

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



T E S I S

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE PARALELO A LA FIBRA,
DE LA MADERA PINUS RADIATA, DETERMINADO POR EL METODO DE
PUNZONAMIENTO Y EL METODO DE LA NORMA ASTM D 143-09/2010**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER:
MAIRA GISELA BAUTISTA AGUILAR**

ASESOR:

M. en I. Héctor Pérez Loaysa

CAJAMARCA-PERÚ

2014

DEDICATORIA

A MIS PADRES

CARMEN AGUILAR CHAVEZ Y RUBÉN BAUTISTA LLERENA, quienes desde muy pequeña me inculcaron valores, me dieron educación, comprensión, aprendí de ellos el esfuerzo, dedicación y voluntad para lograr mis metas a lo largo de toda mi vida y carrera profesional; con su apoyo y sabios consejos.

A MIS HERMANOS

ERICK, JOHANN Y RENZO, que son mi motivación para seguir adelante con mis metas y siempre me acompañan en todo momento con su apoyo.

A MIS ABUELOS

FLOR DE MARÍA CHÁVEZ Y JESÚS MORALES, quienes me criaron y recibí mucho cariño, amor y comprensión; ahora desde el cielo me iluminan y acompañan siempre.

AGRADECIMIENTO

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

Que a través de sus docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, logré los conocimientos necesarios para brindar un servicio profesional a la sociedad.

A MI ASESOR

M en I. Héctor Pérez Loaiza.

Por su paciencia y apoyo incondicional, enrumbó la realización de esta tesis.

A ADEFOR

Por brindarnos su apoyo con la fabricación y suministro de la madera para la elaboración de los especímenes de prueba.

ÍNDICE

Contenido	Página
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice	iv
Índice de Tablas	vi
Índice de Figuras	ix
Índice de Fórmulas	xiii
Resumen	xvi
Abstract	xvii
CAPITULO I.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	1
Introducción	1
Problema de la investigación	3
Planteamiento del Problema	3
Formulación del Problema	4
Justificación de la investigación	4
Alcances	5
Delimitación de la Investigación	6
Limitaciones	6
Objetivos	6
Hipótesis y Variables	7
Diseño Metodológico	7
Tipo de Investigación	7

Descripción del diseño	8
Población	8
Muestra	9
Unidad de Análisis	9
Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	9
Análisis de Datos	10
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	11
Antecedentes	11
Bases Teóricas	13
Estructuras y características anatómicas de la madera	13
Propiedades Físicas	28
Contenido de Humedad	28
Densidad	32
Contracción y Expansión de la Madera	35
Propiedades Mecánicas y Elásticas de la madera	38
Ensayos de resistencia de la madera	44
CAPITULO III. EQUIPAMIENTO, MATERIALES Y METODOLOGIA	58
Equipamiento	58
Materiales	58
Determinación del esfuerzo de Corte Paralelo a la fibra mediante el método de la norma ASTM D 143-09/2010.	59
Metodología	62
CAPÍTULO IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	64
Análisis comparativo por ambos métodos de las propiedades físicas-mecánicas de la madera Pinus Radiata	64

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
Conclusiones	68
Recomendaciones	69
REFERENCIAS	70
ANEXOS	73
A. Anexo: Cálculo de las Propiedades Mecánicas (corte paralelo a la fibra) de la Madera Pinus Radiata	73
B. Anexo: Cálculo de las Propiedades Mecánicas (corte paralelo a la fibra) de la Madera Pinus Radiata	76
C. Anexo: Correlación de las Propiedades Físicas (Contenido de Humedad y Densidad Básica) y el Esfuerzo a la Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata	85
D. Anexo: Panel Fotográfico.	93
 INDICE DE TABLAS	
Contenido	Página
<hr/>	
Tabla 01: Fuentes, Técnicas e Instrumentos para la recolección de los datos de cada variable	9
Tabla 02: Nombre Científico de Especies Exótica	21
Tabla 03: Contracción de Pinus Radiata secado al aire y al horno	37
Tabla 04: Coeficientes considerados para la determinación de los esfuerzos Admisibles	44
Tabla 05: Resumen de resultados de contenido de Humedad, Densidad Básica y Esfuerzo de Rotura (por ambos métodos)	65
Tabla 06: Comparación de Esfuerzos de Diseño o Admisible de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata (por ambos métodos)	66

Tabla 07: Contenido de humedad de probetas por método ASTM D 143-09/2010	73
Tabla 08: Contenido de humedad de probetas por método de Punzonamiento	73
Tabla 09: Comparación de Esfuerzos de Contenidos de Humedad (por ambos métodos)	74
Tabla 10: Densidad Básica de probetas método ASTM D 143-09/2010)	75
Tabla 11: Densidad Básica de probetas por método de Punzonamiento	75
Tabla 12: Comparación de Esfuerzos de Contenidos de Humedad (por ambos métodos)	75
Tablas 13: Cálculo del Esfuerzos de Rotura de Corte paralelo a la fibra del Pinus Radiata a un Contenido de Humedad Natural método ASTM D 143-09/2010)	77
Tablas 14: Cálculo del Esfuerzos de Rotura de Corte paralelo a la fibra del Pinus Radiata a un Contenido de Humedad Natural método Punzonamiento	77
Tabla 15: Cálculo del Esfuerzos de Rotura de Corte paralelo a la fibra del Pinus Radiata de la madera húmeda al 83.03% de Contenido de Humedad según fórmula 39, método ASTM D 143-09/2010)	80
Tabla 16: Cálculo del Esfuerzos de Rotura de Corte paralelo a la fibra del Pinus Radiata de la madera húmeda al 83.03% de Contenido de Humedad según fórmula 39, método de Punzonamiento	80
Tabla 17: Cálculo del Esfuerzos de Rotura de Corte paralelo a la fibra del Pinus Radiata de la madera seca al 12.00% de Contenido de Humedad según fórmula 39, método ASTM D 143-09/2010)	82

Tabla 18: Cálculo del Esfuerzos de Rotura de Corte paralelo a la fibra del Pinus Radiata de la madera seca al 12.00% de Contenido de Humedad según fórmula 39, método de Punzonamiento	82
Tablas 19: Correlación Contenido de Humedad Vs Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra de Pinus radiata método ASTM D 143-09/2010	85
Tablas 20: Correlación Contenido de Humedad Vs Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra de Pinus radiata método de Punzonamiento	85
Tablas 21: Correlación Densidad Básica Vs Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra de Pinus radiata método ASTM D 143-09/2010	87
Tablas 22: Correlación Densidad Básica Vs Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra de Pinus radiata método Punzonamiento	87
Tablas 23: Correlación Contenido de Humedad Vs Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra de Pinus radiata corregidos al 12% del CH, método ASTM D 143-09/2010	89
Tablas 24: Correlación Contenido de Humedad Vs Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra de Pinus radiata corregidos al 12% del CH, método Punzonamiento	89
Tablas 25: Correlación Densidad Básica Vs Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra de Pinus radiata corregidos al 12% del CH, método ASTM D 143-09/2010	91
Tablas 26: Correlación Densidad Básica Vs Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra de Pinus radiata corregidos al 12% del CH, método Punzonamiento.	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 01: Rodela de Secuoya de dos mil años. Se encuentra en Forintek, Vancouver, British Columbia, Canadá	14
Figura 02: Secciones de un árbol: copa, tronco y raíces	15
Figura 03: Sección transversal de un tronco en que se muestra la corteza exterior y la corteza interior o floema	16
Figura 04: En la sección transversal del tronco se muestra el cambium o cambio, que se encuentra adyacente al xilema y hacia la corteza	16
Figura 05: La zona al interior del cambium es la albura	17
Figura 06: Al interior de la albura se encuentra el duramen	17
Figura 07: En el centro se ubica la médula	18
Figura 08: Anillo de crecimiento anual	18
Figura 09: Madera de Primavera o temprana y madera de verano o tardía	19
Figura 10: Ampliación del anillo de crecimiento	19
Figura 11: Dimensión de las células en coníferas y latifoliadas	20
Figura 12: Estructura anatómica de una conífera	22
Figura 13: Eje tangencial en una pieza de madera	26
Figura 14: Eje radial en una pieza de madera	27
Figura 15: Eje longitudinal en una pieza de madera	27
Figura 16: Curvas de humedad de equilibrio de madera	30
Figura 17: Punto de Saturación de la fibra, PSF	31
Figura 18: Madera sobre el PSF. Presencia de agua libre y agua ligada	31
Figura 19: Madera seca. La contracción se inicia	32

Figura 20: Madera verde y madera seca	35
Figura 21: El gráfico muestra la magnitud de la contracción tangencial y el sentido en el tronco	35
Figura 22: El gráfico muestra la magnitud de la contracción radial y el sentido en el tronco	36
Figura 23: Gráfico que muestra la proporción de la contracción de la madera en su eje longitudinal	36
Figura 24: Efectos de la contracción en la madera	38
Figura 25: Gráfica Esfuerzo – Deformación Unitaria	39
Figura 26: Fuerzas de Tensión	41
Figura 27: Fuerzas en compresión	41
Figura 28: Fuerzas en cortante	41
Figura 29: Esfuerzo	41
Figura 30: Esquema de ensayo de compresión paralela a las fibras	45
Figura 31: Esquema de ensayo de compresión perpendicular a las fibras	47
Figura 32: Esquema de ensayo de tracción paralela a las fibras.	49
Figura 33: Esquema de ensayo de la flexión estática	51
Figura 34: Esquema de ensayo de cizalle paralelo tangencial	56
Figura 35: Esquema de ensayo de cizalle paralelo radial	56
Figura 36: Especimen propuesto por la norma ASTM D 143-09/2010	59
Figura 37: Equipo empleado para probar la resistencia de corte de la madera, con la norma ASTM D 143-09/2010	60
Figura 38: Equipo (hembra y macho) empleado para probar resistencia de corte de la madera por Método de Punzonamiento	63

Figura 39: Especímenes de prueba método de Punzonamiento	63
Figura 40: Gráfica de Método vs Esfuerzo de Rotura Promedio corregida al 12% del contenido de Humedad	65
Figura 41: Gráfica de Método vs Esfuerzo de diseño para una madera verde a un contenido de Humedad a 83.03% y al 5% del límite de exclusión	66
Figura 42: Gráfica de Método vs Esfuerzo de diseño para una madera seca a un contenido de Humedad del 12.00% y al 5% del límite de exclusión	67
Figura 43: Variación de la humedad para el método ASTM D 143- 09/2010	74
Figura 44: Variación de la humedad para el método Punzonamiento	74
Figura 45: Variación de la Densidad Básica para el método ASTM D 143-09/210	76
Figura 46: Variación de la Densidad Básica para el método Punzonamiento	76
Figura 47: Dispersión de valores de Esfuerzos de Rotura de las probetas ensayadas por ASTM D-143-09/2010	78
Figura 48: Dispersión de valores de Esfuerzos de Rotura de las probetas ensayadas por el Método de Punzonamiento	78
Figura 49: Variación de los Esfuerzos de Rotura al corte paralelo a la fibra de la madera Pinus Radiata por el Método ASTM D 143-09/2010	79
Figura 50: Variación de los Esfuerzos de Rotura al corte paralelo a la fibra de la madera Pinus Radiata por el Método Punzonamiento	79

Figura 51: Ordenamiento de menor a mayor de los esfuerzos de rotura de las probetas ensayadas al corte paralelo a la fibra de la madera Pinus Radiata corregidos al 12% de contenido de Humedad por el Método ASTM D 143-09/2010	83
Figura 52: Ordenamiento de menor a mayor de los esfuerzos de rotura de las probetas ensayadas al corte paralelo a la fibra de la madera Pinus Radiata corregidos al 12% de contenido de Humedad por el Método de Punzonamiento.	83
Figura 53: Contenido de Humedad y su relación con el Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata por el Método ASTM D143-09/2010	86
Figura 54: Contenido de Humedad y su relación con el Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata por el Método de Punzonamiento	86
Figura 55: Densidad Básica y su relación con el Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata por el Método ASTM D 143-09/2010	88
Figura 56: Densidad Básica y su relación con el Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata por el Método de Punzonamiento	88
Figura 57: Contenido de Humedad vs Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata corregido al 12% del Contenido de Humedad por el Método ASTM D 143-09/2010	90

Figura 58: Contenido de Humedad vs Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata corregido al 12% del Contenido de Humedad por el Método de Punzonamiento	90
Figura 59: Densidad Básica vs Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata corregido al 12% de Contenido de Humedad por el Método ASTM D 143-09/2010	92
Figura 60: Densidad Básica vs Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata corregido al 12% de Contenido de Humedad por el Método de Punzonamiento	92

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Contenido	Página
Fórmula 01: Cálculo del contenido de humedad de la madera	28
Fórmula 02: Cálculo de la Densidad Verde	33
Fórmula 03: Cálculo de la Densidad Seca al Aire	33
Fórmula 04: Cálculo de la Densidad Anhidra	34
Fórmula 05: Cálculo de la Densidad Básica	34
Fórmula 06: Ley de Hooke	40
Fórmula 07: Módulo de Elasticidad	40
Fórmula 08: Esfuerzo	42
Fórmula 09: Deformación	42
Fórmula 10: Deformación Unitaria	43
Fórmula 11: Esfuerzo admisible o de Trabajo o de diseño	43
Fórmula 12: Deformación Unitaria ensayo de compresión paralela a la fibra.	45
Fórmula 13: Cálculo del Esfuerzo a compresión paralela a la fibra.	46

Fórmula 14: Cálculo del Esfuerzo al límite proporcional elástico a compresión paralela a la fibra.	46
Fórmula 15: Cálculo de Esfuerzo de Rotura a compresión paralela a la fibra.	46
Fórmula 16: Cálculo del Módulo de Elasticidad a compresión paralela a la fibra.	47
Fórmula 17: Cálculo del Esfuerzo a compresión perpendicular a la fibra.	48
Fórmula 18: Cálculo del Esfuerzo al límite proporcional elástico a compresión perpendicular a la fibra.	48
Fórmula 19: Deformación Unitaria ensayo a la tracción paralela a la fibra.	50
Fórmula 20: Cálculo del Esfuerzo ensayo a la tracción paralela a la fibra.	50
Fórmula 21: Cálculo del Esfuerzo al límite proporcional elástico ensayo a la tracción paralela a la fibra.	50
Fórmula 22: Cálculo de Esfuerzo de Rotura ensayo a tracción paralela a la fibra.	51
Fórmula 23: Deflexión en el centro de la luz.	52
Fórmula 24: Momento de la sección transversal con relación al eje alrededor del cual se produce la flexión.	53
Fórmula 25: Esfuerzo a la flexión estática.	53
Fórmula 26: Esfuerzo al límite proporcional elástico en flexión estática o flexión –compresión.	53
Fórmula 27: Esfuerzo de Rotura a la flexión estática o flexión-compresión.	54

Fórmula 28: Esfuerzo de rotura por cizallamiento	57
Fórmula 28: Resistencia a corte, con humedad estándar de 12%	64

RESUMEN

La presente investigación surgió al constatar que el Método ASTM D 143-09/2010 vigente, tenía imperfecciones y distorsiones probables en los resultados obtenidos, planteándose una nueva forma de determinar la resistencia al corte paralelo a la fibra mediante el Método de Punzonamiento.

Se planteó como objetivo principal la evaluación de la resistencia al corte, paralelo a la fibra, de la madera *Pinus radiata*, determinado por el método de Punzonamiento y el Método de la Norma ASTM D 143-09/2010, así como las propiedades físicas complementarias e influyentes en la resistencia de la madera. Se eligió la madera de *Pinus Radiata* para el estudio, por ser una de las especies maderables que más abunda en Cajamarca. El bosque de donde se extrajo la madera fue de Granja Porcón, (3 árboles), los que se trasladaron al ADEFOR para la elaboración de 60 probetas estándar. Se ensayaron dichas probetas en la maquina universal (AMSLER- Capacidad de carga = 30 tn.) del laboratorio de ensayo de materiales de la UNC. Obteniéndose los siguientes resultados:

- El valor del esfuerzo de diseño de la madera estudiada a un contenido de humedad 83.03% obtenido mediante el método ASTM D 143-09/2010 es 2.81kg/cm² y el valor del mismo esfuerzo por el método de Punzonamiento es 5.52kg/cm², siendo el segundo mayor en un 96.44% respecto al primero.
- El valor del esfuerzo de diseño de la madera estudiada a un contenido de humedad 12.00% obtenido mediante el método ASTM D 143-09/2010 es 16.22 kg/cm² y el valor del mismo por el método de Punzonamiento es 19.36 kg/cm², siendo el segundo mayor en un 19.36% respecto al primero.

Palabras claves: Madera, fuerza de corte paralelo, Punzonamiento

ABSTRACT

This investigation arose in finding that the ASTM Method D 143-09 / 2010 in force, was likely imperfections and distortions in the results, considering a new way to determine the resistance to cut parallel to the fiber by the indentation method.

Raised as main objective to evaluate the shear strength parallel to the grain, wood *Pinus radiata*, determined by the indentation method and ASTM Method D 143-09 / 2010 and complementary physical properties and influential in the strength of wood. *Pinus Radiata* wood for the study was chosen as one of the most abundant tree species in Cajamarca. The forest where the wood was extracted Porcón Farm (3 trees), which moved to ADEFOR for making 60 standard probes. These specimens were tested on the universal machine (AMSLER- Capacity = 30 tn.) Of material testing lab at UNC. With the following results:

- The value of the design effort timber studied at a moisture content of 83.03% obtained by the method ASTM D 143-09 / 2010 is 2.81kg / cm² and the value of the effort by the indentation method is 5.52kg / cm², being the second largest in 96.44% over first.
- The value of the design effort timber studied at a moisture content of 12.00% obtained by the ASTM D 143-09 / 2010 method is 16.22 kg / cm² and the value thereof by the indentation method is 19.36 kg / cm², being the second largest in 19.36% over first.

Keywords: Wood, strength parallel cutting, punching

CAPITULO I. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1. INTRODUCCIÓN:

Para la presente investigación tomamos la especie conífera (Pinus Radiata), utilizada habitualmente en la industria de la construcción como madera estructural del grupo C, éste agrupamiento está basado en los valores de la densidad básica y de la resistencia mecánica, y siendo el Pinus Radiata un material muy útil en la construcción de edificaciones es importante conocer éstos valores para el diseño de elementos estructurales, éste tipo de árboles alcanza densidades básicas de 0.40 a 0.55 gr/cm³ y su esfuerzo admisible al corte paralelo a la fibra es de aproximadamente 8.00 kg/cm², para madera húmeda.

El desarrollo del método de Punzonamiento es una nueva alternativa para determinar la resistencia de corte paralela a la fibra, y evitar los esfuerzos de rotación que son causados por el método de la norma ASTM D 143-09/2010, es por ello que merece atención su estudio debido a la importancia de sus resultados, para dimensionar elementos estructurales, donde el uso de valores inexactos puede provocar daños a la propiedad y otras consecuencias irreversibles, EVANS (2000).

Para la presente investigación se plantearon las siguientes etapas: (1) elaboración y determinación de las propiedades físicas: Densidad Básica y Contenido de Humedad, (2) elaboración y determinación de pruebas mecánicas(corte paralelo),(3) comparación de las resistencias obtenidas por ambos métodos de la madera Pinus Radiata el cual es el tipo de árbol más utilizado en la MLPE en Latinoamérica.

Para el cálculo de los parámetros antes mencionados se realizaron los análisis con ayuda mediante software Excel para obtener el esfuerzo admisible o de diseño.

Al revisar los resultados obtenidos en esta investigación, con la norma E.010, se ve la importancia de seguir investigando con diferentes especies que se encuentran en nuestro país con el nuevo método de Punzonamiento ya que se puede conseguir valores reales del esfuerzo de diseño al corte paralelo a la fibra.

2. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Planteamiento del problema

Las estructuras de madera son ampliamente usadas en el campo de la ingeniería civil, debido principalmente a la disponibilidad de madera en muchas regiones de nuestro territorio, y a la simplicidad de las herramientas y procesos empleados con este propósito.

El buen desempeño de la madera, como material de construcción, requiere de conocimiento sobre sus propiedades físicas y mecánicas. Existe disponibilidad de variados tipos en el mercado, con propiedades muy distintas, que permiten distintos ámbitos de aplicación. Las propiedades físicas y mecánicas para aplicaciones en la industria de la construcción han sido normadas en la ASTM D 143-09/2010, la misma que establece los procedimientos para obtener resistencias mecánicas para diferentes tipos de esfuerzos.

Los esfuerzos admisibles de corte paralelo a la fibra de madera, usados oficialmente en el Perú, son los que se encuentran en la Norma E.010, los cuales se determinan mediante lo estipulado en la norma ASTM D 143-09/2010, ensayo que es similar a una guillotina, la misma que aplica una fuerza de compresión sobre la porción cortada a media madera de la probeta estándar, que queda en voladizo, con la base del dispositivo de ensayo, con el fin de provocar un esfuerzo de corte paralelo al grano, sobre una sección resistente correspondiente. En investigaciones últimas se han observado algunas deficiencias durante este ensayo, como por ejemplo momentos torsores, los mismos que generan distorsiones en el valor del verdadero

esfuerzo de cizallamiento, que han sido estudiadas y analizadas por medio de propuestas de nuevas metodologías, para disminuir posibles divergencias. Con los antecedentes descritos en la presente investigación se propone un **método diferente al usado hasta la fecha**, para determinar la resistencia al corte paralelo a la fibra de la madera *Pinus radiata*, por medio de la aplicación de un esfuerzo compresional por Punzonamiento, adaptación del método usado por Acharya y Ray (2013) para materiales metálicos.

Después de determinado el esfuerzo por corte paralelo a la fibra mediante el método por Punzonamiento se va comparar con el valor del mismo tipo de esfuerzo, determinado por el método de la norma ASTM-D 143-09/2010. Los resultados del presente trabajo ambicionan ser útiles en el diseño estructural de diversos elementos de estructuras de madera, en Cajamarca.

2.2. Formulación del problema.

La investigación materia del presente estudio se puede sintetizar con la siguiente interrogante:

¿Cuál es la diferencia de la resistencia al corte paralelo a la fibra, del *Pinus radiata* de Cajamarca, obtenida por el método de Punzonamiento y el método de la norma ASTM D 143-09/2010?

2.3. Justificación de la investigación

El método de Punzonamiento aplicado, busca eliminar los efectos no deseados (fisuras por el aplastamiento por comprensión de la madera, excentricidades generando momentos y deformaciones angulares imposibles de cuantificar por métodos instrumentales con que se cuentan), y determinar el valor real de la resistencia a corte paralelo a la fibra de la madera *pinus radiata*, siguiendo el

razonamiento de Liy (1983), Gupta y Sihna (2011); y Hara (2011). El método propuesto es una adaptación del usado por Acharya y Ray (2013) para materiales metálicos. Se justifica la elección de ésta especie, debido a su comercialización y porque viene reemplazando poco a poco a las especies arbóreas nativas y endémicas de la biodiversidad de la flora peruana.

La presente investigación también se justifica porque propone un nuevo método para determinar la resistencia al corte paralelo a la fibra de la madera pino radiata. La información que generará la presente investigación provee ventajas sobre otros métodos, tales como:

- Fácil preparación del espécimen de prueba, para su análisis.
- La disposición, para la prueba de corte paralela a la fibra de la madera, es más simple.
- Simple reproducción del método.

2.4. Alcances de la investigación

Al realizar el presente estudio se pretende, brindar un aporte al conocimiento integral de la madera estructural, proponiendo el nuevo Método de Punzonamiento para determinar la resistencia al corte paralelo a la fibra de la madera *Pinus radiata*, madera elegida por ser la que abunda en el mercado de Cajamarca y su relación con el método de la norma ASTM-D 143-09/2010.

Los resultados obtenidos servirán para los diseñadores de estructuras de madera y servirá también como fuente bibliográfica para trabajos de investigación de naturaleza similar, y también para estudiantes de ingeniería

civil así como a profesionales comprometidos con el campo de la industria de la construcción.

2.5. Delimitaciones de la investigación

- La investigación se limitará a evaluar solamente la resistencia al corte paralelo a la fibra de la madera pinus radiata, sin embargo es aplicable para determinar dicha propiedad mecánica de otras variedades forestales y según se requiera con mayor número de muestras.
- Para realizar el método de punzonamiento se tiene que diseñar y acondicionar algunos accesorios metálicos, a la Maquina Universal del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Cajamarca (dos piezas: macho y hembra).
- Elaboración y acondicionamiento de probetas estándar.

