniformemente.

BIBLIOGRAFÍA

Beer, F., Johnston, R., Dewolf, J. & Mazurek, D. (2009). Mecánica de Materiales Quinta Edición. Universidad autónoma de México. México.

Bermúdez, J. 2002. Manual de la Madera de Eucalipto Blanco. Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera de Galicia (CIS – Madera). Galicia. Recuperado el 27 de febrero del 2019 de <http://www.cismadeira.es/Galego/downloads/l.eucaliptoblanco.pdf>

Birön, C. & Arioğlu, E. (1982). Diseño de Ademes en Minas. Departamento de ingeniería de Minas de Universidad Técnica de Estambul. Estambul.

Cancino, F. (s.f.). Fortificación de Minas. Atacama. Recuperado el 03 de noviembre de 2018 de <https://www.academia.edu/>

Castro, F., & Raigosa, J. (2000). Crecimiento y propiedades físico-mecánicas de la madera de Teca (Tectona grandis) de 17 años de edad en San Joaquín de Abangares, Costa Rica. Costa Rica. Recuperado el 25 de diciembre de 2018 de <https://www.redalyc.org/html/436/43624201/>

Clunes, J. (2006). Acuñadura Manual y Fortificación de Minas Subterráneas. Copiapó. Recuperado el 3 de noviembre de 2018 de <https://www.academia.edu/>

Córdova, R. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la Madera. Costa Rica. Recuperado el 19 de noviembre del 2018 de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5123396.pdf>

Díaz, P. (2005). Evaluación de Propiedades Físicas y Mecánicas de Madera Nothofagus glauca proveniente de la zona de Cauquenes. Chile. Recuperado el 26 de Julio de 2018, de http://dspace.utalca.cl/retrieve/6282/diaz_mendez.pdf

Fitzgerald, R. (1996). Mecánica de Materiales. México. Consultado el 11 de febrero de 2019.

Fortificación de Minas. (2008). Fortificación de Minas-Madera. (en línea), <http://yuverminas.blogspot.com/>, Consulta: 8 de noviembre de 2018.

Gómez de la Pena, E. (2017). Refuerzo y Reparación con FRP de Vigas de Madera aserradas sometidas a Flexión. Madrid. Recuperado del 26 de Julio de 2018, de <http://oa.upm.es/46658/1/ENRIQUE_GOMEZ_DE_LA_PENA.pdf>

Gere, J. & Goodno, B. (2009). Mecánica de Materiales. México. Consultado del 11 de febrero del 2019.

Gonzáles, R. (2013). Guía N° 5 de operación para la Pequeña Minería Fortificación y Acuñadura. Chile. Recuperado el 03 de noviembre de 2018 de <https://www.academia.edu/>

Hibberler, R. (2006). Mecánica de Materiales Sexta Edición. México.

Madariaga, J. (2015). Guía sobre control geotécnico en minería subterránea. España. Recuperado el 8 de noviembre del 2018 de <https://www.mincotur.gob.es/energia/mineria/Seguridad/Guias/Guia-control-geotecnico-mineria-subterranea.pdf>

Mastrandea, C & Martínez, M. (2017). Propiedades de la Madera. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. Recuperado el 14 de marzo de 2018 de <https://inta.gob.ar/sites/default/files/propiedades_de_la_madera.pdf>

Panilla, S. (2010). Guía metodológica de seguridad para sistemas de fortificación y Acuñadura. Chile. Consultado el 8 de noviembre de 2010.

Pinto, N. (s.f.). Acuñadura Manual. Chile. Recuperado el 03 de Noviembre de 2018 de <https://es.scribd.com/doc/>

Pitel, A. & Singer, F. (1994). Resistencia de Materiales Cuarta Edición. Oxford University Press. EE.UU.

Ramírez, Y. (2009). Diseño y Evaluación de los Ademes de Madera, en la empresa C.I CARMINALES en el municipio de Fredonia. Medellín. Consultado el 9 de noviembre del 2018.

Rivera, A. (2018). Alternativas del uso de maderas en fortificación minera bajo diferentes condiciones de humedad. Universidad del Azuay. Cuenca. Recuperado el 17 de marzo de 2009 de http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8341

Rodríguez, C., & Vergara, E. (2008) Propiedades físicas y mecánicas de Pinos canarienses crecido en el secado de la región del Maule, Chile. Facultad de Ciencias Forestales de Universidad católica de Maule. Recuperado el 25 de diciembre de 2018 de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/bosque/v29n3/art02.pdf>

Sernageomin. (2013). Guía N° 5 de Operación para Pequeña Minería Fortificación y Acuñadura. Chile. Recuperado el 03 de noviembre de 2018 de <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/mineria/G5FortificacionAcunadura.pdf >

Spavento, E., Keil, G., & Monteoliva, S. (2008). Propiedades Mecánicas de la Madera. Argentina. Recuperado el 03 de noviembre de 2018 de http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/1725/mod_resource/content/0/APUNTES_PROPIEDADES_MECANICAS_2008.pdf

Tecnología de la Madera. (2007). Propiedades de la Madera. (en línea), <https://sites.google.com/site/tecnologiadelamadera/propiedades-fisicas>, Consulta: 13 de noviembre de 2018.

Teles, R. & Nájera, J. (2017). Propiedades Físico-Mecánicas de la Madera Tectona Grandis Lf. de una plantación comercial en el estado de Michoacán. México. Recuperado el 26 de Julio de 2018, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v8n40/2007-1132-remcf-8-40-00037.pdf >

Umerez, H. 2015. ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE Populus x euramericana Y Pinus pinaster TRAS TRATAMIENTOS DE

OLEOTERMIA. Universidad de Valladolid. Recuperado el 14 de marzo de 2019 de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/11151/1/TFM-L205.pdf>

Vignote, S. & Martínez, I. (1995). Tecnología de la Madera. España. Consultado el 13 de noviembre del 2018.

ANEXOS

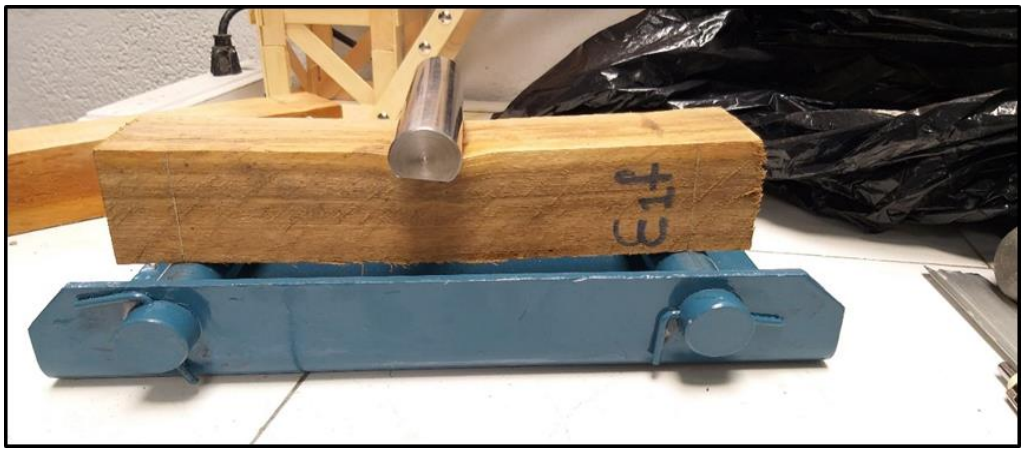
Anexo 1: Medición de peso de las probetas en estado natural

