

**EVALUACIÓN DE CONEXIÓN NO RÍGIDA EN MADERA TECA ROLLIZA DE
PEQUEÑO DIÁMETRO SOMETIDA A FUERZAS AXIALES**

ANDRÉS MAURICIO VILA QUINTERO

NEYRA VALDERRAMA MORENO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2010

**EVALUACIÓN DE CONEXIÓN NO RÍGIDA EN MADERA TECA ROLLIZA DE
PEQUEÑO DIÁMETRO SOMETIDA A FUERZAS AXIALES**

ANDRÉS MAURICIO VILA QUINTERO

NEYRA VALDERRAMA MORENO

Proyecto de grado para obtener el título de ingeniero(a) civil

Director

Ricardo Alfredo Cruz Hernández

Ingeniero Civil

Ph.D. En Ciencias Técnicas

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2010

Ser profesional no es una tarea fácil, se debe tener el interés, las ganas, el anhelo de ser alguien mejor continuamente, gran parte de estos logros son alcanzados con ayuda de personas que siempre están brindando su apoyo, sus conocimientos, su afecto.

Este logro tan importante en mi vida se lo dedico y agradezco principalmente a mis padres Pedro Vila y Astrid Quintero dado que sin su respaldo incondicional no hubiese sido posible la culminación con éxito de este sueño ahora hecho realidad; también quiero dedicar mis triunfos a mi hermana Laura Isabel.

Finalmente, dedico el trabajo realizado a Neyra Valderrama, por aceptar ser parte de éste reto, sin importar el tiempo que tardamos en culminarlo; por ser una amiga especial, incondicional, perseverante, disciplinada, y siempre atenta a una recomendación en todo el proceso de desarrollo.

Andrés Mauricio Vila Quintero

Formarme como profesional, es una de las metas en mi vida, pero quizás la única que me ha permitido encontrar el sendero a seguir en mi crecimiento profesional y personal.

El desarrollo de éste proyecto lo dedico principalmente a mis padres Adolfo Valderrama y Carmen Rosa Moreno, porque gracias a su esfuerzo diario, su confianza y su constante interés me han motivado a obtener este logro, de igual manera le dedico a mis hermanos Nelcy, Deisy y Nestor, quienes son el motivo de mi esfuerzo y mi deseo de ser ejemplo a seguir.

Igualmente dedico este éxito a mi amigo Andrés Vila, compañero del proyecto presentado, que con su perseverancia, interés y conocimientos contribuyo para culminar satisfactoriamente esta meta.

Neyra Valderrama Moreno

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por darnos la oportunidad de realizar nuestro proyecto de grado.

A nuestros padres quienes nos apoyaron de forma incondicional.

Agradecemos a la escuela de Diseño Industrial por facilitarnos un espacio en el taller de maderas. A su encargado Mauricio Jaraba, por su colaboración desinteresada enseñándonos lo necesario para el uso de las herramientas de este laboratorio y por aportar soluciones para la elaboración de piezas necesarias en este proyecto de grado.

A la Escuela de Ingeniería Química, por el préstamo del horno aireado y otros implementos ubicado en el laboratorio de procesos. A sus técnicos por su amable asistencia.

También agradecemos a Jaime Cadena, auxiliar del laboratorio de resistencia de materiales por su contribución en los ensayos realizados en la maquina de pruebas MTS 647 Hidraulic Wedge Grip.

A Jairo Hernández, auxiliar del laboratorio de Hormigón, por su buena atención y colaboración.

Al Ingeniero Álvaro Rey Soto, por el tiempo dedicado a consultas y la orientación de algunos diseños.

A nuestros amigos que en algún momento nos brindaron su apoyo en la realización de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	26
1. GENERALIDADES DE LA MADERA	29
1.1 CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA MADERA.....	29
1.1.1 Contenido de humedad de la madera verde.....	29
1.1.2 Contenido de humedad en equilibrio de la madera.....	30
1.2 SECADO DE LA MADERA	33
1.2.1 Métodos de secado de la madera.....	34
1.2.1.1 Secado natural.....	34
1.2.1.2 Secado al horno.....	40
1.3 DENSIDAD	41
1.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS	42
1.5 RESISTENCIA A LA TENSIÓN PARALELA A LAS FIBRAS.....	43
1.6 RESISTENCIA AL CORTE PARALELO A LAS FIBRAS	44
1.7 CUBIERTAS EN MADERA.....	45
1.7.1 CERCHA COMO ESTRUCTURA DE CUBIERTA	49
1.7.1.1 Elementos que conforman una cercha	50
1.7.1.2 Clasificación y tipos de cerchas.....	51
1.7.2 DIAFRAGMAS INCLINADOS COMO ESTRUCTURA DE CUBIERTA.....	53
1.7.2.1 Elementos que conforman un diafragma inclinado	54

1.8 CONEXIONES EN MADERA ROLLIZA.....	55
2. CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA TECA.....	65
2.1 ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD (CH).....	65
2.2 ENSAYO DE DENSIDAD.....	73
2.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN PARALELO A LAS FIBRAS.....	76
2.3.1 Ensayo de muestras según la ASTM.....	76
2.3.2 Ensayo de muestras circulares con médula.....	84
2.4 ENSAYO A TENSIÓN PARALELA A LAS FIBRAS	89
3. ENSAYO DE CONEXIÓN EN MADERA ROLLIZA.....	99
3.1 SELECCIÓN DE LA CONEXIÓN A EVALUAR.....	99
3.2 CONEXIÓN TIPO 3A A COMPRESIÓN	106
3.2.1 Probeta ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	106
3.2.2 Diseño de ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	109
3.2.3 Ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	121
3.3 CONEXIÓN 3A A TENSIÓN	132
3.3.1 Probeta ensayo a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	132
3.3.2 Diseño de ensayo a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2".	135
3.3.3 Ensayo a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	142
3.4 PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CONEXIÓN TIPO 3A CON MADERA ROLLIZA.....	153
3.4.1 Dimensiones y despiece	153
3.4.2 Selección de las rollizas.....	154

3.4.3 Medición y marcación	155
3.4.4 Corte de los elementos	156
3.4.5 Desbaste de los extremos.....	157
3.4.6 Elaboración de las platinas	158
3.4.7 Perforaciones en madera.....	158
3.4.8 Ensamble	159
4. EVALUACIÓN DE CERCHA EN LABORATORIO – APLICACIÓN DE LA CONEXIÓN TIPO 3A.....	161
4.1 ENSAYO CERCHA TRIANGULAR.....	162
4.1.2. Carga máxima de la cercha	163
4.1.2.1 Carga de elementos en función de la carga P	164
4.1.2.2 Resistencia ultima de los elementos.....	165
4.1.3 Resistencia ultima de la conexión con un perno de 1/2"	168
4.1.4 Diseño de platinas	169
4.1.4.1 Platinas A y C	169
4.1.4.2 Platinas B.....	171
4.1.5 Diseño del ensayo de cercha triangular.....	172
4.1.6 Ensayo cercha triangular	174
5. ANÁLISIS DE DATOS	176
5.1 CONTENIDO DE HUMEDAD	176
5.2 DENSIDAD	177
5.3 COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS.....	178
5.3.1 Compresión paralela a las fibras (muestras sección rectangular).....	178

5.3.2 Compresión paralela a las fibras (muestras sección circular con medula).	180
5.4 TENSIÓN PARALELA A LAS FIBRAS	182
5.5 RESISTENCIA DE LA CONEXIÓN TIPO 3A CON UN PERNO DE 1/2" A FUERZAS AXIALES	184
5.5.1 Resistencia a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	184
5.5.2 Resistencia a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	187
5.6 EVALUACIÓN DE CERCHA EN LABORATORIO – APLICACIÓN DE LA CONEXIÓN TIPO 3A.....	188
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	190
BIBLIOGRAFÍA.....	193
ANEXOS	198

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. % contenido de humedad de las muestras de madera teca	72
Tabla 2. Densidad básica de muestras de madera teca	75
Tabla 3. Tabla resumen del ensayo a compresión paralela a las fibras	83
Tabla 4. Esfuerzos máximos de muestras circulares con medula a compresión paralela a las fibras.....	88
Tabla 5. Tabla resumen del ensayo a tensión paralela a las fibras	97
Tabla 6. Características conexión tipo 1	100
Tabla 7. Características conexión tipo 2	100
Tabla 8. Características conexión tipo 3A.....	101
Tabla 9. Características conexión tipo 3B.....	101
Tabla 10. Características conexión tipo 4A.....	101
Tabla 11. Características conexión tipo 4B.....	102
Tabla 12. Características conexión tipo 5A.....	102
Tabla 13. Características conexión tipo 5B.....	102
Tabla 14. Características conexión tipo 6	103
Tabla 15. Características conexión tipo 7	103
Tabla 16. Características conexión tipo 8	103
Tabla 17. Sumatoria de cada calificación para los tipos de conexión.....	104
Tabla 18. Calificación para cada tipo de conexión.....	104

Tabla 19. Resultado de probetas a compresión conexión tipo 3 A con un perno de 1/2"	129
Tabla 20. Resultado de probetas a tensión conexión tipo 3 A con un perno de 1/2"	151
Tabla 21. Elementos cercha triangular	163
Tabla 22. Muestras ensayo a tensión paralela a las fibras	182
Tabla 23. Variación del esfuerzo con respecto al duramen	186

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Humedad de la madera verde y humedad en equilibrio de la madera...	31
Figura 2. Apilado horizontal de madera teca rolliza	38
Figura 3. Apilado en caballete de madera teca rolliza	38
Figura 4. Apilado triangular	39
Figura 5. Compresión paralela a las fibras	43
Figura 6. Tensión paralela a las fibras	44
Figura 7. Partes de una cubierta a dos aguas	46
Figura 8. Alero de cubierta y sus componentes	47
Figura 9. Algunos tipos de encuentros entre cubiertas	48
Figura 10. Elemento de una Cercha	50
Figura 11. Clasificación de cercha según su forma	51
Figura 12. Clasificación de cerchas según la distribución de sus piezas	52
Figura 13. Elementos de un diafragma inclinado	55
Figura 14. Conexión tipo 1	56
Figura 15. Conexión tipo 2	57
Figura 16. Conexión tipo 3A	58
Figura 17. Conexión tipo 3B	59
Figura 18 Conexión Tipo 4A	60
Figura 19. Conexión tipo 4B	60

Figura 20. Conexión tipo 5A.....	61
Figura 21. Conexión tipo 5B.....	62
Figura 22. Conexión tipo 6.....	62
Figura 23. Conexión tipo 7.....	63
Figura 24 Conexión Tipo 8.....	64
Figura 25. Horno de secado con circulación de aire.....	66
Figura 26. Muestras para ensayo %CH.....	67
Figura 27. Volumen por inmersión de agua.....	74
Figura 28. Muestras para ensayo a compresión paralela a las fibras según ASTM D143-09.....	77
Figura 29. Ensayo a compresión paralela a las fibras de muestra según ASTM D143-09.....	78
Figura 30. Muestras con medula compresión paralela a las fibras.....	85
Figura 31. Ensayo compresión paralela a las fibras de muestra con medula.....	85
Figura 32. Muestras para ensayo a tensión paralela a las fibras según.....	89
Figura 33. Muestra para ensayo a tensión paralela a las fibras según ASTM D143-09.....	90
Figura 34. Ensayo tensión paralela a las fibras de muestra según.....	91
Figura 35. Acople para ensayos a tensión paralela a las fibras.....	91
Figura 36. Muestras falladas a tensión.....	98
Figura 37. Área compresión probeta ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2".....	107
Figura 38. Área cortante probeta ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2".....	107

Figura 39. Adecuación de laboratorio para ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	109
Figura 40. Deflexión esparrago.....	110
Figura 41. Momento plástico esparrago.....	111
Figura 42. Momento plástico último del esparrago	112
Figura 43. Deflexión perno en madera.....	113
Figura 44. Momento plástico perno en madera	114
Figura 45. Momento plástico ultimo perno en madera.....	116
Figura 46. Platina Tipo 1	117
Figura 47. Platina tipo 2	120
Figura 48. Modelo de probeta ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	122
Figura 49. Ensayo probeta a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2".....	122
Figura 50. Aplastamiento producido por de un perno de 1/2" en la conexión tipo 3A a compresión	131
Figura 51. Corte generado posterior al aplastamiento de un perno de 1/2" en la conexión tipo 3A a compresión	131
Figura 52. Forma de fallada de pernos de 1/2" en la conexión tipo 3A a tensión	131
Figura 53. Tensión probeta ensayo de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	133
Figura 54. Área cortante probeta ensayo tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	133
Figura 55. Adecuación de laboratorio para ensayo a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	136
Figura 56. Platina tipo 3	141

Figura 57. Probeta ensayo a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	143
Figura 58. Ensayo probeta a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	144
Figura 59. Forma de fallada a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	152
Figura 60. Probetas falladas a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	152
Figura 61. Forma de fallada de pernos de 1/2" en la conexión tipo 3A a tensión	152
Figura 62. Dimensiones y despiece	154
Figura 63. Selección de las rollizas	155
Figura 64. Medición y marcación	156
Figura 65. Corte de los elementos	157
Figura 66. Desbaste de los extremos	158
Figura 67. Perforaciones en madera y platinas	159
Figura 68. Ensamble	160
Figura 69. Cercha W	161
Figura 70. Cercha triangular con conexiones tipo 3A con un perno de 1/2"	162
Figura 71. Diagrama de cuerpo libre cercha triangular	163
Figura 72. Platinas cercha triangular con conexiones tipo 3A con un perno de 1/2"	169
Figura 73. Platinas A y C cercha triangular	170
Figura 74. Platinas B cercha triangular	172
Figura 75. Ensayo cercha triangular	173
Figura 76. Modo de falla de la cercha triangular	174

Figura 77. Modo de falla del nodo A de la cercha triangular.....175

Figura 78. Modo de falla del nodo C de la cercha triangular.....175

Figura 79. Modo de falla del nodo B de la cercha triangular.....175

Figura 80. Conexión tipo 3A para los apoyos189

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1. Curvas de humedad de equilibrio de la madera	32
Gráfico 2. % de humedad perdida para la muestra 1.....	68
Gráfico 3. % de humedad perdida para la muestra 2.....	68
Gráfico 4. % de humedad perdida para la muestra 3.....	69
Gráfico 5. % de humedad perdida para la muestra 4.....	69
Gráfico 6. % de humedad perdida para la muestra 5.....	70
Gráfico 7. % de humedad perdida para la muestra 6.....	70
Gráfico 8. % de humedad perdida para la muestra 7.....	71
Gráfico 9. % de humedad perdida para la muestra 8.....	71
Gráfico 10. Muestra 1 compresión paralela a las fibras	80
Gráfico 11. Muestra 2 compresión paralela a las fibras	80
Gráfico 12. Muestra 3 compresión paralela a las fibras	81
Gráfico 13. Muestra 4 compresión paralela a las fibras	81
Gráfico 14. Muestra 5 compresión paralela a las fibras	82
Gráfico 15. Muestra 6 compresión paralela a las fibras	82
Gráfico 16. Muestra circular con medula 1 compresión paralela a las fibras	86
Gráfico 17. Muestra circular con medula 2 compresión paralela a las fibras	86
Gráfico 18. Muestra circular con medula 3 compresión paralela a las fibras	87
Gráfico 19. Muestra 1 tensión paralela a las fibras	94

Gráfico 20. Muestra 2 tensión paralela a las fibras	94
Gráfico 21. Muestra 3 tensión paralela a las fibras	95
Gráfico 22. Muestra 4 tensión paralela a las fibras	95
Gráfico 23. Muestra 5 tensión paralela a las fibras	96
Gráfico 24. Muestra 6 tensión paralela a las fibras	96
Gráfico 25. Probeta 1 resistencia conexión 3A	123
Gráfico 26. Probeta 2 resistencia conexión 3A	124
Gráfico 27. Probeta 3 resistencia conexión 3A	124
Gráfico 28. Probeta 4 resistencia conexión 3A	125
Gráfico 29. Probeta 5 resistencia conexión 3A	125
Gráfico 30. Probeta 6 resistencia conexión 3A	126
Gráfico 31. Probeta 7 resistencia conexión 3A	126
Gráfico 32. Probeta 8 resistencia conexión 3A	127
Gráfico 33. Probeta 9 resistencia conexión 3A	127
Gráfico 34. Probeta 10 resistencia conexión 3A	128
Gráfico 35. Probeta 11 resistencia conexión 3A	128
Gráfico 36. Probeta 1 resistencia conexión 3A	145
Gráfico 37. Probeta 2 resistencia conexión 3A	145
Gráfico 38. Probeta 3 resistencia conexión 3A	146
Gráfico 39. Probeta 4 resistencia conexión 3A	146
Gráfico 40. Probeta 5 resistencia conexión 3A	147
Gráfico 41. Probeta 6 resistencia conexión 3A	147
Gráfico 42. Probeta 7 resistencia conexión 3A	148

Gráfico 43. Probeta 8 resistencia conexión 3A	148
Gráfico 44. Probeta 9 resistencia conexión 3A	149
Gráfico 45. Probeta 10 resistencia conexión 3A	149
Gráfico 46. Probeta 11 resistencia conexión 3A	150
Gráfico 47. % Humedad perdida por las muestras de ensayo	176
Gráfico 48. Compresión paralela a las fibras muestras rectangulares.....	179
Gráfico 49. Compresión paralela a las fibras muestras circulares con medula.....	181
Gráfico 50. Tensión paralela a las fibras muestras de ensayo	183
Gráfico 51. Compresión de probetas de la conexión tipo 3A con perno de 1/2" ...	184
Gráfico 52. Esfuerzo Vs % duramen ensayo a compresión de conexión tipo 3A con un perno de 1/2"	186
Gráfico 53. Tensión de probetas de la conexión tipo 3A con perno de 1/2".....	187

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DE CONEXIÓN NO RÍGIDA EN MADERA TECA ROLLIZA DE PEQUEÑO DIÁMETRO SOMETIDA A FUERZAS AXIALES¹

AUTORES: Andrés Mauricio Vila Quintero**
Neyra Valderrama Moreno

PALABRAS CLAVES: Teca, Conexión, Madera, Rolliza, Resistencia, Compresión, Tensión.

DESCRIPCIÓN: Esta investigación da como resultado la utilización de madera Teca rolliza de pequeños diámetros en la realización de estructuras hechas con elementos unidos mediante conexiones no rígidas, para esto se realizó ensayos tomando como referencia las normas ASTM, con lo que se determinó la humedad, densidad, esfuerzo máximo a tensión y compresión paralela a las fibras de la madera de estudio que fue previamente secada al aire.

Después de tener estas características se dio inicio a la elección de la mejor conexión apta para la aplicación en estructuras de madera rolliza, para la cual se tuvo en cuenta una evaluación empírica de cada una de las conexiones encontradas tomando criterios tales como facilidad de trabajo en carpintería, acero, ensamble, economía y estética de ellas. Se continúa realizando el estudio de la conexión escogida que consta de platinas de acero en los extremos superior e inferior de la sección transversal del elemento de madera, unidas mediante pernos ubicados longitudinalmente. Se decide cuantificar mediante ensayos la resistencia de esta con un perno de 1/2" bajo la acción de fuerzas axiales de tensión y compresión, para esto se diseñan piezas que ayudan a la realización de los ensayos de la conexión garantizando resultados confiables.

Además se realizó la evaluación a escala real del comportamiento de cerchas, con el fin de mostrar una aplicación de la conexión evaluada, tomando como referencia una cercha para cubierta tipo W y evaluando su comportamiento mediante un ensayo a escala real de su parte central.

¹ Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ricardo A. Cruz Hernández

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF NON-RIGID CONNECTIONS IN SMALL WOOD TEAK LOGS OF DIAMETER UNDER AXIAL FORCE *

AUTHORS: Andrés Mauricio Quintero Vila **
Neyra Moreno Valderrama

KEY WORDS: Teak, Connection, Wood, Round, Resistance, Compression, Tension.