2.6. Limitaciones.

- La única limitante en la ejecución de la presente investigación el lapso del tiempo.

2.7. Objetivos de la investigación

a) Objetivo General

Evaluar la resistencia al corte, paralelo a la fibra, de la madera Pinus radiata, determinado por el método de Punzonamiento y el método de la norma ASTM D 143-09/2010.

b) Objetivos Específicos:

- Determinar las propiedades físicas de la madera: contenido de humedad, y densidad básica.

- Determinar la resistencia al corte paralelo a la fibra mediante el método ASTM D 143-09/2010.
- Determinar la resistencia al corte paralelo a la fibra mediante el método del Punzonamiento.

2.8. Hipótesis y Variables

2.8.1. Hipótesis

La resistencia al corte paralelo a la fibra del *Pinus radiata*, obtenida por el método de Punzonamiento es mayor en un 15%, que la misma resistencia mecánica, obtenida por la norma ASTM D 143-09/2010.

2.8.2. Variables

Variable Dependiente:

- Resistencia al corte por el Método de la norma ASTM D 143-09/2010.
- Resistencia al corte por el Método de Punzonamiento.

Variable Independiente:

- Contenido de Humedad.
- Densidad Básica.
- Dirección de la fibra
- Edad de la madera

2.9. Diseño Metodológico

2.9.1. Tipo de investigación según distintos criterios

Criterio	Tipo de investigación
Finalidad	Aplicada
Estrategia o enfoque teórico metodológico	Cuantitativa
Objetivos (alcances)	Explicativa

Fuente de datos	Primaria
Control en el diseño de la prueba	Experimental
Temporalidad	Transversal (sincrónica)
Contexto donde sucede	Laboratorio
Intervención disciplinaria	Unidisciplinaria.

2.9.2. Descripción del Diseño

Se ha realizado la descripción de las características, propiedades físico - mecánicas de la madera (contenido de humedad, densidad, contracción, compresión, tracción, flexión, corte o cizalla) y su influencia de éstos en el comportamiento resistente de la madera estudiada.

Se realizaron ensayos para determinar la resistencia al corte paralelo a la fibra por el método de la norma ASTM D 143-09/2010 y por el método propuesto Punzonamiento, además de las propiedades físicas de la madera Pinus Radiata.

Se ha sistematizado los resultados y discutido los resultados obtenidos.

Finalmente se han arribado a las conclusiones y recomendaciones.

2.9.3. Población

Se consideró como población a muestrear las plantaciones de Pinus Radiata de Granja Porcón, la cual se encuentra ubicada a 30 km al norte de la ciudad de Cajamarca (Perú) a una altitud de 3000-3850 m.s.n.m, constituido por 8,137 hectáreas de plantaciones de pinus radiata, ESAN (2008).

2.9.4. Muestra

Las muestras fueron seleccionadas al azar, en un número de 60 especímenes, para determinar la resistencia al corte paralelo a la fibra por los siguientes métodos:

- Resistencia al corte paralelo a la fibra por el método de la norma ASTM D-143-09/2010.
- Resistencia al corte paralelo a la fibra por el método Punzonamiento.

2.9.5. Unidad de análisis.

Cada espécimen de prueba.

2.9.6. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Se tomaran los datos de resistencia al corte paralelo a la fibra del pino radiata, por el método de Punzonamiento, para comparar las mismas resistencias con los datos obtenidos por el método de la norma ASTM D-143-09/2010.

Tabla 1. Fuentes, Técnicas e Instrumentos para la recolección de los datos de cada variable

Variables	Descripción Conceptual	Recolección de Datos		
		Fuente	Técnica	Instrumento
Esfuerzo al corte paralelo a la fibra de la madera Pinus Radiata, por medio del método de Punzonamiento	Se empleó un espécimen de prueba de 75x75x20mm, sobre la cual se aplicó una carga a través de la pieza metálica macho que tiene un diámetro de punzonamiento de 40 mm y una distancia de 3 mm entre ésta y la pieza hembra. El área comprimida es de 2513.21 mm ² , con la carga de rotura y el área comprimida se calculó el esfuerzo de rotura en (kg/cm ²)	Datos estadísticos de los ensayos realizados en el laboratorio de materiales de EAPIC	Análisis experimental	Máquina de prueba universal, marca AMSLER, del laboratorio de materiales de la EAPIC
Esfuerzo al corte paralelo a la fibra de la madera Pinus Radiata, por medio del método de la norma ASTM D 143-09/2010	Se empleó un espécimen de prueba prismático rectangular de forma cúbica con las dimensiones de la norma NBR 7190/1997, sobre la cual se aplica la carga de la guillotina de un espesor de 1/2". El área de corte del espécimen de prueba estándar es de 2500 mm ² , con la carga de rotura y el área comprimida se calculó el esfuerzo de rotura en (kg/cm ²)	Datos estadísticos de los ensayos realizados en el laboratorio de materiales de EAPIC	Análisis experimental	Guillotina
Propiedades físicas de la madera	Contenido de Humedad Densidad Básica Dirección de la fibra Edad de la madera	Datos estadísticos de los ensayos realizados en el laboratorio de materiales de EAPIC	Análisis experimental	Estufa Vernier Balanza Vaso de Precipitación Plumon tinta indeleble Tornillo

2.9.7. Análisis de datos

En la investigación, se realizó un análisis cuantitativo y cualitativo, llegando a hacer un análisis ligado a la hipótesis, es decir llegar a hacer la comparación de las resistencias al corte paralelo a la fibra de madera por el método de punzonamiento propuesto y el método de la norma ASTM D 143-09/2010 para llegar a una sola conclusión, saber que método tiene mayor resistencia en relación a sus propiedades físicas.

CAPITULO II. MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES

El interés en determinar las propiedades mecánicas de la madera se justifica debido a que, en la mayoría de las situaciones de empleo de ésta, las tensiones son controladas y deben ser conocidas, con el fin de permitir la correcta dimensión de variados elementos que conforman el conjunto estructural, como un todo.

- **Antecedentes Internacionales**

LIY (1983) estudiaron nuevos métodos para la prueba de resistencia de corte en la madera. Estos autores estimaron que el método de la norma ASTM D143-09(2010) no alcanzaba un corte puro.

Mendes (1984) observaron que todos los especímenes se rompían en el área reducida, y sólo debido a la fuerza de corte paralela a la fibra. También observaron que la fisura en la región debilitada del espécimen de prueba, no se debía a un corte puro, sino que presenta una combinación de resistencias de corte y de tensión.

En el modelo propuesto por la Norma Brasileña NBR 7190(1997), se aplica la carga al espécimen de prueba, a través de una placa metálica llamada cuchillo, que posee un grosor de $\frac{1}{2}$ ", el cual cuando está en contacto con el espécimen de prueba, le transfiere toda la tensión por compresión. El espécimen de prueba, sugerido por la norma, es un prisma rectangular, de forma cúbica. Se debe observar que los especímenes son similares a los propuestos por la norma ASTM D143-09 (2010) en la cual se produce una excentricidad, un

momento provocado por fuerzas binarias (compresión y tracción), causando rotación que ocurre en la prueba de corte.

Se puede tomar el método de Santos Neto (1999), que propone la modificación del espécimen de prueba. En esta propuesta, el espécimen de prueba de bajo grosor, 20mm, opera en tres fisuras, con el fin de obtener dos planos, cuyo objetivo es que las tensiones de corte aparezcan fácilmente. Para calcular las resistencias de corte, se considera la carga aplicada, así como el área del espécimen en donde se genera la rotura, por corte paralelo al grano.

En otro artículo, Gupta y Sinha (2011) concluyeron que este método de la norma ASTM D143-09 induce a un momento, que resta valor a las medidas de las pruebas de corte puro.

- **Antecedentes nacionales**

En el Perú, así como en los países del denominado Grupo Andino, se han realizado investigaciones para determinar los valores más representativos de 20 especies maderables que abundan en la región, dentro de estas propiedades se encuentra la determinación del esfuerzo al corte paralelo al grano o fibra, que se ha determinado mediante el método propuesto por la norma ASTM- D-143-09 (2010), que aparecen en la fuente bibliográfica más importante en nuestra región llamado: Manual de Diseño de Estructuras de Madera, del Grupo Andino, (Lima Perú-2010).

Sin embargo este método presenta algunas anomalías que se tratan de enmendar o mejorar con el método propuesto denominado: Método para determinar el esfuerzo de corte paralelo a la fibra, mediante Punzonamiento.

- **Antecedentes a nivel local:**

En la Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil, se han realizado algunos estudios de la madera estructural como “Estudio tecnológico de la madera del eucalipto en Cajamarca con fines estructurales”. Ponencia presentada en el I Congreso Nacional del Eucalipto, organizado por la Facultad de Ciencias forestales y del Ambiente de la UNCP publicado en el libro I CONAE(M. en I. Héctor Perez-2001), estudio en el que se concluyó que la madera del Eucalipto procedente de árboles que se han desarrollado en el valle, presenta mejores propiedades que la madera provenientes de árboles de Eucalipto , provenientes de ladera, ello indudablemente se debe a las mejores condiciones de crecimiento, suelos más ricos en nutrientes , clima, temperado, menor altitud, vientos de menor velocidad, terreno con menos pendiente, etc; cuyas propiedades mecánicas también han sido determinadas por el método de la norma ASTM D 143-09/2010.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. ESTRUCTURA Y CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS DE LA MADERA.

- **La Madera**

La madera es un material orgánico, formado de tejido leñoso pertenecientes a la división de fanerógamas, que se subdivide en angiospermas y gimnospermas. Material durable y ligero, utilizado con fines estructurales en construcciones diversas. La madera es un material higroscópico, absorbe o entrega agua según sean las condiciones de temperatura y humedad relativa

del ambiente que la rodea y también tienen propiedades físicas y mecánicas de acuerdo con la orientación espacial (Ortotropía). (Ferreira Martins & Sons, 2008).

La madera proviene de los árboles. Esto es lo más importante a tener presente para entender su naturaleza. El origen de las cualidades o defectos que posee pueden determinarse a partir del árbol de donde proviene. La madera tiene una compleja estructura natural, diseñada para servir a las necesidades funcionales de un árbol en vida, más que ser un material diseñado para satisfacer necesidades de constructores.



Figura 01: Rodela de Secuoya de dos mil años. Se encuentra en Forintek, Vancouver, British Columbia, Canadá.

Fuente CORMA

El conocimiento sobre la naturaleza de la madera, características y comportamiento, es necesario para establecer y efectuar un buen uso de este material. En este aspecto radica la importancia de que exista información adecuada y estructurada a los actuales requerimientos, ya que permite a los profesionales que intervienen en el diseño, cálculo y ejecución de construcciones en madera, realizar una acertada gestión y correcta utilización

del material, con el objeto de cumplir altos estándares de calidad y bienestar, a precios convenientes en el mercado de la vivienda.

- **Estructura de la Madera**

El árbol está compuesto por tronco, copa y raíces. Del tronco se obtiene materia prima para la producción de madera aserrada, perfiles y tableros contrachapados o contraplacadas; etc. y de la copa (ramas), tableros de hebras orientadas.

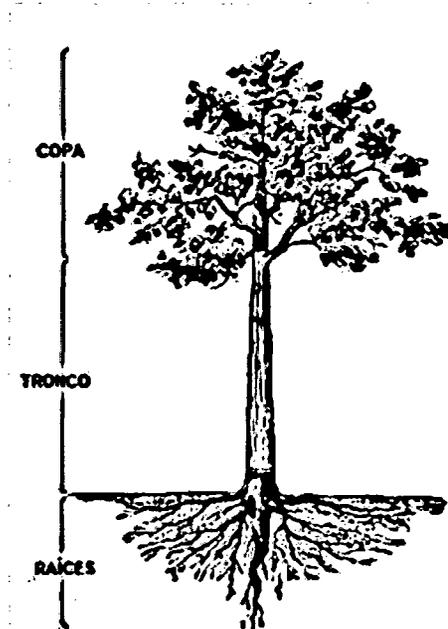


Figura 02: Secciones de un árbol: copa, tronco y raíces.

Fuente: Proyecto CORFO-FONTEC (2003)

Al hacer un corte transversal de un árbol y analizar desde el exterior hacia el interior una sección de éste, se pueden apreciar zonas claramente diferenciadas, las cuales cumplen funciones específicas:

- ✓ La primera zona apreciable es la **corteza**, formada por materia muerta, de aspecto resquebrajado, que se divide en corteza exterior y corteza interior (floema).

La corteza exterior está compuesta por células muertas que cumplen la función de proteger la estructura interior frente a agentes climáticos y biológicos.

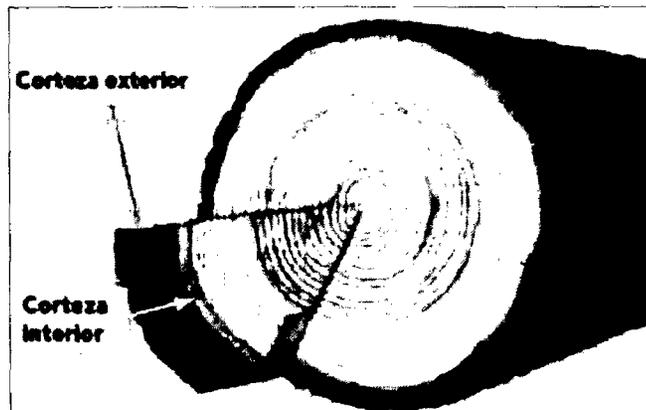


Figura 03: Sección transversal de un tronco en que se muestra la corteza exterior y la corteza interior o floema. Fuente: CORMA

- ✓ Siguiendo hacia dentro se encuentra la corteza interior, compuesta por células que trasladan savia elaborada.

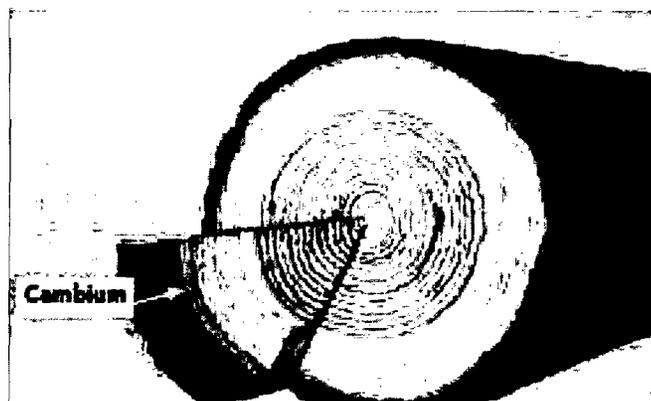


Figura 04: En la sección transversal del tronco se muestra el cambium o cambio, que se encuentra adyacente al xilema y hacia la corteza. Fuente: CORMA.

- ✓ Luego se presenta el **cambium o cambio**, zona que corresponde al tejido generador de células, es decir, donde se produce el crecimiento del árbol. Hacia el interior forma el **xilema** y hacia el exterior, forma el **floema**.

- ✓ En el **xilema** podemos distinguir la **albura** hacia el exterior, con células que cumplen la función de sostén y traslado de agua y nutrientes.

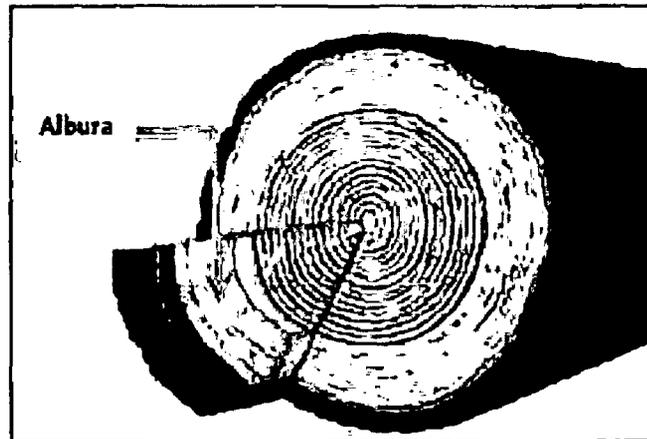


Figura 05: La zona al interior del cambium es la albura.

Fuente: CORMA

- ✓ Hacia el interior del xilema se forma el **duramen**, compuesto por células inactivas, pero que mantienen la función de sostén.

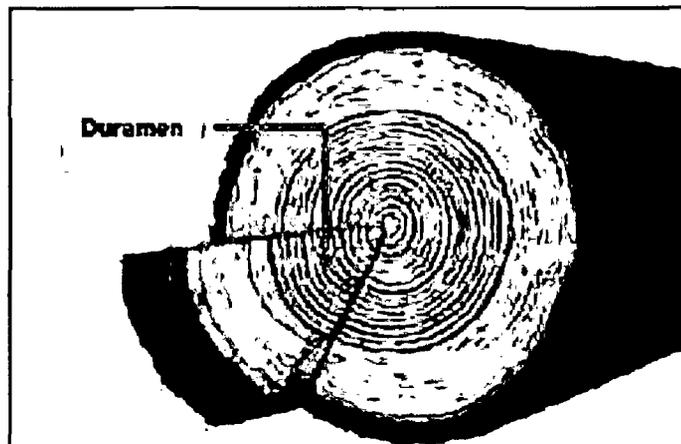


Figura 06: Al interior de la albura se encuentra el duramen.

Fuente: CORMA

- ✓ En el centro del árbol se encuentra la **médula**, tejido inactivo sin función específica.

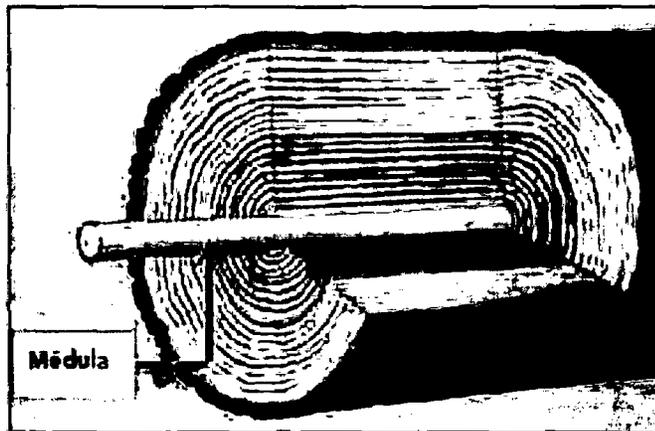


Figura 07: En el centro se ubica la médula.

Fuente: CORMA.

Otra de las características relevantes del árbol en su sección transversal son los denominados anillos de crecimiento (concéntricos), los cuales son apreciables a simple vista, dependiendo de la especie.

Las especies madereras, se clasifican en dos grandes grupos: **coníferas y latifoliadas.**

En las coníferas, los anillos de crecimiento son perfectamente diferenciables, mientras que en las segundas, no son tan apreciables.

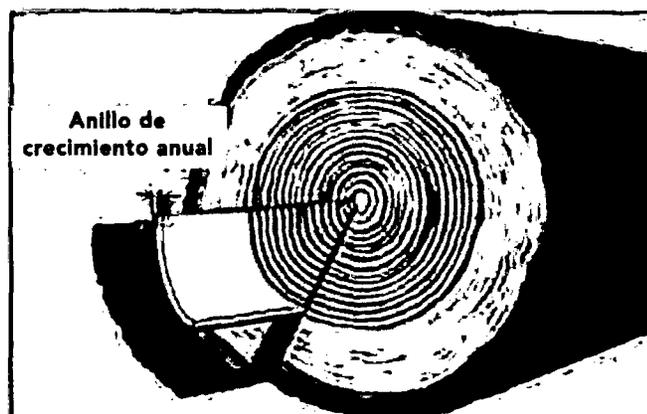


Figura 08: Anillo de crecimiento anual. Fuente: CORMA.

En las coníferas se pueden apreciar dos bandas concéntricas, diferenciadas en los anillos de crecimiento.

La banda más clara es denominada madera de primavera o temprana. La banda más oscura, más densa que la de primavera, es la madera de verano o tardía. En esta última, al llegar el receso invernal puede observarse la reducción de su crecimiento.

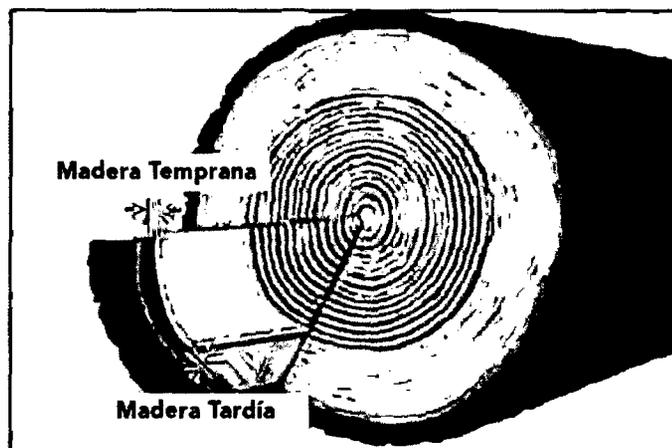


Figura 09: Madera de Primavera o temprana y madera de verano o tardía. Fuente: CORMA.

Al realizar una ampliación del anillo de crecimiento, podemos identificar la madera temprana, formada por células de mayor tamaño y la madera tardía, compuesta por células más concentradas.

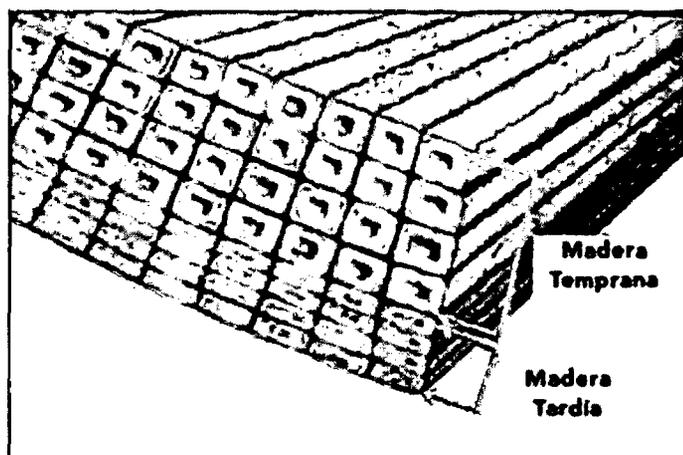


Figura 10. Ampliación del anillo de crecimiento Fuente: CORMA.

Las células en coníferas pueden medir de 3 a 5 milímetros de largo, dependiendo de la especie. En el caso de latifoliadas, el largo puede llegar a 1mm.



Figura 11. Dimensión de las células en coníferas y latifoliadas

- **Naturaleza, Características del Pinus Radiata.**

- **Nombre Científico**

La madera proviene de árboles que se pueden clasificar botánicamente, asignando un nombre científico a la especie cuya madera es de nuestro interés. Esto permite evitar la confusión que surge del uso y abuso de los nombres comunes. Un nombre científico de una especie posee dos palabras. La primera describe el **Género** al que pertenece, mientras que la otra denota la **especie** en sí. El conjunto de Géneros relacionados botánicamente entre sí constituye una **Familia**. Estas palabras identifican una especie y ellas pertenecen al latín. Ejemplo: El género PINUS generalmente poseen fibra larga. Sin embargo, esto no es absoluto. El punto quizás más importante es que el nombre científico es el mismo en todos los países y es único.

En la Tabla 2.se incluyen algunas especies madereras comerciales, de uso corriente en la construcción o susceptibles de serlo, con sus nombres científicos y comunes.

Tabla 2. Nombre Científico de Especies Exóticas

GENERO	ESPECIE	FAMILIA	NOMBRE COMUN
Pinus	Radiata D.DON	Pinaceae	Pino insigne.Pino Radiata
Eucaliptus	Globulus LABILL	Myrtacease	Eucalipto

Identificación General del Recurso Forestal

La madera es producto de un proceso metabólico en un organismo vivo (árbol), que crece en la naturaleza en condiciones climáticas, geográficas y de suelos muy diversos. Ésta diversidad afecta el crecimiento y las características de la madera en relación con su estructura celular.

Al analizar una probeta en microscopio se observa la madera igual a cualquier ser vivo, conformada por células generalmente alargadas y dispuestas en la dirección del eje del árbol, pudiendo cumplir esencialmente 2 funciones: sostén del propio árbol y conductora de savia. Por esto a nivel de estructura celular la especie Pinus Radiata pertenece al grupo de árboles de las coníferas (CORMA).

- **Coníferas.**

La madera de coníferas está constituida esencialmente por células de características homogéneas, del grupo traqueidas, las cuales realizan la doble función de sostén del árbol y conducción de la savia. (NCh 173 Madera-Terminología General).