Anexo 2: Medición del peso de las muestras sumergidas en agua

Anexo 3: Pruebas de Resistencia a la Flexión y deflexión en maderas

Anexo 4: Muestra de T12F sometida a carga máxima

Anexo 5: Probeta de E1F sometida a la carga máxima



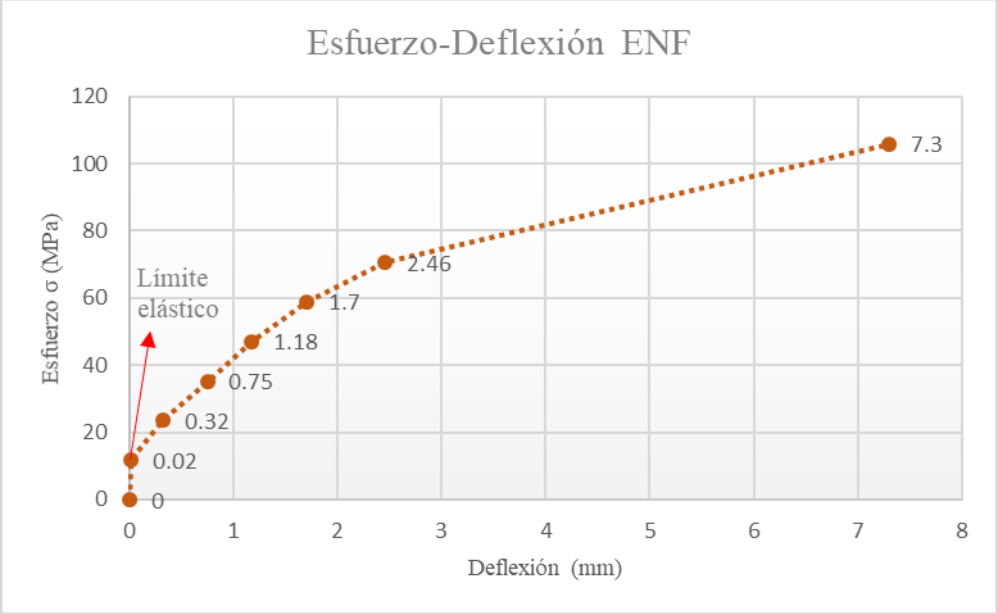
Anexo 6: Probeta de P1F sometida a la carga máxima

Anexo 7: Probeta de T1F sometida a la carga máxima

Anexo 8: Prueba de flexión ENF

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			7/12/2018						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendiculares a la carga						
Tipo de material			Madera-Eucalipto en estado natural						
Distancia entre apoyos			200 mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250 mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				3		
Número de prueba	**Carga (kg)**	**Fuerza (N)**	**Deflexión**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	0.63	0.61	0.02	0.11	245	11.8	78.40
2	1000	9800	1.52	1.2	0.32	0.22	490	23.5	9.80
3	1500	14700	2.55	1.8	0.75	0.34	735	35.3	6.27
4	2000	19600	3.58	2.4	1.18	0.45	980	47.0	5.32
5	2500	24500	4.8	3.1	1.7	0.56	1225	58.8	4.61
6	3000	29400	6.16	3.7	2.46	0.67	1470	70.6	3.82
7	4500	44100	13	5.7	7.3	1.01	2205	105.9	1.93

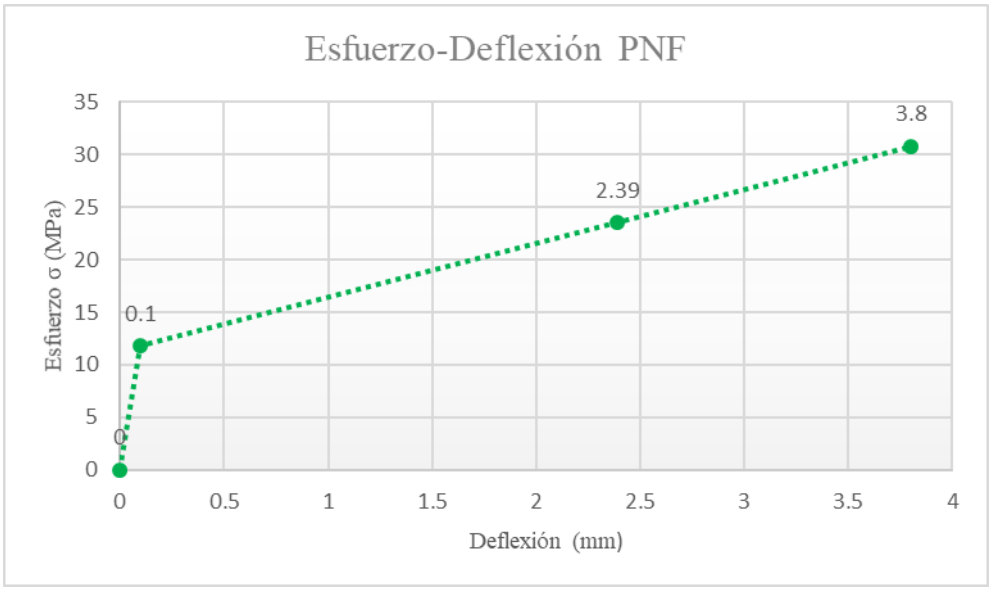
Anexo 9: Gráfica de esfuerzo-deflexión de ENF



Anexo 10: Prueba de flexión PNF

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			7/12/2018						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Pino en estado natural						
Distancia entre apoyos			200mm				Número de ensayo		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				1		
Número de prueba	**Carga (Kg)**	**Fuerza (N)**	**Deflexión**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax (N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	2	1.9	0.1	0.14	245	11.8	15.68
2	1000	9800	6.2	3.81	2.39	0.28	490	23.5	1.31
3	1309	12828.2	8.8	5	3.8	0.37	641.41	30.8	1.08

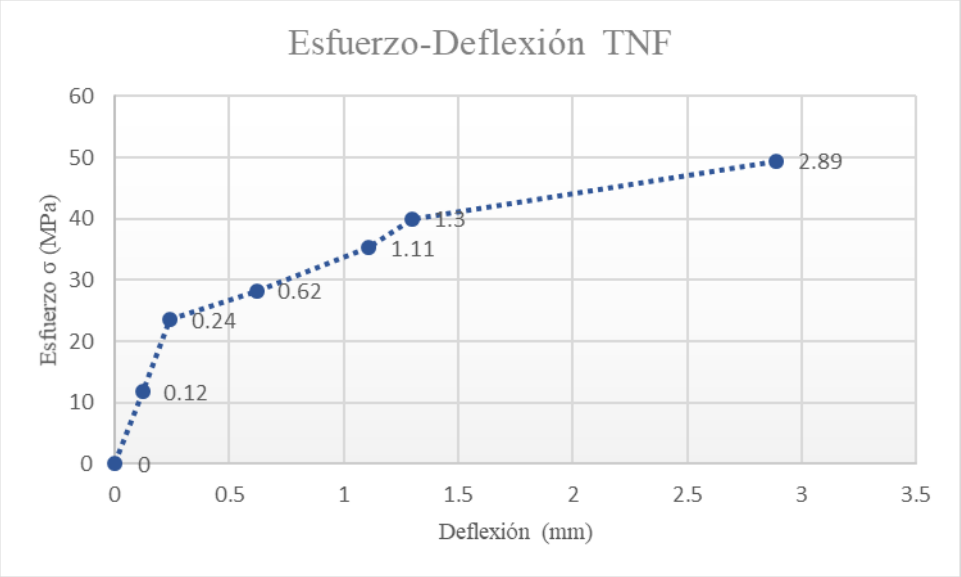
Anexo 11: Gráfica de esfuerzo-deflexión de PNF