DESCRIPTION: This research results in the use of teak wood from small diameter roundwood in the performance of structures made with elements joined by non-rigid connections for this test was carried out by reference to ASTM standards, which were determined moisture density, maximum stress in tension and compression parallel to grain of wood that was previously studied air dried.

After having these characteristics began to choose the best connection suitable for use in roundwood structures, for which consideration was given an empirical assessment of each of the connections found taking criteria such as ease of work carpentry, steel, assembly, economics and aesthetics of them. It continues to make the study of the selected connection consisting of steel plates in the upper and lower ends of the cross section of the element of wood joined by bolts located longitudinally. It was decided to quantify through testing the strength of the bolt with a 1 / 2 "under the action of axial forces of tension and compression, so that parts are designed to help test the performance of the connection ensuring reliable results.

We also carried out full-scale evaluation of the behavior of trusses, to show a connection application assessed by reference to a type roof truss for W and evaluating its performance through a full scale test of its central part.

* Graduation Project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Ricardo A. Cruz Hernández

INTRODUCCIÓN

En el momento la Teca tiene poco auge en Colombia debido a su desconocimiento, aunque en los últimos 12 años aproximadamente se ha empezado a sembrar logrando más hectáreas cultivadas gracias a nuestra topografía y clima que son aptas para el buen desarrollo de los árboles. En el manejo normal del cultivo se deben talar árboles intermedios entre los 8 y 12 años de edad que posteriormente saldrán al mercado, es por esto que en unos años la cantidad de Teca rolliza será mayor por lo cual se debe estudiar desde ahora para su mejor aprovechamiento en Colombia y no simplemente exportarla.

La madera Teca rolliza es un material ecológico y supremamente bajo en consumo de energía para su utilización, aparte de esto presenta unas propiedades únicas como la resistencia a la corrosión por contacto con metales, resistencia mecánica, durabilidad y belleza.

Las conexiones son una parte fundamental de una estructura para hacer un solo conjunto resistente y para que adopte el diseño arquitectónico deseado, por eso es de vital importancia estudiarlas.

Las conexiones en madera rolliza se basan generalmente en la experiencia y sus propiedades de diseño en datos de prueba limitadas, haciéndolas más costosas y su capacidad de diseño conservador.

Los objetivos de este trabajo son determinar mediante ensayos las características físicas de la madera de estudio tales como humedad, densidad, propiedades mecánicas como lo son la resistencia a compresión y tensión paralela a las fibras, también la investigación y selección de una conexión apta para madera rolliza de pequeños diámetros, además de la evaluación de su resistencia a fuerzas axiales,

la propuesta de un proceso constructivo de dicha conexión y su comportamiento en una cercha a escala real.

El desarrollo del trabajo se presenta organizado de la siguiente manera:

En el primer capítulo se presenta la fundamentación teórica que guía la investigación, referente a las generalidades de las maderas tales como su contenido de humedad, secado, densidad, propiedades resistentes como a la compresión, tensión y corte paralelo a las fibras y cubiertas en madera.

En el segundo capítulo usando normas de referencia como las ASTM, se realizó la caracterización de la madera Teca en la cual se hizo ensayos de su contenido de humedad, determinación de la densidad y con el fin de conocer la resistencia de la madera se realizó ensayos a compresión y tensión paralela a las fibras con el uso de la máquina de pruebas *MTS 647 Hydraulic Wedge Grip*, de allí se obtuvo información necesaria para la realización de graficas comparativas y cálculos específicos que determinaron de la resistencia de la madera a este tipo de sollicitación.

En el tercer capítulo de acuerdo a la fundamentación teórica del primero se eligió la mejor conexión apta para madera rolliza, en la cual se tuvo en cuenta una evaluación empírica de cada una de ellas tomando criterios tales como facilidad de trabajo en carpintería, acero, ensamble, economía y estética; dando inicio al estudio de una conexión que consta de platinas de acero en los extremos superior e inferior de la sección transversal del elemento de madera, unidas mediante pernos ubicados longitudinalmente, por lo que se decide cuantificar mediante ensayos la resistencia de ésta con un perno de 1/2" bajo la acción de fuerzas axiales de tensión y compresión.

El cuarto capítulo presenta la evaluación a escala real del comportamiento de cerchas, con el fin de mostrar una aplicación de la conexión evaluada, se toma como referencia una cercha para cubierta tipo W y se evalúa su comportamiento mediante un ensayo a escala real de su parte central.

En el quinto capítulo se presenta un análisis de resultados de los ensayos hechos en todo el trabajo.

1. GENERALIDADES DE LA MADERA

1.1 CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA MADERA

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. Este comportamiento es el que determina y provoca cambios dimensionales y deformaciones en la madera.

Se entiende por contenido de humedad la masa de agua contenida en una pieza de madera, expresada como porcentaje de la masa de la pieza anhidra (madera seca al horno).

$$CH = \frac{\textit{peso madera humeda} - \textit{peso madera seca}}{\textit{peso madera seca}}$$

Donde CH es contenido de humedad en porcentaje.

1.1.1 Contenido de humedad de la madera verde.

La madera verde es a menudo definida como la madera recién aserrada la cual contiene gran volumen de agua en sus cavidades y paredes celulares, humedad que oscila alrededor del 80% y 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.

El contenido de humedad depende de la ubicación de la madera en el árbol y la estación de año. Sin embargo, la variación estacional es ligera en comparación con las diferencias que se producen dentro de un árbol entre la albura y el duramen. La albura puede contener el doble del porcentaje de humedad al que se encuentran en el duramen esto para maderas blandas, mientras que en las maderas duras esta diferencia es considerablemente menor o incluso inexistente. La madera en este estado es susceptible al ataque de hongos, además la resistencia y rigidez de la madera verde es considerablemente inferior al de la misma madera cuando se seca.

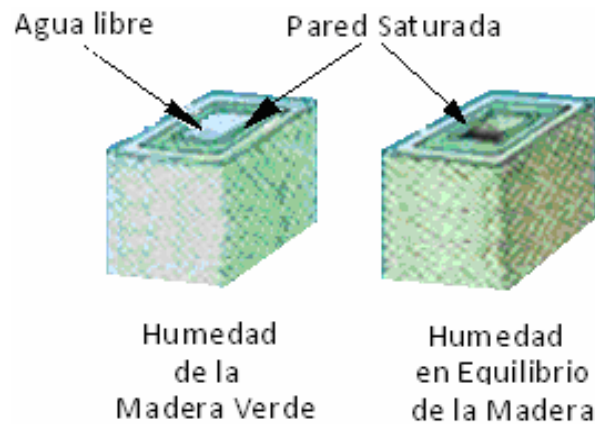
1.1.2 Contenido de humedad en equilibrio de la madera

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 de tiempo determinado a condiciones de temperatura y humedad en su medio ambiente, logrando que solo permanezca agua en las paredes celulares ver figura 1.

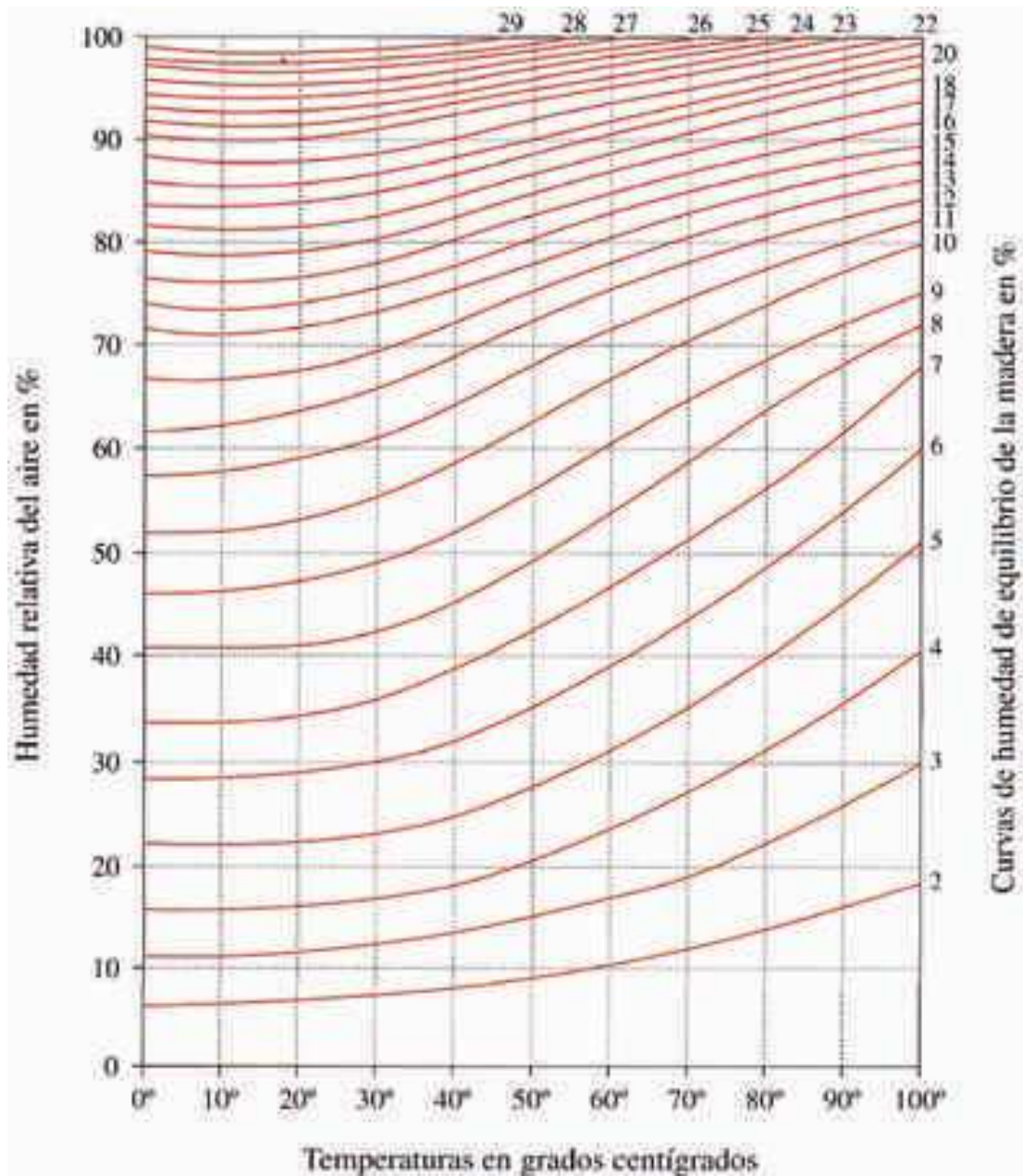
Figura 1. Humedad de la madera verde y humedad en equilibrio de la madera



Fuente: Corporación Chilena de la Madera. La construcción de vivienda en madera.

Kollmann (1959) comprobó que la humedad de equilibrio es casi constante para todas las maderas, y elaboró un ábaco para determinar este valor ver gráfico1. Es decir, 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%. Dicha condición se produce en casi todas las especies.[13]

Gráfico 1. Curvas de humedad de equilibrio de la madera



Fuente: Corporación Chilena de la Madera. La construcción de vivienda en madera.

1.2 SECADO DE LA MADERA

El secado de la madera es un proceso que se justifica para toda pieza que tenga uso definitivo en el interior de una vivienda (queda incorporada a la vida útil de ésta), sea con fines estructurales o de terminación. La utilización de madera seca aporta una serie de beneficios, entre los que se destacan:

- Mejora sus propiedades mecánicas: la madera seca es más resistente que la madera verde.
- Mejora su estabilidad dimensional.
- Aumenta la resistencia al ataque de agentes destructores como hongos.
- Aumenta la retención de clavos y tornillos.
- Disminuye considerablemente su peso propio, baja los costos de transporte y facilita la manipulación de herramientas.
- Mejora la resistencia de adhesivos, pinturas y barnices.
- Mejora su ductilidad, facilidad para cortar y pulir.
- Mejora la absorción de preservantes líquidos aplicados con presión.
- Aumenta la resistencia de las uniones de maderas encoladas.

1.2.1 Métodos de secado de la madera

El secado de la madera puede ser realizado a través de dos métodos:

1.2.1.1 Secado natural

El secado natural de la madera es un proceso relativamente económico, ya que no requiere de exposición a temperaturas producidas por fuentes de calor artificial o eléctrico, sin embargo suele ser un proceso dispendioso (lento) y poco efectivo, pues depende de las condiciones ambientales y/o climáticas de la zona o el lugar donde se lleve a cabo el proceso.

El proceso de secado natural de la madera suele ser un proceso rápido en tiempo de verano debido a las altas temperaturas y bajas humedades relativas, siendo lo contrario en tiempo de invierno, el cual se caracteriza por bajas temperaturas y altas humedades relativas.

Este tipo de secado se efectúa simplemente acomodando (apilando) la madera bajo cubiertas protectoras contra la incidencia directa del sol, permitiendo la circulación de aire en forma libre y disminuyendo la humedad entre ellas.[13]

1.2.1.1.1 Factores que inciden en el secado natural

Si se quiere obtener buenos resultados en el secado natural, se deben tener las siguientes consideraciones.[13]

Condiciones climáticas

Entre los factores climáticos, el que más influye en el secado, es la temperatura, aunque si bien la lluvia también lo es. Muchas veces las altas temperaturas se ven anuladas por las lluvias.

En regiones muy secas y áridas, se producen defectos, los cuales no pueden ser evitados debido a las bajas humedades relativas.

Si se mantienen más o menos constantes la temperatura y el equilibrio de contenido de humedad del aire, se puede aumentar la rata de secado aumentando la velocidad del aire.

Las horas de brillo de sol son un factor de importancia. El aire se calienta al entrar en contacto con áreas calentadas por el sol (edificios, carreteras, etc.). Viene luego un movimiento de convección, aumentando el potencial de secado del aire. Las condiciones locales de la zona, tales como lagos, patios de poca elevación, etc., influyen en la rata de secado. Los sitios elevados en general son más recomendables si se quiere aumentar la velocidad de secado.[13]

El patio de secado

El sitio para el patio de secado debe elegirse y planearse muy bien teniendo en cuenta factores tales como los vientos, tipo de suelos y su drenaje, extensión y topografía del terreno, etc.

Un mal drenaje, estanca el agua y se disminuye la rata de secado. El terreno deberá estar libre de malezas y residuos de madera o cortezas, las cuales además de ser focos de infección para hongos e insectos impiden el libre movimiento tanto del agua como del aire.

La mayoría de los patios de secado son rectangulares; los pasadizos para el movimiento de personas y vehículos se cruzan entre sí en ángulo recto.

Los pasadizos además de servir para el movimiento de vehículos, sirven también como rompe fuegos.

En general el espaciamiento de las pilas varía con el clima, con el tamaño del patio y la clase de madera. Así mismo con el tipo de defecto que se quiere evitar. Para evitar grietas se reduce el espacio.[13]

Movimiento del aire

En general de una buena orientación del patio de secado con respecto al viento, dependerá tanto la calidad como la velocidad de secado.

El patio se debe proveer de buenos pasadizos y espacios entre hileras y columnas para facilitar la circulación del aire.

Algunos investigadores recomiendan la orientación de los pasillos principales en forma perpendicular al viento; otros en cambio dicen que deben ser paralelos. Lo importante en términos generales es que los pasadizos deben ser rectos y continuos a través del patio, con el fin de conseguir un flujo continuo de aire.

La especie de madera que se está secando

En general las maderas livianas secan más rápido que las pesadas bajo condiciones favorables del ambiente. Así pues la densidad es un factor que nos indica la rata de secado. Pero no se debe olvidar las diferencias de permeabilidad y difusividad del agua, factores que producen diferencias en el secado. Gran parte de estas diferencias se deben a la proporción de albura y duramen.

Fibras de la madera

Las piezas con cortes radiales secan más lentamente que las tienen cortes tangenciales, lo cual es debido al mayor número de radios expuestos en las caras tangenciales, lo cual aumenta la velocidad de salida a través de los radios medulares.

Espesor de las piezas a secar

Mientras más gruesas sean las piezas de madera, más tiempo requieren para su secado. Además las piezas de mayores espesores están más propensas a la formación de grietas superficiales y en los extremos.

Métodos de apilado en el secado natural

Apilado horizontal:

Consiste en formar pisos horizontales con la madera que se va a secar, colocadas una al lado de la otra y separadas verticalmente con listones o separadores, hasta construir la pila del ancho y altura deseados.

La mejor forma de acomodar la madera para un secado rápido con el mínimo de agrietamiento y torceduras, es el apilado horizontal.

Figura 2. Apilado horizontal de madera teca rolliza



Apilado en caballete:

Las piezas se colocan reclinadas o cargadas de canto sobre una viga transversal o soporte y además también se apoyan en el extremo inferior sobre una guía separada del suelo.

Figura 3. Apilado en caballete de madera teca rolliza



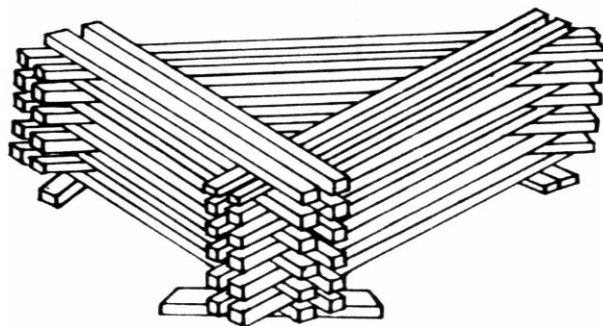
En este tipo de apilado se expone la mayoría de la superficie de las piezas a las condiciones climáticas, mediante este sistema se logra un secado bastante rápido pero con la desventaja que la parte inferior de las piezas se secan más lentamente que la superior logrando un mayor riesgo de alabeo.

Apilado en triangular:

Tiene la ventaja de no utilizar separadores, pues los espacios para la circulación del aire entre la madera se logran mediante el cruzamiento de los extremos de la pieza. Es un método que requiere mucho espacio y aunque produce un secado rápido presenta como desventaja que la madera está más expuesta a grietas y alabeo y en las partes de contacto hay alto riesgo de ataque de hongos.

No es aplicable para maderas rollizas ya la superficie en contacto entre las piezas es poca y aunque es una ventaja para la prevención del ataque de hongos se estaría logrando un apilamiento inestable.

Figura 4. Apilado triangular



Fuente: www.lablaa.org/blaavirtual/ciencias/sena/carpinteria/madera/madera2c.htm

Seminario sobre: Secado de la Madera.

1.2.1.2 Secado al horno

En la operación normal de un horno secador, es necesario tomar ciertas precauciones para conseguir resultados satisfactorios. La madera debe ser apropiadamente apilada, se deben incluir en la pila suficientes muestras de secado, para verificar el contenido de humedad de la carga a un determinado tiempo, y las condiciones de secado requieren ser cuidadosamente controladas a través del proceso.

Los hornos convencionales son cámaras o compartimientos cerrados, dotados de ventiladores que dan lugar a una circulación forzada del aire dentro de la cámara; tienen, también, un sistema de calentamiento controlado que permite elevar la temperatura del horno y dispositivos regulables para conseguir la variación deseada de la humedad relativa en el ambiente interior del horno.

Un horno, para secar madera, debe tener un buen aislamiento térmico, ser de construcción hermética, fabricarse de materiales resistentes a la corrosión y elevadas temperaturas, y disponer de puertas de fácil manejo y cierre hermético.

El secado convencional se verifica a temperaturas entre 40 y 100 °C y se diferencia del secado a alta temperatura porque éste opera por encima de 100 °C.