Según el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino, la Junta del Acuerdo de Cartagena, indica las siguientes características de las coníferas:

Son árboles con el tronco generalmente recto, cónico hasta su ápice y revestido por las ramas cuya madera es homogénea constituida por células que se agrupan en bandas concéntricas las cuales conforman los anillos de crecimiento, las hojas son resistentes y generalmente verdes durante todo el año, son de consistencia dura y en forma de aguja, a estos árboles se les conoce como resinosos porque sus hojas y tallo segregan resina, los órganos reproductores de las coníferas están constituidos por pseudo flores, que son elementos escamosos reunidos en conjuntos a modo de espigas coloreadas, los frutos contienen las semillas y tienen la forma de cono.

Según la norma E.010 de RNE la especie *Pinus Radiata* corresponde al grupo C, con una densidad básica 0.40 a 0.55 g/cm³, como se muestra en el ítem 5.2.1 y un Esfuerzo Admisible al corte paralelo 0.8MPa(8 kg/cm²), como se muestra en el ítem 5.2.3.

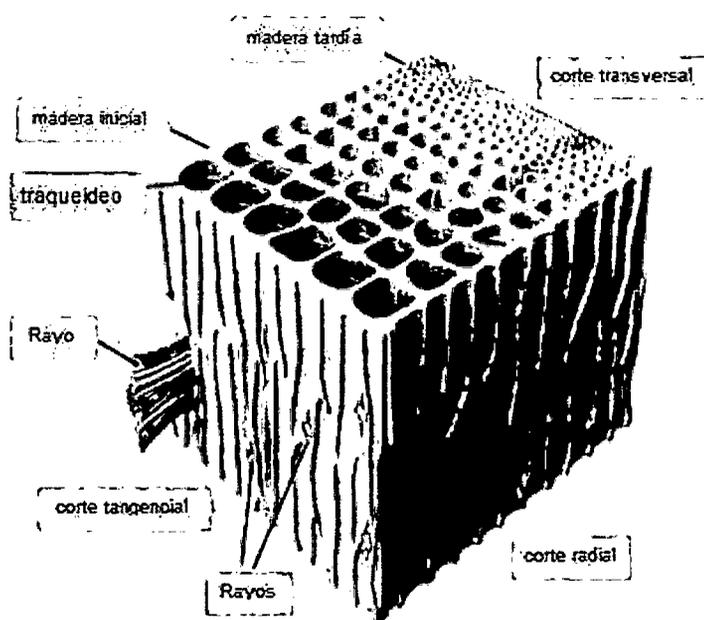


Figura 12: Estructura anatómica de una conífera. Fuente: Gonzaga (2006)

- **Distribución Geográfica**

Especie originaria de Monterrey, región ubicada dentro de las costas Californianas, en los Estados Unidos. Fuera de su distribución natural ha sido plantada con buenos resultados en Victoria (Canadá), Brasil, Uruguay, Argentina, Perú, Ecuador, Bolivia, Australia, Nueva Zelanda, Inglaterra y España.

- **Aspectos sobresalientes del árbol.**

Es un árbol elevado que llega fácilmente a los 30m, si bien su altura media se puede cifrar en los 20m., alcanza una altura hasta de 60 m. y más de 1 m. de diámetro. Tronco cónico, recto, con un sistema reticular potente, con raíces laterales bien desarrolladas y muy extendidas. La corteza interna de color crema rosácea, segrega una resina transparente. Presenta flores en forma de conos y agrupadas. El fruto es un cono leñoso, grande parecido a una piña. Crece en las formaciones vegetales bosque húmedo o muy húmedo montano bajo (bmh-MB).

- **Características externas de la madera.**

La madera de albura es de color blanco amarillento, se oscurece con la luz de forma relativamente rápida, y el duramen tiene color pardo amarillento o pardo marrón. La madera de albura está poco o medianamente diferenciada. Los anillos de crecimiento son visibles y tienen un gran espesor(de 1 a 5 por centímetro).La fibra es recta. El grano varía de fino a medio.

La madera está clasificada según la norma(UNE-EN 350-2,1995), como poco durable o no durable frente a la acción de los hongos y sensible a los cerambícidos, a los anóbidos y a las termitas. La madera de duramen no es

impregnable y la albura varía de medianamente impregnable a poco impregnable.

- **Secado.**

Seca fácil y lentamente al aire libre presentando deformaciones leves. Se recomienda como horario de secado, el programa K del Reino Unido y el M de la junta del acuerdo de Cartagena.

Según el PADT-REFORT/JUNAC(1984) (Junta de Cartagena) en el "Manual De Diseño Para Maderas Del Grupo Andino"; los resultados de secado al aire se expresan en función del tiempo de secado hasta que el contenido de humedad final sea de 20%. Se distinguen especies de secado muy rápido (MR), rápido R, moderado (M) y lento (L).

- **Durabilidad Natural**

Es poco resistente al ataque de hongos e insectos. Posee una duración en uso exterior menor a 5 años.

Sin embargo la madera preservada, alcanza a tener una vida útil entre los 30 y 50 años, comportándose similarmente a muchos materiales usados en la construcción.

- **Preservación**

Este tipo de madera es muy fácil de preservar mediante los sistemas de: vacío-presión o inmersión total y mediante el método de Boucherie. (Mediante la preservación se genera un efecto barrera para el no ataque de insectos, hongos, bacterias y otros agentes degradantes de este material, aumentando de esta manera su vida útil).

- **Trabajabilidad.**

Es fácil de trabajar con herramientas manuales y en las diferentes operaciones de maquinado.

*** (Manual: La Construcción de Viviendas en Maderas. Por: Corporación Chilena de la Madera. CORMA).**

- **Propiedades de la Madera**

La madera elaborada a través de un proceso de aserrío se denomina pieza de madera y posee propiedades definidas.

La madera de *Pinus radiata* puede tener los siguientes usos: Construcción pesada, postes de transmisión, postes de cerco y estacas, estructura para construcción de: puentes, vigas, techos, cerchas, pisos, revestimientos exteriores, revestimientos interiores, muebles, encofrados, chapas, contrachapados, pulpa para fábrica de papel (celulosa), tableros de fibra, tableros de partículas. Como madera preservada los usos se amplían enormemente.

- **Propiedades Básicas**

CORMA Independientemente de la especie, la madera es un material biológico, anisotrópico e higroscópico (CORMA).

Es un material biológico, ya que está compuesto principalmente por moléculas de celulosa, hemicelulosa y lignina principalmente. Siendo la madera un producto biológico, es biodegradada por el ataque de hongos e insectos taladradores, como son las termitas.

Por ello, a diferencia de otros materiales inorgánicos (ladrillo, acero y hormigón, entre otros), la madera debe tener una serie de consideraciones de orden técnico que garanticen su durabilidad en el tiempo (preservación).

La madera es un material anisotrópico. Según sea el plano o dirección que se considere respecto a la dirección longitudinal de sus fibras y anillos de crecimiento, el comportamiento tanto físico como mecánico del material, presenta resultados dispares y diferenciados. Para tener una idea de cómo se comporta, la madera resiste entre 20 y 200 veces más en el sentido del eje del árbol, que en el sentido transversal.

Debido a este comportamiento estructural tan desigual, se ha hecho necesario establecer, tres ejes principales:

- ✓ Eje tangencial
- ✓ Eje radial y
- ✓ Eje axial o longitudinal.

El eje tangencial, como su nombre lo indica, es tangente a los anillos de crecimiento y perpendicular al eje longitudinal de la pieza.

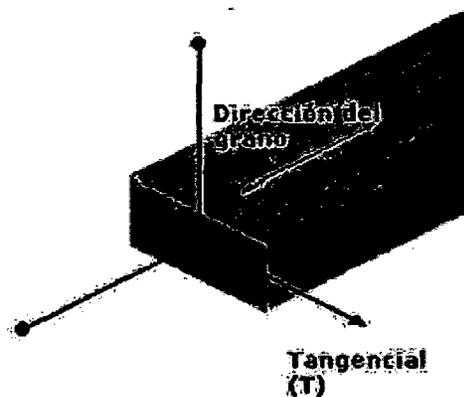


Figura 13: Eje tangencial en una pieza de madera. Fuente: CORMA

El eje radial; es perpendicular a los anillos de crecimiento y al eje longitudinal.

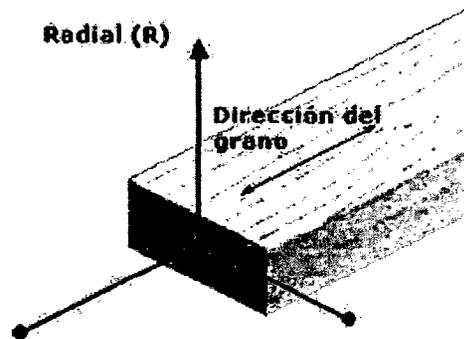


Figura 14: Eje radial en una pieza de madera. Fuente: CORMA

El eje longitudinal es paralelo a la dirección de las fibras y por ende, al eje longitudinal del tronco. Forma una perpendicular respecto al plano formado por los ejes tangencial y radial.

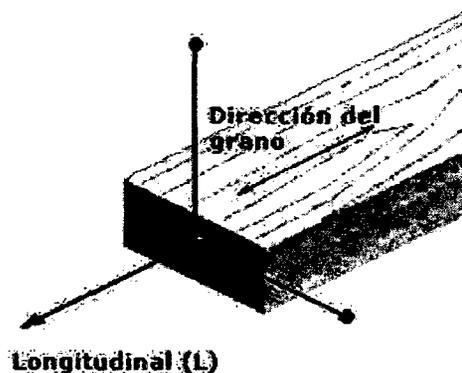


Figura 15: Eje longitudinal en una pieza de madera. Fuente: CORMA

La madera es un material higroscópico. Tiene la capacidad de captar y ceder humedad en su medio, proceso que depende de la temperatura y humedad relativa del ambiente donde se ubica. Este comportamiento es el que determina y provoca cambios dimensionales y deformaciones en la madera.

- **Acondicionamiento de la madera.**

Es necesario utilizar la madera en las mejores condiciones, por lo que se tienen que cumplir con ciertos requisitos, tales como: La edad del árbol (esta normado que la edad mínima para el uso estructural de la madera es de 25 años), diámetro del tronco, tamaño de los defectos: alabeos, encorvaduras, rajaduras, nudos, etc.

Las normas exigen que la madera a emplearse, en especial para uso estructural satisfaga las normas de clasificación visual recomendada por el PADT REFORT/JUNAC, (1984), para de ésta manera garantizar un comportamiento adecuado en el diseño.

2.2.2. PROPIEDADES FÍSICAS

2.2.2.1. Contenido de Humedad

La estructura de la madera almacena una importante cantidad de humedad. Esta se encuentra como agua ligada (savia embebida) en las paredes celulares y como agua libre, en el interior de las cavidades celulares.

Para determinar la humedad en la madera, se establece una relación entre masa de agua contenida en una pieza y masa de la pieza anhidra, expresada en porcentaje. A este cociente se le conoce como **contenido de humedad**, cuya fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$\% \text{ Contenido de Humedad} = \frac{\text{Peso del Agua} \times 100}{\text{Peso de Madera Seca en Horno}} \quad (1)$$

Donde:

$$\text{Peso del Agua} = \text{Peso Madera Húmeda} - \text{Peso Madera Seca en Horno}$$

El agua contenida en el interior de la madera, sea en forma natural o por estar expuesta a condiciones del medio ambiente, puede variar principalmente debido a la humedad y temperatura predominantes en el lugar donde se utiliza. Al cortar un árbol, la madera contiene gran volumen de agua en sus cavidades y paredes celulares, humedad que oscila alrededor del 80%. En algunos casos, puede ser superior al 100%, es decir, el peso del agua contenida en el volumen de madera es superior al peso de ésta anhidra.

Dependiendo de las condiciones ambientales, la madera entrega al medio agua libre contenida en sus cavidades, y luego agua adherida por capilaridad a las paredes celulares.

Cuando el intercambio de humedad que produce el medio ambiente cesa, se dice que la madera ha alcanzado un punto denominado humedad de equilibrio. Se denomina, entonces, humedad de equilibrio al porcentaje de agua que alcanza una madera sometida durante un lapso determinado a condiciones de temperatura y humedad en su medio ambiente.

Los cambios climáticos del aire que se suceden continuamente, día y noche según las estaciones, hacen que la humedad de la madera también cambie, aunque en valores pequeños.

Kollmann (1959) comprobó que la humedad de equilibrio es casi constante para todas las maderas, y elaboró un ábaco para determinar este valor. O sea,

cuando la madera es sometida a un ambiente saturado de humedad (100% de humedad relativa del aire), la humedad de equilibrio es casi constante para todas las maderas, alcanzando un valor máximo de 30%.

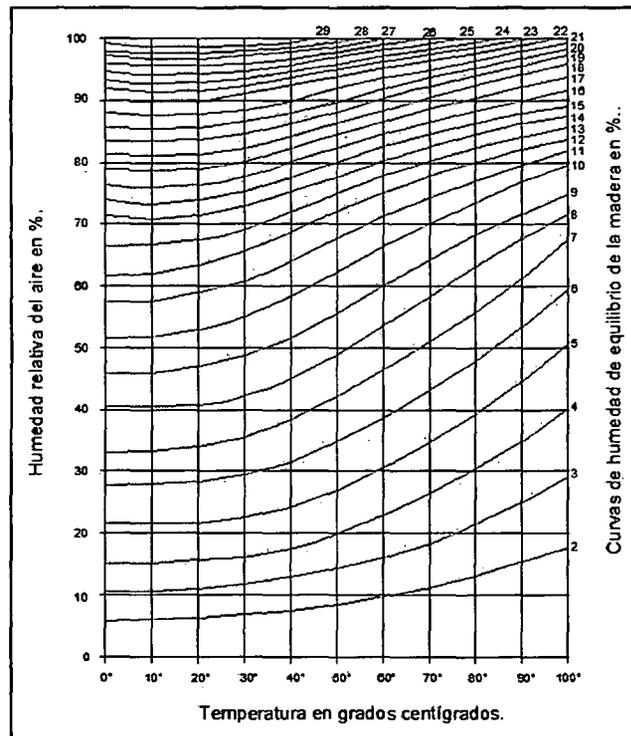


Figura 16: Curvas de humedad de equilibrio de madera. Fuente:

CORMA.

Dicha condición se produce en casi todas las especies cuando el agua libre ha sido entregada al ambiente, permaneciendo con agua sólo las paredes celulares. A este punto de humedad se le denomina punto de saturación de la fibra (PSF)

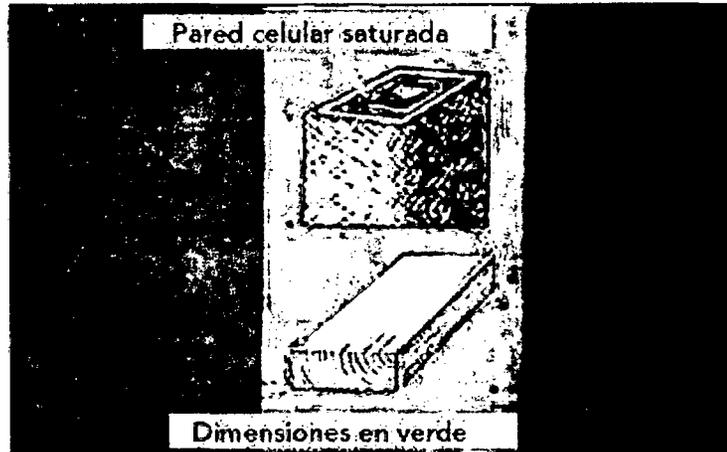


Figura 17: Punto de Saturación de la fibra, PSF. Fuente: CORMA

Desde este punto porcentual y sobre él, la madera tiene las dimensiones de la madera verde.

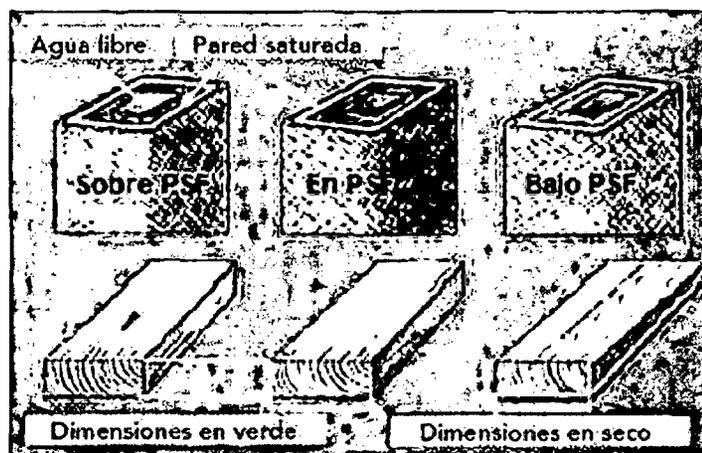


Figura 18: Madera sobre el PSF. Presencia de agua libre y agua ligada. Fuente: CORMA

Cuando la madera tiene un contenido de humedad bajo (el punto de saturación de las fibras es menor al 30%), se habla de madera seca. Sin embargo, para ser utilizada como material de construcción, y específicamente con fines estructurales, el contenido de humedad debe ser inferior al 15%.

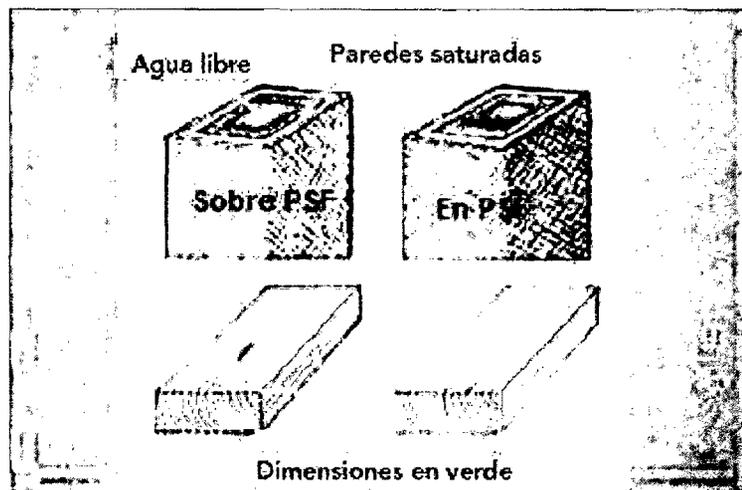


Figura 19: Madera seca. La contracción se inicia. Fuente: CORMA.

La Norma Chilena de Cálculo de Construcciones en Madera (NCh 1198) define como *madera en estado verde* aquella cuyo contenido de humedad es superior al 30 % y como *madera seca* aquella cuyo contenido de humedad no es superior al 20 %. En general no se recomienda el uso, con fines estructurales, de piezas de madera cuyo contenido de humedad esté comprendido entre 20 y 30 %. Por otra parte, es deseable que la madera destinada a la construcción tenga un contenido de humedad similar a la humedad de equilibrio del lugar en que ella preste servicio.

El rango de humedad en la madera puede variar entre un 40 % - 400 %. Esto se da generalmente en especies de crecimiento rápido, por lo tanto de muy baja densidad, lo que implica paredes celulares delgadas y lúmenes o cavidades celulares muy anchas.

2.2.2.2. Densidad de la madera.

Como se sabe, la densidad de un cuerpo es el cociente entre la masa y el volumen. Sin embargo para la fuente bibliográfica del presente estudio esta propiedad física se define como el cociente entre el peso y su volumen.

En la madera, por ser higroscópica, la masa y el volumen varían con el contenido de humedad; por lo que resulta importante expresar la condición bajo la cual se obtiene la densidad. Esta es una de las características físicas más importantes, ya que está directamente relacionada con las propiedades mecánicas y durabilidad de la madera.

Según el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino, se pueden distinguir cuatro densidades para una misma muestra de madera:

a. Densidad Verde (Dv). Es la relación que existe entre el peso verde (Pv) y el volumen verde (Vv), se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$DV = \frac{PV}{VV} \quad (2)$$

Donde:

Dv: Densidad verde.

Pv: Peso de la probeta en estado verde.

Vv: Volumen de la probeta en estado verde.

b. Densidad Seca al Aire (DSA). Es la relación que existe entre el peso seco al aire (PSA) y el volumen seco al Aire (VSA), se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$DSA = \frac{PSA}{VSA} \quad (3)$$

Donde:

DSA: Densidad seca al aire.

PSA: Peso de la probeta seca al aire.

VSA: Volumen de la probeta seca al aire.

c. Densidad Anhidra (DA). Es la relación entre el peso seco al horno (PSH) y el volumen seco al horno (VSH, se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$DA = \frac{PSH}{VSH} \quad (4)$$

Donde:

DA: Densidad anhidra.

PSH: Peso de la probeta seca al horno.

VSH: Volumen de la probeta seca al horno.

d. La Densidad Básica (DB). Es la relación entre el peso seco al horno (PSH) y el volumen verde (VV). Es la menor de las cuatro, sin embargo es la más importante porque nos permite clasificar estructuralmente a la madera estudiada. Se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$DB = \frac{PSH}{VV} \quad (5)$$

Donde:

DB: Densidad básica.

Psh: Peso de la probeta seca al horno.

Vv: Volumen de la probeta en estado verde.

2.2.2.3. Contracción y Expansión de la Madera.

El secado de la madera por debajo del punto de saturación de la fibra, provoca pérdida de agua en las paredes celulares, lo que a su vez produce contracción de la madera. Cuando esto ocurre se dice que la madera "trabaja", (CORMA).

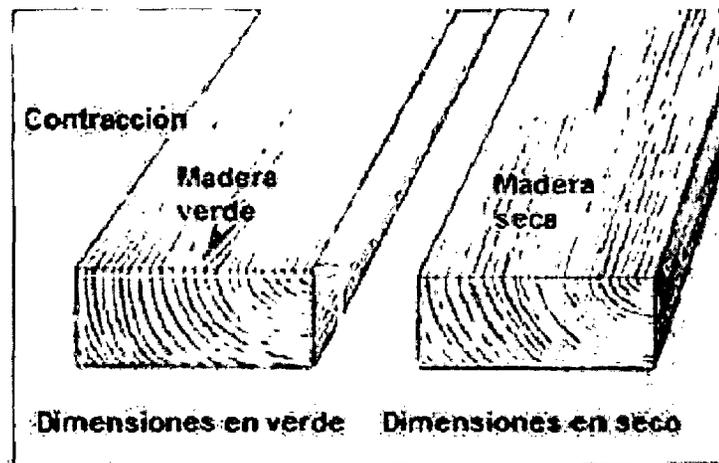


Figura 20: Madera verde y madera seca. Fuente: CORMA.

Las dimensiones de la madera comienzan a disminuir en los tres ejes anteriormente descritos: tangencial, radial y longitudinal. Sin embargo, en este proceso la contracción tangencial es mayor a la que se produce en un árbol.

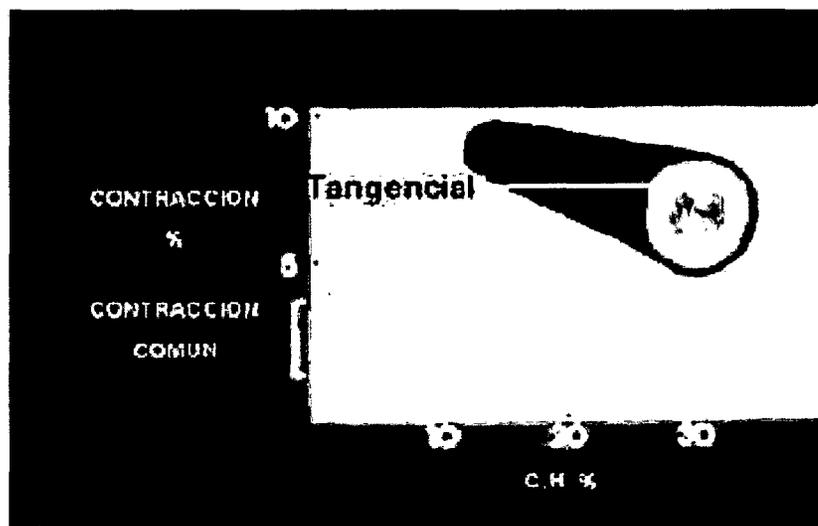


Figura 21: El gráfico muestra la magnitud de la contracción tangencial y el sentido en el tronco. Fuente: CORMA.