Anexo 12: Prueba de flexión TNF

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			7/12/2018						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Teca en estado natural						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				2		
Número de prueba	**Carga (Kg)**	**Fuerza (N)**	**Deflexión**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	0.66	0.54	0.12	0.14	245	11.8	13.07
2	1000	9800	2.1	1.86	0.24	0.28	490	23.5	13.07
3	1200	11760	3	2.38	0.62	0.34	588	28.2	6.07
4	1500	14700	4.28	3.17	1.11	0.43	735	35.3	4.24
5	1700	16660	5	3.7	1.3	0.48	833	40.0	4.10
7	2101	20590	7.65	4.76	2.89	0.60	1029.49	49.4	2.28

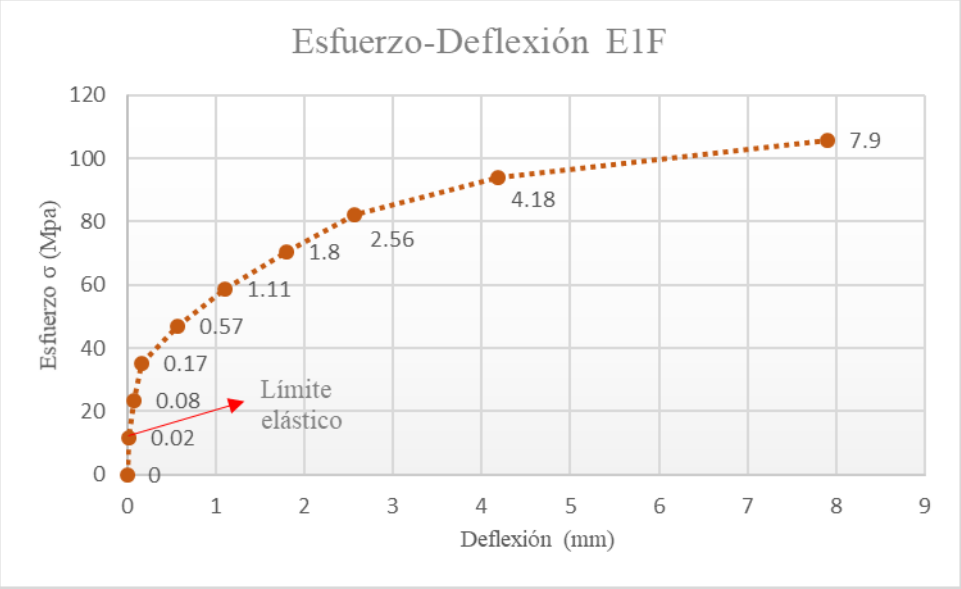
Anexo 13: Gráfica esfuerzo-deflexión TNF



Anexo 14 Prueba de flexión en E1F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			14/12/2018						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Eucalipto 7 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				4		
Número de prueba	**Carga (kg)**	**Fuerza (N)**	**Deflexión**				**Esfuerzo**		
			Medida(mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (Mpa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	0.8	0.78	0.02	0.11	245	11.8	78400.00
2	1000	9800	1.64	1.56	0.08	0.22	490	23.5	39200.00
3	1500	14700	2.5	2.33	0.17	0.34	735	35.3	27670.59
4	2000	19600	3.68	3.11	0.57	0.45	980	47.0	11003.51
5	2500	24500	5	3.89	1.11	0.56	1225	58.8	7063.06
6	3000	29400	6.47	4.67	1.8	0.67	1470	70.6	5226.67
7	3500	34300	8	5.44	2.56	0.78	1715	82.3	4287.50
8	4000	39200	10.4	6.22	4.18	0.90	1960	94.1	3000.96
9	4500	44100	14.9	7	7.9	1.01	2205	105.9	1786.33

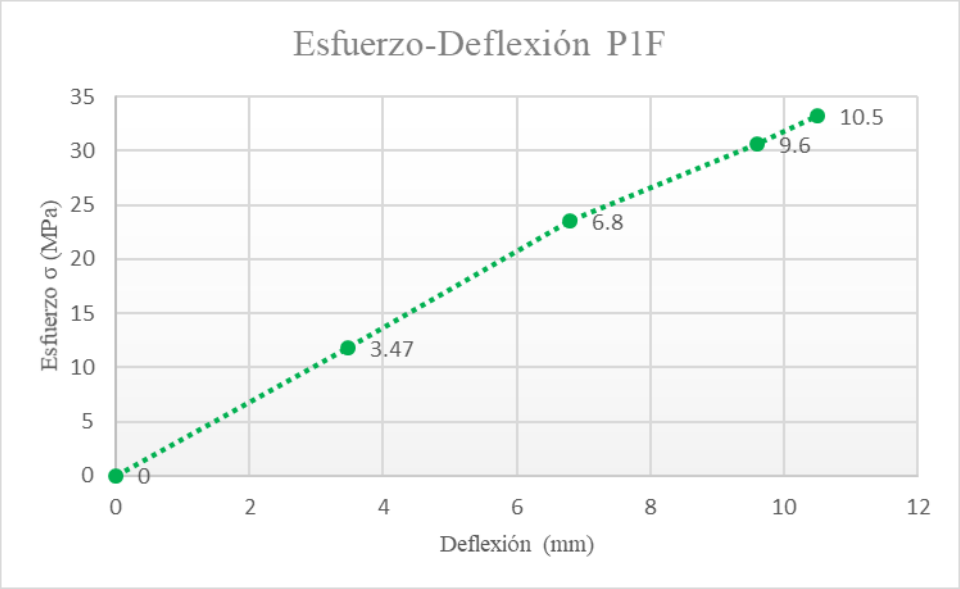
Anexo 15: Gráfica de esfuerzo-deflexión de E1F



Anexo 16: Prueba de flexión en P1F

Prueba de Flexión									
Fecha			14/12/2018						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Pino 7 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				6		
Número de prueba	**Carga (Kg)**	**Fuerza (N)**	**Deformacion**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	4	0.53	3.47	0.14	245	11.8	0.45
2	1000	9800	7.9	1.10	6.8	0.28	490	23.5	0.46
3	1300	12740	11	1.40	9.6	0.37	637	30.6	0.42
4	1411	13828	12	1.50	10.5	0.40	691.39	33.2	0.42

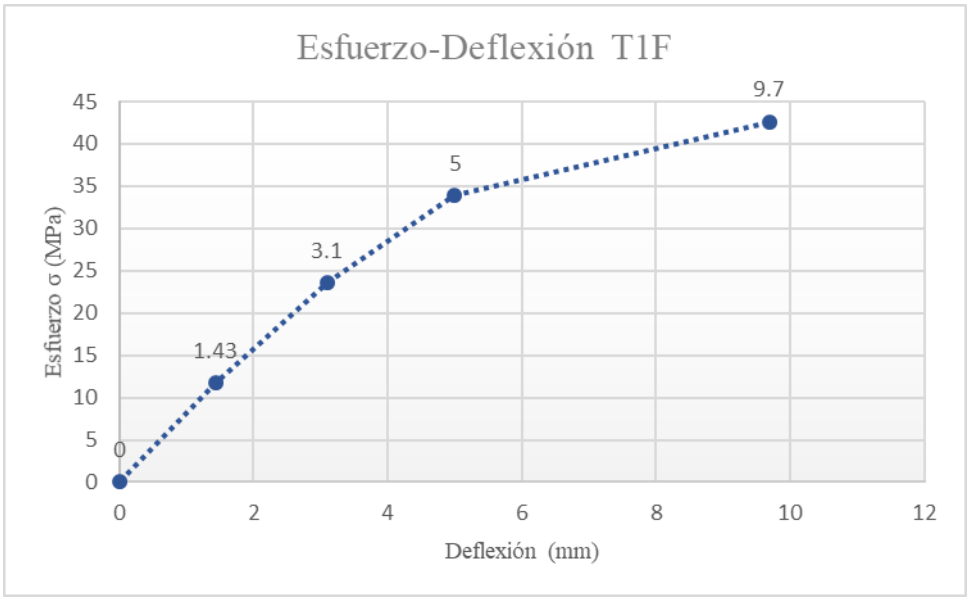
Anexo 17: Gráfica de esfuerzo-deflexión de P1F