Los pasos a seguir para una operación normal de secado en hornos se inician con la selección de la madera y prosiguen con el apilado o armado de la carga para el horno, la toma de muestras para control de la humedad durante el secado, la selección del horario o programa para la especie en cuestión, el control del contenido de humedad, la aplicación de tratamientos de igualado y acondicionamiento, y pruebas finales de control del contenido de humedad, distribución y tensiones de la madera.[38]

1.3 DENSIDAD

La densidad es el mejor indicador de las propiedades de la madera y es un factor importante que determina su fuerza siempre y cuando la sección de la madera sea de fibra recta, libre de nudos y defectos.

Esta se determina con el cociente entre el peso y el volumen de la pieza de madera, pero debido a que ésta es higroscópica es decir, la capacidad de la madera para absorber o ceder humedad al ambiente, hace que el peso y el volumen varíen con el contenido de humedad. Por eso se distinguen cuatro densidades para una misma muestra de madera determinadas a partir del contenido de humedad de la pieza.

Densidad verde: Relaciona el peso verde y el volumen en estado verde.

Densidad seca al aire: Aquella que relaciona el peso seco al aire y el volumen seco al aire.

Densidad Anhidra: Relaciona el peso seco al horno y su volumen seco al horno.

Densidad Básica: Es la que relaciona el peso seco al horno y su volumen verde.

Muchas veces para disminuir el efecto de la variable humedad se trabaja con la gravedad específica la cual es definida como el peso de un volumen dado de madera seca a horno, dividido por el peso de un volumen equivalente en agua.

[31]

1.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

La madera en general presenta gran resistencia a los esfuerzos de compresión paralela a las fibras. Esta proviene del hecho que las fibras están orientadas con su eje longitudinal en esa dirección y que a su vez coincide, o está muy cerca de la orientación de las microfibrillas que constituyen la capa media de la pared celular. Esta es la capa de mayor espesor de las fibras.

Está dada por la máxima carga a compresión que puede actuar en un cuerpo de prueba con sección determinada. La madera en la dirección de las fibras, resiste menos a compresión que a tensión, siendo la relación del orden de 0,50 aunque varia de una especie a otra de 0,25 a 0,7.

En la práctica las piezas sometidas a compresión dependen del módulo de elasticidad de la madera, sobre todo cuando éstas son esbeltas, por tanto un valor relativamente bajo del módulo de elasticidad reduce la resistencia a la compresión de piezas esbeltas.

Para la buena realización de un ensayo a compresión se debe comprobar la inestabilidad de la pieza para aprovechar totalmente su resistencia y que no falle por pandeo, para esto la norma ASTM D198-09 ¹ propone que la longitud de las probetas a compresión paralela a las fibras debe ser inferior a 17 veces el radio de giro. En el caso de la madera rolliza, el radio de giro es de 0,25 D donde D es el diámetro, dando un límite de longitud de 4,25 D.

La alta resistencia a la compresión es una propiedad que es necesaria en gran cantidad de tipos de piezas tales como pilares, pares de cubierta, soportes en construcción, elementos en compresión en cerchas, etc.[13] [21]

¹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for small clear specimens of Timber. ASTM D143-09.USA, 2009.

Figura 5. Compresión paralela a las fibras



Fuente: Corporación Chilena de la Madera. "La construcción de vivienda en madera"

1.5 RESISTENCIA A LA TENSIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

Es la carga máxima a tensión en dirección de las fibras que soporta una sección mínima de una pieza de madera. La resistencia de la madera a tensión en la dirección de las fibras, se debe a las moléculas de celulosa que constituye, en parte, la pared celular.

Una pieza sometida a tensión paralela a las fibras, tendrá una deformación menor que si se somete a esfuerzo a compresión y la rotura que se produce se puede considerar como rotura frágil.

En el momento de realizar un ensayo con este tipo de esfuerzo a tensión, se debe tener en cuenta los defectos de la madera como nudos, inclinación de fibras, etc. ya que afectan su resistencia disminuyéndola en una proporción mayor que en los esfuerzos de compresión. Durante el ensayo se debe tener en cuenta que en la zona de agarre de la pieza, se pueden presentar compresiones, cizallas, etc. que harían fallar la pieza por corte, sin llegar a aprovechar su gran resistencia a tensión.

Un ejemplo de piezas solicitadas a esfuerzos de tensión son los tirantes y los pendolones de las cerchas, que son muy utilizadas e importantes en diversas estructuras.

La madera es un material que trabaja muy bien a tensión paralela a las fibras, pero se ve limitado por la dificultad de transmitir estos esfuerzos, esto quiere decir que las piezas sometidas a tensión presentaran problemas en las conexiones.

Figura 6. Tensión paralela a las fibras



Fuente: Corporación Chilena de la Madera. La construcción de vivienda en madera.

1.6 RESISTENCIA AL CORTE PARALELO A LAS FIBRAS

La resistencia al corte paralelo a las fibras proviene de la capacidad del cementante de las fibras es decir la lignina. El esfuerzo de rotura de probetas sometidas a corte paralelo varia entre 0,25 y 2 KN/cm^2 .

Para la madera teca seca al aire con contenido de humedad del 12 % , la resistencia al corte paralelo a las fibras es de 1,11 KN/cm^2 , mientras que para la madera en estado verde con contenido de humedad del 30 % es de 1,03 KN/cm^2 .²

² Ficha técnica Teca <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Teca.pdf>

1.7 CUBIERTAS EN MADERA

Es necesario mencionar las cubiertas en la investigación ya que éstas son estructuras que pueden contar con elementos de madera para su conformación.

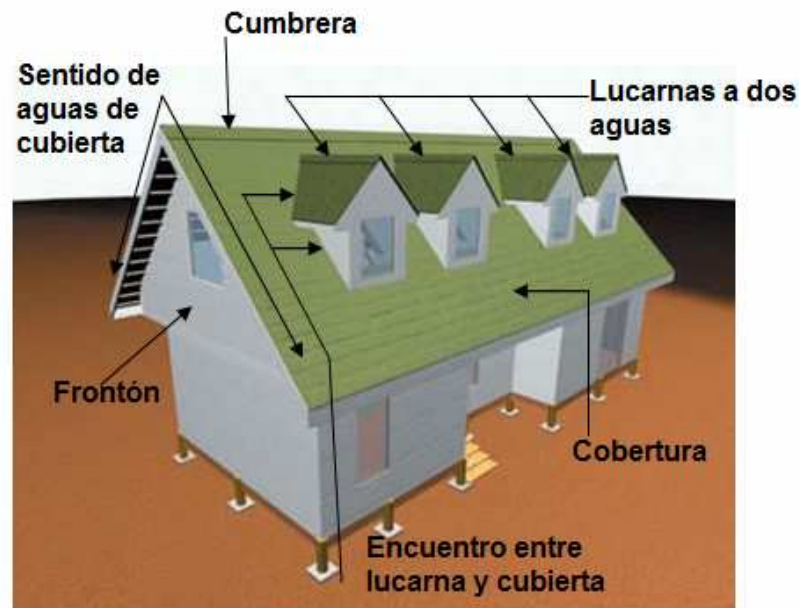
Se entiende por cubierta toda estructura de una edificación ubicada sobre el cielo del último piso, cuya función es recibir un recubrimiento para aislar a la vivienda del medio ambiente, protegiéndola del frío, calor, viento, lluvia y/o nieve.

Al analizar la cubierta, se debe distinguir dos áreas: Una vinculada a la arquitectura (aguas o vertientes y encuentros de cubiertas) y otra a la estructuración.

Las aguas son superficies planas e inclinadas, encargadas de recibir la lluvia y/o nieve.

Se podrá diseñar la cubierta a dos o cuatro aguas, en forma tradicional (frontón), con o sin lucarnas, dependiendo de los requerimientos del diseño de arquitectónico.

Figura 7. Partes de una cubierta a dos aguas



Fuente: Corporación Chilena de la Madera. La construcción de vivienda en madera.

La pendiente de las aguas, es decir, el ángulo que tienen éstas con respecto a un plano horizontal cualquiera, se define durante el diseño y está sujeta a las condiciones climáticas de la zona (precipitaciones y nieve) en combinación con la arquitectura de la vivienda. Puede ser expresada en porcentaje o en grados.

Grados: se refiere al ángulo que se forma entre el plano de las aguas y el plano horizontal.

Porcentaje: establece un número de unidades que se debe subir en vertical por cada 100 en horizontal.

Como prolongación de las aguas de una cubierta está el alero, el que además de obedecer a razones arquitectónicas, cumple con una función de protección perimetral de la vivienda, tanto en lo que se refiere al posible ingreso de las aguas lluvia y nieve a través de ventanas y puertas como también acortar el escurrimiento libre de las aguas que se produce en los paramentos exteriores. Igualmente, impide el ingreso de los rayos solares en forma directa en las estaciones y horas de mayor calor, según la orientación de la vivienda.

Figura 8. Alero de cubierta y sus componentes

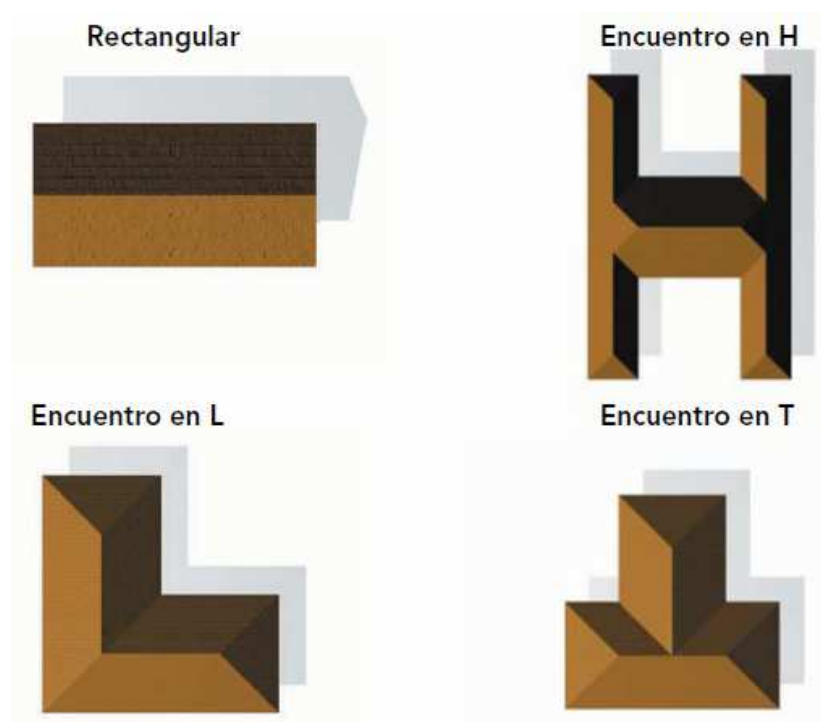


Fuente: Corporación Chilena de la Madera. La construcción de vivienda en madera.

Otras partes importantes de una cubierta son el frontón y la cumbrera los cuales son tabique soportante, generalmente triangular, con el que se remata la cubierta y la arista superior horizontal más alta que separa dos aguas de la cubierta respectivamente.

Los encuentros de cubiertas también quedarán definidos por el diseño en planta del primer y segundo nivel de la vivienda, dando origen a una diversidad de formas, siendo las más utilizadas las rectangulares H, L, T o U.

Figura 9. Algunos tipos de encuentros entre cubiertas



Fuente: Corporación Chilena de la Madera. La construcción de vivienda en madera.

La enmaderación, será la encargada de soportar la cubierta y las cargas que solicita la cubierta, transmitiéndolas a los muros soportantes. Por consiguiente, los elementos que la conforman cumplen funciones estructurales.

Generalmente las luces que se deben cubrir en viviendas tradicionales no son mayores a 10 m, por lo tanto la madera resulta ser un material idóneo para solucionar la cubierta, de bajo peso en relación a su resistencia, con posibilidad de aumentar su resistencia y longitudes mediante el traslape de piezas paralelas u otros métodos (vigas compuestas, reticuladas, doble, maderas laminadas, entre otros).

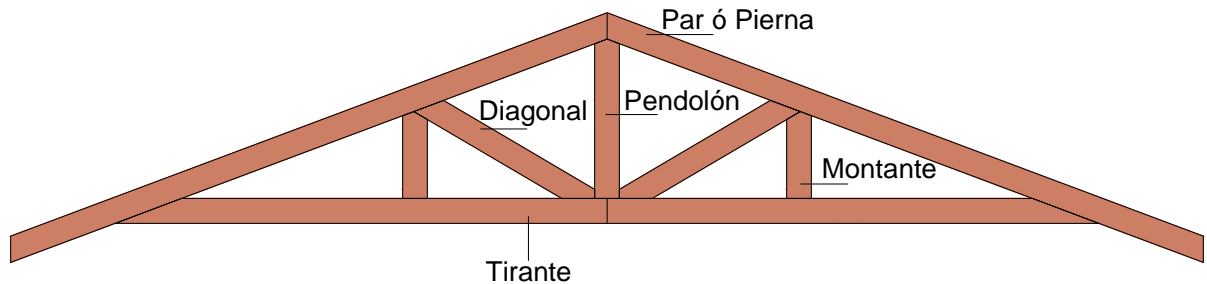
La estructura de una cubierta se puede realizar a través de dos sistemas, cerchas o diafragmas inclinados, pudiendo existir la situación que en una misma cubierta se necesiten ambos sistemas.[13]

1.7.1 CERCHA COMO ESTRUCTURA DE CUBIERTA

Las cerchas son una gran aplicación de la madera ya que presenta grandes ventajas para la solución de coberturas de casas por su posibilidad de cubrir o salvar grandes luces, lo que no ocurre usando sistemas a base de viguetas ya que tendría que usar elementos largos y de secciones transversales grandes los cuales comercialmente son costosos o imposibles de encontrar. El tamaño de las cerchas no está limitado por el largo de las piezas comerciales, puesto que existen sistemas de unión que permiten conformar elementos de dimensiones mayores aprovechando así la madera corta que es muy económica. Asimismo el relativo poco peso debido a sus secciones pequeñas las hace más manejables en el montaje que otros sistemas.[13] [27]

1.7.1.1 Elementos que conforman una cercha

Figura 10. Elemento de una Cercha



Pendiente de la cercha: La pendiente de una cercha se define como la inclinación de sus aguas, que se puede expresar en ángulo o porcentaje.

Par o Pierna: Cada una de las dos piezas inclinadas que forman las aguas de un techo.

Tirante: Pieza horizontal de una cercha que une el extremo inferior de los pares e impide que se separen.

Diagonales: Pieza inclinada que une un par con un tirante.

Pendolón: Elemento vertical que une el punto de la cumbrera con un punto del tirante.

Péndola o montante: Elemento vertical que une un punto del par con otro punto del tirante.

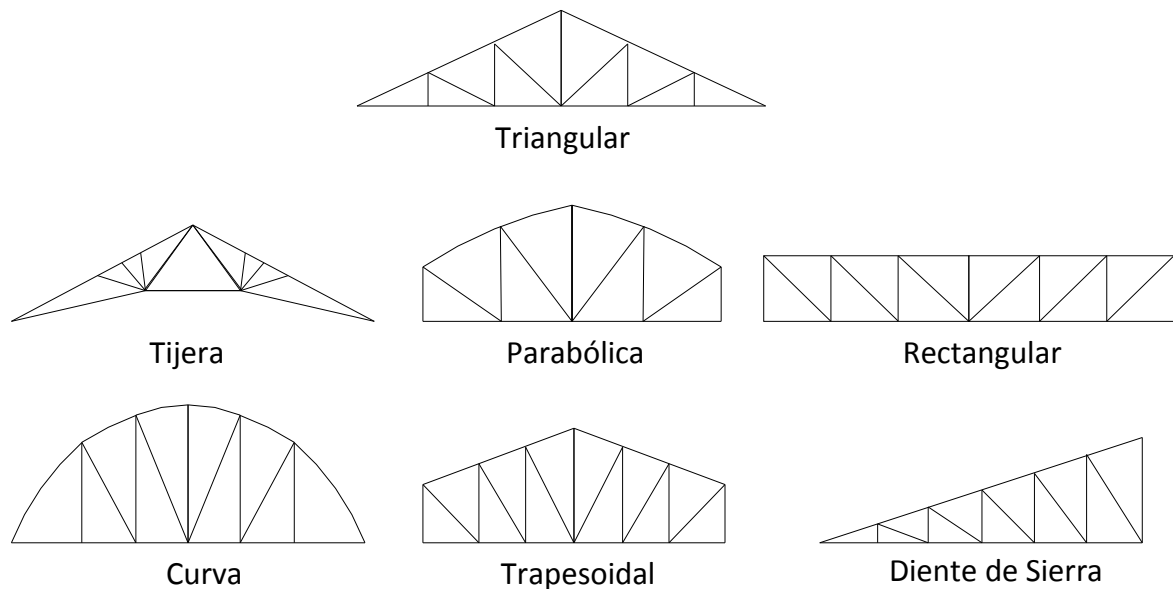
1.7.1.2 Clasificación y tipos de cerchas

Existen varios tipos de cerchas y varias formas de clasificarlas, en este caso serán clasificadas de acuerdo a su forma y a la distribución de las piezas interiores.

Clasificación por forma

Referente a la figura geométrica que representa los elementos envolventes, como la triangular, trapezoidal y parabólica, entre otras.

Figura 11. Clasificación de cercha según su forma



La cercha Triangular es la más utilizada y permite cubrir todo tipo de luces. Sus pendientes van generalmente entre 12° a 45° . Si tiene una pendiente mayor genera gran altura interior de difícil aprovechamiento, si además las edificaciones

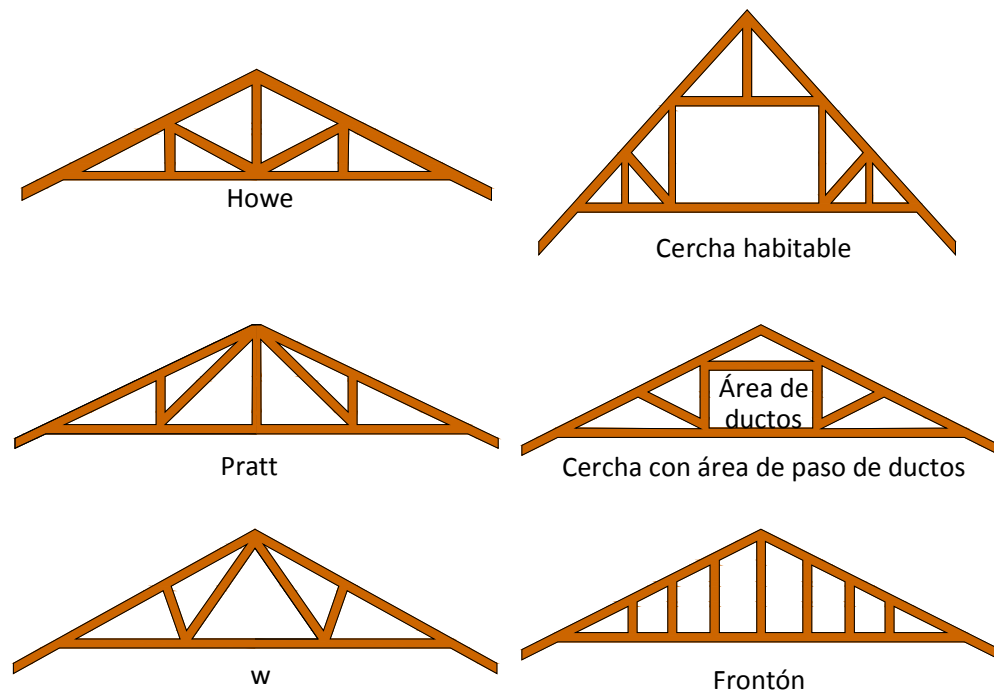
están situadas en zonas de vientos fuertes, se aumenta la tendencia al volamiento y se deben aumentar las secciones de las piezas que trabajen a la compresión para evitar el pandeo.