A la contracción tangencial le sigue la radial, con menos efecto, pero significativo en la deformación de la pieza

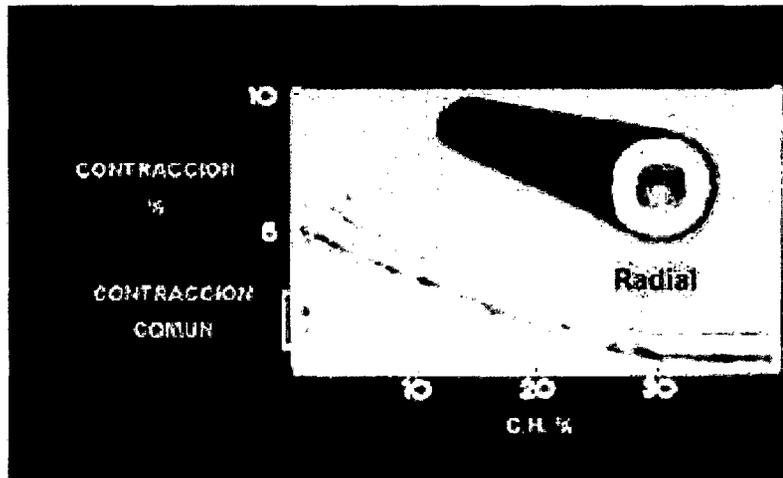


Figura 22: El gráfico muestra la magnitud de la contracción radial y el sentido en el tronco.

Fuente: CORMA.

La contracción longitudinal es prácticamente despreciable en madera utilizada con fines estructurales.

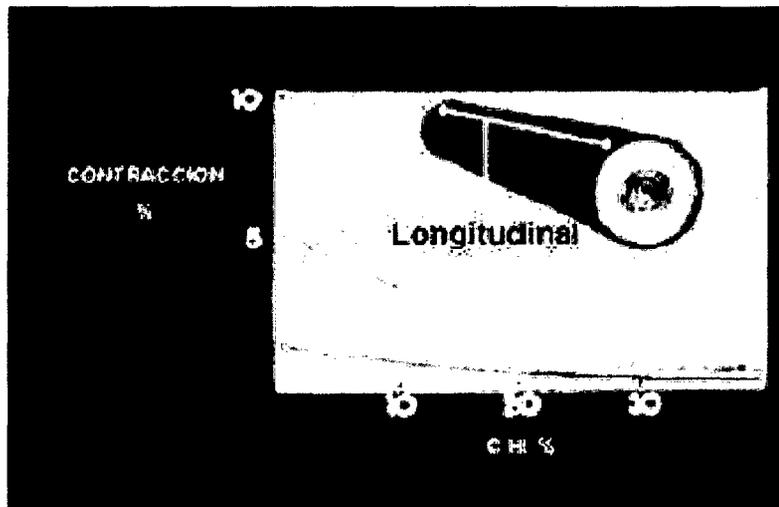


Figura 23: Gráfico que muestra la proporción de la contracción de la madera en su eje longitudinal. Fuente: CORMA.

Desde el punto de vista del comportamiento de la madera, el punto de saturación de la fibra es una variable muy importante, puesto que sobre él, la madera no variará sus características ni su comportamiento físico o mecánico. Sin embargo, cuando la madera se encuentra bajo dicho punto, sufre cambios dimensionales y volumétricos que pueden ir de leves a drásticos. Las consecuencias de dicho proceso en beneficio de las propiedades resistentes de la madera, dependerán de las condiciones y método de secado aplicado (al aire o en cámara).

Tabla 3. Contracción en Pinus Radiata secado al aire y al horno.

Humedad	Dimensión	Contracción (%)
Verde-12%	Tangencial	4,00
	Radial	2,00
	Longitudinal	0.1
	Volumétrica	6,00
Verde -Seco en cámara	Tangencial	7,00
	Radial	3,4
	Longitudinal	0,2
	Volumétrica	10,5

La contracción por secado provoca deformaciones en la madera. Sin embargo con un adecuado método, los efectos son beneficiosos sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

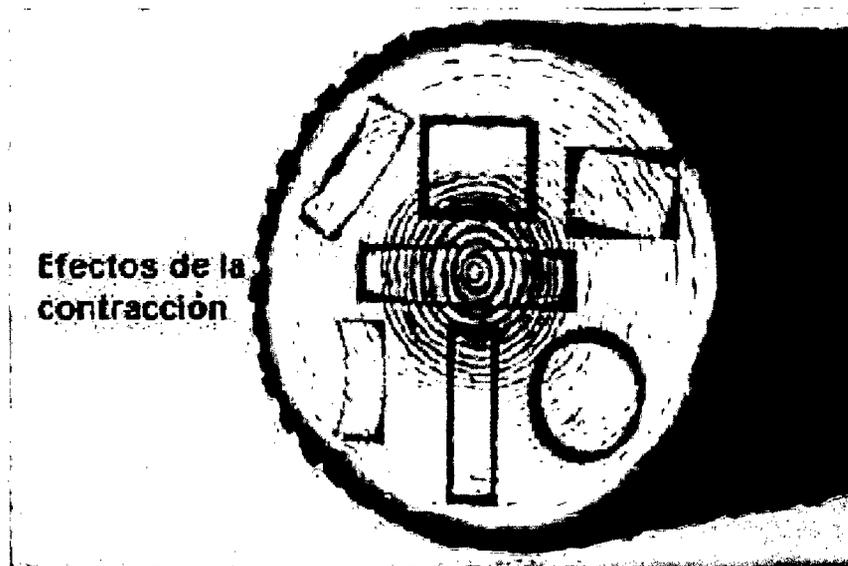


Figura 24: Efectos de la contracción en la madera. Fuente: CORMA.

2.2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS Y ELÁSTICAS DE LA MADERA.

Las propiedades mecánicas y elásticas de la madera determinan la capacidad o aptitud para resistir fuerzas externas o llamadas de diseño.

Se entiende por carga de diseño, cualquier sollicitación que, actuando exteriormente, altere su tamaño, dimensión o la deforme.

El conocimiento de las propiedades mecánicas y elásticas de la madera se obtiene a través de la experimentación, mediante ensayos que se aplican al material, y que determinan los diferentes valores de esfuerzos a los que puede estar sometida.

El esfuerzo que soporta un cuerpo por unidad de superficie es la llamada esfuerzo unitario.

Cuando la carga aplicada a un cuerpo aumenta, se produce una deformación que se incrementa paulatinamente. Esta relación entre la carga aplicada y la deformación que sufre un cuerpo se puede representar gráficamente por una

recta o tramo elástico del material(Figura 25), hasta el punto donde se inicia el tramo plástico del material ensayado. Si se sigue incrementando la carga, se logra la rotura del material.

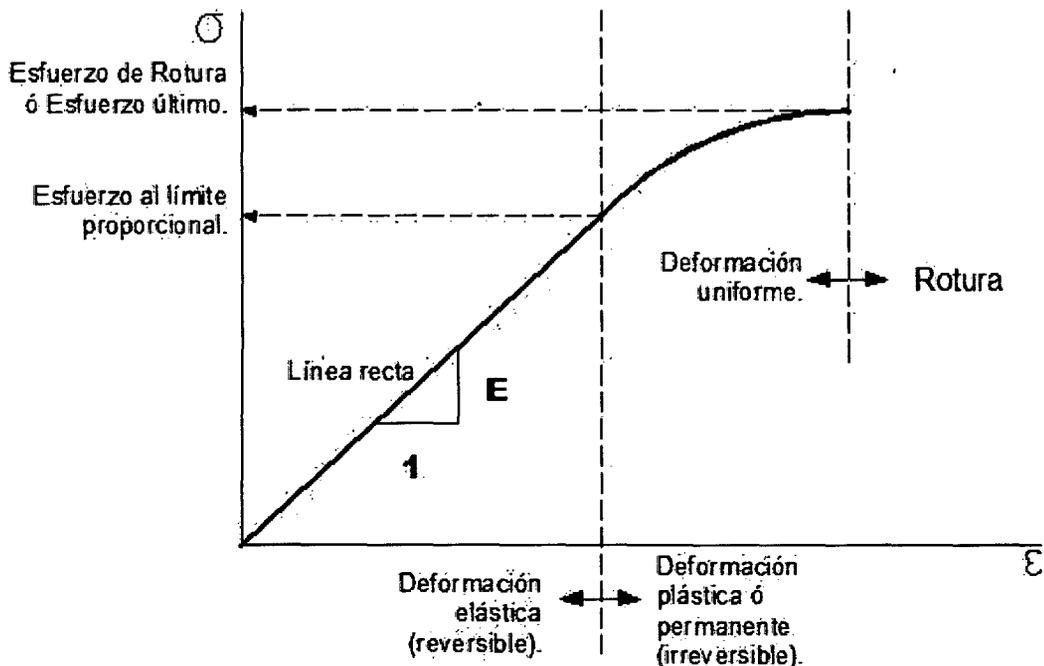


Figura 25: Diagrama Esfuerzo vs. Deformación Unitaria

El límite elástico se define como el esfuerzo por unidad de superficie, en que la deformación comienza a aumentar en mayor proporción que la carga que se aplica.

El esfuerzo necesario para solicitar un material hasta el límite elástico, determina **“El Esfuerzo al Límite Proporcional Elástico”** o también conocido como tensión en el límite de proporcionalidad, que es la carga máxima a que se puede someter sin que se produzcan deformaciones permanentes.

La rigidez de un cuerpo se define como la propiedad que tiene para resistir la deformación al ser solicitado por fuerzas externas. La medida de rigidez de la

madera se conoce como **“Módulo de Elasticidad”** o coeficiente de elasticidad, calculado por la razón entre esfuerzo por unidad de superficie y deformación por unidad de longitud ó *deformación unitaria (manual Corma)*. Complementando lo anterior, la Ley de Hooke se define como la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación lineal en una barra sometida a tracción o compresión simple.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (6)$$

En donde σ es el esfuerzo normal, ε es la deformación lineal y E es una **constante de proporcionalidad llamada módulo de elasticidad del material**. El módulo de elasticidad es la pendiente del diagrama esfuerzo deformación en la región elástica lineal y como la deformación es adimensional, las unidades del módulo de elasticidad son las mismas que las unidades del esfuerzo (**Timoshenko, Resistencia de Materiales, 5º edición**).

En consecuencia de lo anterior y despejando “formula 12” tenemos:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$

Cuando la carga resulta mayor a la del límite elástico, la pieza continúa deformándose hasta llegar a colapsar, obteniendo **“El Esfuerzo de Rotura”**, esfuerzo último ó tensión de rotura de la pieza de madera.

a. Definiciones.

- **Fuerzas en Tensión.** Son las fuerzas aplicadas que intentan estirar al material a lo largo de su línea de acción.



Figura 26: Fuerzas de Tensión

- **Fuerzas en Compresión.** Son las fuerzas aplicadas que intentan comprimir o acortar al material a lo largo de su línea de acción.

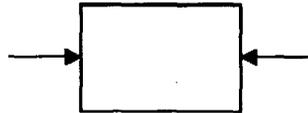


Figura 27: Fuerzas en compresión

- **Fuerza cortante.** Son las fuerzas que se aplican de tal forma que intentan cortar o seccionar al material.

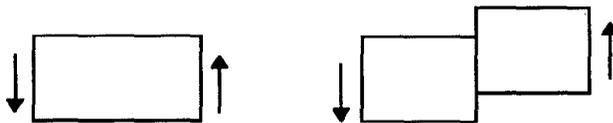


Figura 28: Fuerzas en cortante.

- **Esfuerzo.** Para estudiar la reacción de los materiales a las fuerzas externas que se les aplican, se utiliza el concepto de esfuerzo:

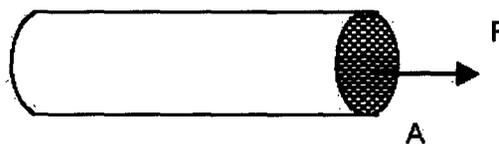


Figura 29: Esfuerzo.

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Fuerza Aplicada}}{\text{Área sobre la cuál se aplica la fuerza.}} \quad (8)$$

El esfuerzo tiene las mismas unidades que la presión, es decir, unidades de fuerza por unidad de área. En el sistema métrico, el esfuerzo se mide en Pascales (Pa/cm²). En el sistema inglés, en psi (libras/pulgada²). En aplicaciones de Ingeniería Civil, es muy común expresar el esfuerzo en unidades Kg/cm².

- **Esfuerzo Básico (σ_b).** Es el esfuerzo mínimo obtenido de ensayos de propiedades mecánicas que sirve de base para la determinación del esfuerzo admisible. Este mínimo corresponde a un límite de exclusión del 5% (cinco por ciento). Reglamento Nacional de Edificaciones : Norma E.010(2006)
- **Esfuerzo Admisible (σ_{adm}):** Es el esfuerzo de diseño del material para cargas de servicio, definidos para los grupos estructurales. Reglamento Nacional de Edificaciones : Norma E.010(2006)
- **Deformación.** Cualquier fuerza externa que se aplique sobre un material causa deformación. La deformación del material se define como el cambio en la longitud a lo largo de la línea de aplicación de la fuerza. En forma matemática:

$$\text{Deformación} = \Delta L = L_f - L_o \quad (09)$$

Donde:

ΔL : Deformación total.

L_f : Longitud final.

L_o : Longitud inicial.

- **Deformación Unitaria (ϵ).** Se define como la deformación total (ΔL) dividida entre la longitud inicial (L_0) del material.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (10)$$

- **Diagrama Esfuerzo - Deformación Unitaria.** Suponiendo que al inicio la fuerza aplicada es cero y luego su magnitud se incrementa gradualmente hasta que se rompe. Suponga que cada tiempo se grafica el esfuerzo aplicado contra la deformación unitaria del material. A ésta gráfica se le llama diagrama esfuerzo-deformación unitaria, y sirve para entender el comportamiento mecánico del material del elemento estudiado.

**(<http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2008.pdf>)*

Cuando la madera se encuentra en servicio se ve afectada por una serie de factores los cuales influyen directamente en sus propiedades de resistencia, por lo cual para efectos de diseño y seguridad se modifican las resistencias últimas mínimas de la madera “afectándolas con factores de reducción”; a ésta resistencia modificada se le denomina **“Esfuerzo Admisible ó de Trabajo ó de Diseño”**, cuya fórmula general según el PADT- REFORT es como se muestra a continuación:

$$\sigma_{adm} = \frac{(F.C.)X(F.T.)}{(F.S)X(F.D.C)} X \text{EsfuerzoBásico} \quad (11)$$

F.C = Factor de reducción por calidad.

F.T. = Factor de reducción por tamaño.

F.S. = Factor de servicio y seguridad.

F.D.C. = Factor de duración de carga.

Así mismo el PADT-REFORT/JUNAC(1984) de manera experimental ha obtenido los siguientes valores para los diferentes coeficientes de seguridad que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4. Coeficientes considerados para la determinación de los esfuerzos

Admisibles

	FLEXIÓN	COMPRESIÓN PARALELA	CORTE PARALELO	COMPRESIÓN PERPENDICULAR
F.C	0.80	*	*	*
F.T	0.90	*	*	*
F.S	2.00	1.60	4.00**	1.60
F.D.C	1.15	1.25	*	*

(*)Incluido F.S

(**)Incluye un coeficiente por concentración de esfuerzos=2 debido a la posible presencia de rajaduras por secado en los extremos de las piezas.

La NBR 7190/07 establece los ensayos para la caracterización de las propiedades mecánicas de la madera tipo *Pinus Radiata*, las cuales describiremos a continuación:

2.2.3.1 Ensayos de Resistencia de la Madera

a. Resistencia a la Compresión paralela a la fibra.

Es la resistencia de la madera a una carga en dirección paralela a la fibra, la que se realiza en columnas cortas para determinar el esfuerzo de rotura, esfuerzo al límite de proporcionalidad, esfuerzo de trabajo y módulo de elasticidad.

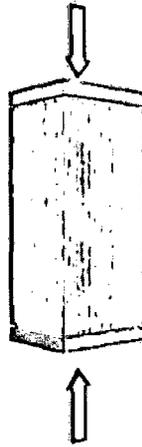


Figura 30: Esquema de ensayo de compresión paralela a la fibra. Fuente: CORMA.

La madera se somete a esfuerzos de compresión paralela cuando se la utiliza como pilotes, columnas, barras internas o cerchas, etc. Su comportamiento ante este tipo de esfuerzos es considerado dentro de su estado elástico; es decir mientras tenga la capacidad de recuperar su dimensión inicial una vez retirada la fuerza.

- **Fórmulas de cálculo.**

Para calcular las diferentes propiedades mecánicas de la madera, cuando ésta resiste fuerzas en compresión, en dirección paralela a la fibra; se aplican las siguientes fórmulas:

1. Deformación Unitaria.

$$DU = \frac{DT}{H} \quad (12)$$

Donde:

DU: Deformación unitaria.

DT: Deformación total, en (mm).

H : Altura de la probeta en dirección de la carga, en (mm).

2. Esfuerzo.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (13)$$

Donde:

σ : Esfuerzo, en Kg./Cm².

P : Carga, en Kg.

A : Área de la sección transversal de la probeta, en Cm².

3. Esfuerzo al límite proporcional elástico.

$$\sigma L = \frac{PL}{A} \quad (14)$$

Donde:

σL : Esfuerzo al límite proporcional elástico, en Kg./cm².

PL: Carga al límite proporcional elástico, en Kg.

A : Área de la sección transversal de la probeta, en cm².

4. Esfuerzo de rotura.

$$\sigma R = \frac{PR}{A} \quad (15)$$

Donde:

σR : Esfuerzo de rotura, en Kg./cm².

PR: Carga de rotura, en Kg.

A : Área de la sección de la probeta, en cm².

5. Módulo de elasticidad.

$$MOE = \frac{\sigma L}{DU} \quad (16)$$

Donde:

MOE: Módulo de elasticidad, en Kg/cm².

σL : Esfuerzo al límite proporcional elástico, en Kg/cm².

DU : Deformación unitaria (correspondiente al límite proporcional elástico).

6. Esfuerzo Admisible.

Por facilidad usamos la fórmula 11: Esfuerzo admisible o de Trabajo o de diseño.

b. Resistencia a la Compresión Perpendicular a la Fibra.

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

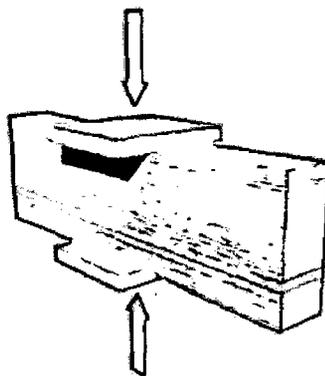


Figura 31: Esquema de ensayo de compresión perpendicular a las fibras. Fuente: CORMA.

La madera se somete a esfuerzos de compresión perpendicular cuándo se la utiliza en forma de soleras, durmientes, cubrejuntas de cerchas, en vigas en las

zonas de apoyo, etc. Bajo este tipo de carga las fibras están sometidas a un esfuerzo perpendicular a su eje. Esto permite que se pueda cargar la madera sin que ocurra una falla claramente distinguible.

- **Fórmulas de cálculo.**

Para calcular las diferentes propiedades mecánicas de la madera, cuando ésta resiste fuerzas en compresión, en dirección perpendicular a la fibra; se aplican las siguientes fórmulas:

- 1. Deformación Unitaria.**

Para su determinación se usa la fórmula 15

- 2. Esfuerzo.**

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (17)$$

Donde:

σ : Esfuerzo, en Kg./cm².

P : Carga, en Kg.

A : Superficie impresa sobre la probeta por la pieza de presión, en cm².

- 3. Esfuerzo al límite proporcional elástico.**

$$\sigma_L = \frac{PL}{A} \quad (18)$$

Donde:

σ_L : Esfuerzo al límite proporcional elástico, en Kg/cm².

PL : Carga al límite proporcional elástico, en Kg.

A : Superficie impresa sobre la probeta por la pieza de presión, en cm².

4. Esfuerzo de rotura.

No es posible determinar experimentalmente éste esfuerzo, por cuanto la falla en la probeta ocurre por corte, por efectos de la deformación, y no por efectos de la compresión.

5. Módulo de elasticidad.

Se aplica la *Fórmula 16*.

6. Esfuerzo Admisible.

Para lo cual se usa la fórmula 11: Esfuerzo admisible o de Trabajo o de diseño.

c. Resistencia a la Tracción Paralela a la Fibra.

Es la resistencia a una carga de tracción en dirección paralela a las fibras.

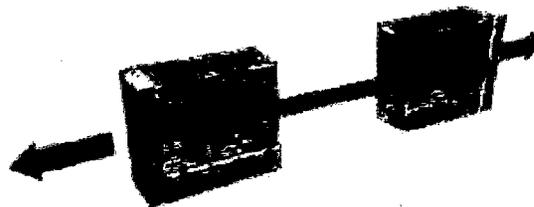


Figura 32: Esquema de ensayo de tracción paralela a la fibra. Fuente: CORMA

La resistencia a la tracción paralela es afectada significativamente por la dirección del grano, debido a que las uniones longitudinales entre fibras son de 30 a 40 veces más resistentes que las uniones transversales.

- **Fórmulas de cálculo.**

Cuando la madera está sometida a cargas de tracción, en dirección paralela a la fibra; se aplican las siguientes fórmulas:

1. Deformación Unitaria.

$$DU = \frac{DT}{H} \quad (19)$$

Donde:

DU : Deformación unitaria o esfuerzo de rotura.

DT : Deformación total, en (mm).

H : Altura de la sección efectiva de la probeta en dirección de la carga, en (mm).

2. Esfuerzo.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (20)$$

Donde:

σ : Esfuerzo, en Kg./cm².

P : Carga, en Kg.

A : Área de la sección efectiva de la probeta en tracción, en cm².

3. Esfuerzo al límite proporcional elástico.

$$\sigma L = \frac{PL}{A} \quad (21)$$

Donde:

σL : Esfuerzo al límite proporcional elástico, en Kg./cm².

PL : Carga al límite proporcional elástico, en Kg.

A : Área de la sección efectiva de la probeta en tracción, en cm².

4. Esfuerzo de rotura.

$$\sigma_R = \frac{PR}{A} \quad (22)$$

Donde:

σ_R : Esfuerzo de rotura, en Kg./cm².

PR : Carga de rotura, en Kg.

A : Área de la sección efectiva de la probeta en tracción, en cm².

5. Módulo de elasticidad.

Por facilidad usamos la *Fórmula 16*.

6. Esfuerzo Admisible.

Se usa la fórmula 11: Esfuerzo admisible o de Trabajo o de diseño.

d. Resistencia a la Flexión Estática. Es la resistencia de la viga a una carga puntual, aplicada en el centro de la luz, determinando la tensión en el límite de proporcionalidad, tensión de rotura y el módulo de elasticidad.

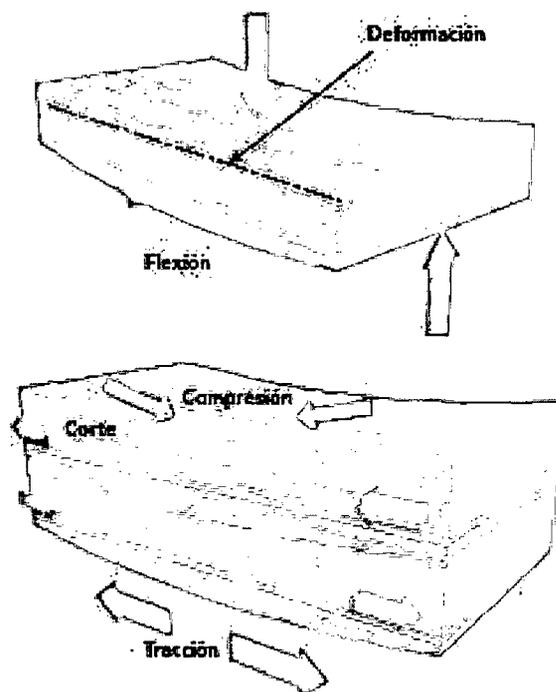


Figura 33: Esfuerzos de ensayo de la flexión estática. Fuente: CORMA

Para un elemento de madera de sección rectangular sometido a flexión estática: la zona de la pieza correspondiente al lado cóncavo, se encuentra en compresión y la zona convexa en tracción, mientras que la zona central de la pieza se encuentra sometida a un esfuerzo de corte. En la práctica, la madera es solicitada a flexión cuándo se la utiliza en forma de vigas, viguetas, soleras, entablado, dinteles, etc.

- **Fórmulas de cálculo.**

Como ante éste tipo de sollicitación, se combinan simultáneamente comportamientos debidos a la tracción, compresión y corte, para calcular las diferentes propiedades mecánicas de la madera, cuando se encuentra en éstas condiciones de esfuerzo, se ha tenido que realizar algunas deducciones, las cuales se muestran a continuación:

*Deducción del "MOE" para una viga simplemente apoyada en función del Esfuerzo al Límite Proporcional y la deflexión en el centro de la luz.