Anexo 18: Prueba de flexión en T1F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			14/12/2018						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Teca 7 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				5		
Número de prueba	**Carga (Kg)**	**Fuerza (N)**	**Deformacion**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	1.78	0.35	1.43	0.14	245	11.8	1.10
2	1000	9800	3.8	0.7	3.1	0.28	490	23.5	1.01
4	1439	14102	6	1	5	0.41	705.11	33.9	0.90
3	1810	17738	11.2	1.5	9.7	0.52	886.9	42.6	0.59

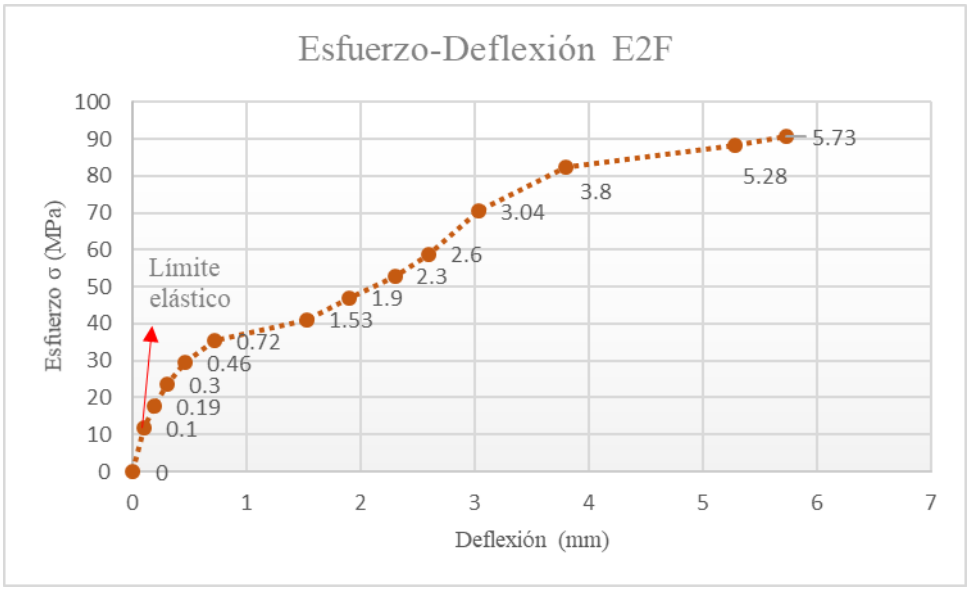
Anexo 19: Gráfica de esfuerzo-deflexión de T1F



Anexo 20: Prueba de flexión en E2F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			5/2/2019						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Eucalipto 14 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				8		
Número de prueba	**Carga (Kg)**	**Fuerza (N)**	**Deformacion**				**Esfuerzo**		
			Medida	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	0.8	0.7	0.1	0.11	245	11.76	15.68
2	750	7350	1.8	1.61	0.19	0.17	367.5	17.64	12.38
3	1000	9800	2.45	2.15	0.3	0.22	490	23.52	10.45
4	1250	12250	3.15	2.69	0.46	0.28	612.5	29.40	8.52
5	1500	14700	3.95	3.23	0.72	0.34	735	35.29	6.53
6	1750	17150	5.5	3.97	1.53	0.39	857.5	41.17	3.59
7	2000	19600	6.4	4.5	1.9	0.45	980	47.05	3.30
8	2250	22050	7.1	4.8	2.3	0.50	1102.5	52.93	3.07
9	2500	24500	7.5	4.9	2.6	0.56	1225	58.81	3.02
10	3000	29400	9.5	6.46	3.04	0.67	1470	70.57	3.09
11	3500	34300	11	7.2	3.8	0.78	1715	82.33	2.89
12	3750	36750	13.2	7.92	5.28	0.84	1837.5	88.21	2.23
13	3856	37789	13.7	7.97	5.73	0.86	1889.44	90.71	2.11

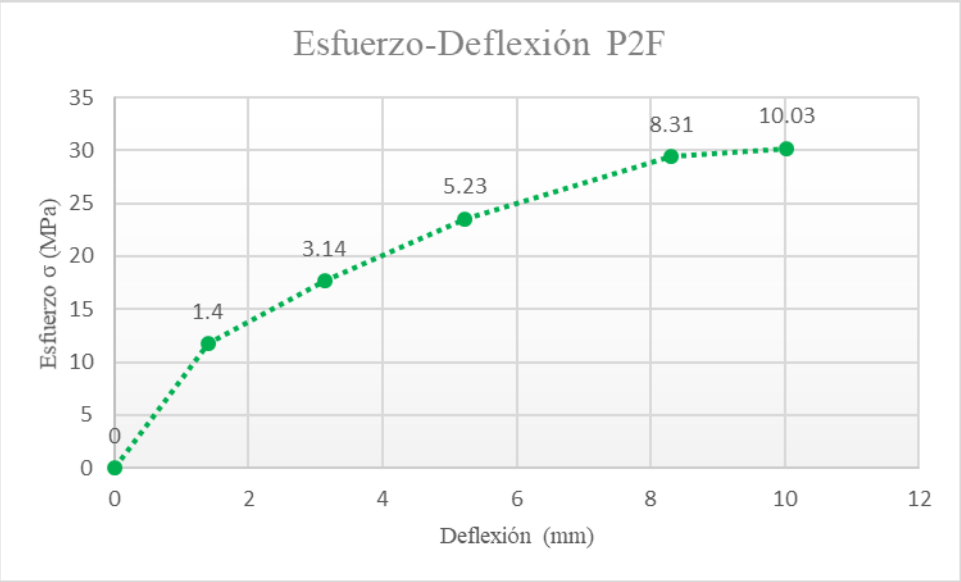
Anexo 21: Gráfica de esfuerzo-deflexión de E2F



Anexo 22: Prueba de flexión en P2F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			5/2/2019						
Descripción de maquinaria			Prensa hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Pino 14 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				7		
Número de prueba	**Carga (kg)**	**Fuerza (N)**	**Deflexión**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	2.37	0.97	1.4	0.14	245	11.76	1.12
2	750	7350	4.6	1.46	3.14	0.21	367.5	17.64	0.75
3	1000	9800	7.18	1.95	5.23	0.28	490	23.52	0.60
4	1250	12250	10.75	2.44	8.31	0.36	612.5	29.40	0.47
5	1283	12573	12.53	2.5	10.03	0.37	628.67	30.18	0.40