El tener una fuerte pendiente (30° a 60° con respecto a un plano horizontal), permite un escurrimiento rápido de las aguas lluvias y/o nieve, apropiado para climas lluviosos.[13]

Clasificación por distribución de piezas

Las cerchas más utilizadas son las cerchas Howe, Pratt, Warren, W, entre otras, las cuales se pueden ver en la figura 12.

Figura 12. Clasificación de cerchas según la distribución de sus piezas



Howe: Está compuesta por montantes que trabajan a la tracción y diagonales que lo hacen a la compresión. Es apta para ser trabajada en un mismo material. [13]

Pratt: Consta de montantes verticales que trabajan a la compresión y diagonales a la tracción. Los elementos diagonales encargados de resistir el esfuerzo de tracción son más largos que los sometidos a la compresión. Se recomienda su uso para pendientes entre 25° y 45° y luces de hasta 30 m. [13]

W: Es la más usada para viviendas o estructuras livianas. Permite cubrir luces de hasta de 12 m. [13]

1.7.2 DIAFRAGMAS INCLINADOS COMO ESTRUCTURA DE CUBIERTA

Los diafragmas inclinados como estructura de cubierta, son de gran uso en edificaciones de muchos países, se corta y arma en su lugar definitivo, siendo su materialización improvisada y artesanal. Esto puede significar inexactitud en cubicaciones, cortes y ensambles, pérdida de material y demora en su ejecución, lo que genera una solución más complicada que la cercha si no se planifica y programa su materialización.

Por diafragma inclinado se entenderá un conjunto de piezas de madera que conforman una estructura, diseñada para soportar las cargas de la cubierta. Esta estructura se apoya en sus extremos sobre tabiques soportantes, transmitiendo a estos los esfuerzos que recibe la cubierta. Su diseño permite soportar esfuerzos de tracción, compresión y flexión y la carga no requiere estar aplicada en los nodos.[13]

1.7.2.1 Elementos que conforman un diafragma inclinado

Solera de amarre: Pieza horizontal a la cual se une por medio de clavos u otro tipo de conexión los elementos inclinados que conforman el diafragma.

Viga limatón o limateza estructural: Va desde la solera de amarre hasta la cumbrera mayor.

Viga limahoya estructural: Va desde la solera de amarre hasta la cumbrera horizontal mayor.

Viga limahoya secundaria: Va desde la solera superior hasta la limahoya estructural.

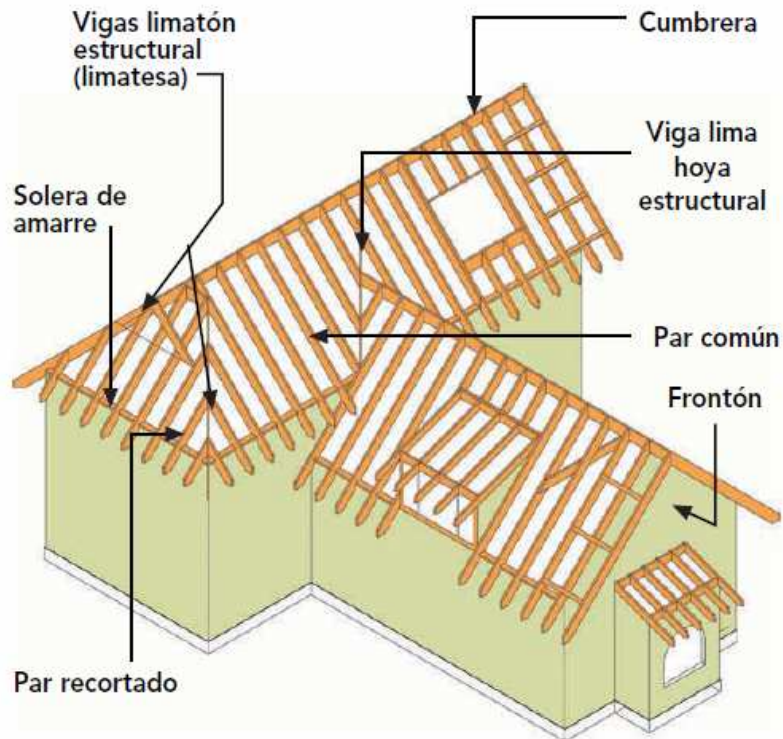
Par o pierna: Elemento estructural que va desde la solera de amarre hasta una viga limatón, viga limahoya o cumbrera, y forma el plano de las aguas de la cubierta.

Par común: Elemento que va desde la solera de amarre hasta la cumbrera, formando un ángulo recto con ella.

Par recortado: Elemento que va desde la solera de amarre hasta la viga limatón, formando un ángulo recto con ella.

Par de limahoya: Va desde la cumbrera hasta la viga limahoya estructural.

Figura 13. Elementos de un diafragma inclinado.



Fuente: Corporación Chilena de la Madera. La construcción de vivienda en madera.

1.8 CONEXIONES EN MADERA ROLLIZA

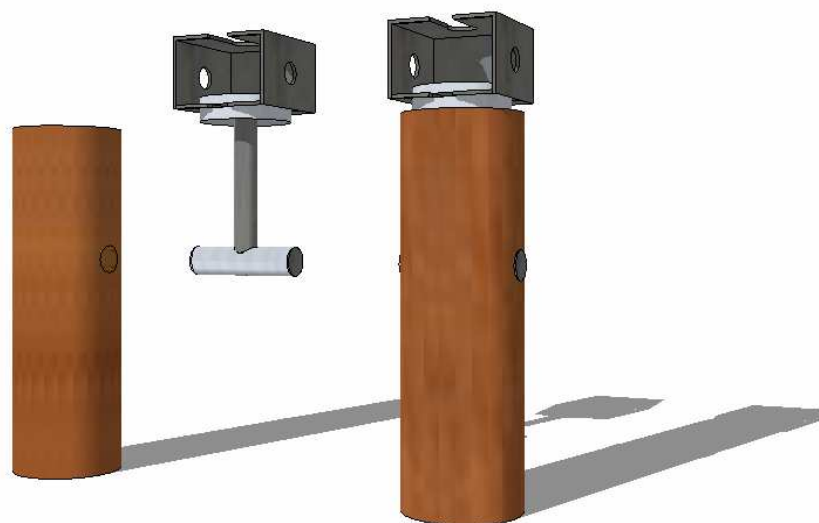
Las conexiones son uno de los eslabones más débiles de la construcción en madera ya que variables como el diámetro de la madera, las distancias a los bordes, el tipo de conexión, contenido de humedad, elementos de unión tales como platinas, pernos, tornillos, clavos, grapas y hasta con la misma madera, entre otros, puede afectar el comportamiento de la conexión.

En el proceso de investigación se encontró muchos tipos de conexiones, de los cuales se consideraron los más adecuadas para madera rolliza y son los siguientes:

Conexión tipo 1

Esta conexión requiere dos agujeros en la madera, uno se perfora en el centroide de la sección transversal y otro en el sentido longitudinal perpendicular a las fibras, este último deberá ser lo suficientemente grande para acomodar un cilindro macizo con un orificio roscado transversal en el medio de su longitud. En el primer orificio mencionado anteriormente se acomodara una varilla roscada que se atornillara al cilindro, adicionalmente se conecta a una sistema de unión que consta de de una caja y discos metálicos que aseguran la varilla roscada a la conexión, ésta se puede ver en más detalle en la figura 14.

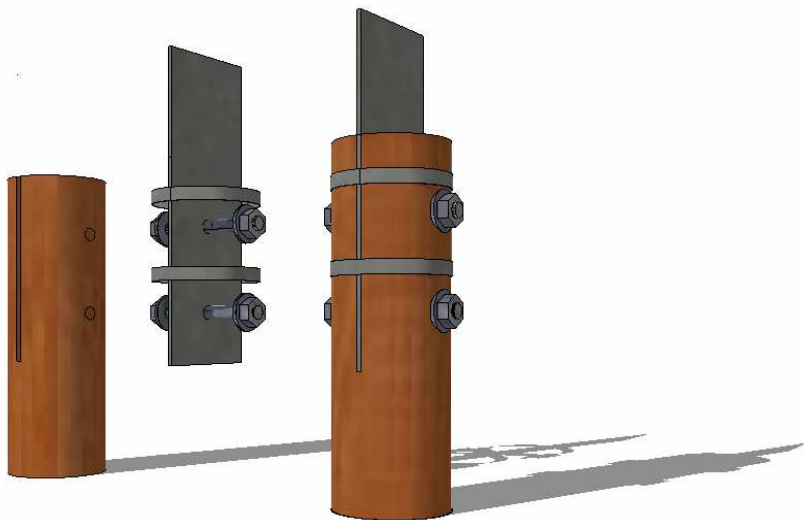
Figura 14. Conexión tipo 1



Conexión tipo 2

Requiere una platina de apoyo la cual es incrustada en el eje central de la sección transversal de la madera, también necesita perforaciones en el sentido longitudinal perpendicular a las fibras en los cuales se ubicaran pernos ajustados y unas abrazaderas que crearan un confinamiento entre la madera y la platina.

Figura 15. Conexión tipo 2



Conexión tipo 3

Consta de platinas de acero en los extremos superior e inferior de la sección transversal del elemento de madera, unida mediante pernos ubicados longitudinalmente. Para realizar esta conexión es necesario desgastar superficialmente el elemento, donde descansarán las platinas, esto garantizará que estas queden paralelas y que al conectarlo con otros elementos del mismo nodo tengan la misma separación entre platinas.

Este tipo de conexión se puede realizar mediante pernos la cual se puede ver en la figura 16, llamándola conexión tipo 3A y mediante clavos o tornillos autoperforantes, estos dos sin llegar a ser pasantes, los cuales pueden ir en varias filas de acuerdo a la fuerza axial requerida y al tamaño del elemento en madera, a ésta se le llamo conexión tipo 3B y se muestra en la figura 17.

Figura 16. Conexión tipo 3A



Figura 17. Conexión tipo 3B



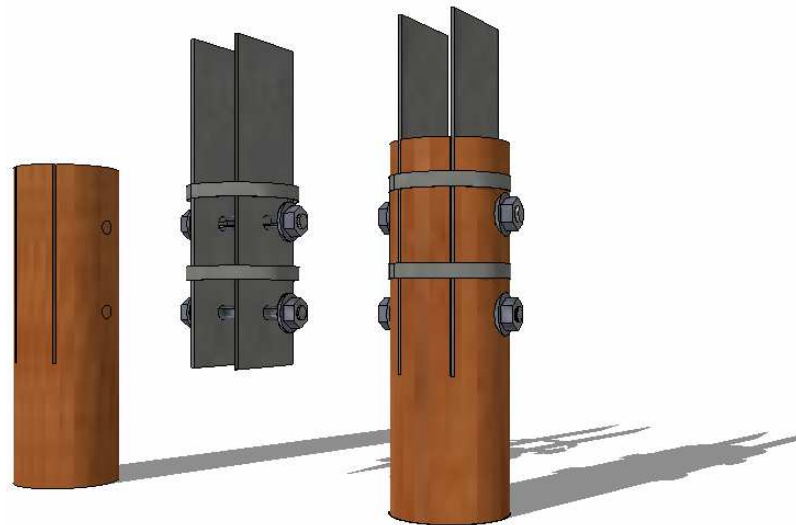
Conexión tipo 4

Para ésta conexión es necesario dos platinas de apoyo las cuales son incrustadas en la sección transversal y se ajustan mediante clavos orientados radialmente que atraviesan la madera y pasan a través de las perforaciones de una de las platinas o mediante pernos a lo largo del elemento, a éstas conexiones se les llamo 4A y 4B respectivamente.

Figura 18 Conexión Tipo 4A



Figura 19. Conexión tipo 4B



Conexión tipo 5

Está conformada por un sistema de cilindros huecos metálicos unidos entre sí, a los cuales llegan los elementos de madera figurados en sus extremos para acoplarse a dichos cilindros y quedar enfrentados con el fondo de ellos, esto para los elementos a compresión, para los elementos a tensión se cuentan con cables o varillas tensionantes que ayudan a mantener la estructura unida. Este tipo de conexión es mayormente usada en puentes.

Esta conexión se clasifica en dos tipos, las que se usan cables y las que usan varillas de acero llamándolas conexión 5A y 5B respectivamente, las cuales se pueden ver en las figuras 20 y 21.

Figura 20. Conexión tipo 5A

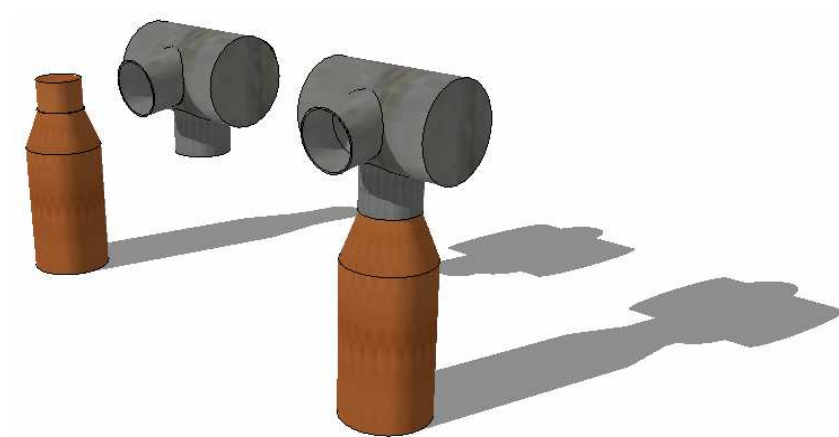
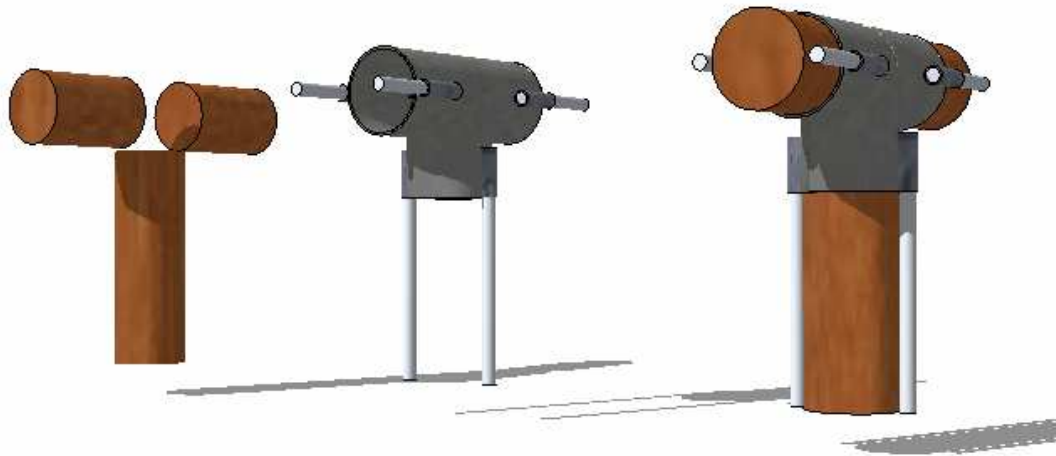


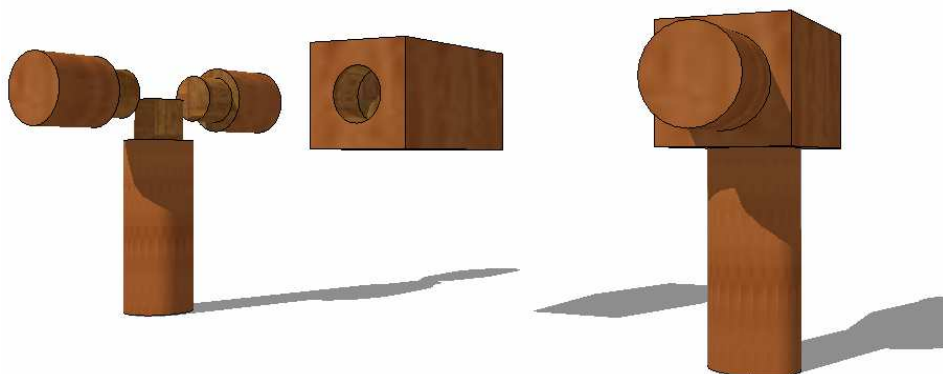
Figura 21. Conexión tipo 5B



Conexión tipo 6

Se necesita de una pieza de ensamble de madera a la cual se le han realizado orificios donde se introducen rollizas que anteriormente fueron redondeadas sus extremos y unidas mediante un adhesivo epóxico. Este tipo de conexión trabaja mucho mejor a compresión que a tensión debido a que en esta última se dependerá de la capacidad del adhesivo.

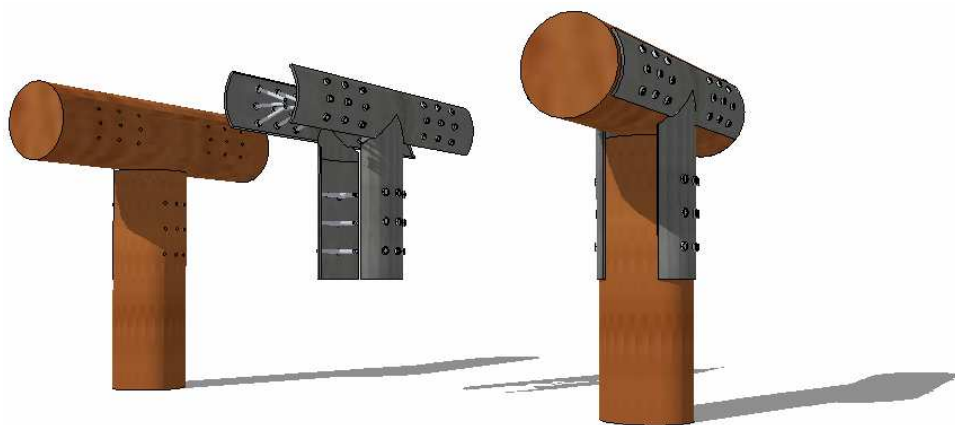
Figura 22. Conexión tipo 6



Conexión tipo 7

Para este tipo de conexión es necesario dar forma a platinas conectoras, de tal manera que se adecuen al contorno de los elementos de madera, a los que se les realizan orificios por los cuales pasarán clavos o tornillos autoperforantes en dirección radial que fijaran las platinas y la madera.

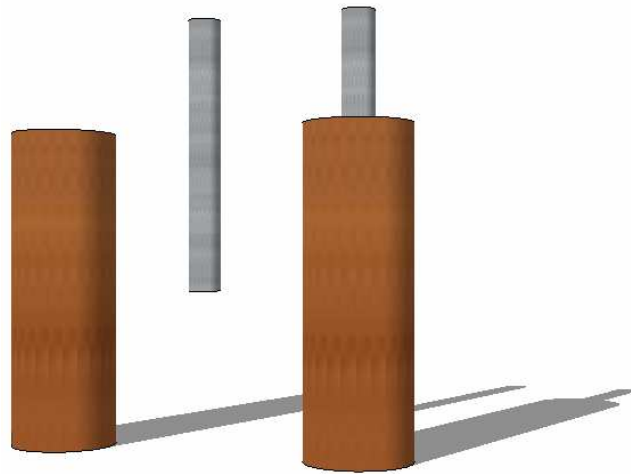
Figura 23. Conexión tipo 7



Conexión tipo 8

Para la realización de esta conexión es necesario perforar en el centroide de la sección transversal de la madera para posteriormente introducir una varilla roscada a la que se le aplica una capa de adhesivo epoxi.

Figura 24 Conexión Tipo 8



2. CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA TECA

Uno de los objetivos de este proyecto es determinar la densidad y resistencias de fuerzas a compresión y tensión paralela a las fibras de la madera Teca (*Tectona Grandis* L. Fill), la cual es originaria de una plantación forestal de 150 hectáreas, de una edad promedio de 9 años, ubicada en el departamento de Antioquia, Municipio Turbo, Vereda la Ahuyama-Nueva Antioquia.