Según Diagramas y Formulas para vigas rectangulares simplemente apoyada carga concentrada (Págs.: 8-5 y 8-79 del Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino).

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (23)$$

Donde:

Δ : Deflexión en el centro de la luz (flecha).

P : Carga Puntual.

L : Luz entre apoyos.

E : Módulo de elasticidad de la sección transversal con relación al eje alrededor del cual se produce la flexión.

I : Momento de la sección transversal con relación al eje alrededor del cual se produce la flexión:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (24)$$

Donde:

b : Ancho de la probeta.

h : Espesor de probeta.

2. Esfuerzo.

$$\sigma = \frac{3P}{2ab^2} \quad (25)$$

Donde:

σ : Esfuerzo, en Kg/cm².

P : Carga, en Kg.

L : Luz entre apoyos, en cm.

a : Ancho de la probeta, en cm.

b : Espesor de la probeta, en cm.

3. Esfuerzo al límite proporcional elástico.

$$\sigma L = \frac{3PL}{2ab^2} \quad (26)$$

Donde:

σ_L : Esfuerzo al límite proporcional elástico, en Kg./cm².

PL : Carga al límite proporcional elástico, en Kg.

L : Luz entre apoyos, en cm.

a : Ancho de la probeta, en cm.

b : Espesor de la probeta, en cm.

4. Esfuerzo de rotura.

$$\sigma_R = \frac{3 PR}{2ab^2} \quad (27)$$

Donde:

σ_R : Esfuerzo de rotura, en Kg./cm².

PR : Carga de rotura, en Kg.

L : Luz entre apoyos, en Cm.

a : Ancho de la probeta, en Cm.

b : Espesor de la probeta, en Cm.

5. Módulo de elasticidad.

Se aplica la *Fórmula 16*

6. Esfuerzo Admisible.

Por facilidad usamos la fórmula 11: Esfuerzo admisible o de Trabajo o de diseño.

e. Resistencia al Corte o Cizallamiento.

Es la medida de la capacidad de la pieza para resistir fuerzas que tienden a causar deslizamiento de una parte de la pieza respecto de la otra.

La resistencia al corte de la madera es directamente proporcional a su densidad, pero principalmente depende del sentido en que se aplica el esfuerzo en relación con los anillos de crecimiento (normalmente la rotura se determina en un plano tangencial). En el plano tangencial hay una gran influencia de la diferencia entre madera temprana y tardía. En el plano radial hay una gran influencia de los rayos de la madera, siendo que maderas con rayos largos presenta baja resistencia al cizallamiento, en relación con los anillos de crecimiento más cortos. En el plano tangencial hay una gran influencia de crecimiento del árbol, y una diferencia de resistencia entre la madera temprana y tardía.

La resistencia de la madera está relacionada con la cantidad de agua en la pared celular de la fibra. Por encima del punto de saturación de la fibra el agua se acumula en las cavidades celulares de la madera (agua libre), y no hay ningún efecto sensible sobre la resistencia de la madera asociado a la variación del contenido de humedad en este intervalo.

Para contenidos de Humedad entre 0%(madera seca en estufa) hasta el PSF el agua se acumula en las paredes celulares de la madera (impregnación de agua) y afecta significativamente la resistencia de la madera, ya que el aumento de la cantidad de agua reduce las conexiones por enlaces de hidrógeno entre los polímeros orgánicos de las paredes celulares, disminuyendo la resistencia de la madera WIANDY & ROWELL (1984).

La resistencia al cizallamiento es inversamente proporcional a su contenido de Humedad (0%-PSF), es decir que la resistencia es mayor con la disminución

del contenido de Humedad, mientras que para la resistencia a la flexión y compresión es menor KEYLWERTH(1945).

- **Corte Paralelo Tangencial.**

La sollicitación es paralela a las fibras y produce un plano de falla, tangente a los anillos de crecimiento.

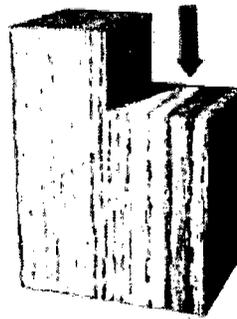


Figura 34: Esquema de ensayo de cizalle paralelo tangencial.

- **Corte Paralelo Radial.**

La sollicitación es paralela a las fibras y produce un plano de falla perpendicular a los anillos de crecimiento.

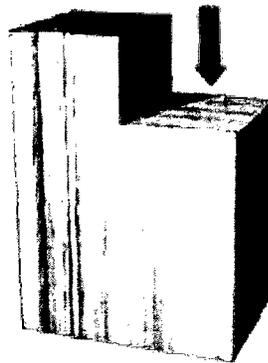


Figura 35: Esquema de ensayo de cizalle paralelo radial.

La madera es más resistente al corte o al cizallamiento perpendicular al grano, que al corte paralelo, debido a que las fibras aumentan la resistencia al

cizallamiento; en cambio en el corte paralelo, el esfuerzo de corte es resistido básicamente por la sustancia cementante llamada lignina.

- **Fórmulas de cálculo.**

Para calcular las diferentes propiedades mecánicas de la madera, cuando ésta resiste fuerzas cortantes en dirección paralela radial o tangencial a la fibra; se aplican las siguientes fórmulas, aclarando que no es posible determinar con los instrumentos y equipos con los que cuenta el Laboratorio de Materiales de la UNC, el esfuerzo al límite proporcional, ni el módulo de elasticidad:

1. Esfuerzo de rotura.

$$\sigma_R = \frac{P}{A} \quad (28)$$

Donde:

σ_R : Esfuerzo de rotura por cizallamiento, en Kg/cm².

P : Carga máxima soportada por la probeta, en Kg.

A : Superficie del plano en que se produce el cizallamiento, en cm².

2. Esfuerzo Admisible.

Por facilidad usamos la fórmula 11: Esfuerzo admisible o de Trabajo o de diseño.

CAPITULO III. EQUIPAMIENTO, MATERIALES Y METODOLOGIA

3.1. EQUIPAMIENTO

Los ensayos de las propiedades físicas se realizaron con los equipos existentes en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Cajamarca.

Para los ensayos mecánicos al corte paralelo al grano se realizaron en la Máquina de Pruebas Universal, la marca de esta máquina es AMSLER, con una capacidad máxima de 30 toneladas, a ella se le adicionó y acondicionara las piezas metálicas: hembra y macho con las características que se indican líneas abajo.

3.2. MATERIALES

- Estufa: Para secar las muestras durante 24 horas.
- Balanza: Para tomar los pesos secos y húmedos de las muestra.
- Vernier: Para tomar las medidas de la muestra, con una precisión mínima de 0.1 mm.
- Sierra de cinta.
- Wincha.
- Vaso de Precipitados
- Plumones indelebles
- Piezas metálicas hembra y macho.
- Tornillos.
- Probetas estándar de madera espécimen fig.36
- Probetas estándar de madera espécimen fig.39.
- Cámara Fotográfica.

3.3. DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO DE CORTE PARALELO A LA FIBRA MEDIANTE EL MÉTODO DE LA NORMA ASTM D 143-09/2010.

El desarrollo de una nueva herramienta para determinar la resistencia al corte paralelo a la fibra de madera surge a partir de una serie de imperfecciones observadas en el modelo de la norma ASTM D 143-09/2010. En éste modelo se aplica el esfuerzo al espécimen de prueba, a través de una placa metálica, denominado cuchillo, que poseen un espesor $\frac{1}{2}$ ", que al contacto con el espécimen de prueba, le trasfiere el esfuerzo de compresión. El espécimen de prueba sugerido por la norma NBR 7190/97 es un prisma rectangular de forma cúbica (figura 36).

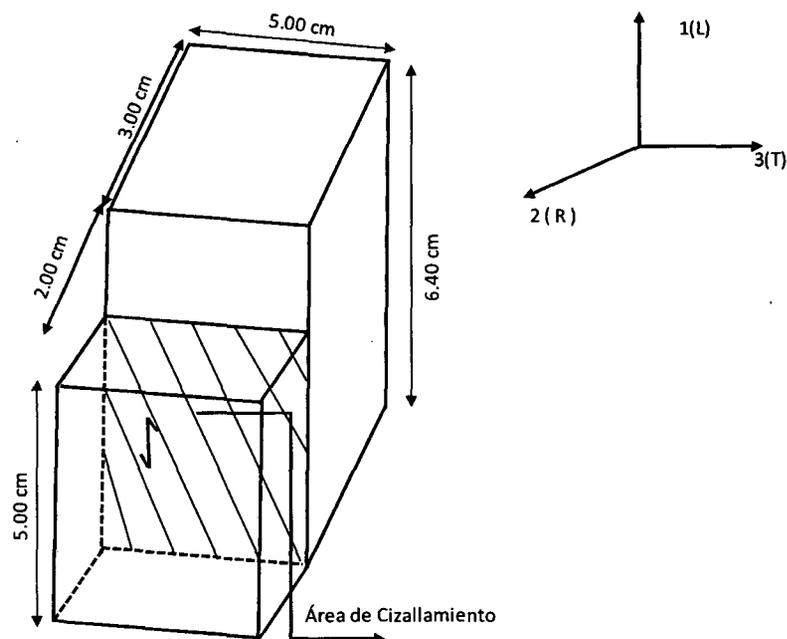


Figura 36: Especimen propuesto por la norma Brasileña, similar a los especímenes propuestos por ASTM D 143-09/2010. Fuente: NBR 7190/1997.

La fuerza de compresión aplicada a la parte superior del espécimen de prueba, es transferida a la placa de apoyo, ubicada en la parte inferior del

especimen. La cara de la placa de apoyo coincide con el plano formado por la parte interior del cuchillo. Este modelo entrega un plano de corte en el especimen de prueba (equipo empleado en la figura 37), creando un corte entre la placa superior y la placa de apoyo, con un área cortada entre ellas.



Figura 37: Equipo empleado para probar la resistencia al corte paralelo al grano de la madera, usando la norma ASTM D 143-09/2010

Se observa que el contacto del cuchillo con el espécimen de prueba requiere de un área de contacto, con dimensiones que eviten las fisuras debido al aplastamiento por compresión de la madera, antes que se produzca la fisura por el corte. El centro de la fuerza aplicada al plano de corte del espécimen de prueba, es equivalente a la mitad del grosor del cuchillo. De la misma manera, ocurre algo similar en la placa de soporte inferior, que se traduce en una excentricidad, entre las fuerzas aplicadas al borde superior del espécimen de prueba y en la parte inferior de igual valor al grosor del cuchillo. Puesto que existe una fuerza de acción y reacción, paralelas entre ellas, y una señal

contraria, separadas por un brazo, que en este caso corresponde a la excentricidad, tenemos un momento provocado por fuerzas binarias. Este momento es la causa de la rotación que ocurre en la prueba de corte. Este es un defecto, cuya solución puede ser la aplicación de campos de tracción y compresión, en forma simultánea a la fuerza de corte en el espécimen de prueba, haciendo que los resultados sean cuestionables.

Se empleó 30 especímenes de prueba, cuyo ensayo estandarizado proporciona un montaje vertical y dos tornillos de fijación en la parte superior del espécimen de prueba para la compresión, evitando la rotación. Ésta solución es aceptada, pero no resuelve el problema de los esfuerzos secundarios (rotación).

Debido a los efectos que se producen en el método antes descrito se propone el Método de Punzonamiento, cuyo proceso consiste en un conjunto de piezas macho y hembra, generalmente de forma circular para permitir agujeros cilíndricos, que pueden tener variantes. Este conjunto es acoplado a una máquina que induce fuerza, que normalmente es una prensa hidráulica.

El conjunto es ensamblado de tal manera que el macho sea insertado en la hembra, y pueda penetrar unos pocos milímetros o perforar a través de ella. La pieza macho es ensamblada a la máquina (bastidor) que ejecuta el movimiento hacia arriba y debajo de la herramienta, y además transmite la fuerza generada por la máquina. La pieza hembra es acoplada a la base de la máquina. El conjunto debe ser ensamblado, de forma que el movimiento de la pieza hembra sea preciso, y sobre un eje vertical que pasa a través del centro longitudinal del cilindro de la pieza macho. Cualquier desviación, debido a imperfecciones en

el movimiento, puede provocar una falla en el calce entre las piezas macho y hembra dañando así la herramienta.

Este proceso resuelve los principales problemas descritos anteriormente, tales como la proporción entre las tensiones de corte y de compresión. El hecho se produce estrictamente por la geometría del proceso, donde la compresión actuará en un área circular igual a la sección transversal de la pieza macho. Esta característica permite que la separación del espécimen se produzca sólo por corte.

Otro aspecto importante es la estabilidad de la prueba, puesto que será multi-sistémica en relación al eje longitudinal de la pieza macho, a la cual llamaremos eje conductor de prueba. Con esta característica, nos aseguramos que el espécimen de prueba no gire.

3.4. Metodología

Para el estudio se eligió la especie maderable: *Pinus radiata*, se emplearon 30 especímenes de prueba para el método de la norma ASTM D 143-09/2010 (figura 36) y 30 especímenes de prueba para el método de Punzonamiento (figura 39), para éste último se estableció un diámetro de Perforación de 40mm para la pieza macho, y una distancia de 3mm entre la pieza macho y la pieza hembra (figura 38), resultando así 20 mm de espesor.

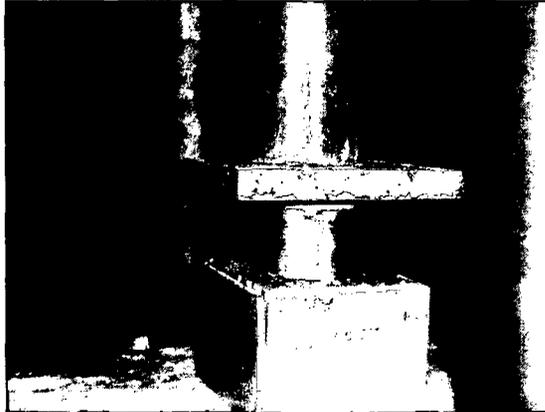


Figura 38: Equipo (hembra y macho) empleado para probar resistencia de corte de la madera por Método de Punzonamiento.

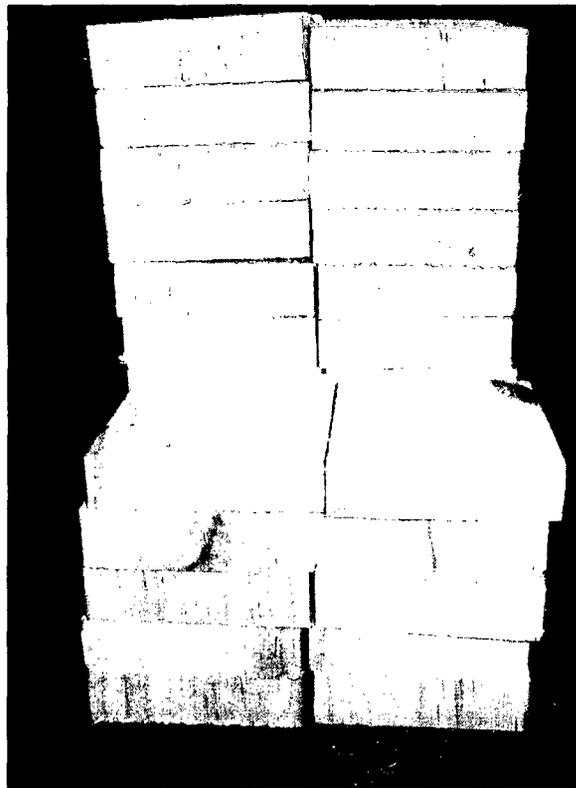


Figura 39. Especímenes de prueba del método de Punzonamiento.

De acuerdo a los estudios de Hara (2013), se concluyó que la mejor dimensión para el espécimen de prueba para el método de Punzonamiento es 75x75 mm(largo x ancho), con un espesor de 20 mm. La prueba se realizó con una

carga de aumento constante en la Maquina Universal del Laboratorio de ensayos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca. El área de corte para la prueba propuesta es de 2513.21 mm² (3,14159 x 40 x 20), que es equivalente al área de corte del espécimen de prueba estándar 2500mm² (50x50) del método de la norma D-143-09/2010, el cual permite la comparación directa de los resultados.

Después de ejecutado el ensayo de corte, se determinará el contenido de humedad y densidad básica, corrigiéndose los resultados de resistencia por efecto del contenido de humedad. La corrección antes mencionada (resistencia a corte paralelo a la fibra), a contenidos de humedad del 12% y 83.03% se realizó con la ecuación (29), la cual es definida por la Norma Brasileña NBR 7190/1997. Similar a la ASTM D-143-09/2010. Finalmente con la ecuación 11 determinamos el esfuerzo de diseño.

$$f_{v12} = f_{vU\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (29)$$

Donde:

f_{v12} = resistencia a corte, con humedad estándar de 12%;

$f_{vU\%}$ = resistencia a corte, con la humedad del espécimen de prueba;

U = contenido de humedad (%) del espécimen de prueba.

CAPITULO IV. PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. Análisis comparativo por ambos métodos de las propiedades físicas-mecánicas de la madera Pinus Radiata.

Tabla 5. Resumen de resultados de contenido de Humedad, Densidad Básica y Esfuerzo de Rotura por ambos métodos.

METODO ASTM-D-143-09/2010				METODO PUNZONAMIENTO			
N° Probetas	30						
Parametros	Contenido de Humedad(%)	Densidad Basica(gr/cm3)	Esfuerzo de Rotura(kg/cm2)	Contenido de Humedad(%)	Densidad Basica(gr/cm3)	Esfuerzo de Rotura(kg/cm2)	%Diferencia
Promedio(kg/cm2)	37.66	0.48	45.64	83.03	0.40	29.39	-35.62%
Desviación Estándar(Kg/cm2)	2.67	0.05	5.86	5.30	0.02	2.42	Respecto al método ASTM D-143-09/2010
Coeficiente de Variación%	7.09	9.36	12.84	6.38	4.10	8.24	

METODO ASTM-D-143-09/2010				METODO PUNZONAMIENTO			
N° Probetas	30						
Parametros	Contenido de Humedad(%)	Densidad Basica(gr/cm3)	Esfuerzo de Rotura corregido al 12%	Contenido de Humedad(%)	Densidad Basica(gr/cm3)	Esfuerzo de Rotura corregido al 12%	%Diferencia
Promedio(kg/cm2)	12	0.48	80.73	12	0.40	92.07	14.04% Respecto al método ASTM D-143-09/2010

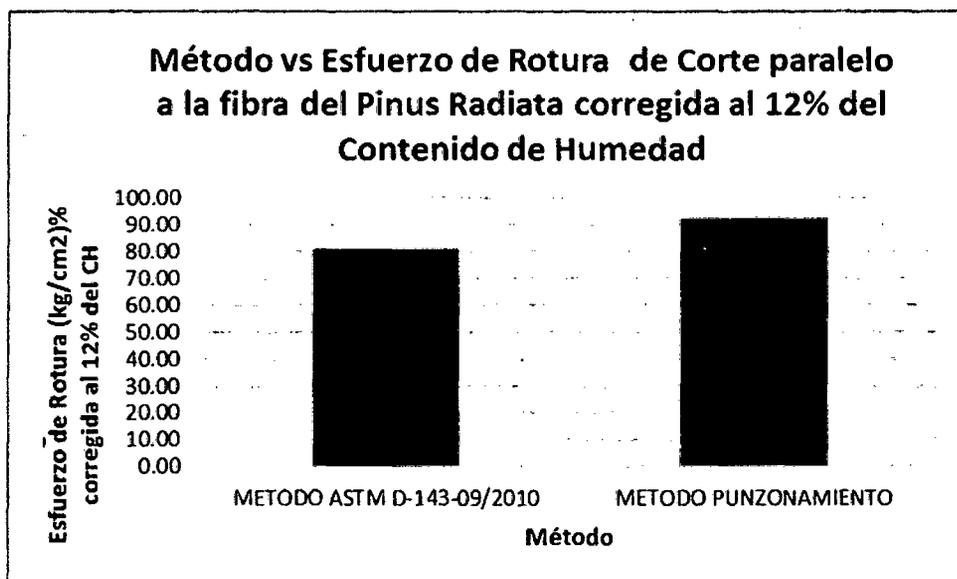


Figura 40: Gráfica de Método vs Esfuerzo de Rotura corregida al 12% del contenido de Humedad.

Tabla 6. Comparación de Esfuerzos de Diseño o Admisible de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata por ambos métodos

ESFUERZO DE DISEÑO O ADMISIBLE PARA UNA MADERA VERDE A UN CONTENIDO DE HUMEDAD 83.03% Y AL 5% DEL LÍMITE DE EXCLUSIÓN					
METODO ASTM-D-143-09/2010		METODO PUNZONAMIENTO		%Diferencia	
Esfuerzo admisible o diseño(kg/cm ²)	2.81	Esfuerzo admisible o diseño(kg/cm ²)	5.52	96.44%	
ESFUERZO DE DISEÑO O ADMISIBLE PARA UNA MADERA SECA A UN CONTENIDO DE HUMEDAD 12% Y AL 5% DEL LÍMITE DE EXCLUSIÓN					
METODO ASTM-D-143-09/2010		METODO PUNZONAMIENTO		%Diferencia	
Esfuerzo admisible o diseño(kg/cm ²)	16.22	Esfuerzo admisible o diseño(kg/cm ²)	19.36	19.36%	

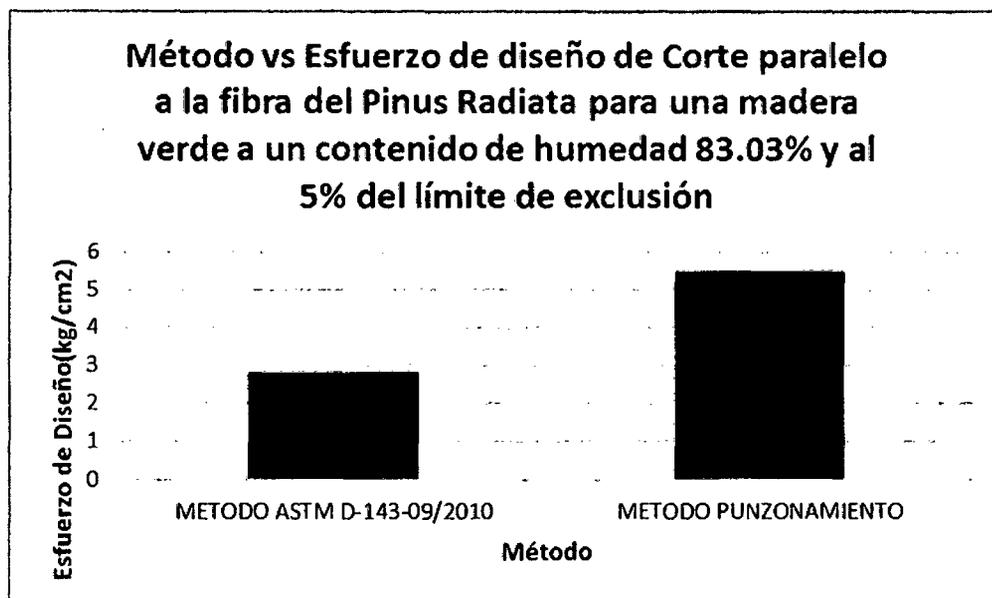


Figura 41: Gráfica de Método vs Esfuerzo de diseño para una madera verde a un contenido de Humedad a 83.03% y al 5% del límite de exclusión

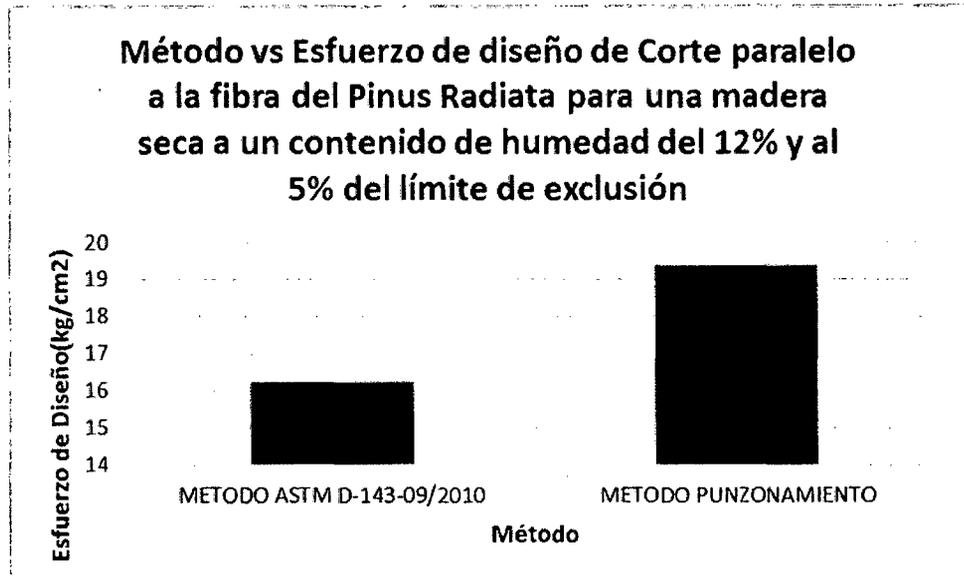


Figura 42: Gráfica de Método vs Esfuerzo de diseño para una madera seca a un contenido de Humedad del 12.00% y al 5% del límite de exclusión

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El valor del esfuerzo de diseño de la madera estudiada a un contenido de humedad 83.03% obtenido mediante el método ASTM D 143-09/2010 es 2.81kg/cm² y el valor del mismo esfuerzo por el método de Punzonamiento es 5.52kg/cm², siendo el segundo mayor en un 96.44% respecto al primero.
- El valor del esfuerzo de diseño de la madera estudiada a un contenido de humedad 12.00% obtenido mediante el método ASTM D 143-09/2010 es 16.22 kg/cm² y el valor del mismo por el método de Punzonamiento es 19.36 kg/cm², siendo el segundo mayor en un 19.36% respecto al primero.
- Con los valores obtenidos de los esfuerzos al corte paralelo a la fibra mediante el Método de Punzonamiento se afirma que tiene una mejor performance que el método de la norma ASTM D 143-09/2010.
- Los esfuerzos de diseño de corte paralelo a la fibra determinados por el método ASTM D143-09/2010 son factibles de transformarlos a esfuerzos de diseño de corte paralelo a la fibra obtenidos por el método de Punzonamiento multiplicándolo a los anteriores por un factor de 1.20.
- La variación del valor del esfuerzo de corte paralelo a la fibra varía en razón inversa a su contenido de humedad.
- La variación del valor del esfuerzo de corte paralelo a la fibra varía en razón directa a su densidad básica.