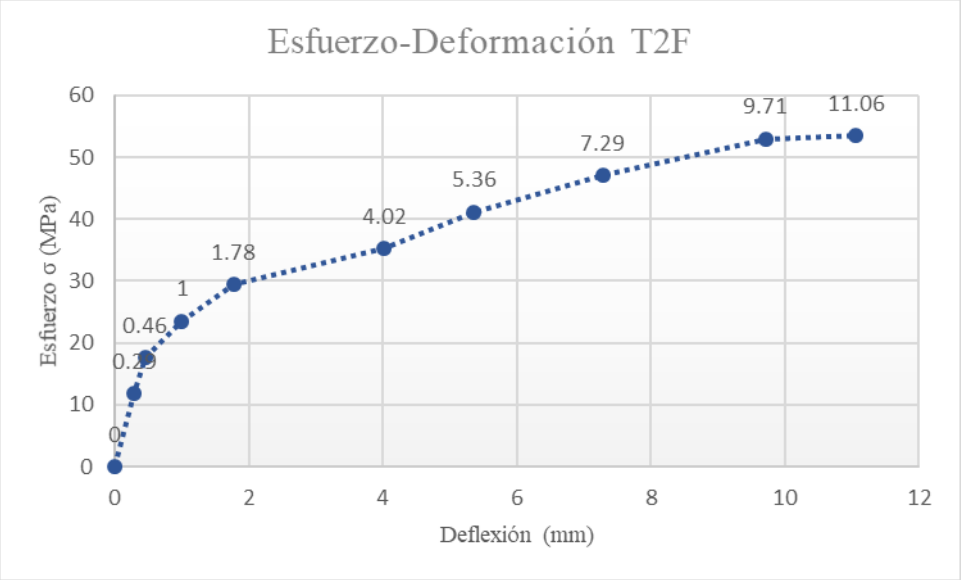
Anexo 23: Gráfica de esfuerzo-deflexión de P2F



Anexo 24: Prueba de flexión en T2F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			5/2/2019						
Descripción de maquinaria			Prensa hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Teca 14 días en agua						
Distancia entre apoyos			200 mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250 mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				9		
			Deflexión				**Esfuerzo**		
Número de prueba	**Carga (Kg)**	**Fuerza (N)**	**Medida**	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	1	0.71	0.29	0.14	245	11.76	5.41
2	750	7350	1.55	1.09	0.46	0.21	367.5	17.64	5.11
3	1000	9800	2.45	1.45	1	0.28	490	23.52	3.14
4	1250	12250	3.6	1.82	1.78	0.36	612.5	29.40	2.20
5	1500	14700	6.2	2.18	4.02	0.43	735	35.29	1.17
6	1750	17150	7.9	2.54	5.36	0.50	857.5	41.17	1.02
7	2000	19600	10.2	2.91	7.29	0.57	980	47.05	0.86
8	2250	22050	12.98	3.27	9.71	0.64	1102.5	52.93	0.73
9	2272	22266	14.36	3.3	11.06	0.65	1113.28	53.45	0.64

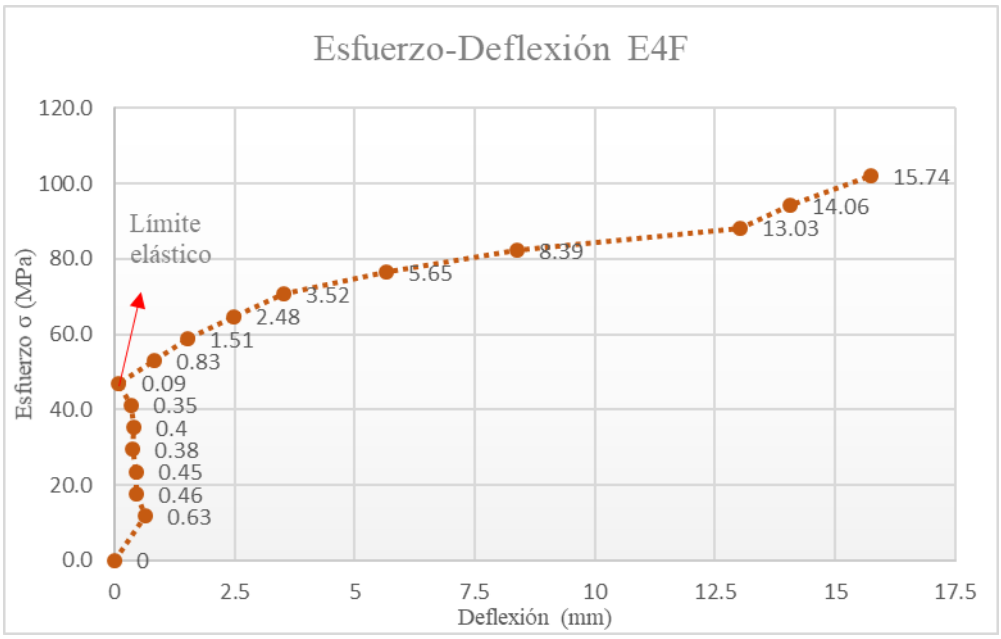
Anexo 25: Gráfica de esfuerzo-deflexión de T2F



Anexo 26: Prueba de flexión en E4F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			5/2/2019						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Eucalipto 28 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				10		
			Deflexión				**Esfuerzo**		
Número de prueba	**Carga (Kg)**	**Fuerza (N)**	**Medida (mm)**	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax (N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	1.95	1.32	0.63	0.11	245	11.76	2.49
2	750	7350	2.45	1.99	0.46	0.17	367.5	17.64	5.11
3	1000	9800	3.1	2.65	0.45	0.22	490	23.52	6.97
4	1250	12250	3.7	3.32	0.38	0.28	612.5	29.40	10.32
5	1500	14700	4.38	3.98	0.4	0.34	735	35.29	11.76
5	1750	17150	5	4.65	0.35	0.39	857.5	41.17	15.68
6	2000	19600	5.4	5.31	0.09	0.45	980	47.05	69.69
7	2250	22050	6.8	5.97	0.83	0.50	1102.5	52.93	8.50
8	2500	24500	8.15	6.64	1.51	0.56	1225	58.81	5.19
9	2750	26950	9.78	7.3	2.48	0.62	1347.5	64.69	3.48
10	3000	29400	11.48	7.96	3.52	0.67	1470	70.57	2.67
11	3250	31850	14.28	8.63	5.65	0.73	1592.5	76.45	1.80
12	3500	34300	17.68	9.29	8.39	0.78	1715	82.33	1.31
13	3750	36750	22.98	9.95	13.03	0.84	1837.5	88.21	0.90
14	4000	39200	24.68	10.62	14.06	0.90	1960	94.10	0.89
17	4332	42454	27.24	11.5	15.74	0.97	2122.68	101.90	0.86

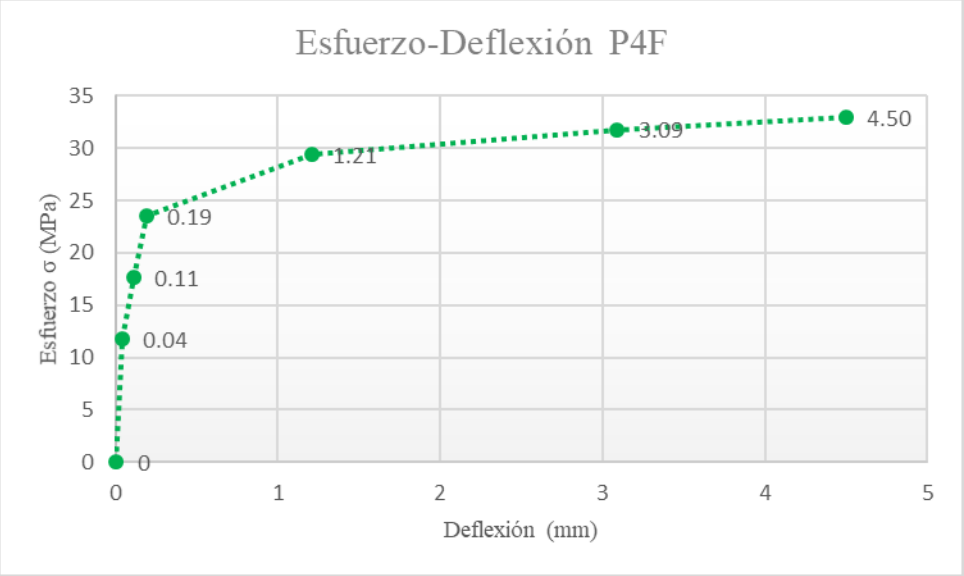
Anexo 27: Gráfica de esfuerzo-deflexión de E4F