En el manejo normal de este cultivo fueron talados árboles intermedios, los cuales fueron descortezados y secados naturalmente usando el método de apilado horizontal. De ésta madera se extrajeron al azar 7 rollizas de 4 metros y 11 de 3 metros, con diámetros promedio entre 8 y 12 cm, las cuales se tomaron como la muestra para la investigación, de las que se obtuvo el contenido de humedad, la densidad, esfuerzo máximo a la compresión, esfuerzo máximo a la tensión y los módulos de elasticidad por medio de ensayos que se detallan a continuación.

2.1 ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD (CH)

Para esta investigación se sabe de antemano que la madera teca de estudio fue secada naturalmente, por tanto se hallará el porcentaje de contenido de humedad para tenerlo como información en la realización del resto de ensayos, teniendo una precisión de 10 mg o 0,01 g.

El contenido de humedad de la madera se determinó mediante la norma ASTM D4442-07³, para lo cual fue necesario un horno de secado con circulación de aire (ver figura 25) a una temperatura de 103 ± 2 °C, para secar 8 muestras de la

³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials. ASTM D4442 .USA, 2007

madera de estudio. Estas muestras tenían un espesor de aproximadamente una 1" (25,4 mm) paralelas a las fibras de acuerdo a la norma.

En este ensayo se tomaron lecturas cada hora del peso de las muestras. El primer día se tomaron lecturas desde las 7am a 5 pm, tomando un receso hasta el día 2 a las 7 am, ya que si se dejaba encendido el horno durante la noche, no se podrían tomar los datos para conocer la variación de la humedad respecto al tiempo. En este receso se dio un aumento en el peso de las muestras, lo que nos indicó que estaban por debajo de la humedad de equilibrio. Se continuó el ensayo el día 2 de 7am a 5 pm y al ver que la variación del peso era poco al final de la tarde se dejó secando las muestras toda la noche para tomar como lecturas finales las obtenidas el día 3 a las 7 y 8 am respectivamente. Estas lecturas tuvieron variación de 0,01 g, lo que indicó que las muestras ya estaban secas.

Figura 25. Horno de secado con circulación de aire



Figura 26. Muestras para ensayo %CH



Con los datos de pesos de las muestras, obtenidos del proceso de secado en el horno, se calcula la humedad perdida en porcentaje para cada hora.

Teniendo los cálculos de la humedad perdida respecto al tiempo, se realiza las respectivas graficas, para observar la variación de la humedad respecto al tiempo para cada muestra.

Gráfico 2. % de humedad perdida para la muestra 1

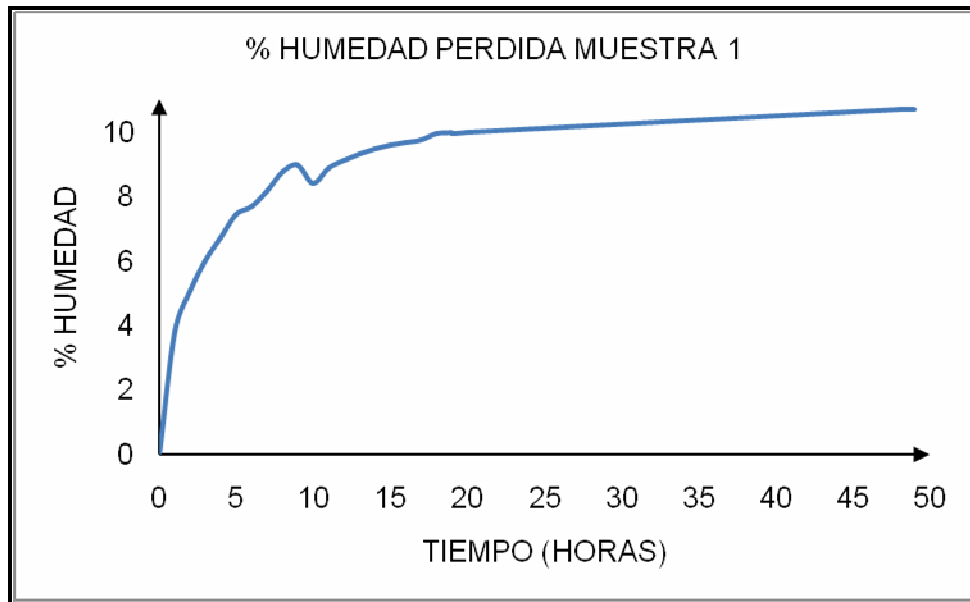


Gráfico 3. % de humedad perdida para la muestra 2

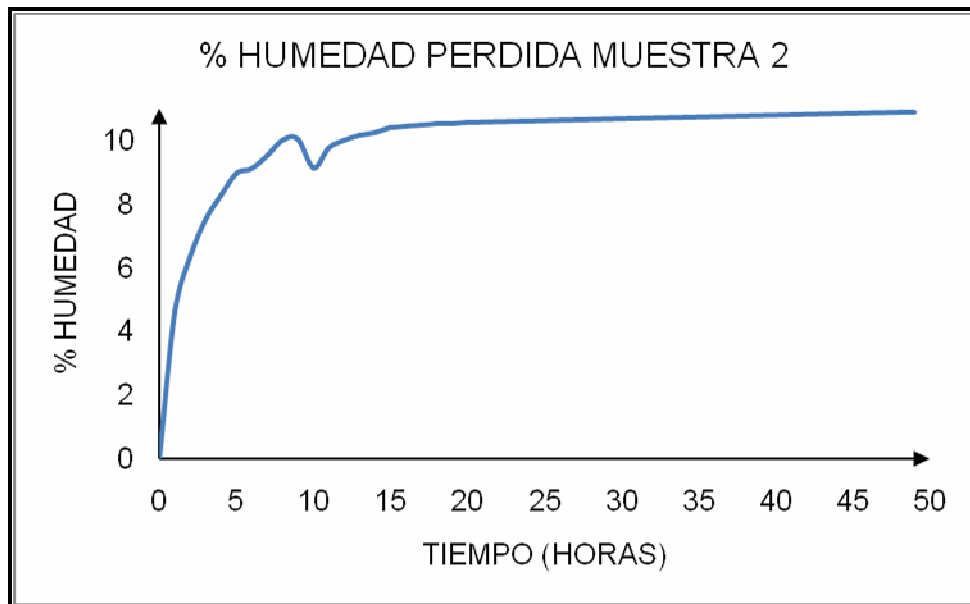


Gráfico 4. % de humedad perdida para la muestra 3

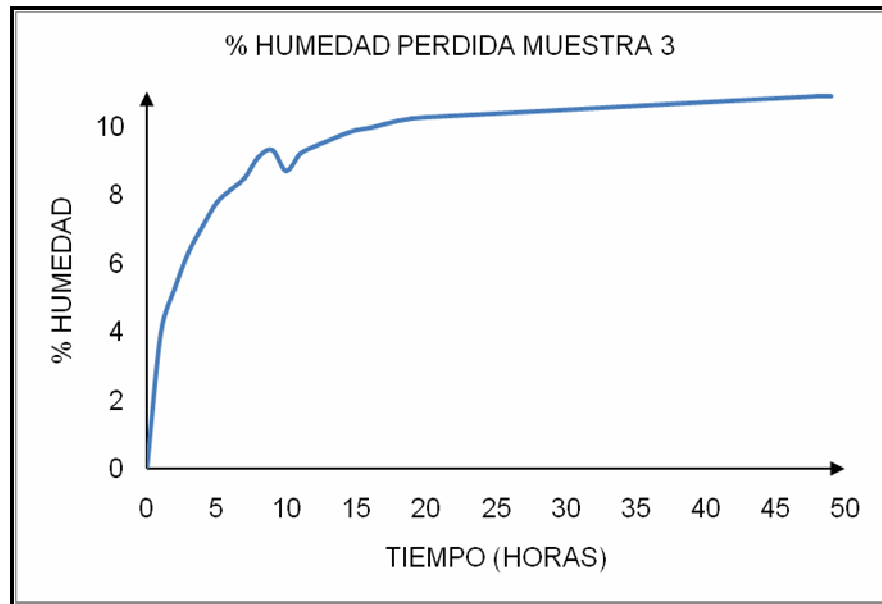


Gráfico 5. % de humedad perdida para la muestra 4

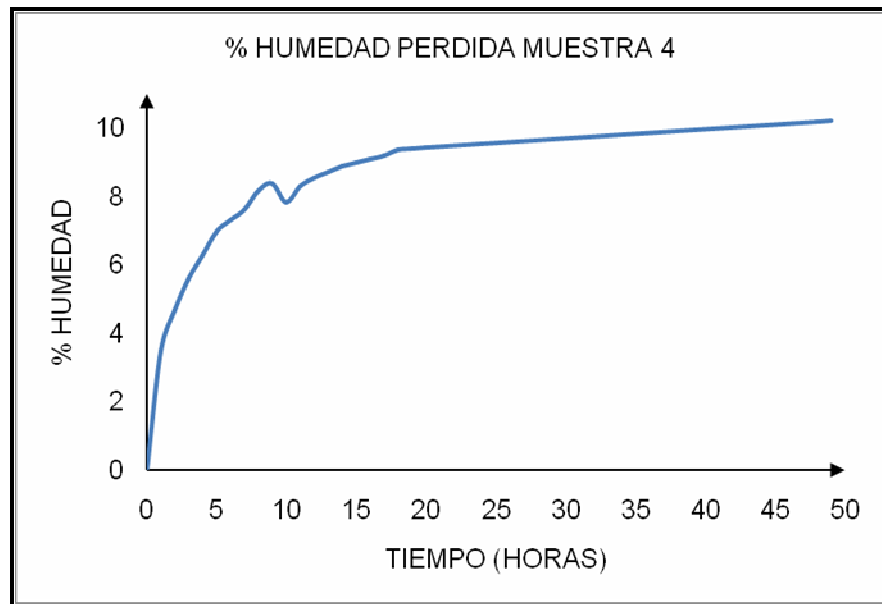


Gráfico 6. % de humedad perdida para la muestra 5

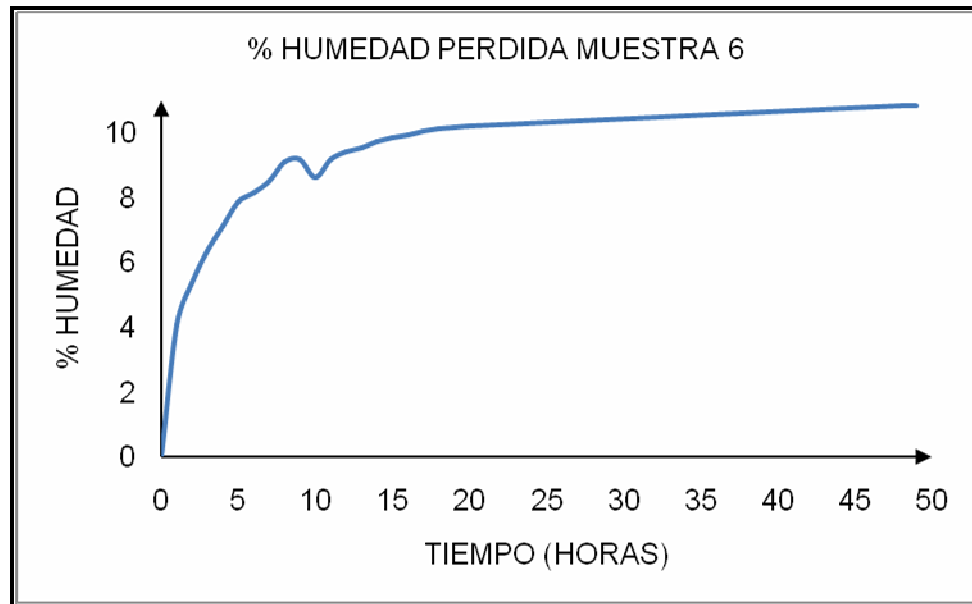


Gráfico 7. % de humedad perdida para la muestra 6

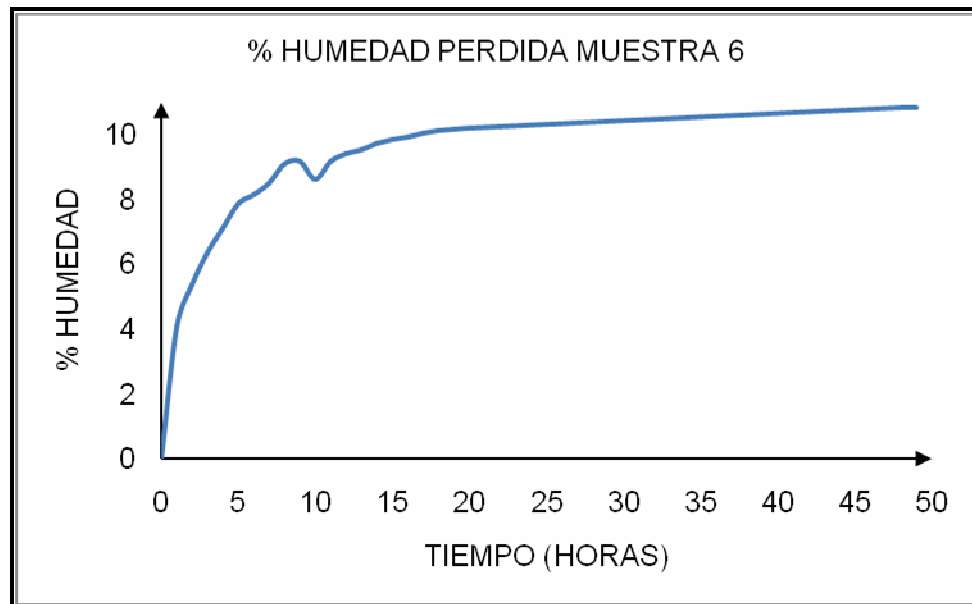


Gráfico 8. % de humedad perdida para la muestra 7

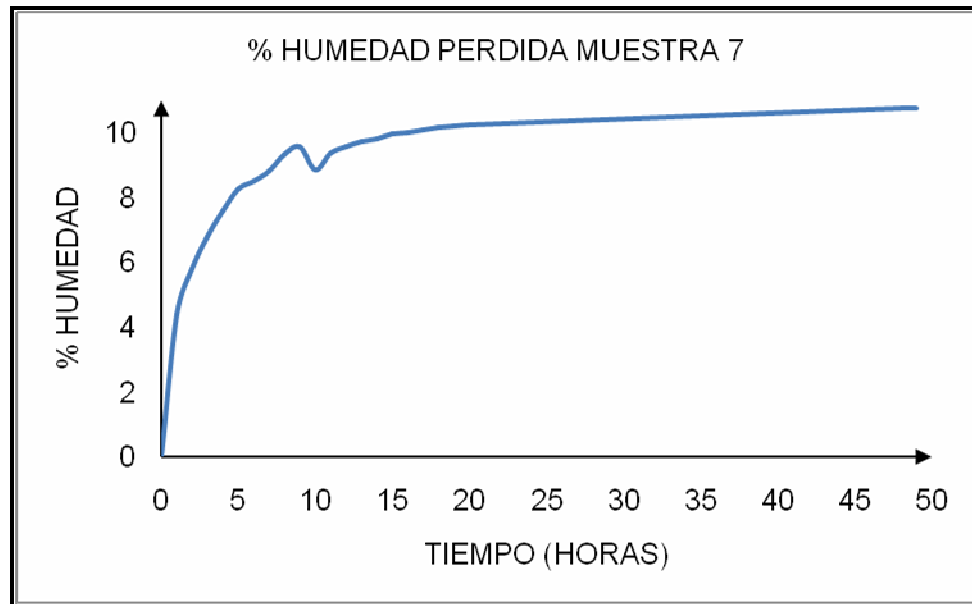
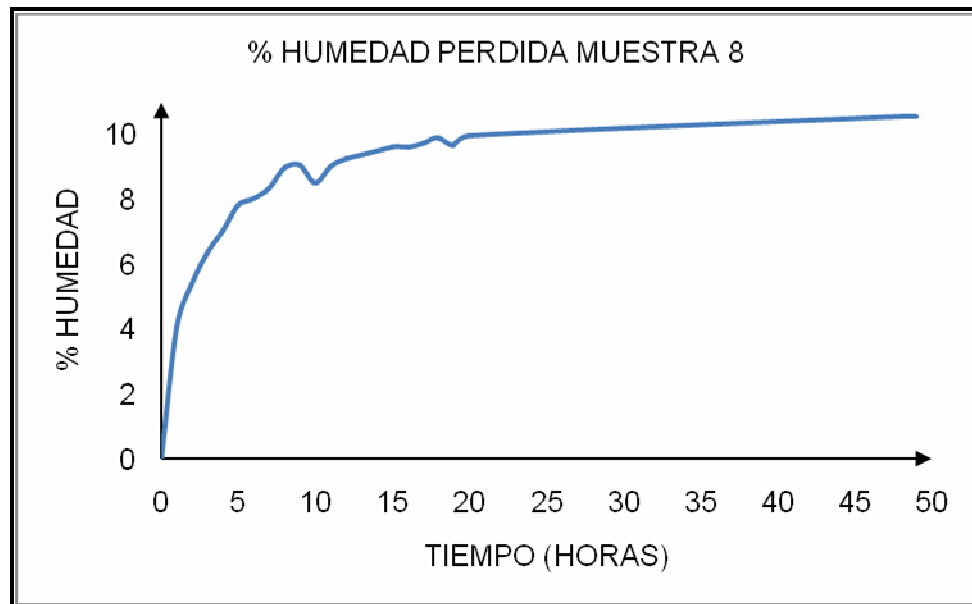


Gráfico 9. % de humedad perdida para la muestra 8



El contenido de humedad de la madera se determina con el peso inicial y final de las muestras del ensayo obtenido de la siguiente manera:

$$CH = \frac{\text{peso madera humeda} - \text{peso madera seca}}{\text{peso madera seca}} \times 100$$

Cada muestra obtuvo un porcentaje de contenido de humedad final, el cual se encuentra en la tabla 1, con los cuales se realizó un análisis estadístico para el cual se usó la distribución de T de Student con 7 grados de libertad, y estimando un intervalo de confianza del 95 %, arrojó los siguientes datos:

Tabla 1. % contenido de humedad de las muestras de madera teca

	% CH
Muestra 1	10,68
Muestra 2	10,9
Muestra 3	10,86
Muestra 4	10,21
Muestra 5	10,55
Muestra 6	10,82
Muestra 7	10,74
Muestra 8	10,55

- % Contenido de humedad promedio 10,663%.
- Desviación estándar 0,23%.
- Intervalo de confianza para la media [10,320 – 11,005] %.
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,219 – 2,637] %.

2.2 ENSAYO DE DENSIDAD

Muchas veces para disminuir el efecto de la variable humedad se trabaja con la gravedad específica la cual es definida como el peso de un volumen dado de madera seca a horno, dividido por el peso de un volumen equivalente en agua.[31]

Para esto se realizó el previo secado de 8 muestras de la madera, durante el ensayo de contenido de humedad, donde se conoció el peso de la madera seca al horno, aparte de esto, el volumen de la madera se halló según el método de volumen por inmersión de agua de la norma ASTM D2395-07⁴, donde es necesario un recipiente suficientemente amplio para sumergir en su totalidad las muestras, en éste caso se utilizó un Kitasato de 2000 ml y para medir el volumen de agua desplazada se usó una probeta graduado de 250 ml.

En la determinación del volumen de la madera se procedió a adicionar agua en el Kitasato hasta que se estabilizará, es decir hasta que dejará de verter agua, en ese momento se introdujo la muestra de madera en su totalidad con ayuda de una aguja. El agua que empezó a desplazarse se recolecto en la probeta graduada ubicada bajo el tubo de vertimiento del Kitasato hasta que éste se estabilizará nuevamente. Por último se realizó la lectura del volumen de agua contenido en la probeta, que será igual al peso de un volumen equivalente en agua de la muestra de madera, todo esto se puede ver en la figura 27.