- La dispersión de valores del esfuerzo respecto al número de probetas es mínimo y casi homogéneo, lo que permite afirmar que la confiabilidad de los resultados del estudio es alta equivalente al 95%
- La variación de los esfuerzos obtenidos por el método de la norma ASTM D 143-09/2010 se deben a las distorsiones como la excentricidad de carga aplicada a la probeta, la que a su vez genera un momento disminuyendo su resistencia.
- En el método de Punzonamiento, el esfuerzo de corte paralelo a la fibra no sufre ningún tipo de distorsión obteniéndose valores más confiables que el método de la norma ASTM D 143-09/2010

5.2. Recomendaciones

- Se sugiere realizar estudios similares al ejecutado utilizando otras especies maderables que abundan en Cajamarca, como el eucalipto, otros tipos de Pinos, el Aliso, y otras.
- Es recomendable tener cuidado en el proceso de centrar el espécimen de prueba y el disparador de carga, ya de cometerse éste error impediría la correcta ejecución del ensayo por el método de Punzonamiento.
- Verificar que la velocidad de aplicación de carga sea constante, para no alterar los resultados obtenidos de resistencia al corte paralelo a la fibra de madera.

REFERENCIAS

Acharya S., Ray K. K. (2013), Assessment of tensile properties of spot welds using shear punch test. *Materials Science & Engineering A* – v.565 March P. 405 – 413.

Armas Ventura, José Javier. ; Chávez Cabanillas, Edwin Iván. ; Parodi Skontorp, Michell Renzo. ; Saldaña Rodríguez, Martha Patricia, Desarrollo estratégico para el aprovechamiento comercial del pino de bosques reforestados de la Granja Porcón(Cajamarca) y su comercialización en el mercado de industrias maderables de Lima Metropolitana. -- Lima : Universidad Esan, 2008. -- 234 p. -- Maestría en Dirección de Empresas Cajamarca 2. -- MACJ02.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (1997), Projeto de Estruturas de Madeira. NBR 7190. Rio de Janeiro.

ASTM D 143-09 (2010), Standard test methods for small clear specimens of timber. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken. USA.

CORMA (Corporación Chilena de la Madera) “Manual de Construcción de Viviendas en Maderas”, publicado en www.corma.cl

El Peruano (2006). Reglamento Nacional de Edificaciones norma E.010.

EVANS J.L.W., Senft J. F., Green D. W. (2000), Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. Forest Products Journal, v.50, n.7/8, p.75-87.

FERREIRA Martins & Filhos (2008). Guia da Madeira. Braga,

GONZAGA, Armando Luiz. Madeira: Uso e Conservação, Editora Ipham/Monumenta, Brasília, 2006.

GUPTA R., Sinha A. (2011), Effect of grain angle on shear strength of Douglas-fir wood. Holzforschung, v. 66, p. 655-658 – Berlin.

HARA Mario Massayuki (2013), título de tesis: “Resistencia a corte paralela a la tensión de la fibra de la madera, por medio de la prueba de punzonamiento propuesta” de la Universidad Tecnológica Federal de Paraná (UTFPR), Brasil

KOLLMAN, F.F.P.; CÔTÊ JUNIOR, W. A. Principles of Wood Science and Technology. Berlin: Springer, 1968-1984.

PADT-REFORT/JUNAC, (1984). Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino. Por: Junta del Acuerdo de Cartagena. Lima, Perú.

MENDES A. P. (1984), Resistência da Madeira ao Cisalhamento. 1984, 157p. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos,

Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

NCh 173(Norma Chilena) of.74 Madera-Terminología General.

Pérez L. Hector (2001), Estudio tecnológico de la madera del eucalipto en Cajamarca con fines estructurales. Ponencia presentada en el I Congreso Nacional del Eucalipto, organizado por la Facultad de Ciencias forestales y del Ambiente de la UNCP. publicado en el libro I CONAE. 2001

SANTOS NETO A. B. S. (1999), Cisalhamento em Corpos de Prova de Madeira. 1999. 146p. Dissertação – Mestrado em Engenharia /civil.Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

TIMOSHENKO(1957), Resistencia de Materiales, 5° edición, Madrid.

WIANDY, J. E.; ROWELL, R. M. (1984). The Chemistry of Wood Strength. In: The Chemistry of Solid Wood. Washington, D.C. American Chemical Society

A. Anexo: Cálculo de las Propiedades Físicas de la Madera

Pinus Radiata

A.1. Cálculo de Contenido de humedad: según fórmula 1 (para ambos métodos)

Tabla 7. PROBETAS METODO ASTM D 143-09/2010

N° Probeta	Peso Verde (gr)	Peso seco al horno(gr)	Contenido de Humedad(%)
1	109.5	78.2	40.03
2	96.6	70.8	36.44
3	97.7	70.9	37.80
4	113.5	81.7	38.92
5	97.5	71.3	36.75
6	92.2	66.5	38.65
7	93.4	66.5	40.45
8	111.7	81.5	37.06
9	97.4	71.8	35.65
10	117.7	88.5	32.99
11	98.8	70.7	39.75
12	122.7	82.9	48.01
13	114.2	82.3	38.76
14	117.3	86	36.40
15	90.8	66.5	36.54
16	113.4	82	38.29
17	115.4	82.4	40.05
18	107.6	78.6	36.90
19	114.7	84	36.55
20	93	66.4	40.06
21	96.7	71.4	35.43
22	91.5	66.1	38.43
23	112.2	83.1	35.02
24	96	70.8	35.59
25	95.2	70.3	35.42
26	112.7	81.4	38.45
27	111.7	82.5	35.39
28	105.3	77.6	35.70
29	98.7	72.4	36.33
30	107.9	78.2	37.98

Tabla 8. PROBETAS METODO PUNZONAMIENTO

N° Probeta	Peso Verde (gr)	Peso seco al horno(gr)	Contenido de Humedad(%)
1	89.7	49.4	81.58
2	87.3	48.4	80.37
3	83.3	41.1	102.68
4	85.9	48.4	77.48
5	87.8	48.1	82.54
6	81.5	43	89.53
7	85.8	45.7	87.75
8	85.5	47.9	78.50
9	89.1	48.9	82.21
10	88.5	48.3	83.23
11	81.8	44.6	83.41
12	84.8	46.5	82.37
13	85.6	48.5	76.49
14	80.6	43.8	84.02
15	91.3	52.1	75.24
16	85.7	47	82.34
17	87.5	48.4	80.79
18	84.4	47.9	76.20
19	87.1	46.3	88.12
20	88	48	83.33
21	86.6	46.6	85.84
22	88.6	47.7	85.74
23	84.4	47.6	77.31
24	87.4	48.5	80.21
25	89.9	48.6	84.98
26	85.4	47.2	80.93
27	86.3	46.1	87.20
28	87.6	46.5	88.39
29	88.2	48.5	81.86
30	80.2	44.5	80.22

Tabla 9. Comparación de los Contenidos de Humedad

	ASTM-D-143-09/2010	PUNZONAMIENTO
Parametros		
Promedio(%)	37.66	83.03
Desviación Estándar(%)	2.67	5.30
Coefficiente de Variación%	7.09	6.38

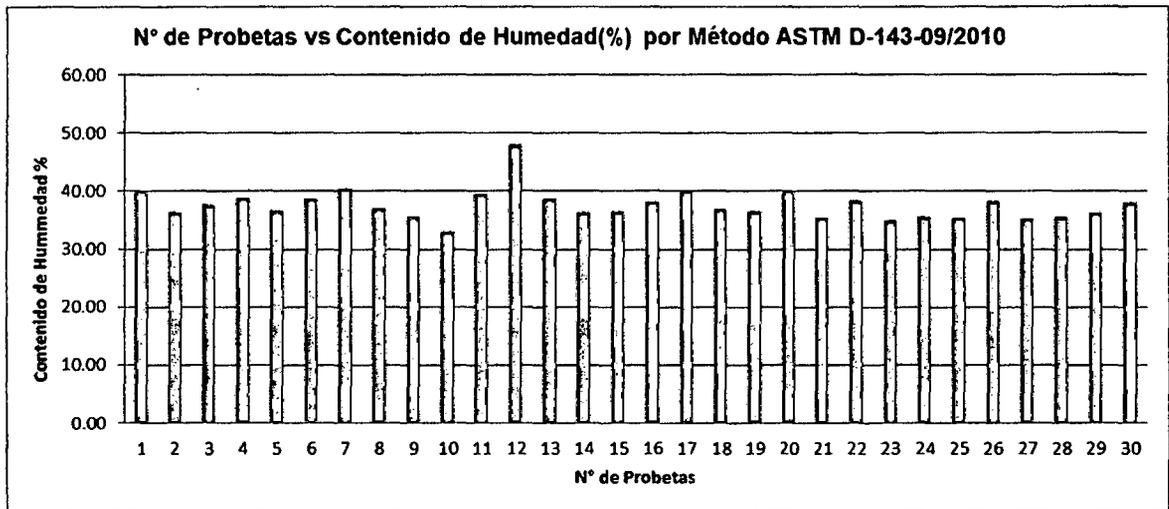


Figura 43: Variación de la humedad para el método ASTM D 143-09/2010.

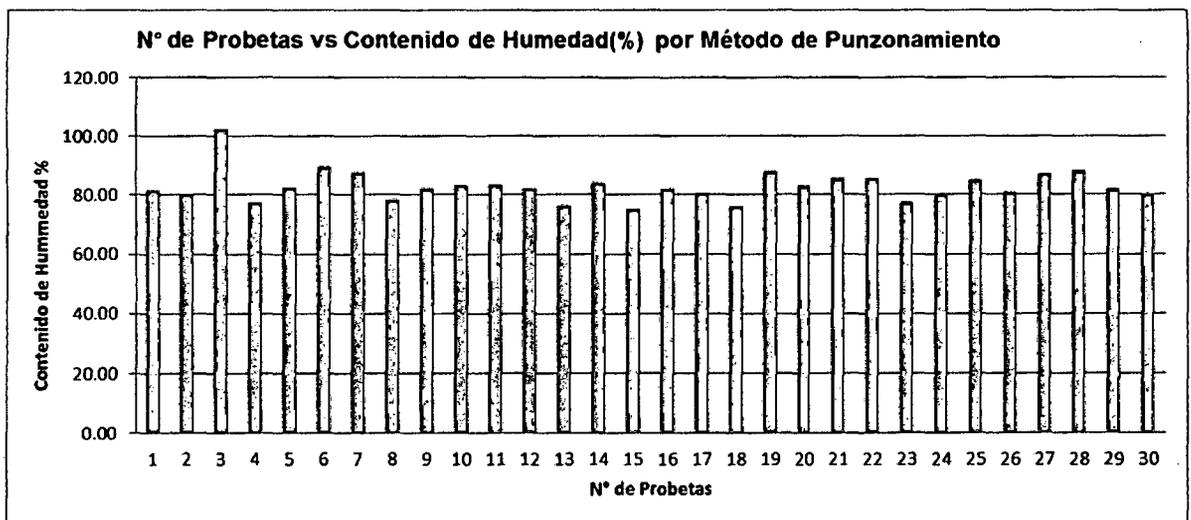


Figura 44: Variación de la humedad para el método Punzonamiento.

A.2. Densidad Básica: según fórmula 5 (para ambos métodos)

Tabla 10. PROBETAS METODO ASTM D 143-09/2010

Volumen inicial(vaso de precipitación) 500 cm3			
N° Probeta	Peso seco al horno(gr)	Volumen Verde(cm3)	Densidad Basica(gr/cm3)
1	78.2	655	0.50
2	70.8	660	0.44
3	70.9	660	0.44
4	81.7	655	0.53
5	71.3	655	0.46
6	66.5	650	0.44
7	66.5	658	0.42
8	81.5	660	0.51
9	71.8	660	0.45
10	88.5	652	0.58
11	70.7	655	0.46
12	82.9	667	0.50
13	82.3	660	0.51
14	86	662	0.53
15	66.5	660	0.42
16	82	658	0.52
17	82.4	656	0.53
18	78.6	655	0.51
19	84	655	0.54
20	66.4	655	0.43
21	71.4	660	0.45
22	66.1	656	0.42
23	83.1	655	0.54
24	70.8	660	0.44
25	70.3	655	0.45
26	81.4	650	0.54
27	82.5	655	0.53
28	77.6	660	0.49
29	72.4	660	0.45
30	78.2	660	0.49

Tabla 11. PROBETAS METODO PUNZONAMIENTO

Volumen inicial(vaso de precipitación) 500 cm3			
N° Probeta	Peso seco al horno(gr)	Volumen Verde(cm3)	Densidad Basica(gr/cm3)
1	49.4	620	0.41
2	48.4	615	0.42
3	41.1	602	0.40
4	48.4	620	0.40
5	48.1	615	0.42
6	43	605	0.41
7	45.7	615	0.40
8	47.9	615	0.42
9	48.9	620	0.41
10	48.3	615	0.42
11	44.6	610	0.41
12	46.5	620	0.39
13	48.5	610	0.44
14	43.8	610	0.40
15	52.1	615	0.45
16	47	615	0.41
17	48.4	625	0.39
18	47.9	620	0.40
19	46.3	615	0.40
20	48	620	0.40
21	46.6	625	0.37
22	47.7	625	0.38
23	47.6	620	0.40
24	48.5	625	0.39
25	48.6	625	0.39
26	47.2	615	0.41
27	46.1	618	0.39
28	46.5	615	0.40
29	48.5	625	0.39
30	44.5	610	0.40

Tabla 12. Comparacion Densidad Básica

ASTM D-143-09/2010 PUNZONAMIENTO		
Parametros		
Promedio(Kg/m3)	0.48	0.40
Desviación Estándar(Kg/cm3)	0.05	0.02
Coefficiente de Variación%	9.36	4.10

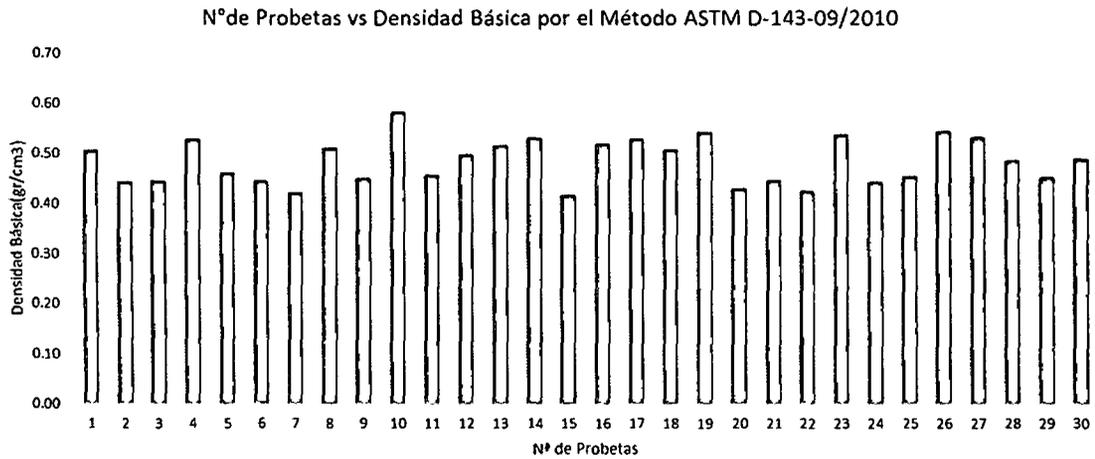


Figura 45: Variación de la Densidad Básica para el método ASTM D 143-09/210

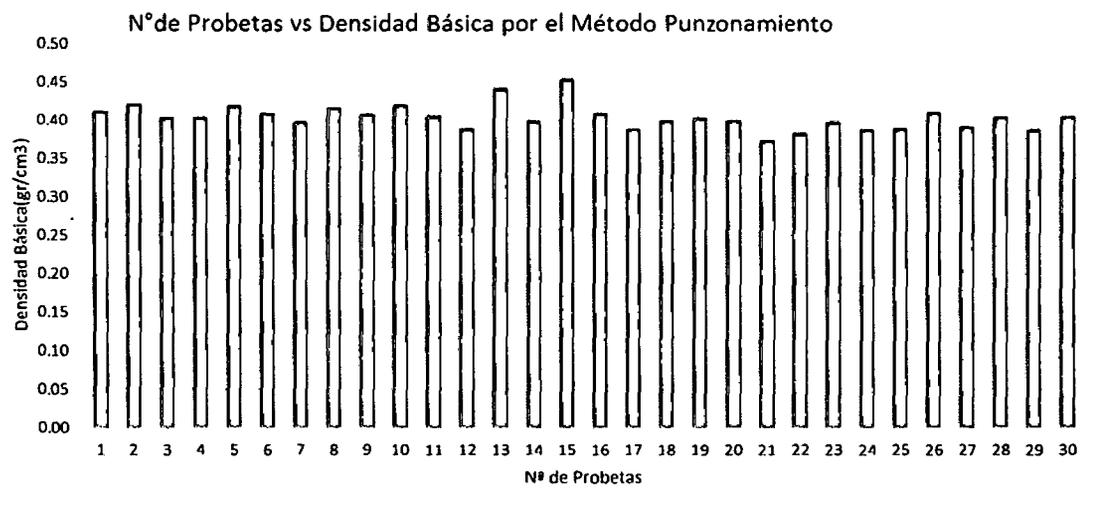


Figura 46: Variación de la Densidad Básica para el método de Punzomaniento:

B. Anexo: Cálculo de las Propiedades Mecánicas (corte paralelo a la fibra) de la Madera Pinus Radiata.

B.1. Cálculo del Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata a un Contenido de Humedad Natural: según fórmula 28 (para ambos métodos).

*Tabla 13. PROBETAS
METODO ASTM D 143-
09/2010*

N° Probeta	Esfuerzo de Rotura(Kg/cm2)
1	37.17
2	38.10
3	38.49
4	38.86
5	39.43
6	39.59
7	40.75
8	41.13
9	41.13
10	42.45
11	42.45
12	42.83
13	43.43
14	43.46
15	43.77
16	43.77
17	45.47
18	45.66
19	48.08
20	48.30
21	48.65
22	49.14
23	50.00
24	51.15
25	51.32
26	51.54
27	52.31
28	54.23
29	57.12
30	59.25

*Tabla 14. PROBETAS
METODO
PUNZONAMIENTO*

N° Probeta	Esfuerzo de Rotura(Kg/cm2)
1	25.39
2	25.96
3	26.46
4	26.66
5	26.90
6	27.06
7	27.65
8	27.66
9	27.85
10	28.04
11	28.23
12	28.42
13	28.42
14	28.45
15	28.97
16	29.11
17	29.70
18	29.70
19	29.84
20	30.32
21	30.37
22	30.64
23	31.05
24	31.05
25	31.05
26	31.41
27	32.59
28	32.65
29	34.34
30	35.60

Nº Probetas vs Esfuerzos de Rotura por el Método
ASTM D 143-09/2010

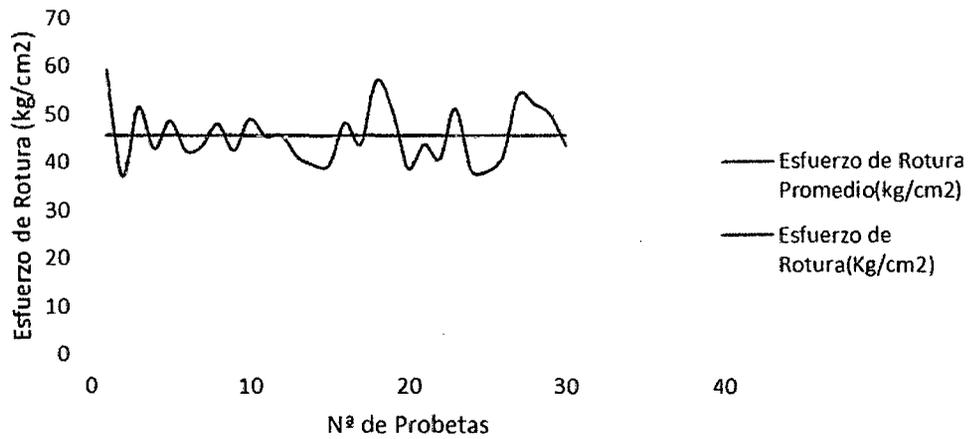


Figura 47: *Dispersión de valores de Esfuerzos de Rotura de las probetas ensayadas por ASTM D-143-09/2010*

Nº Probetas vs Esfuerzos de Rotura por el Método
de Punzonamiento

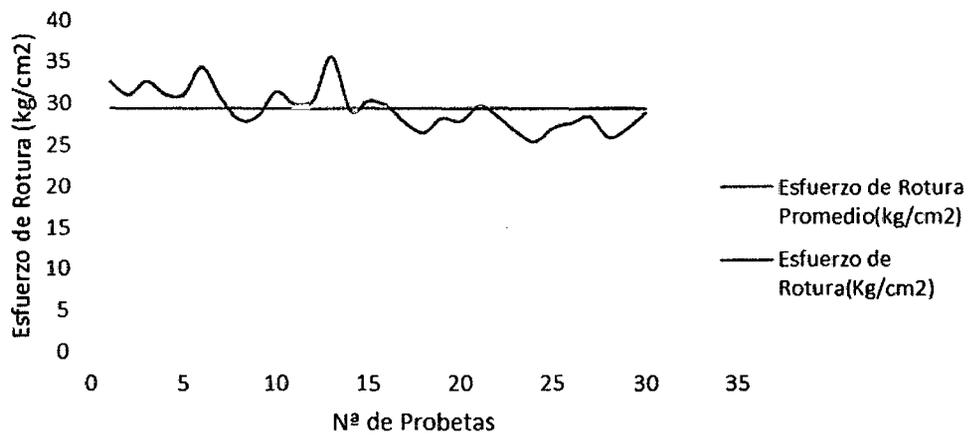


Figura 48: *Dispersión de valores de Esfuerzos de Rotura de las probetas ensayadas por el Método de Punzonamiento.*

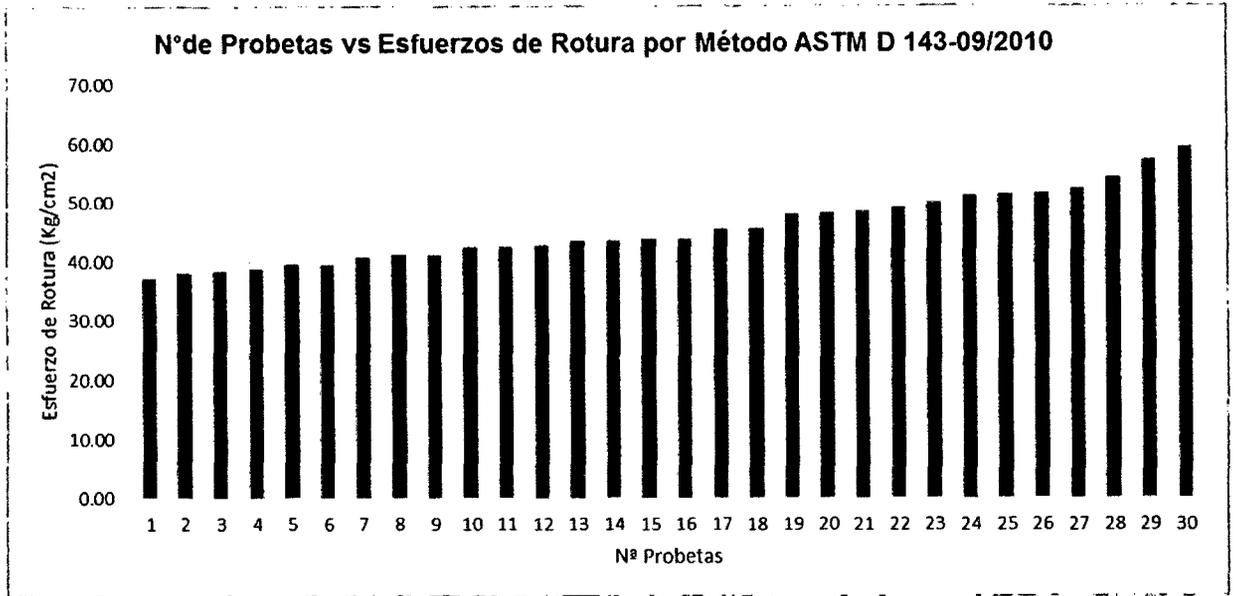


Figura 49: Variación de los Esfuerzos de Rotura al corte paralelo a la fibra de la madera Pinus Radiata por el Método ASTM D 143-09/2010.