Anexo 28: Prueba de flexión en P4F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			5/2/2019						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Pino 28 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				11		
Número de prueba	**Carga (Kg)**	**Fuerza (N)**	**Deflexión**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección(mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	2.9	2.86	0.04	0.14	245	11.76	39.20
2	750	7350	4.4	4.29	0.11	0.21	367.5	17.64	21.38
3	1000	9800	5.9	5.71	0.19	0.28	490	23.52	16.51
4	1250	12250	8.35	7.14	1.21	0.36	612.5	29.40	3.24
5	1350	13230	10.8	7.71	3.09	0.38	661.5	31.76	1.37
6	1400	13720	12.5	8	4.50	0.40	686	32.93	0.98

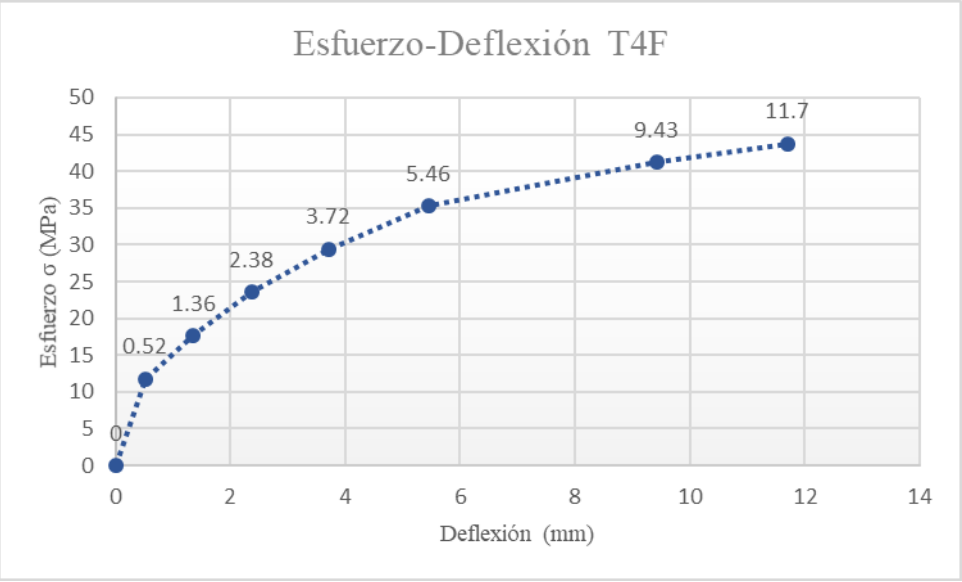
Anexo 29: Gráfica de esfuerzo-deflexión de P4F



Anexo 30: Prueba de flexión en T4F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			5/2/2019						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Teca 28 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				12		
			Deflexión				**Esfuerzo**		
Número de prueba	**Carga (Kg)**	**Fuerza (N)**	**Medida (mm)**	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	2	1.48	0.52	0.14	245	11.76	3.02
2	750	7350	3.58	2.22	1.36	0.21	367.5	17.64	1.73
3	1000	9800	5.34	2.96	2.38	0.28	490	23.52	1.32
4	1250	12250	7.42	3.70	3.72	0.36	612.5	29.40	1.05
5	1500	14700	9.9	4.44	5.46	0.43	735	35.29	0.86
6	1750	17150	14.6	5.17	9.43	0.50	857.5	41.17	0.58
7	1860	18228	17.2	5.50	11.7	0.53	911.4	43.75	0.50

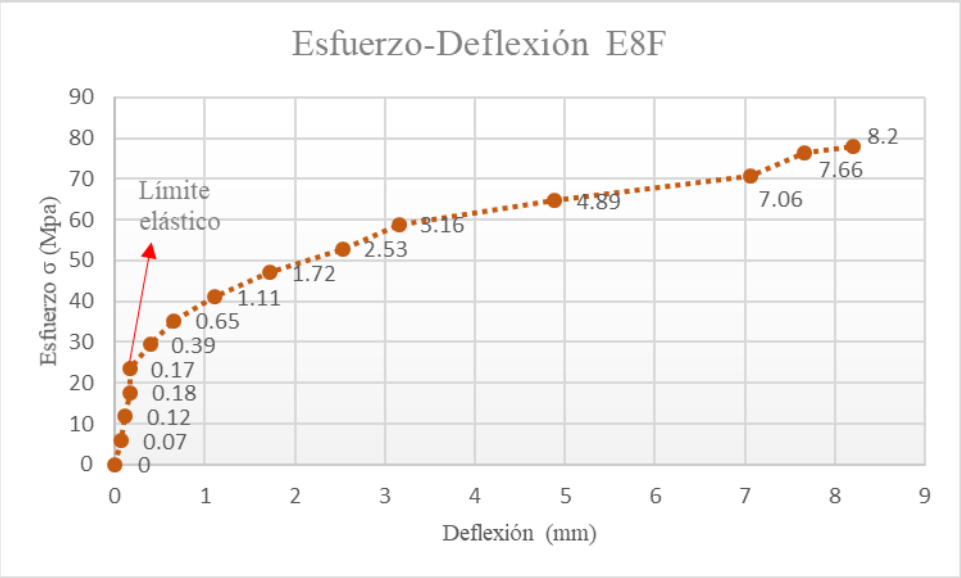
Anexo 31: Gráfica de esfuerzo-deflexión de T4F



Anexo 32: Prueba de flexión en E8F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			8/2/2019						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Eucalipto 56 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				13		
Número de prueba	**Carga (Kg)**	**Fuerza (N)**	**Deflexión**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (Mpa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	250	2450	0.71	0.64	0.07	0.06	122.5	5.88	11.40
2	500	4900	1.4	1.28	0.12	0.11	245	11.76	13.34
3	750	7350	2.1	1.92	0.18	0.17	367.5	17.64	13.34
4	1000	9800	2.73	2.56	0.17	0.22	490	23.52	18.99
5	1250	12250	3.6	3.21	0.39	0.28	612.5	29.40	9.95
6	1500	14700	4.5	3.85	0.65	0.34	735	35.29	7.21
7	1750	17150	5.6	4.49	1.11	0.39	857.5	41.17	4.94
8	2000	19600	6.85	5.13	1.72	0.45	980	47.05	3.65
9	2250	22050	8.3	5.77	2.53	0.50	1102.5	52.93	2.79
10	2500	24500	9.57	6.41	3.16	0.56	1225	58.81	2.48
11	2750	26950	11.94	7.05	4.89	0.62	1347.5	64.69	1.76
12	3000	29400	14.75	7.69	7.06	0.67	1470	70.57	1.33
13	3250	31850	16	8.34	7.66	0.73	1592.5	76.45	1.33
14	3314	32477	16.7	8.5	8.2	0.74	1623.86	77.96	1.27