⁴ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials. ASTM D2395 .USA, 2007.

Figura 27. Volumen por inmersión de agua



Para evitar la absorción de agua por la madera en el ensayo, se sumergió con anterioridad cada una de las muestras en parafina durante cinco minutos y se retiró el exceso de la superficie, logrando así que las muestras quedarán impermeabilizadas.

En la Tabla 2 se encuentran los datos de masa, volumen y el cálculo de las densidades de las 8 muestras de madera teca.

Tabla 2. Densidad básica de muestras de madera teca

	MASA gr	VOL. cm³	DB gr/cm³
Muestra 1	102,69	150	0,685
Muestra 2	73,05	120	0,609
Muestra 3	69,59	106	0,657
Muestra 4	80,1	111	0,722
Muestra 5	60,11	86	0,699
Muestra 6	58,06	82	0,708
Muestra 7	54,39	82	0,663
Muestra 8	39,26	58	0,677

Con los datos encontrados anteriormente se realizó un análisis estadístico, para el cual se usó la distribución de T de Student con 7 grados de libertad, y estimando un intervalo de confianza del 95 %, arrojó los siguientes datos:

- Densidad promedio 0,677 gr/cm³
- Desviación estándar 0,035 gr/cm³
- Intervalo de confianza para la media [0,643 – 0,711] gr/cm³
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,020 – 0,061] gr/cm³

2.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN PARALELO A LAS FIBRAS

En este ensayo se encontrará el esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad a compresión de la madera teca de estudio la cual tiene un contenido de humedad de 10,663% hallado en el numeral 2.1, ya que en general en las maderas estas son unas de las propiedades mecánicas de gran importancia, debido a que si se conocen se pueden diseñar o dimensionar los elementos a compresión que conforman una estructura en madera.

2.3.1 Ensayo de muestras según la ASTM

El procedimiento del ensayo fue el siguiente: se extrajeron seis muestras representativas libres de defectos de 3 de 18 rollizas (ver Figura 28). El tamaño de las muestras se determinó según el método secundario de la norma ASTM D143-09⁵, donde se sugiere dimensiones de 1 por 1 por 4 pulgadas (25 por 25 por 100 mm), adecuada para los diámetros de la madera estudiada que están entre 80 y 120 mm, esto por ser una madera joven. Por lo mismo no se usó el método primario pues requiere de dimensiones más grandes de 2 por 2 por 8 pulgadas (50 por 50 por 200 mm) y que al ser usado las muestras contendrían la medula la cual es una parte del árbol de baja resistencia y se considera como un defecto según la clasificación visual manual de diseño para madera del grupo andino⁶.

⁵ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for small clear specimens of Timber. ASTM D143-09.USA, 2009.

⁶ Capítulo 3 del manual de diseño para madera del grupo andino (clasificación visual de la madera aserrada).

Para la elaboración de las muestras no se permite un error mayor a 0,3% según la norma ASTM D143-09, para esto se midió cada lado tres veces que es lo mínimo que recomienda esta norma, pero lo suficiente para muestras uniformes que fue lo que ocurrió en este caso.

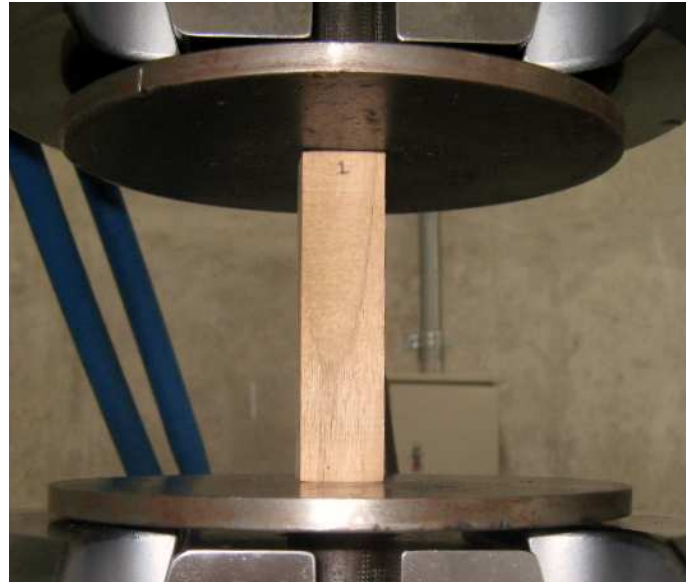
Para dar inicio al ensayo a compresión, primero que todo, se adecuó la máquina de pruebas, instalándole unos platos de acero en la parte superior e inferior de las muestras, esto para poderlas ubicar de tal manera que quedaran totalmente apoyadas y que la carga aplicada fuera uniforme en toda su sección transversal. Posteriormente se aplicó carga a una velocidad constante de 0,01 mm/seg. hasta que las muestras fallaron.

El ensayo a compresión de la madera se realizó en la máquina de pruebas *MTS 647 Hydraulic Wedge Grip*. Los datos obtenidos de éste ensayo fueron los de carga aplicada y desplazamiento. Estos fueron suministrados de manera electrónica por esta máquina, ya que cuenta con instrumentos automáticos de medición, por tanto se considera que son datos confiables.

Figura 28. Muestras para ensayo a compresión paralela a las fibras según ASTM D143-09



Figura 29. Ensayo a compresión paralela a las fibras de muestra según ASTM D143-09



Para conocer el valor del esfuerzo máximo a compresión (δ) sobre cada muestra, es necesario medir el área en cm^2 de la sección transversal de cada una, y conociendo la carga aplicada en KN, se procede a calcular el esfuerzo para cada valor de carga hasta la falla así:

$$\delta = \frac{\text{carga (KN)}}{\text{Área de la sección (cm}^2\text{)}}$$

El módulo de elasticidad a compresión también es una propiedad importante de la madera, y se puede determinar, teniendo los datos de esfuerzo y calculando la deformación unitaria (ϵ) a partir de los desplazamientos de ésta.

La deformación unitaria es definida como el cociente del desplazamiento de la muestra suministrado por la maquina y la longitud inicial de la misma.

$$\varepsilon = \frac{\text{Desplazamiento de la muestra}}{\text{longitud inicial}}$$

Por tanto el módulo de elasticidad en compresión (MOE) será el cociente entre la diferencia del 50% y el 10% del máximo esfuerzo, y la diferencia de sus correspondientes deformaciones unitarias (ε) así:

$$MOE = \frac{\delta_{50\%} - \delta_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}}$$

El cálculo del módulo de elasticidad se hacen en estos puntos, ya que los primeros datos obtenidos de desplazamientos son erróneos, pues se considera que en la primera zona del 10% ocurre el acomodamiento de la muestra a los elementos actuantes de la carga de ensayo, esto se puede ver en las gráficas que se encuentran a continuación, ya que la pendiente en esta zona es diferente a donde verdaderamente se comporta elásticamente la madera.

Teniendo todos los datos de esfuerzos (δ) en KN/cm^2 y las deformaciones unitarias (ε) para todas las muestras se generan las siguientes gráficas, en las que se observa la ecuación de la sección elástica, en la cual su pendiente corresponde al módulo de elasticidad a compresión paralela a las fibras.

Gráfico 10. Muestra 1 compresión paralela a las fibras

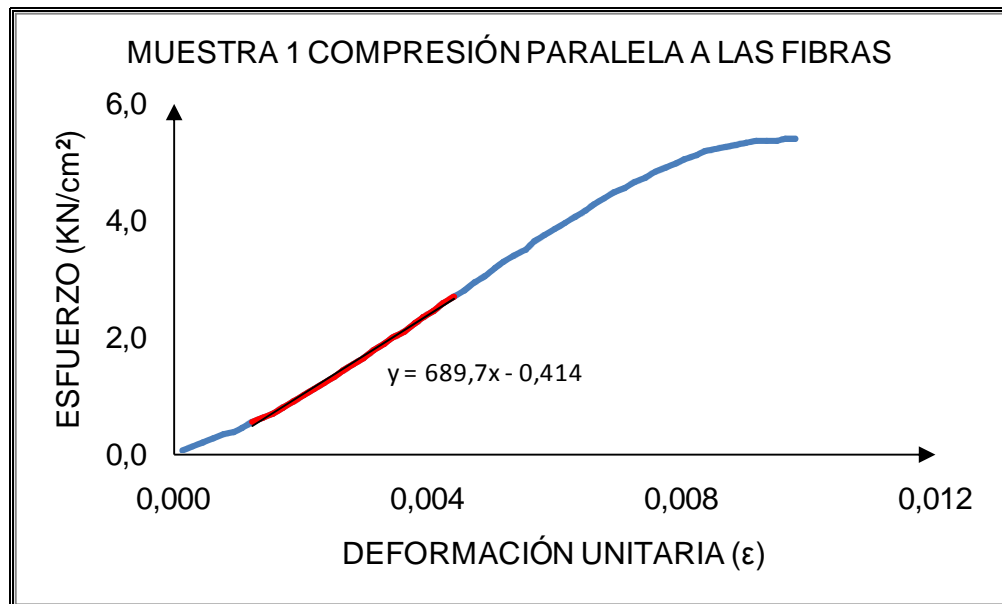


Gráfico 11. Muestra 2 compresión paralela a las fibras

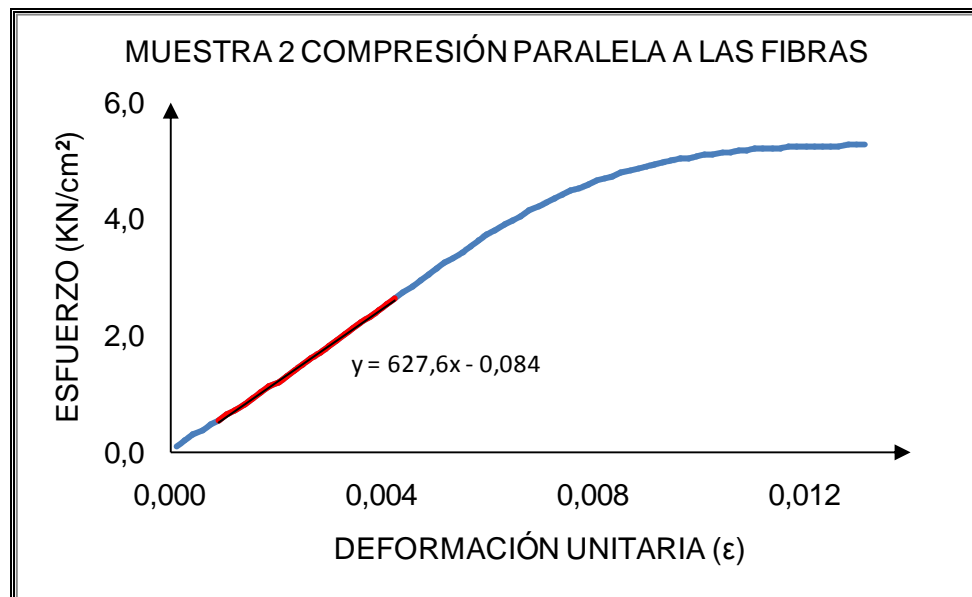


Gráfico 12. Muestra 3 compresión paralela a las fibras

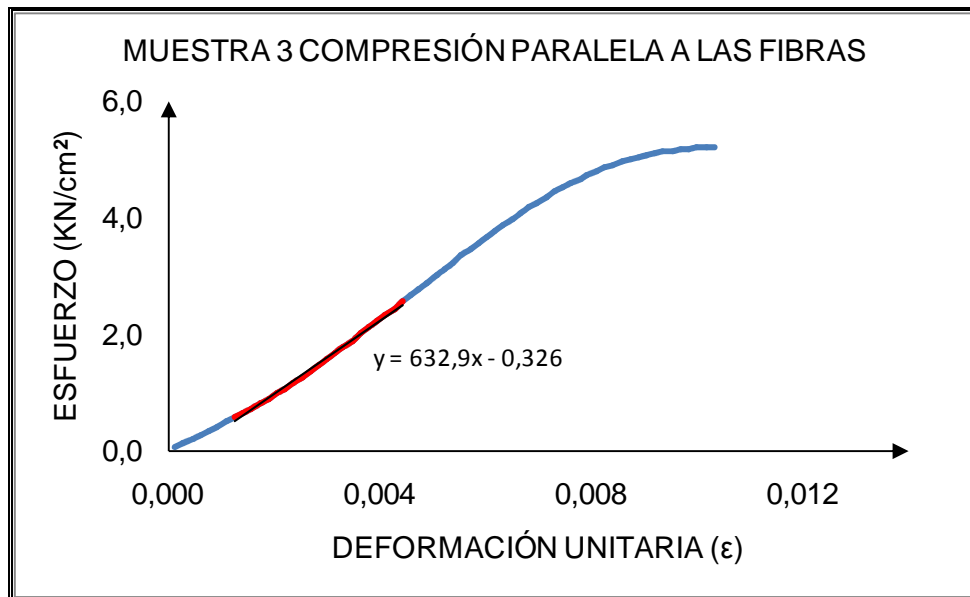


Gráfico 13. Muestra 4 compresión paralela a las fibras

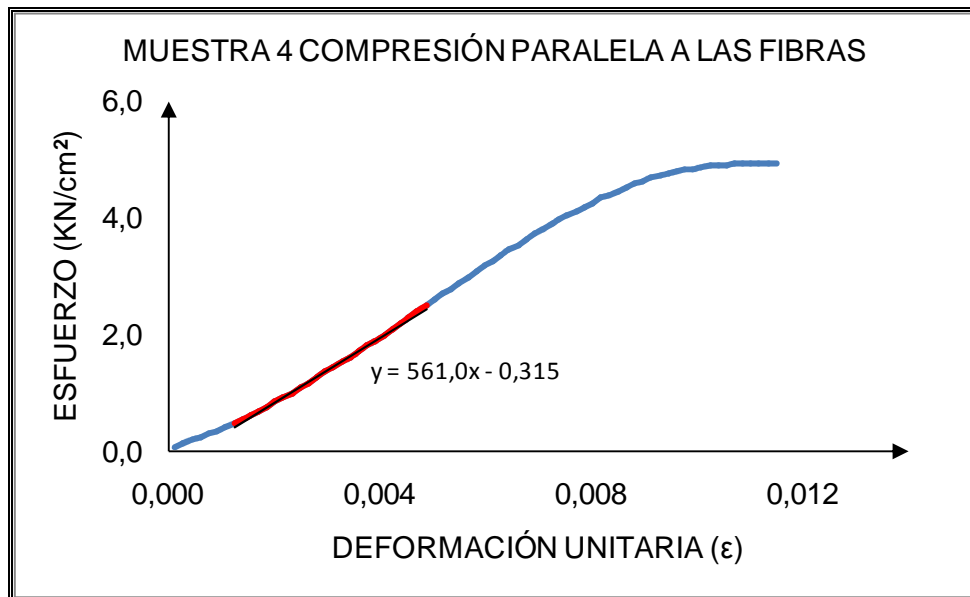


Gráfico 14. Muestra 5 compresión paralela a las fibras

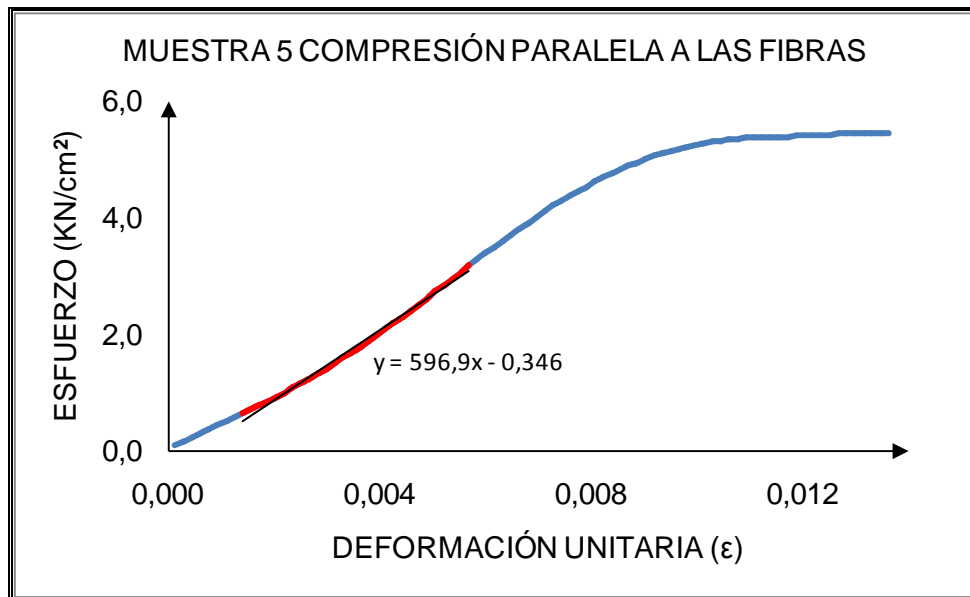
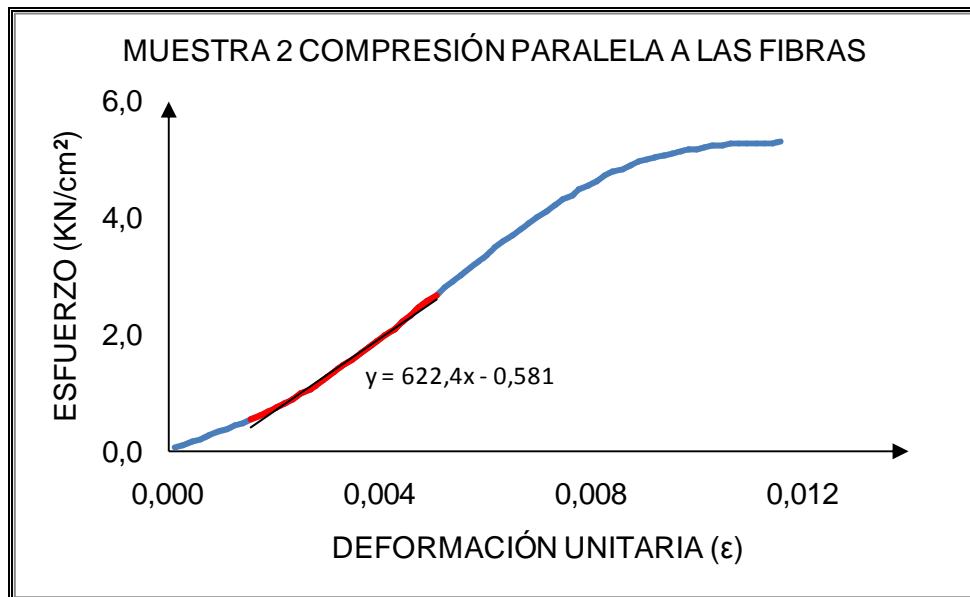


Gráfico 15. Muestra 6 compresión paralela a las fibras



En la Tabla 3, se observa un resumen de los esfuerzos máximos a compresión paralela a las fibras, para cada una de las muestras falladas, y sus respectivas áreas de las secciones transversales, las cargas máximas alcanzadas durante el ensayo y los módulos de elasticidad.