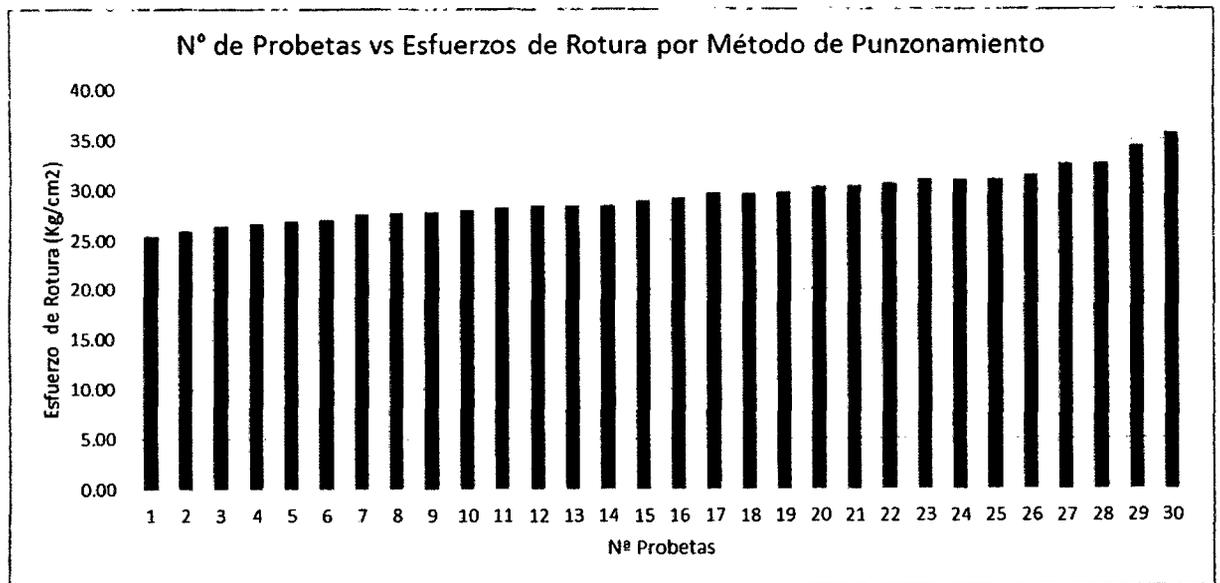


Figura 50: Variación de los Esfuerzos de Rotura al corte paralelo a la fibra de la madera Pinus Radiata por el Método Punzonamiento.

B.2. Cálculo del Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra del Pinus Radiata corregido al 83.03% de Contenido de Humedad: según fórmula 29 (para ambos métodos).

Tabla 15. PROBETAS METODO ASTM D 143-09/2010

N° Probeta	Esfuerzo de Rotura(Kg/cm2)
1	2.31
2	11.23
3	12.05
4	12.67
5	13.49
6	13.58
7	13.78
8	13.84
9	13.88
10	14.07
11	14.78
12	15.27
13	15.56
14	15.80
15	16.29
16	16.32
17	16.53
18	17.19
19	17.88
20	18.23
21	18.39
22	18.73
23	18.90
24	20.06
25	20.18
26	21.93
27	21.97
28	22.60
29	23.27
30	24.62

Tabla 16. PROBETAS METODO PUNZONAMIENTO

N° Probeta	Esfuerzo de Rotura(Kg/cm2)
1	21.04
2	22.08
3	23.23
4	23.24
5	24.23
6	25.80
7	25.88
8	25.91
9	25.96
10	26.54
11	27.75
12	28.11
13	28.58
14	28.62
15	28.64
16	29.08
17	29.76
18	29.98
19	30.13
20	30.18
21	30.59
22	30.73
23	31.17
24	31.60
25	31.98
26	32.20
27	32.54
28	34.97
29	41.05
30	51.89

B.3. Cálculo del Esfuerzo de Diseño del Corte paralelo a la fibra del Pinus Radiata al 5% del límite de exclusión corregido al 83.03% de Contenido de Humedad: según la fórmula 11 (para ambos métodos)

Para el Método de la Norma ASTM D 143-09/2010

- El esfuerzo básico o mínimo, corresponde a un de límite de exclusión 5% (cinco por ciento) del número de probetas ensayadas=0.05xN=0.05x30=1.5≈2 (segundo mínimo especimen de prueba), donde N: número de probetas.

Por lo tanto el esfuerzo básico Esfuerzo = 11.23 kg/cm².

- Para el cálculo del Esfuerzo de Diseño o Admisible utilizamos los valores de Tabla 4 y reemplazándolos en la fórmula 11 tenemos lo siguiente:

$$\sigma_{adm} = \frac{(F.C.)X(F.T.)}{(F.S)X(F.D.C)} X \text{EsfuerzoBásico}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{(1)x(1)}{(4)x(1)} X (11.23\text{kg/cm}^2)$$

$$\sigma_{adm} = 2.81 \text{ kg/cm}^2$$

Para el Método de Punzonamiento

- El esfuerzo básico o mínimo, corresponde a un de límite de exclusión 5% (cinco por ciento) del número de probetas ensayadas=0.05xN=0.05x30=1.5≈2 (segundo mínimo especimen de prueba), donde N: número de probetas.

Por lo tanto el esfuerzo básico Esfuerzo = 22.08 kg/cm².

- Para el cálculo del Esfuerzo de Diseño o Admisible utilizamos los valores de Tabla 4 y reemplazándolos en la fórmula 11 tenemos lo siguiente:

$$\sigma_{adm} = \frac{(F.C.)X(F.T.)}{(F.S)X(F.D.C)} X \text{Esfuerzo Básico}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{(1)x(1)}{(4)x(1)} x (22.08)$$

$$\sigma_{adm} = 5.52 \text{ kg/cm}^2$$

B.4. Cálculo del Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra del Pinus Radiata corregido al 12.00% de Contenido de Humedad: según fórmula 29 (para ambos métodos).

Tabla 17. PROBETAS METODO
ASTM D 143-09/2010

N° Probeta	Esfuerzo de Rotura Fv12(Kg/cm2)
1	64.42
2	64.86
3	65.73
4	68.47
5	68.57
6	71.57
7	72.58
8	73.07
9	73.77
10	74.15
11	74.55
12	76.39
13	77.28
14	77.42
15	80.09
16	80.56
17	80.61
18	83.32
19	84.21
20	84.77
21	86.40
22	86.49
23	86.76
24	88.83
25	89.49
26	91.43
27	92.29
28	94.99
29	99.77
30	109.06

Tabla 18. PROBETAS
METODO
PUNZONAMIENTO

N° Probeta	Esfuerzo de Rotura Fv12(Kg/cm2)
1	77.34
2	77.42
3	78.89
4	83.29
5	83.98
6	84.75
7	84.84
8	85.44
9	86.29
10	87.46
11	87.83
12	88.28
13	88.37
14	91.30
15	92.02
16	92.06
17	92.36
18	92.54
19	92.70
20	93.77
21	94.46
22	94.75
23	95.48
24	96.77
25	98.54
26	100.26
27	100.61
28	104.48
29	114.23
30	121.46

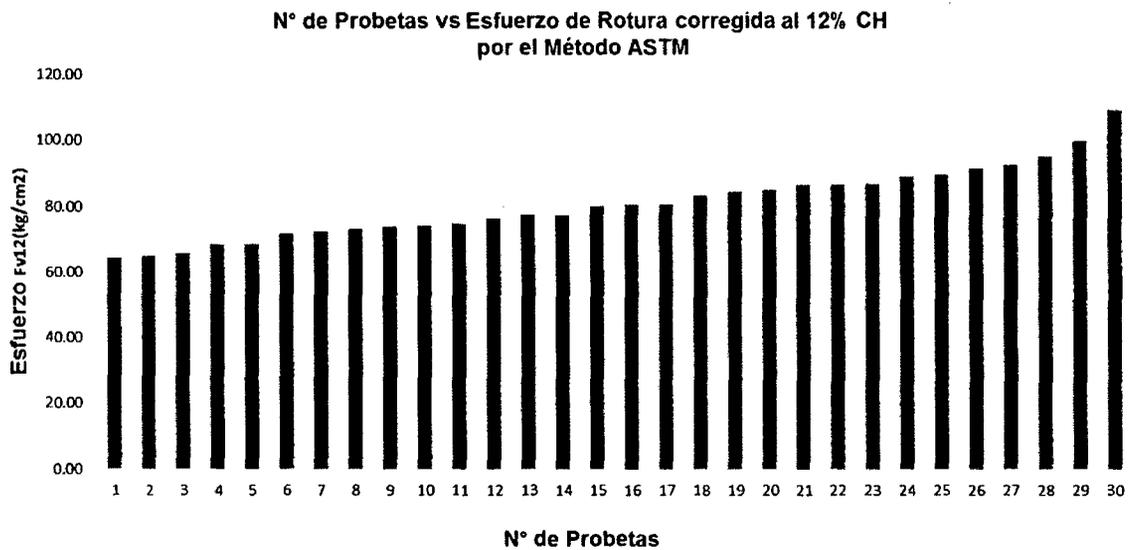


Figura 51: Ordenamiento de menor a mayor de los esfuerzos de rotura de las probetas ensayadas al corte paralelo a la fibra de la madera Pinus Radiata corregidos al 12% de contenido de Humedad por el Método ASTM D 143-09/2010

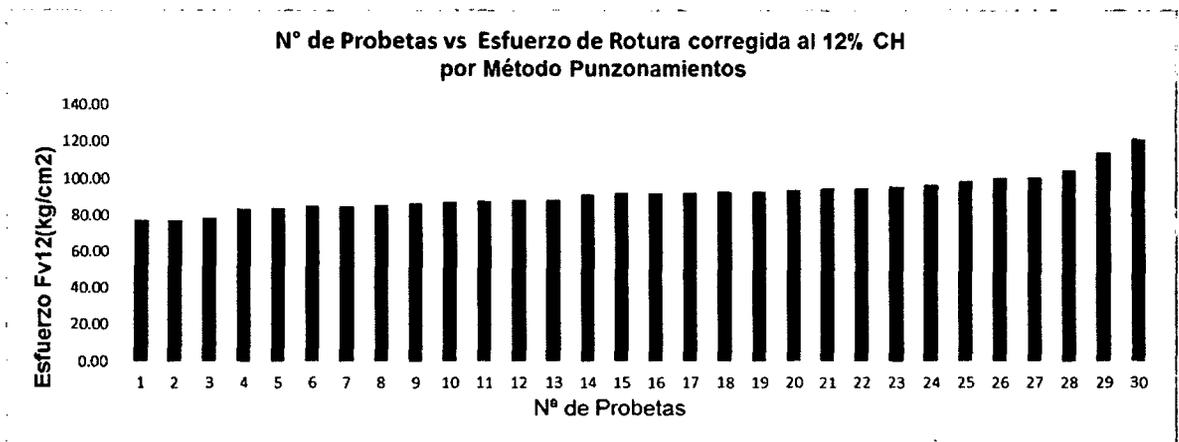


Figura 52: Ordenamiento de menor a mayor de los esfuerzos de rotura de las probetas ensayadas al corte paralelo a la fibra de la madera Pinus Radiata corregidos al 12% de contenido de Humedad por el Método de Punzonamiento.

B.5. Cálculo del Esfuerzo de Diseño de Corte Paralelo a la fibra del Pinus Radiata al 5% del límite de exclusión corregido al 12% de Contenido de Humedad: según la fórmula 11 (para ambos métodos)

Para el Método de la Norma ASTM D 143-09/2010

- El esfuerzo básico o mínimo, corresponde a un de límite de exclusión 5% (cinco por ciento) del número de probetas ensayadas= $0.05 \times N = 0.05 \times 30 = 1.5 \approx 2$ (segundo mínimo especimen de prueba), donde N: número de probetas.

Por lo tanto el esfuerzo básico Esfuerzo = 64.86 Kg/cm²

- Para el cálculo del Esfuerzo de Diseño o Admisible utilizamos los valores de Tabla 4 y reemplazándolos en la fórmula 11 tenemos lo siguiente:

$$\sigma_{adm} = \frac{(F.C.)X(F.T.)}{(F.S)X(F.D.C)} X \text{EsfuerzoBásico}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{(1)x(1)}{(4)x(1)} x (64.86)$$

$$\sigma_{adm} = 16.22 \text{ kg/cm}^2$$

Para el Método de Punzonamiento

- El esfuerzo básico o mínimo, corresponde a un de límite de exclusión 5% (cinco por ciento) del número de probetas ensayadas= $0.05 \times N = 0.05 \times 30 = 1.5 \approx 2$ (segundo mínimo especimen de prueba), donde N: número de probetas.

Por lo tanto el esfuerzo básico Esfuerzo = 77.42 kg/cm².

- Para el cálculo del Esfuerzo de Diseño o Admisible utilizamos los valores de Tabla 4 y reemplazándolos en la fórmula 11 tenemos lo siguiente:

$$\sigma_{adm} = \frac{(F.C.)X(F.T.)}{(F.S)X(F.D.C)} X \text{EsfuerzoBásico}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{(1)x(1)}{(4)x(1)} x (77.42)$$

$$\sigma_{adm} = 19.36 \text{ kg/cm}^2$$

C. Anexo: Correlación de las Propiedades Físicas(Contenido de Humedad y Densidad Básica) y el Esfuerzo a la Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata

C.1. Correlación Contenido de Humedad vs Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra de Pinus Radiata por ambos métodos.

Tabla 19. PROBETAS METODO ASTM-D-143-09/2010

N° Probeta	Contenido de Humedad(%)	Esfuerzo de Rotura(Kg/cm2)
1	32.99	49.14
2	35.02	51.32
3	35.39	54.23
4	35.42	38.10
5	35.43	43.77
6	35.59	38.49
7	35.65	42.45
8	35.70	52.31
9	36.33	50.00
10	36.40	39.59
11	36.44	37.17
12	36.54	39.43
13	36.55	51.15
14	36.75	48.65
15	36.90	57.12
16	37.06	48.08
17	37.80	51.54
18	37.98	43.43
19	38.29	48.30
20	38.43	40.75
21	38.45	41.13
22	38.65	42.45
23	38.76	41.13
24	38.92	42.83
25	39.75	45.47
26	40.03	59.25
27	40.05	43.77
28	40.06	38.86
29	40.45	43.46
30	48.01	45.66

Tabla 20. PROBETAS METODO PUNZONAMIENTO

N° Probeta	Contenido de Humedad(%)	Esfuerzo de Rotura(Kg/cm2)
1	75.24	30.32
2	76.20	26.46
3	76.49	35.60
4	77.31	26.66
5	77.48	31.05
6	78.50	28.04
7	80.21	25.39
8	80.22	28.97
9	80.37	31.05
10	80.79	27.66
11	80.93	27.65
12	81.58	32.59
13	81.86	26.90
14	82.21	28.45
15	82.34	29.70
16	82.37	30.37
17	82.54	31.05
18	83.23	31.41
19	83.33	27.85
20	83.41	29.84
21	84.02	29.11
22	84.98	27.06
23	85.74	28.42
24	85.84	29.70
25	87.20	28.42
26	87.75	30.64
27	88.12	28.23
28	88.39	25.96
29	89.53	34.34
30	102.68	32.65

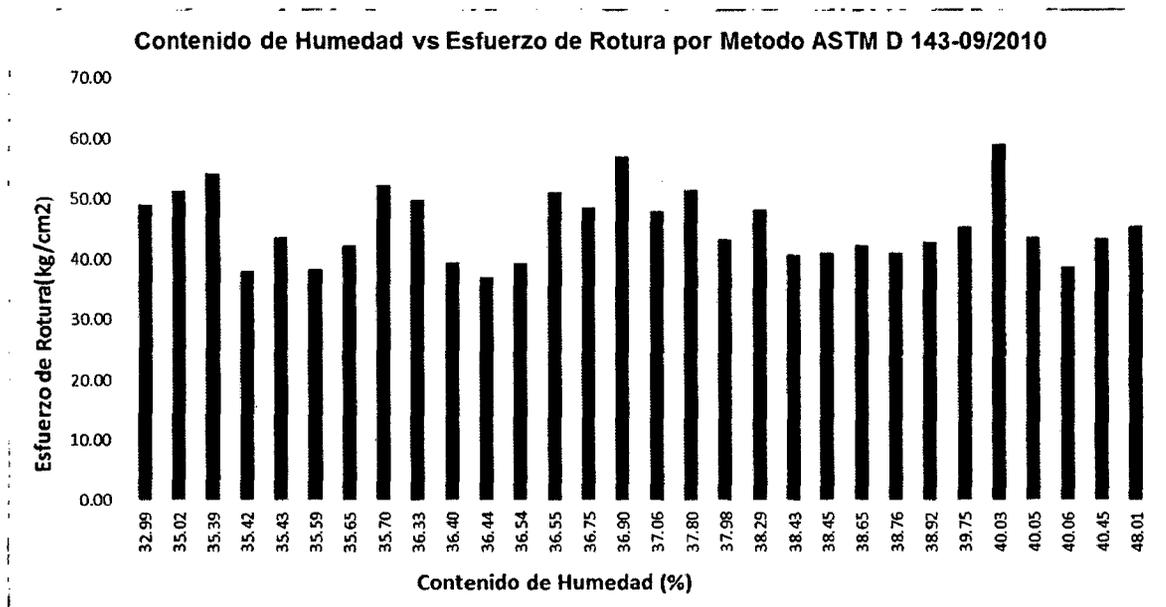


Figura 53: Contenido de Humedad y su relación con el Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata por el Método ASTM D143-09/2010.

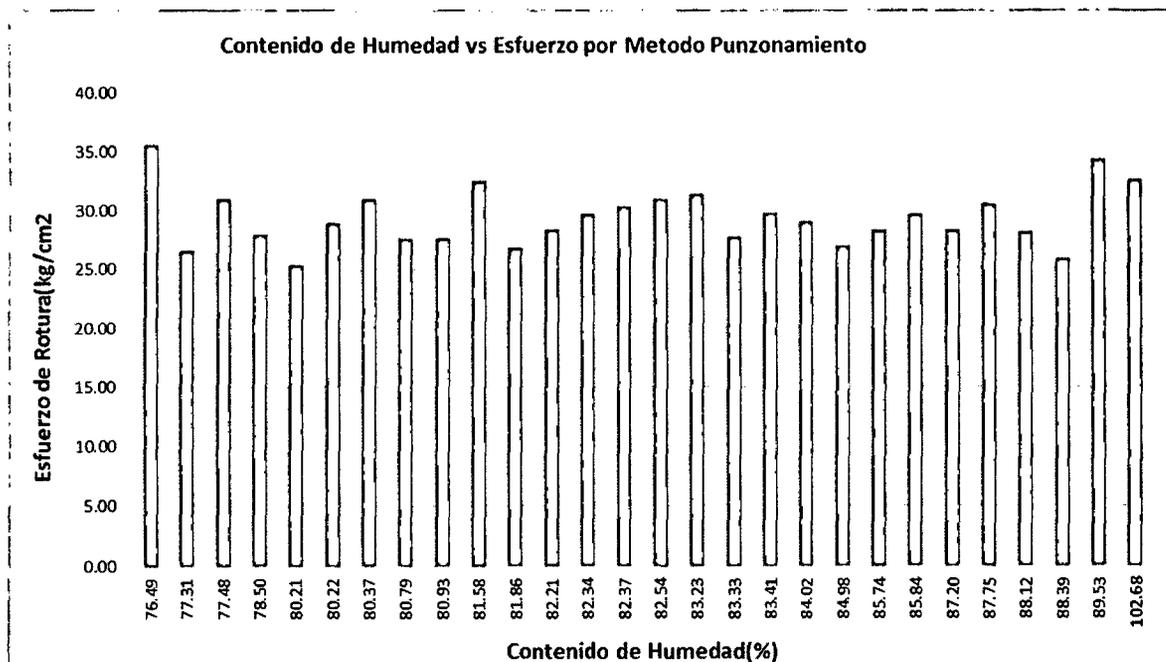


Figura 54: Contenido de Humedad y su relación con el Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata por el Método de Punzonamiento.

C.2. Correlación Densidad Básica vs Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra de Pinus Radiata por ambos métodos.

Tabla 21. PROBETAS METODOASTM D143-09/2010

N° Probeta	Densidad Basica(gr/cm3)	Esfuerzo de Rotura(Kg/cm2)
1	0.42	39.43
2	0.42	43.46
3	0.42	40.75
4	0.43	38.86
5	0.44	38.49
6	0.44	37.17
7	0.44	51.54
8	0.44	42.45
9	0.45	43.77
10	0.45	42.45
11	0.45	50.00
12	0.45	38.10
13	0.46	45.47
14	0.46	48.65
15	0.49	52.31
16	0.49	43.43
17	0.50	45.66
18	0.50	59.25
19	0.51	57.12
20	0.51	48.08
21	0.51	41.13
22	0.52	48.30
23	0.53	42.83
24	0.53	43.77
25	0.53	39.59
26	0.53	54.23
27	0.54	51.32
28	0.54	51.15
29	0.54	41.13
30	0.58	49.14

Tabla 22. PROBETAS METODO PUNZONAMIENTO

N° Probeta	Densidad Basica(gr/cm3)	Esfuerzo de Rotura(Kg/cm2)
1	0.37	29.70
2	0.38	28.42
3	0.39	27.66
4	0.39	30.37
5	0.39	25.39
6	0.39	26.90
7	0.39	27.06
8	0.39	28.42
9	0.40	26.66
10	0.40	30.64
11	0.40	29.11
12	0.40	26.46
13	0.40	27.85
14	0.40	28.23
15	0.40	32.65
16	0.40	31.05
17	0.40	25.96
18	0.40	28.97
19	0.41	29.84
20	0.41	28.45
21	0.41	29.70
22	0.41	34.34
23	0.41	27.65
24	0.41	32.59
25	0.42	28.04
26	0.42	31.05
27	0.42	31.41
28	0.42	31.05
29	0.44	35.60
30	0.45	30.32

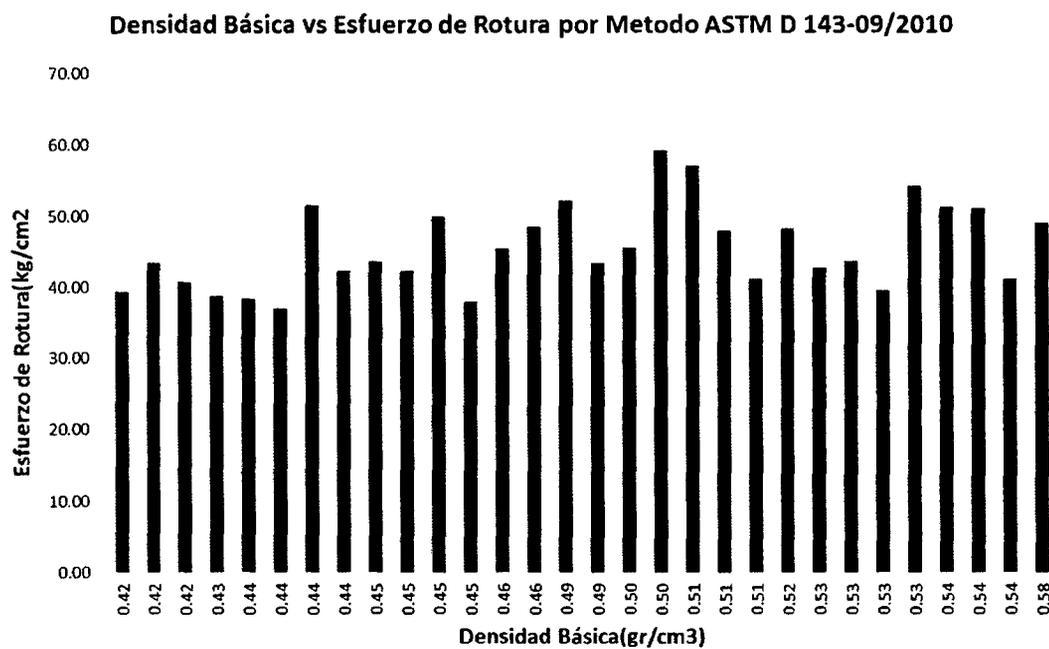


Figura 55: Densidad Básica y su relación con el Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata por el Método ASTM D 143-09/2010.