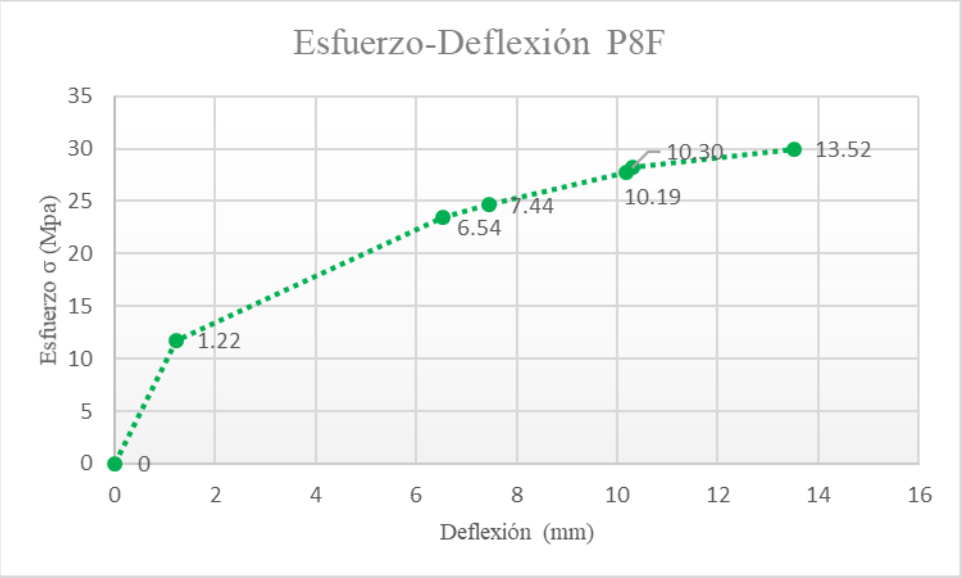
Anexo 33: Gráfica de esfuerzo-deflexión de E8F



Anexo 34: Prueba de flexión en P8F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			8/2/2019						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Pino 56 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				14		
Número de prueba	**Carga (Kg)**	**Fuerza (N)**	**Deflexión**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (Mpa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	2.2	0.98	1.22	0.14	245	11.76	1.29
2	1000	9800	8.5	1.96	6.54	0.28	490	23.52	0.48
3	1050	10290	9.5	2.06	7.44	0.30	514.5	24.70	0.44
4	1180	11564	12.5	2.31	10.19	0.34	578.2	27.76	0.36
5	1200	11760	12.65	2.35	10.30	0.34	588	28.23	0.37
6	1275	12495	16.02	2.5	13.52	0.36	624.75	29.99	0.30

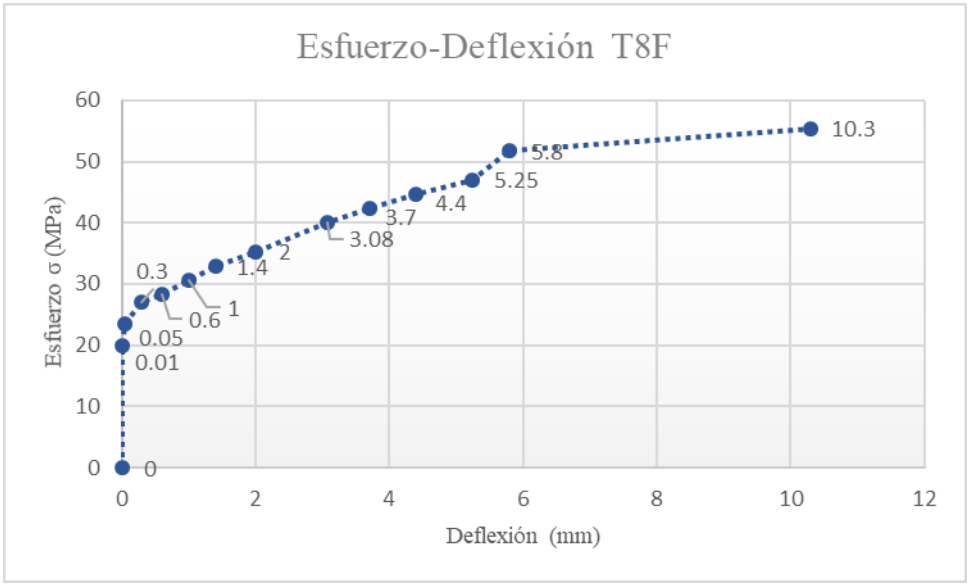
Anexo 35: Gráfica de esfuerzo-deflexión de P8F



Anexo 36: Prueba de flexión en T8F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			8/2/2019						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Teca 56 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				15		
Número de prueba	**Carga (kg)**	**Fuerza (N)**	**Deformacion**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	850	8330	1.61	1.6	0.01	0.24	416.5	20.00	266.56
2	1000	9800	1.95	1.9	0.05	0.28	490	23.52	62.72
3	1150	11270	2.5	2.2	0.3	0.33	563.5	27.05	12.02
4	1200	11760	2.9	2.3	0.6	0.34	588	28.23	6.27
5	1300	12740	3.5	2.5	1	0.37	637	30.58	4.08
6	1400	13720	4.1	2.7	1.4	0.40	686	32.93	3.14
7	1500	14700	4.9	2.9	2	0.43	735	35.29	2.35
8	1700	16660	6.28	3.2	3.08	0.48	833	39.99	1.73
9	1800	17640	7.1	3.4	3.7	0.51	882	42.34	1.53
10	1900	18620	8	3.6	4.4	0.54	931	44.70	1.35
11	2000	19600	9.05	3.8	5.25	0.57	980	47.05	1.19
12	2200	21560	10	4.2	5.8	0.63	1078	51.75	1.19
13	2354	23069.2	14.8	4.5	10.3	0.67	1153.46	55.37	0.72

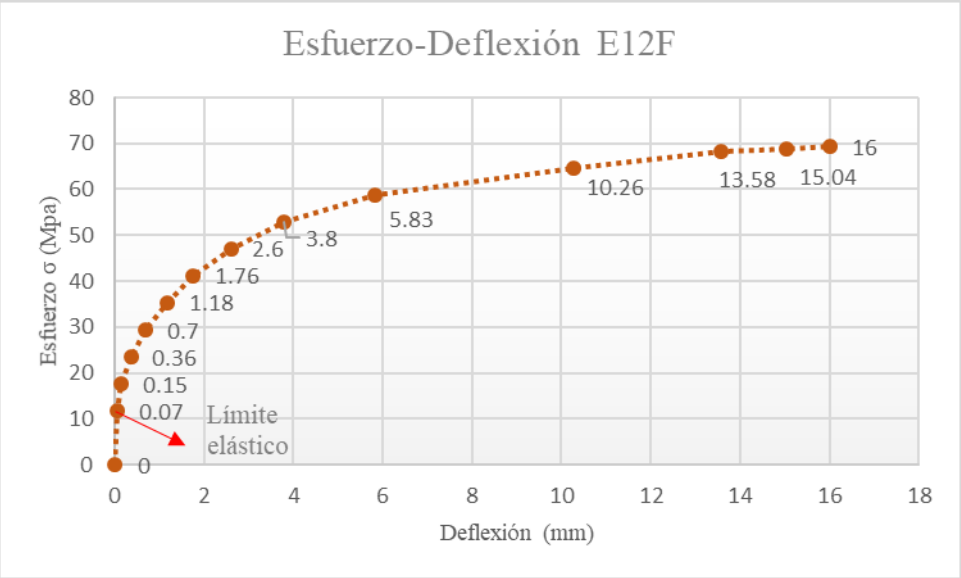
Anexo 37: Gráfica de esfuerzo-deflexión de T8F