Tabla 3. Tabla resumen del ensayo a compresión paralela a las fibras

	ÁREA PROMEDIO cm²	CARGA MÁXIMA KN	ESFUERZO MÁXIMO KN/cm²	MÓDULO DE ELASTICIDAD KN/cm²
Muestra 1	6,44	34,65	5,37	689,7
Muestra 2	6,23	33,06	5,25	627,6
Muestra 3	6,38	33,15	5,20	632,9
Muestra 4	6,39	31,51	4,93	561,0
Muestra 5	6,31	34,33	5,44	596,9
Muestra 6	6,38	33,72	5,28	622,4

Con los datos encontrados anteriormente, tanto para los esfuerzos máximos como los módulos de elasticidad, se realizó un análisis estadístico usando la distribución de T de Student con 5 grados de libertad, y estimando un intervalo de confianza del 95 %, arrojando los siguientes datos:

Esfuerzo máximo de compresión paralela a las fibras

- Esfuerzo máximo promedio 5,247 KN/cm²
- Desviación estándar 0,178 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [5,060 – 5,434] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,107 – 0,437] KN/cm²

Módulo de elasticidad de compresión paralela a las fibras

- Módulo de elasticidad promedio 621,75 KN/cm²
- Desviación estándar 42,62 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [577,01 - 666,48] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [26,61 - 104,55] KN/cm²

2.3.2 Ensayo de muestras circulares con médula

A parte se realizaron tres ensayos adicionales a tres muestras circulares que contenían sus médulas (ver Figura 30.), tomadas de los tres arboles utilizados para las muestras según la ASTM. Esto se hizo ya que en una situación real, los elementos de madera rolliza de una estructura trabajan completos, conteniendo toda su médula y de secciones circulares. Las dimensiones de las muestras son: 5 cm de diámetro y 10 cm de altura. Las muestras fueron torneadas para obtener uniformidad en los resultados y en el comportamiento de estas.

Al igual que en el ensayo anterior, se adecuo la maquina, instalándole unos platos de acero en la parte superior e inferior de las muestras, y se aplicó carga a una velocidad constante de 0,01 mm/seg, hasta que las muestras fallaron.

Figura 30. Muestras con medula compresión paralela a las fibras



Figura 31. Ensayo compresión paralela a las fibras de muestra con medula



También con los datos suministrados en el proceso de ensayo para cada muestra, se obtuvo las graficas de esfuerzo vs deformación unitaria y sus respectivos módulos de elasticidad, los cuales se muestran en las siguientes gráficas:

Gráfico 16. Muestra circular con medula 1 compresión paralela a las fibras

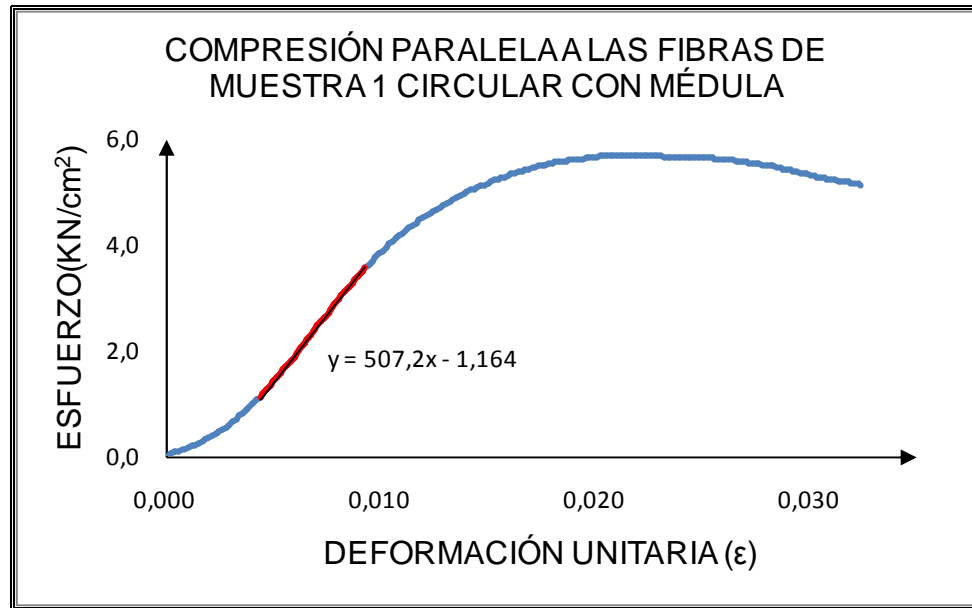


Gráfico 17. Muestra circular con medula 2 compresión paralela a las fibras

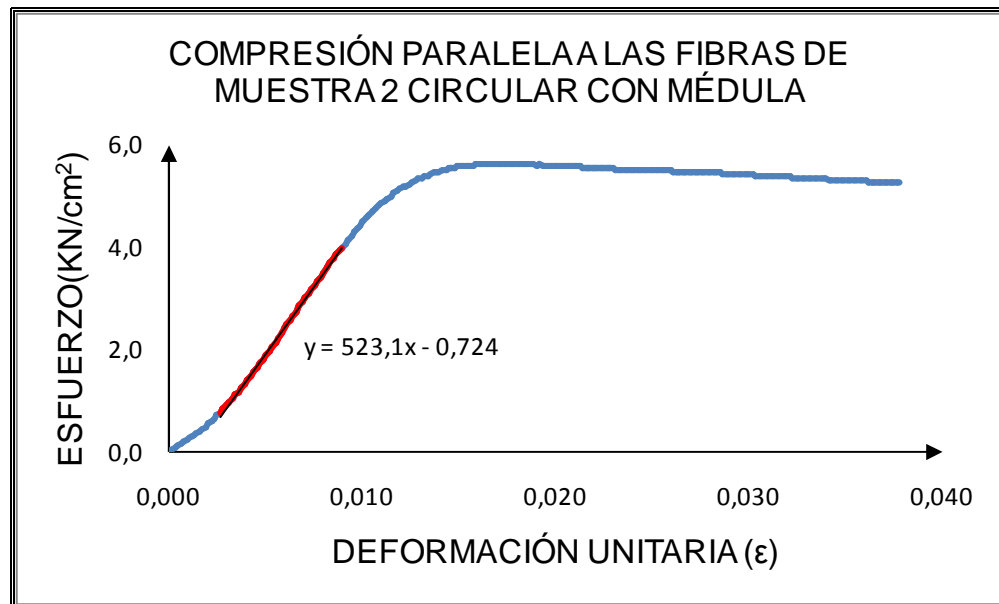
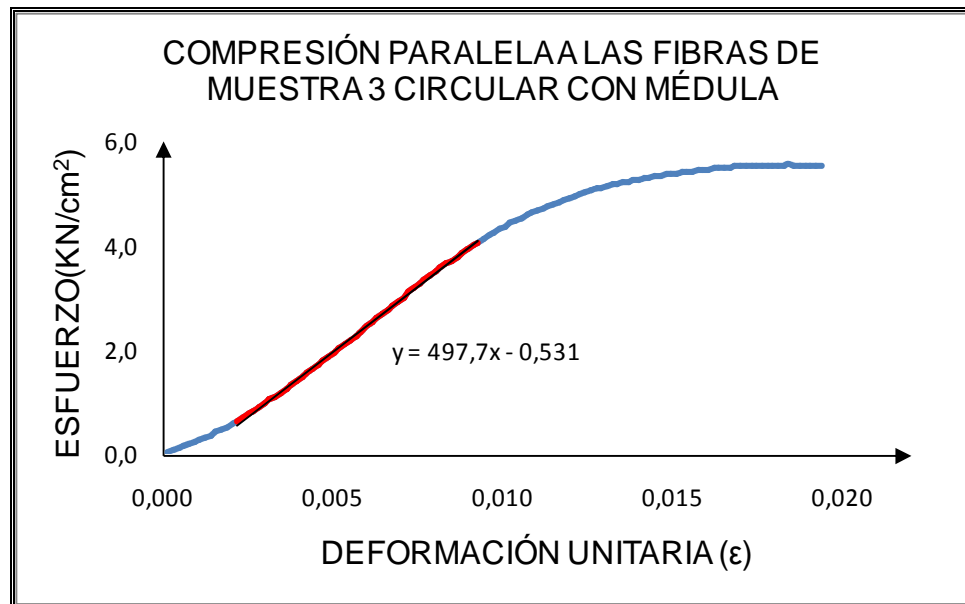


Gráfico 18. Muestra circular con medula 3 compresión paralela a las fibras



En la Tabla 4 se encuentran los esfuerzos máximos a compresión paralela a las fibras de cada una de las muestras circulares con medula falladas, para esto fue necesario encontrar el área promedio de la sección transversal y las cargas máximas alcanzadas durante el ensayo.

Tabla 4. Esfuerzos máximos de muestras circulares con medula a compresión paralela a las fibras

	ÁREA PROMEDIO cm ²	CARGA MÁXIMA KN	ESFUERZO MÁXIMO KN/cm ²	MÓDULO DE ELASTICIDAD KN/cm ²
Muestra 1	19,335	109,616	5,669	507,2
Muestra 2	19,192	107,773	5,615	523,1
Muestra 3	19,192	106,463	5,547	497,1

Con los datos encontrados anteriormente se realizó un análisis estadístico para el cual se usó la distribución de T de Student, con 2 grados de libertad, y estimando un intervalo de confianza del 95 %, arrojó los siguientes datos:

Esfuerzo máximo de compresión paralela a las fibras

- Esfuerzo máximo promedio 5,61 KN/cm²
- Desviación estándar 0,061 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [5,503 – 5,718] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,050 – 0,608] KN/cm²

Módulo de elasticidad de compresión paralela a las fibras

- Módulo de elasticidad promedio 650,607 KN/cm²
- Desviación estándar 34,43 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [589,57 - 710,54] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [28,34 - 342,21] KN/cm²

2.4 ENSAYO A TENSIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

Los objetivos de este ensayo es determinar el esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad a tensión de la madera teca de estudio la cual tiene un contenido de humedad de 10,663% hallado en el numeral 2.1, para esto se extrajeron seis muestras representativas libres de defectos de 3 de 18 rollizas (Figura 32), las cuales se dimensionaron según norma ASTM D143-09⁷, teniendo un error permitió no mayor de 0.3%, estas dimensiones se observan en la figura 33.

Figura 32. Muestras para ensayo a tensión paralela a las fibras según ASTM D143-09



⁷ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for small clear specimens of Timber. ASTM D143-09.USA, 2009.

Figura 33. Muestra para ensayo a tensión paralela a las fibras según ASTM D143-09

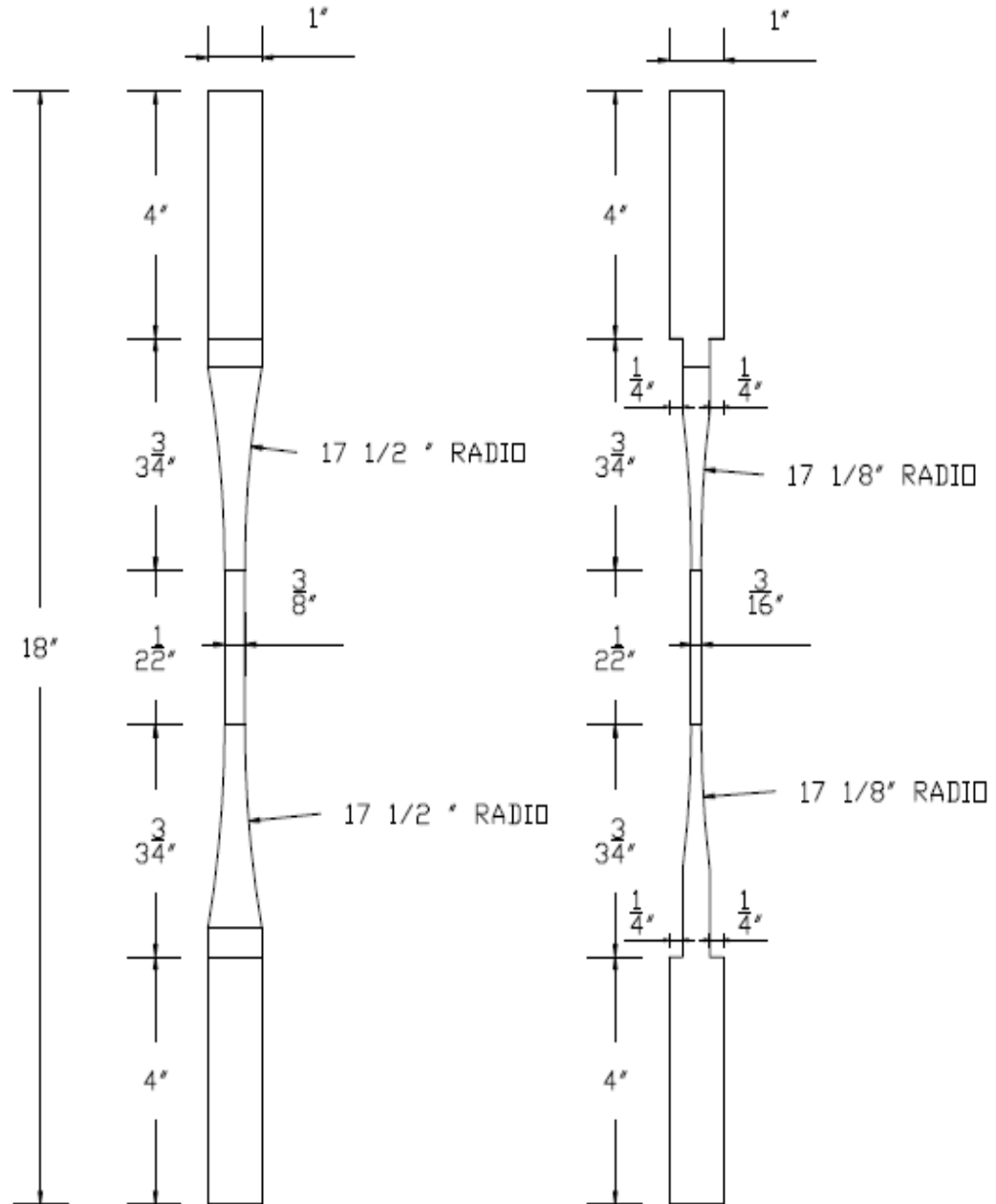


Figura 34. Ensayo tensión paralela a las fibras de muestra según ASTM D143-09



Figura 35. Acople para ensayos a tensión paralela a las fibras



Al igual que el ensayo a compresión, este se realizó con la máquina de pruebas *MTS 647 Hydraulic Wedge Grip*. Para poder realizar éstos ensayos, se procedió a adecuar la máquina, de modo que pudiera sostener las muestras para ensayarlas. Para esto se elaboraron dos acoples metálicos (ver figura 35) donde se pudieron acomodar las muestras, garantizando la falla a tensión paralela a las fibras en el centro de estas.

Posteriormente se aplicó carga a una velocidad constante de 0,015 mm/seg. hasta que las muestras fallaron.

Debido a que la máquina cuenta con instrumentos de medición de carga y desplazamientos automáticos, se considera que los datos obtenidos son confiables.

Para conocer el valor del esfuerzo máximo a tensión (δ) sobre cada muestra, se hace necesario medir el área en de la sección transversal central de cada muestra que es donde ocurrirá la falla.

Teniendo el área de la sección y conociendo la carga aplicada en KN, se procede a calcular el esfuerzo de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{\text{carga (KN)}}{\text{Área de la sección (cm}^2\text{)}}$$

El módulo de elasticidad a tensión se puede determinar, teniendo los datos de la resistencia a tensión de la madera y calculando la deformación unitaria (ϵ) a partir de los desplazamientos de ésta.

La deformación unitaria es definida como el cociente del desplazamiento de la muestra suministrado por la máquina y la longitud inicial correspondiente al tramo central que será de 6,35 cm donde se supone que ocurrirán los desplazamientos.

$$\varepsilon = \frac{\text{Desplazamiento de la muestra}}{\text{longitud inicial}}$$

Por tanto el módulo de elasticidad a tensión será el cociente entre la diferencia del 50% y el 10% del máximo esfuerzo, y la diferencia de sus correspondientes deformaciones unitarias (ε) así:

$$\text{Modulo de elasticidad a tensión} = \frac{\delta_{50\%} - \delta_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}}$$

El módulo de elasticidad se halla de esta manera, pues que se considera que las deformaciones que se encuentran entre el 0% y 10% de la carga máxima no son confiables ya que la muestra primero se acomoda al acople y después si se empieza a transmitir totalmente la carga a la sección de falla de la muestra.

Teniendo los cálculos los esfuerzos (δ) en KN/cm^2 y las deformaciones unitarias (ε), se generan las siguientes gráficas, en las que se observa la ecuación de la sección elástica en la cual su pendiente corresponde al respectivo módulo de elasticidad.