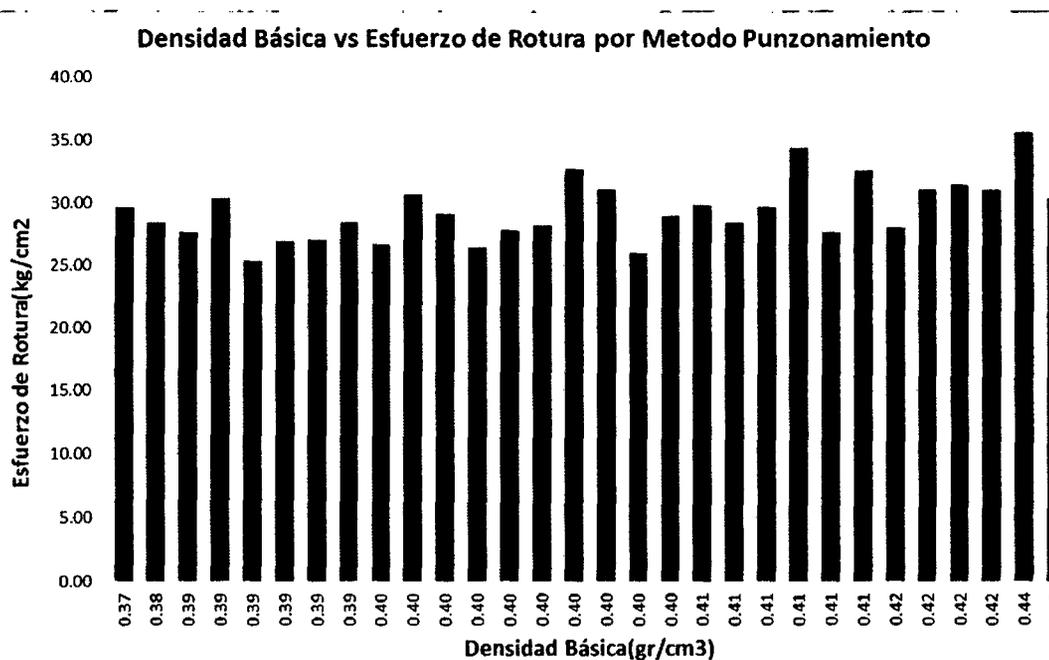


Figura 56: Densidad Básica y su relación con el Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata por el Método de Punzonamiento.

C.3. Correlación entre Contenido de humedad vs Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra de Pinus Radiata corregidos al 12% CH (para ambos Métodos).

Tabla 23. PROBETAS METODOASTM D143-09/2010

N° Probeta	Contenido de Humedad(%)	Esfuerzo de Rotura Fv12(Kg/cm2)
1	32.99	80.09
2	35.02	86.76
3	35.39	92.29
4	35.42	64.86
5	35.43	74.55
6	35.59	65.73
7	35.65	72.58
8	35.70	89.49
9	36.33	86.49
10	36.40	68.57
11	36.44	64.42
12	36.54	68.47
13	36.55	88.83
14	36.75	84.77
15	36.90	99.77
16	37.06	84.21
17	37.80	91.43
18	37.98	77.28
19	38.29	86.40
20	38.43	73.07
21	38.45	73.77
22	38.65	76.39
23	38.76	74.15
24	38.92	77.42
25	39.75	83.32
26	40.03	109.06
27	40.05	80.61
28	40.06	71.57
29	40.45	80.56
30	48.01	94.99

Tabla 24. PROBETAS METODO PUNZONAMIENTO

N° Probeta	Contenido de Humedad(%)	Esfuerzo de Rotura Fv12(Kg/cm2)
1	75.24	87.83
2	76.20	77.42
3	76.49	104.48
4	77.31	78.89
5	77.48	92.06
6	78.50	83.98
7	80.21	77.34
8	80.22	88.28
9	80.37	94.75
10	80.79	84.75
11	80.93	84.84
12	81.58	100.61
13	81.86	83.29
14	82.21	88.37
15	82.34	92.36
16	82.37	94.46
17	82.54	96.77
18	83.23	98.54
19	83.33	87.46
20	83.41	93.77
21	84.02	92.02
22	84.98	86.29
23	85.74	91.30
24	85.84	95.48
25	87.20	92.54
26	87.75	100.26
27	88.12	92.70
28	88.39	85.44
29	89.53	114.23
30	102.68	121.46

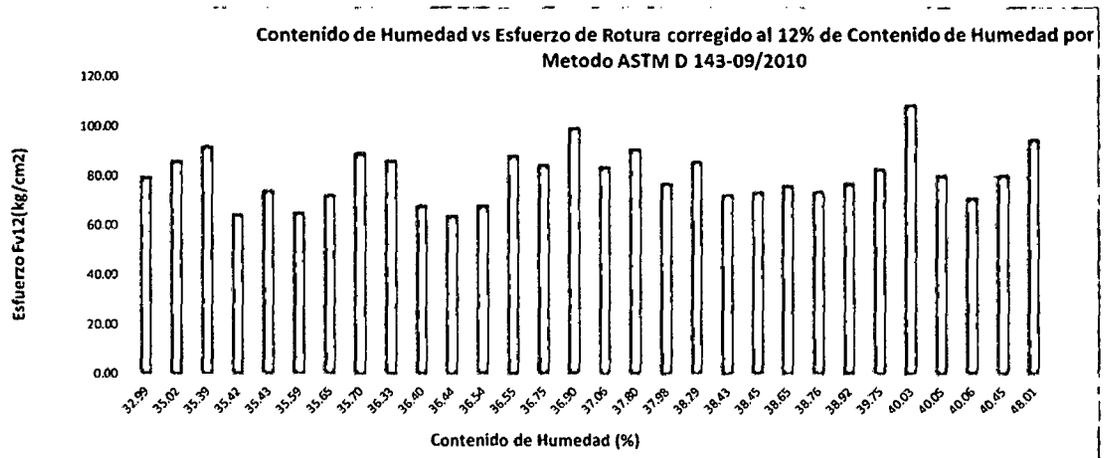


Figura 57: Contenido de Humedad vs. l Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata corregido al 12% del Contenido de Humedad por el Método ASTM D 143-09/2010.

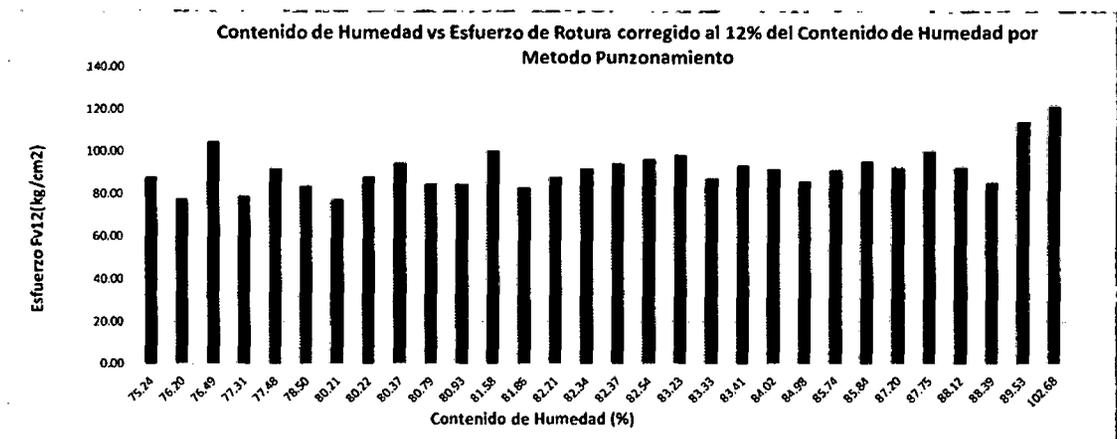


Figura 58: Contenido de Humedad vs. Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata corregido al 12% del Contenido de Humedad por el Método de Punzonamiento.

C.4. Correlación entre Densidad Básica vs Esfuerzo de Rotura de Corte Paralelo a la fibra de Pinus Radiata corregidos al 12% CH (para ambos Métodos).

Tabla 25. PROBETAS METODOASTM-D-143-09/2010

Nº Probeta	Densidad	Esfuerzo de
1	0.42	68.47
2	0.42	80.56
3	0.42	73.07
4	0.43	71.57
5	0.44	65.73
6	0.44	64.42
7	0.44	91.43
8	0.44	76.39
9	0.45	74.55
10	0.45	72.58
11	0.45	86.49
12	0.45	64.86
13	0.46	83.32
14	0.46	84.77
15	0.49	89.49
16	0.49	77.28
17	0.50	94.99
18	0.50	109.06
19	0.51	99.77
20	0.51	84.21
21	0.51	74.15
22	0.52	86.40
23	0.53	77.42
24	0.53	80.61
25	0.53	68.57
26	0.53	92.29
27	0.54	86.76
28	0.54	88.83
29	0.54	73.77
30	0.58	80.09

Tabla 26. PROBETAS METODO PUNZONAMIENTO

Nº Probeta	Densidad	Esfuerzo de
1	0.37	95.48
2	0.38	91.30
3	0.39	84.75
4	0.39	94.46
5	0.39	77.34
6	0.39	83.29
7	0.39	86.29
8	0.39	92.54
9	0.40	78.89
10	0.40	100.26
11	0.40	92.02
12	0.40	77.42
13	0.40	87.46
14	0.40	92.70
15	0.40	121.46
16	0.40	92.06
17	0.40	85.44
18	0.40	88.28
19	0.41	93.77
20	0.41	88.37
21	0.41	92.36
22	0.41	114.23
23	0.41	84.84
24	0.41	100.61
25	0.42	83.98
26	0.42	96.77
27	0.42	98.54
28	0.42	94.75
29	0.44	104.48
30	0.45	87.83

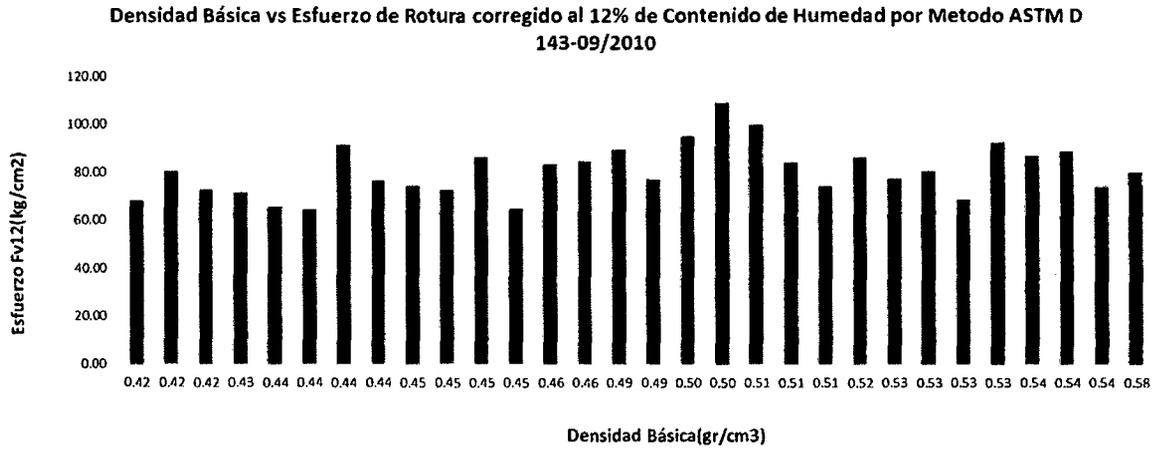


Figura 59: Densidad Básica vs. Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata corregido al 12% de Contenido de Humedad por el Método ASTM D 143-09/2010.

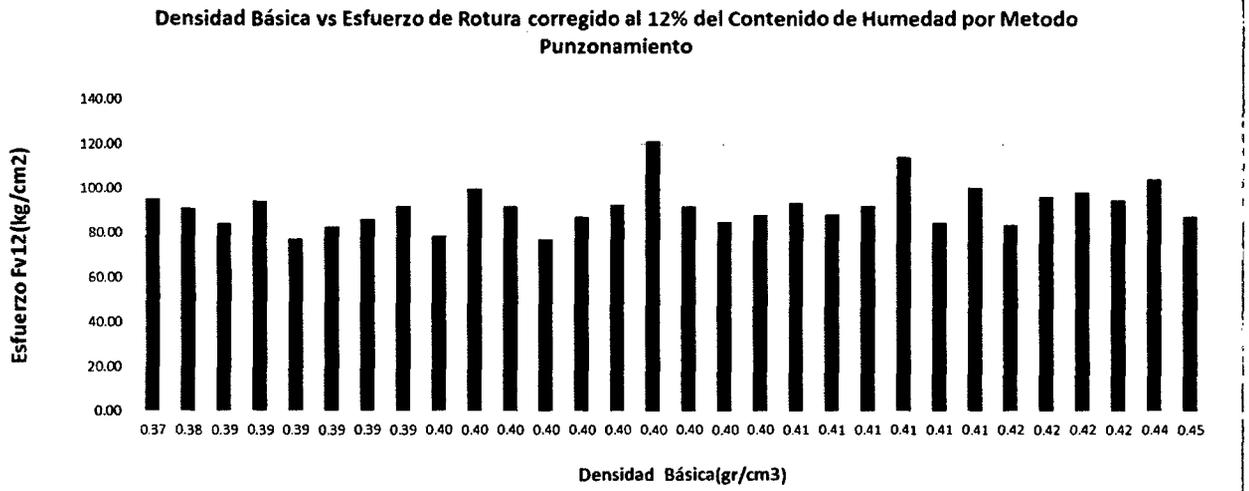


Figura 60: Densidad Básica vs. Esfuerzo de Rotura de Corte paralelo a la fibra de Pinus Radiata corregido al 12% de Contenido de Humedad por el Método de Punzonamiento.

D. Anexo: Panel Fotográfico



Foto 1: Ubicación del arboretum o bosque con la población de Pino Radiata en la Cooperativa Atahualpa - Granja Porcón.

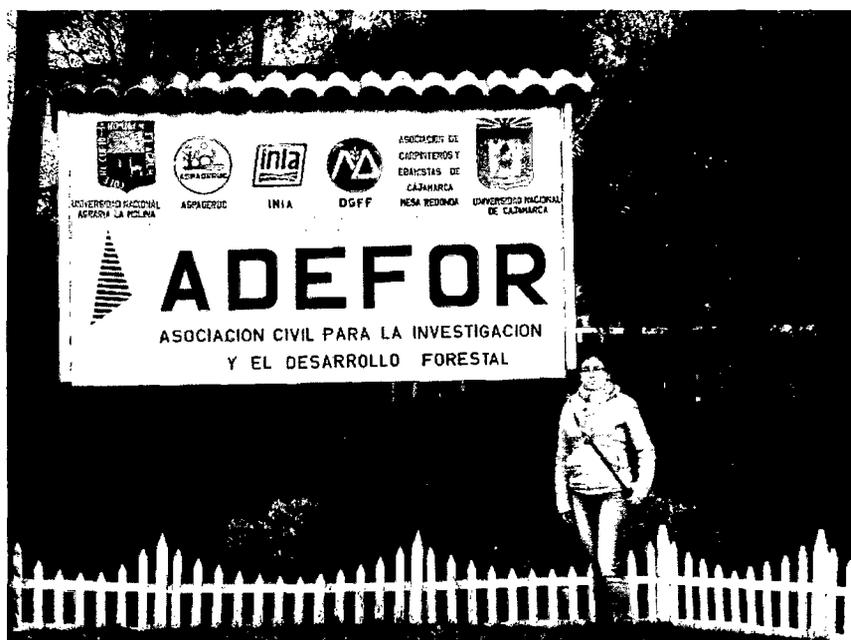


Foto 2: Visita técnica al ADEFOR, para la coordinación, obtención y habilitamiento de la madera aserrada, para la elaboración de probetas estándar.



Foto 3: Plantaciones de Pinus Radiata en ADEFOR.



Foto 4: Troncos de madera Pinus Radiata, traídos de la plantación de la Cooperativa Atahualpa-Granja Porcón.



Fotos 5,6: Secado al Aire de la madera Pinus Radiata



Foto 7,8: Corte de piezas de madera con la sierra de cinta y madera con determinada escuadria.

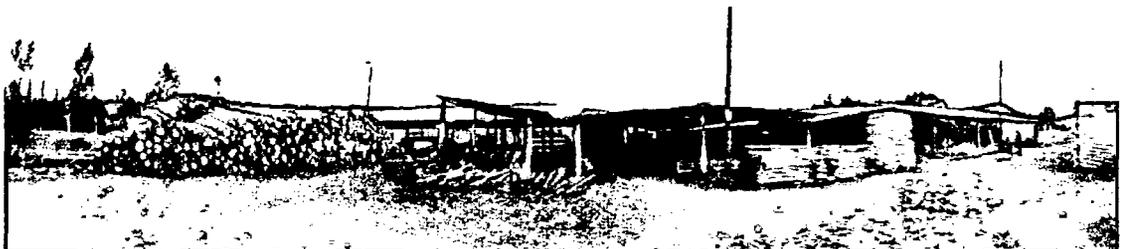
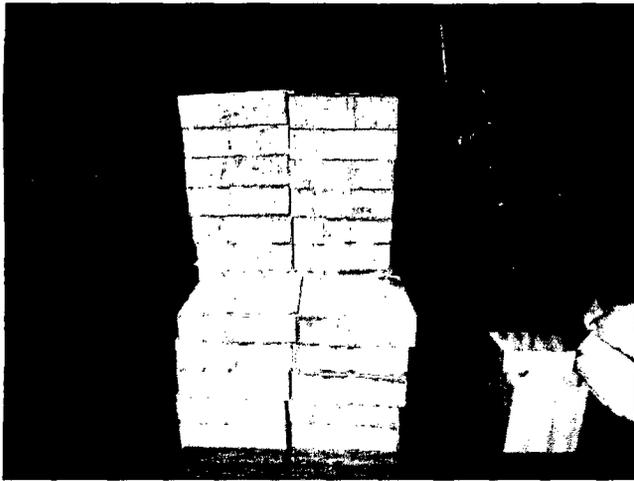
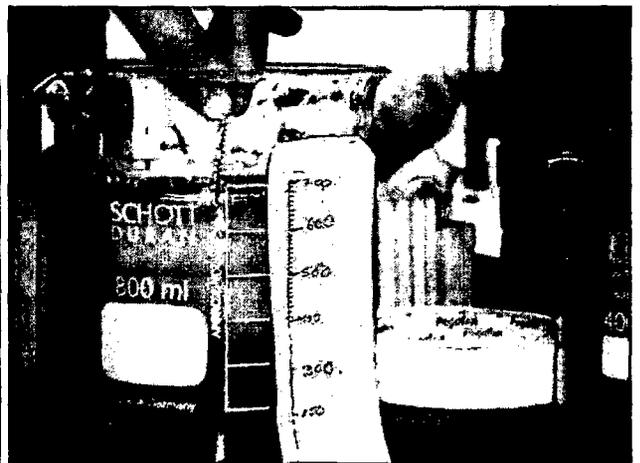


Foto 09: Vista panorámica del habilitamiento de madera Pinus Radiata



Fotos 10,11: Codificación de Probetas estándar de ser ensayadas.



Fotos 12, 13: Ensayo de inmersión en agua, para determinar Volumen en estado Verde de las probetas, antes de ser ensayadas.



Foto 14, 15: Obtención del Peso Secado al Horno y Peso en estado Verde de las probetas antes de ser ensayadas.



Foto16, 17: Equipo de acero, diseñado para realizar el ensayo de probetas por el Método de Punzonamiento.



Fotos 18 y 19: Máquina Universal donde se realizaron los ensayos mecánicos. Laboratorio de Ensayo de Materiales de la F.I de la UNC.



Fotos 20 y 21: Colocación de las probetas en el equipo diseñado y su acondicionamiento en la Máquina Universal

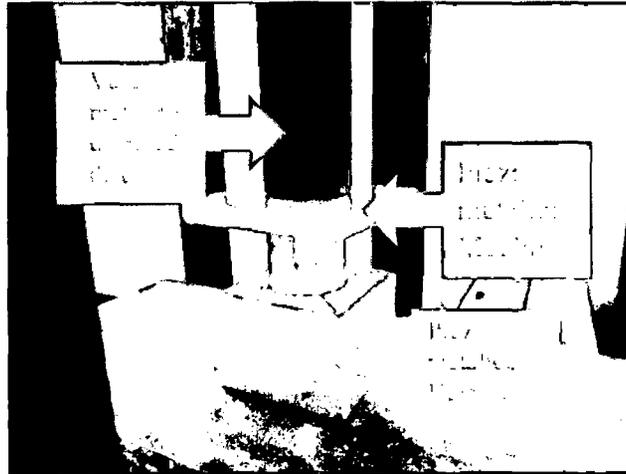


Foto 22: Piezas metálicas macho y hembra para determinar el esfuerzo a corte por método de Punzonamiento.



Fotos 23, 24: Secuencia de ensayos de corte Paralelo al grano mediante el Método de Punzonamiento.

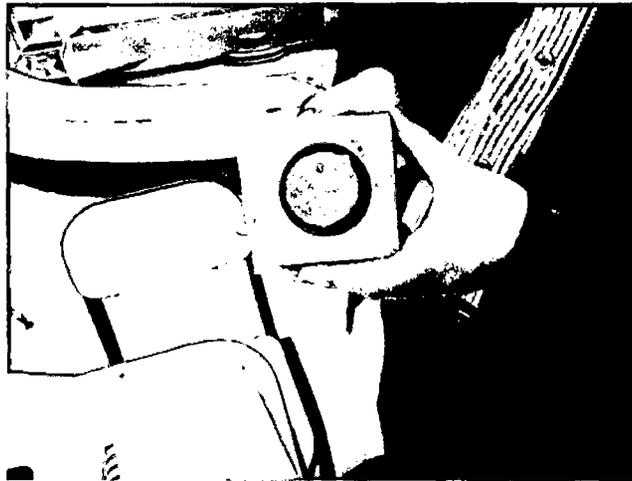


Foto 25: Muestra cilíndrica luego de la falla de la probeta de ensayo mediante el Método de Punzonamiento



Foto 26, 27, 28, 29 Secuencia de ensayos de corte Paralelo al grano mediante el Método

ASTM D 143-09/2010.



Fotos 30, 31, 32: Modo de falla de corte e imperfecciones por el giro o rotación de probetas estándar usadas en el Método de Norma ASTM D 143-09/2010.



Fotos: 33, 34 : Fuerzas binarias de compresión y tracción generadas al aplicar la carga de corte por el método ASTM D 143-09/2010. Notese la deformación angular que se genera.