Anexo 38: Prueba de flexión en E12F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			5/2/2019						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Eucalipto 84 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				17		
Número de prueba	**Carga (kg)**	**Fuerza (N)**	**Deflexión**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (Mpa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	1	0.93	0.07	0.11	245	11.76	22.40
2	750	7350	1.55	1.4	0.15	0.17	367.5	17.64	15.68
3	1000	9800	2.23	1.87	0.36	0.22	490	23.52	8.71
4	1250	12250	3.04	2.34	0.7	0.28	612.5	29.40	5.60
5	1500	14700	3.98	2.8	1.18	0.34	735	35.29	3.99
6	1750	17150	5.03	3.27	1.76	0.39	857.5	41.17	3.12
7	2000	19600	6.34	3.74	2.6	0.45	980	47.05	2.41
8	2250	22050	8	4.2	3.8	0.50	1102.5	52.93	1.86
9	2500	24500	10.5	4.67	5.83	0.56	1225	58.81	1.34
10	2750	26950	15.4	5.14	10.26	0.62	1347.5	64.69	0.84
11	2900	28420	19	5.42	13.58	0.65	1421	68.22	0.67
12	2924	28655.2	20.5	5.46	15.04	0.65	1432.76	68.78	0.61
13	2943	28841.4	21.5	5.5	16	0.66	1442.07	69.23	0.58

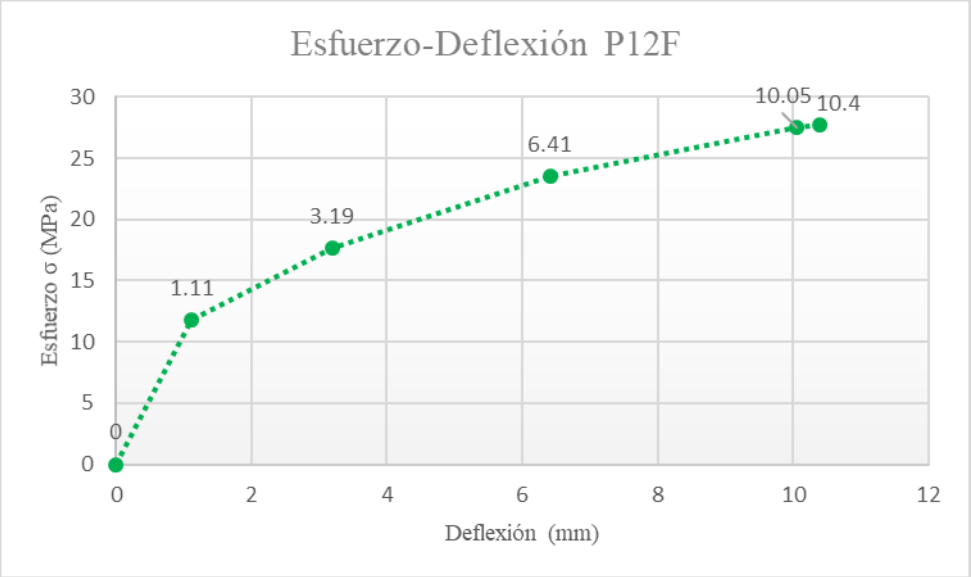
Anexo 39: Gráfica de esfuerzo-deflexión de E12F



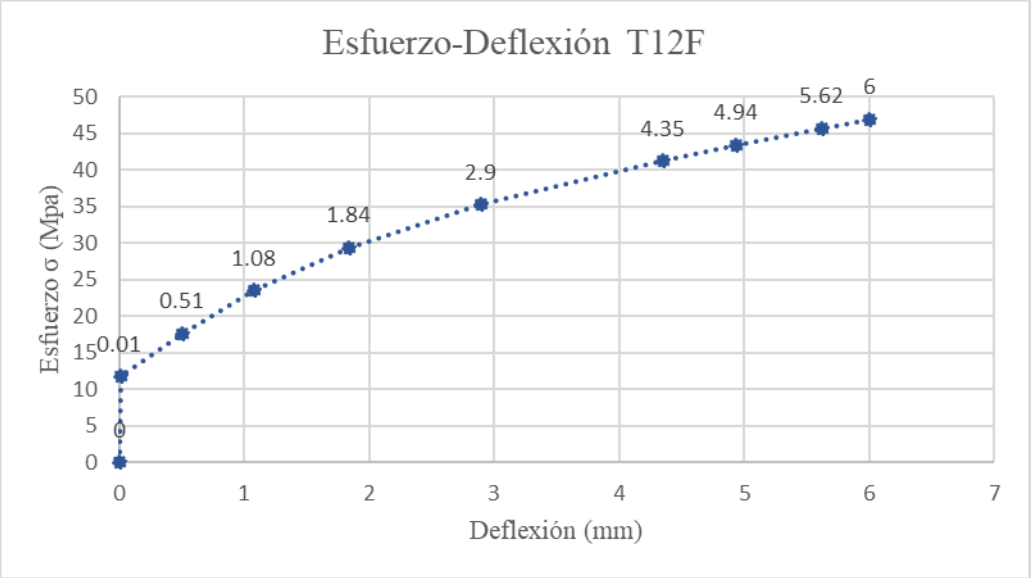
Anexo 40: Prueba de flexión en P12F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			5/2/2019						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Pino 84 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm				**Número de ensayo**		
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm				16		
Número de prueba	**Carga (Kg)**	**Fuerza (N)**	**Deflexión**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (MPa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	3.65	2.54	1.11	0.14	245	11.76	1.41
2	750	7350	7	3.81	3.19	0.21	367.5	17.64	0.74
3	1000	9800	11.50	5.09	6.41	0.28	490	23.52	0.49
4	1170	11466	16	5.95	10.05	0.33	573.3	27.52	0.37
5	1180	11564	16.40	6	10.4	0.34	578.2	27.76	0.36

Anexo 41: Gráfica de esfuerzo-deflexión de P12F



Anexo 42: Prueba de flexión en T12F

Prueba de Flexión en Madera									
Fecha			5/2/2019						
Descripción de maquinaria			Prensa Hidráulica de Humboldt						
Tipo de carga			Puntual centrada						
Sección de probeta			Cuadrada						
Dirección de fibras			Perpendicular a la carga						
Tipo de material			Madera-Teca 84 días en agua						
Distancia entre apoyos			200mm			**Número de ensayo**			
Longitud de probeta			250mm						
Sección transversal			25x5x5 cm			18			
Número de prueba	**Carga (kg)**	**Fuerza (N)**	**Deflexión**				**Esfuerzo**		
			Medida (mm)	**Factor de corrección (mm)**	**Deflexión real (mm)**	**Deflexión teórica (mm)**	**Mfmax(N.m)**	**σ (Mpa)**	**Módulo de Elasticidad (GPa)**
1	500	4900	1.3	1.29	0.01	0.14	245	11.76	16.00
2	750	7350	2.2	1.69	0.51	0.21	367.5	17.64	0.47
3	1000	9800	3.34	2.26	1.08	0.28	490	23.52	0.30
4	1250	12250	4.66	2.82	1.84	0.36	612.5	29.40	0.22
5	1500	14700	6.28	3.38	2.9	0.43	735	35.29	0.17
6	1750	17150	8.3	3.95	4.35	0.50	857.5	41.17	0.13
6	1844	18071.2	9.1	4.16	4.94	0.53	903.56	43.38	0.12
7	1940	19012	10	4.38	5.62	0.55	950.6	45.64	0.11
8	1995	19551	10.5	4.5	6	0.57	977.55	46.93	0.11

Anexo 43: Gráfica de esfuerzo-deflexión de T12F