Gráfico 19. Muestra 1 tensión paralela a las fibras

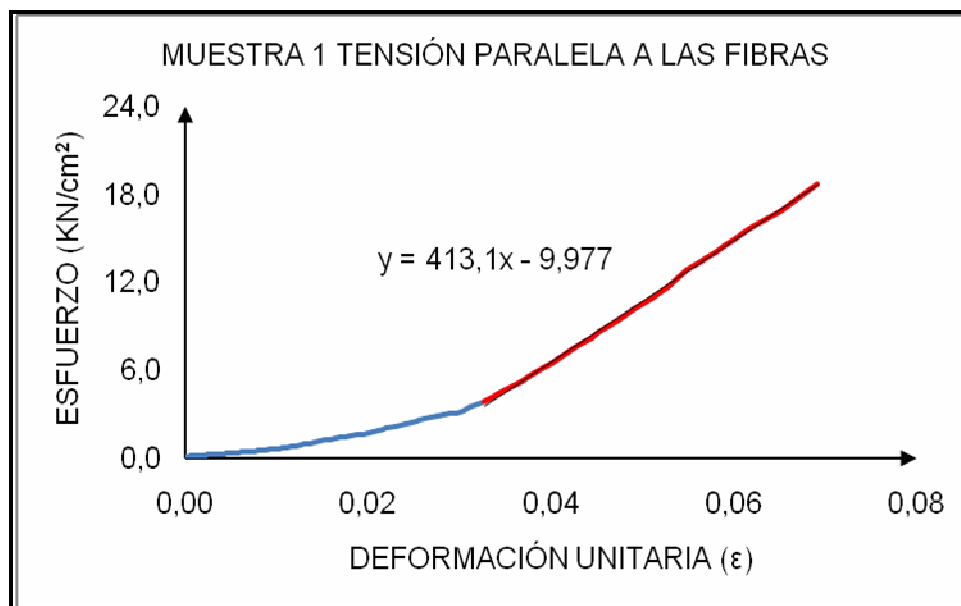


Gráfico 20. Muestra 2 tensión paralela a las fibras

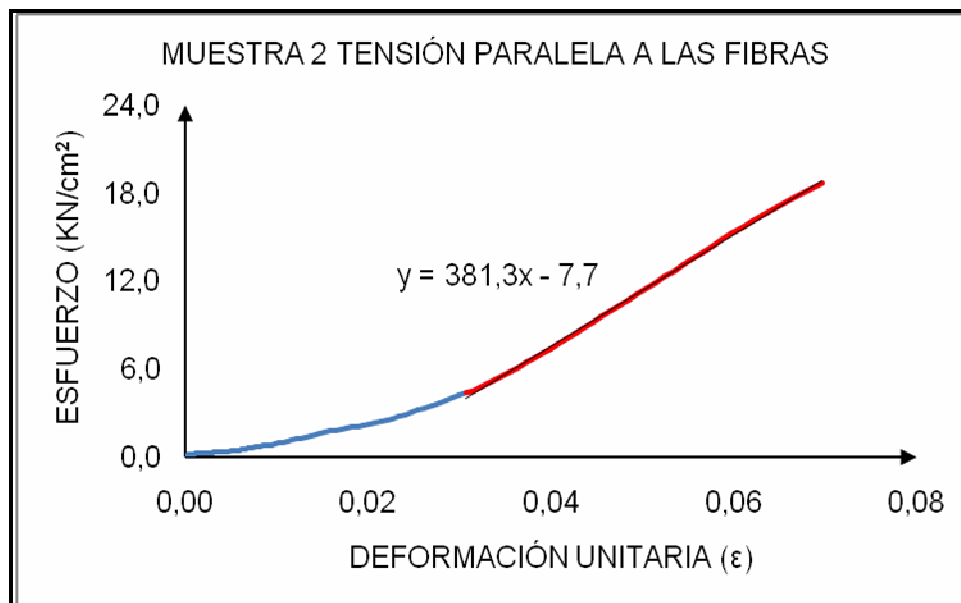


Gráfico 21. Muestra 3 tensión paralela a las fibras

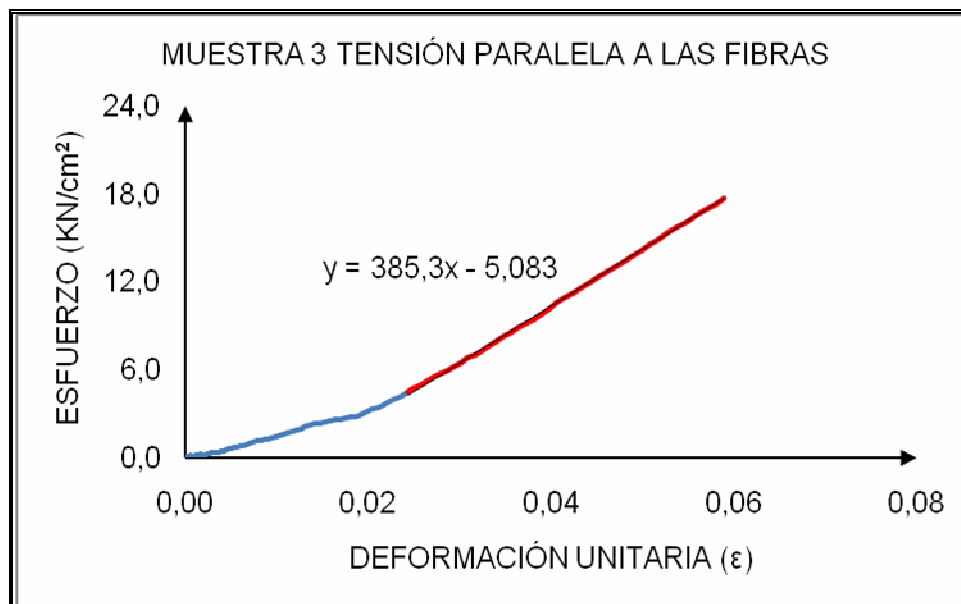


Gráfico 22. Muestra 4 tensión paralela a las fibras

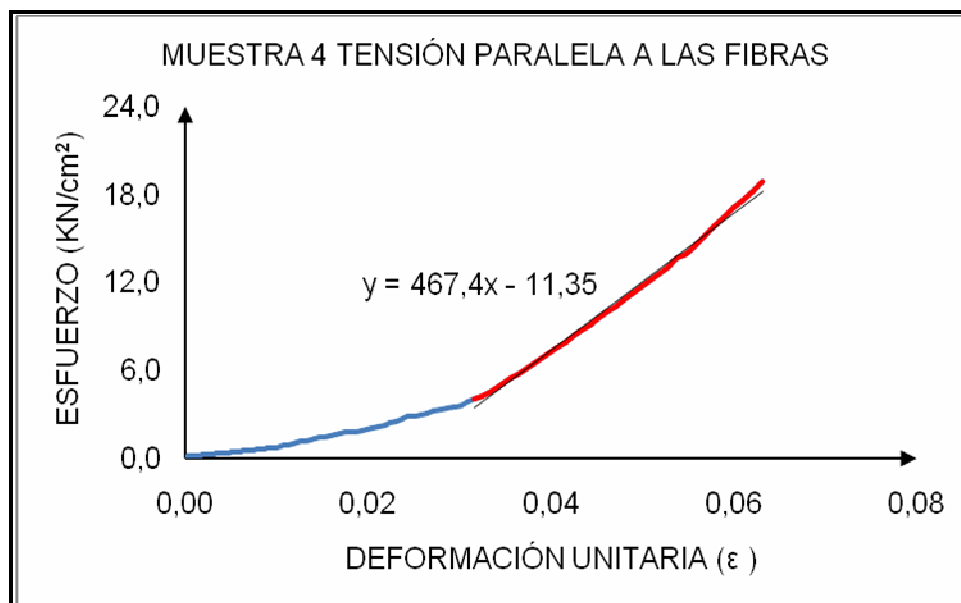


Gráfico 23. Muestra 5 tensión paralela a las fibras

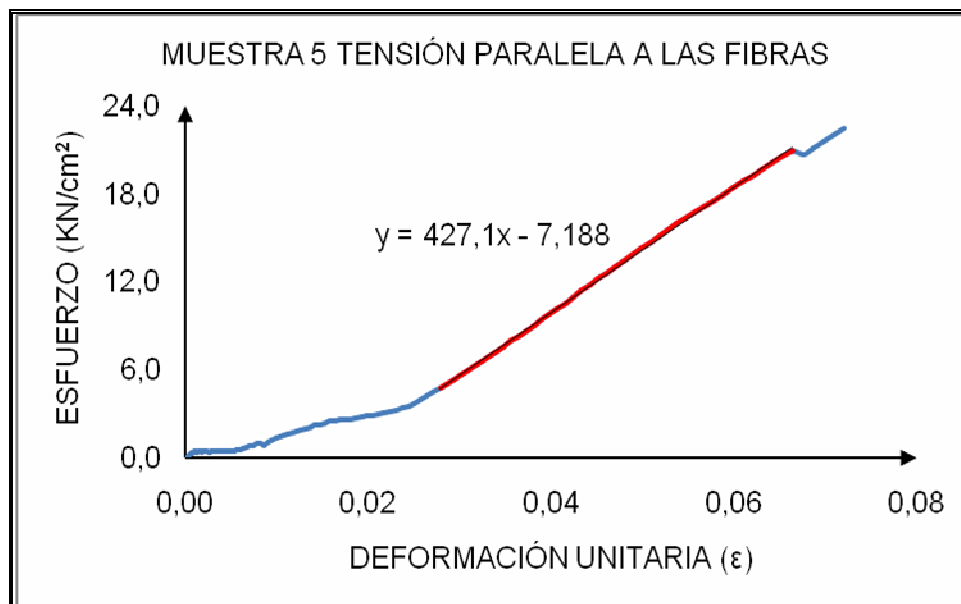
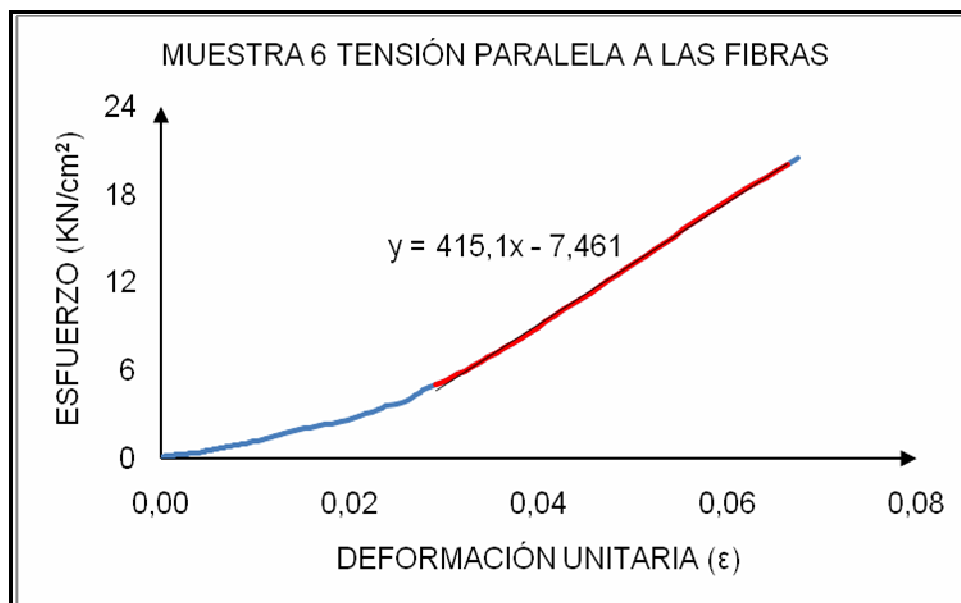


Gráfico 24. Muestra 6 tensión paralela a las fibras



En la Tabla 5, se observa el esfuerzo máximo a tensión paralela a las fibras, de cada una de las muestras falladas, junto con las respectivas áreas de las secciones transversales, las cargas máximas alcanzadas durante el ensayo y los módulos de elasticidad.

Tabla 5. Tabla resumen del ensayo a tensión paralela a las fibras

	ÁREA PROMEDIO cm²	CARGA MÁXIMA KN	ESFUERZO MÁXIMO KN/cm²	MÓDULO DE ELASTICIDAD KN/cm²
Muestra 1	0,57	10,69	18,69	413,10
Muestra 2	0,54	10,01	18,71	381,30
Muestra 3	0,54	9,44	17,64	385,30
Muestra 4	0,53	10,01	18,87	467,40
Muestra 5	0,51	11,51	22,43	427,10
Muestra 6	0,54	10,18	19,02	415,10

Con los datos encontrados anteriormente, se realizó un análisis estadístico, para el cual se usó la distribución de T de Student con 5 grados de libertad, y estimando un intervalo de confianza del 95 % arrojó los siguientes datos:

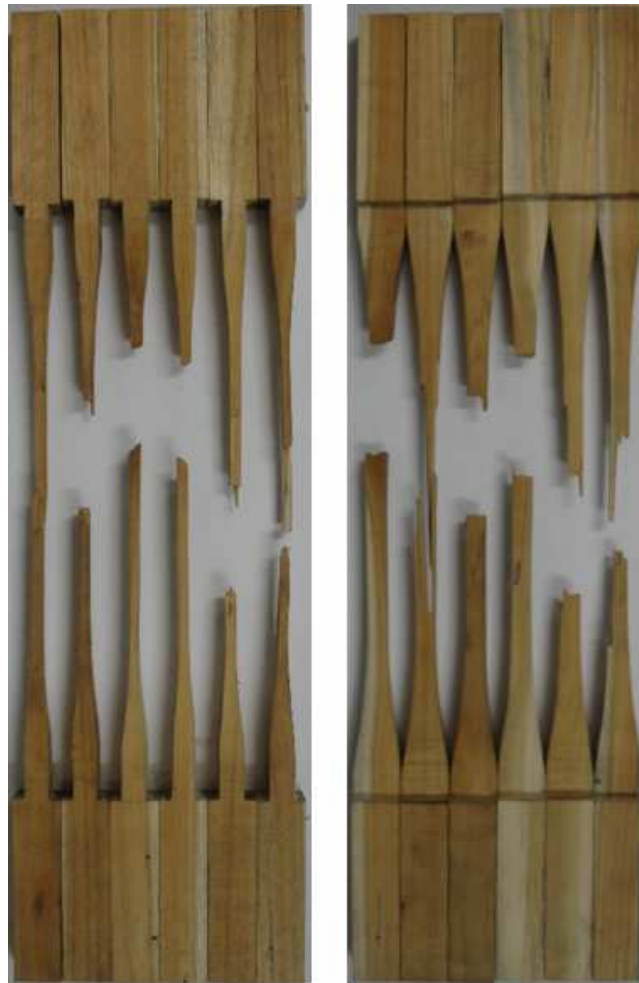
Esfuerzo máximo de tensión paralela a las fibras

- Esfuerzo promedio 19,227 KN/cm²
- Desviación estándar 1,641 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [17,504 – 20,950] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,987 – 4,027] KN/cm²

Módulo de elasticidad de tensión paralela a las fibras

- Módulo de elasticidad promedio 414,88 KN/cm²
- Desviación estándar 31,38 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [381,986 - 447,781] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [18,847- 76,894] KN/cm²

Figura 36. Muestras falladas a tensión



3. ENSAYO DE CONEXIÓN EN MADERA ROLLIZA

3.1 SELECCIÓN DE LA CONEXIÓN A EVALUAR

En esta investigación se quiso evaluar un tipo de conexión en madera rolliza para lo cual se realizó una evaluación empírica de las conexiones descritas en el numeral 1.10 dando calificación alta, media, baja y NA (no aplica), considerando los siguientes aspectos

Facilidad de trabajo de carpintería: Referente a la cantidad trabajos o procedimientos en la madera tales como cortes, perforaciones, desbastes, etc.

Facilidad de trabajo de acero: Referente a la cantidad trabajos o procedimientos en el acero como cortes de platinas, perforaciones, soldadura, realización de piezas a medida con maquinaria especializada, etc.

Facilidad de trabajo en el ensamble: Tiene que ver con la complejidad que se genera al momento del ensamble, esto tiene que ver con la cantidad de piezas, la herramienta necesaria, la misma forma de la conexión, etc.

Accesibilidad de materiales, herramientas y piezas en el mercado: muchas veces no se cuenta con alguno de estos elementos, debido a que si se tiene pensado comprar o hacer, nuestra región o país no cuenta con empresas o maquinarias especializadas para su venta o elaboración.

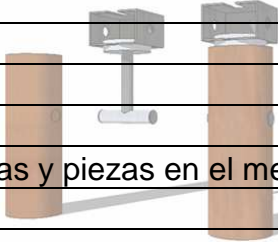
Economía de la conexión: Debido a factores como los anteriores pueden aumentar o disminuir el costo de la conexión, tales como mano de obra calificada, piezas costosas y maquinaria especializada.

Estética de la conexión: En un diseño integral de una estructura, hacen parte tanto la resistencia como la estética, siendo para muchos éste último de gran importancia.

En los criterios de evaluación no se tuvo en cuenta la resistencia de la conexión ya que se asume que teniendo conocimiento de las propiedades resistentes de los elementos de conexión y de la madera a utilizar se pueden dimensionar y ubicar de tal forma que cumplan los requerimientos de carga previamente calculados.

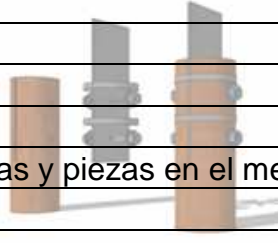
A continuación se muestran las tablas resumen con las calificaciones de los criterios mencionados anteriormente para cada una de las conexiones:

Tabla 6. Características conexión tipo 1



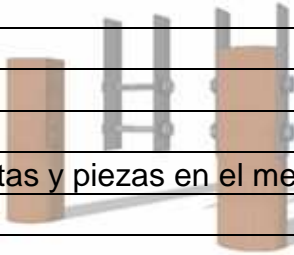
Criterio	Calificación
Facilidad de trabajo de carpintería	Alta
Facilidad de trabajo de acero	Baja
Facilidad de trabajo en el ensamble	Alta
Accesibilidad de materiales, herramientas y piezas en el mercado	Baja
Economía de la conexión	Baja
Estética de la conexión	Media

Tabla 7. Características conexión tipo 2




Criterio	Calificación
Facilidad de trabajo de carpintería	Medio
Facilidad de trabajo de acero	Alta
Facilidad de trabajo en el ensamble	Alta
Accesibilidad de materiales, herramientas y piezas en el mercado	Alta
Economía de la conexión	Alta
Estética de la conexión	Baja

Tabla 8. Características conexión tipo 3A



Criterio	Calificación
Facilidad de trabajo de carpintería	Alta
Facilidad de trabajo de acero	Alta
Facilidad de trabajo en el ensamble	Alta
Accesibilidad de materiales, herramientas y piezas en el mercado	Alta
Economía de la conexión	Alta
Estética de la conexión	Alta

Tabla 9. Características conexión tipo 3B



Criterio	Calificación
Facilidad de trabajo de carpintería	Alta
Facilidad de trabajo de acero	Alta
Facilidad de trabajo en el ensamble	Alta
Accesibilidad de materiales, herramientas y piezas en el mercado	Alta
Economía de la conexión	Alta
Estética de la conexión	Alta

Tabla 10. Características conexión tipo 4A



Criterio	Calificación
Facilidad de trabajo de carpintería	Media
Facilidad de trabajo de acero	Media
Facilidad de trabajo en el ensamble	Media
Accesibilidad de materiales, herramientas y piezas en el mercado	Alta
Economía de la conexión	Media
Estética de la conexión	Media

Tabla 11. Características conexión tipo 4B

Criterio	Calificación
Facilidad de trabajo de carpintería	Media
Facilidad de trabajo de acero	Alta
Facilidad de trabajo en el ensamble	Alta
Accesibilidad de materiales, herramientas y piezas en el mercado	Alta
Economía de la conexión	Media
Estética de la conexión	Baja




Tabla 12. Características conexión tipo 5A

Criterio	Calificación
Facilidad de trabajo de carpintería	Alta
Facilidad de trabajo de acero	Media
Facilidad de trabajo en el ensamble	Media
Accesibilidad de materiales, herramientas y piezas en el mercado	Media
Economía de la conexión	Media
Estética de la conexión	Media

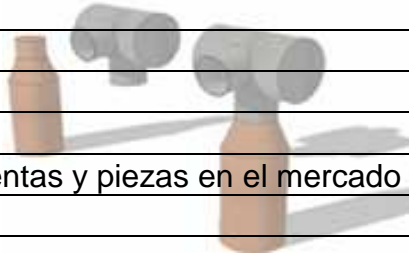


Tabla 13. Características conexión tipo 5B

Criterio	Calificación
Facilidad de trabajo de carpintería	Alta
Facilidad de trabajo de acero	Media
Facilidad de trabajo en el ensamble	Media
Accesibilidad de materiales, herramientas y piezas en el mercado	Media
Economía de la conexión	Media
Estética de la conexión	Media

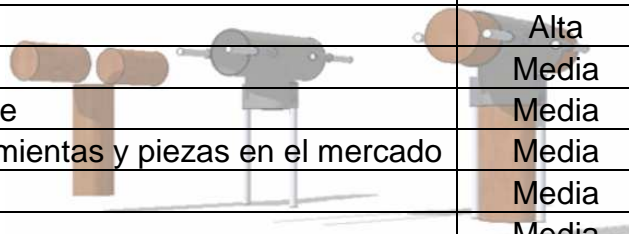


Tabla 14. Características conexión tipo 6

Criterio	Calificación
Facilidad de trabajo de carpintería	Baja
Facilidad de trabajo de acero	NA
Facilidad de trabajo en el ensamble	Alta
Accesibilidad de materiales, herramientas y piezas en el mercado	Media
Economía de la conexión	Baja
Estética de la conexión	Alta

Tabla 15. Características conexión tipo 7

Criterio	Calificación
Facilidad de trabajo de carpintería	Alta
Facilidad de trabajo de acero	Baja
Facilidad de trabajo en el ensamble	Media
Accesibilidad de materiales, herramientas y piezas en el mercado	Media
Economía de la conexión	Media
Estética de la conexión	Media

Tabla 16. Características conexión tipo 8

Criterio	Calificación
Facilidad de trabajo de carpintería	Alta
Facilidad de trabajo de acero	Alta
Facilidad de trabajo en el ensamble	Alta
Accesibilidad de materiales, herramientas y piezas en el mercado	Alta
Economía de la conexión	Alta
Estética de la conexión	Alta

Teniendo la evaluación de cada conexión, se da inicio al proceso de selección, realizando una sumatoria parcial de las valoraciones alta, media, baja, y NA (no aplica), para cada una de las conexiones como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17. Sumatoria de cada calificación para los tipos de conexión.

VALORACIÓN	CONEXIÓN										
	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3A	TIPO 3B	TIPO 4A	TIPO 4B	TIPO 5A	TIPO 5B	TIPO 6	TIPO 7	TIPO 8
Alta	2	4	6	6	1	3	1	1	2	1	6
Media	1	1	0	0	5	2	5	5	1	4	0
Baja	3	1	0	0	0	1	0	0	2	1	0
NA	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Para hacer más clara la selección se dio un peso a cada valoración de la siguiente forma: Alta = 3, Media = 2, Baja = 1, NA= 3

Se procedió a multiplicar las sumatorias parciales de las valoraciones ya halladas, por el peso dado a cada valoración.

Finalmente, para cada una de las conexiones se realizó la sumatoria de todas sus valoraciones, obteniendo así la calificación final. Esto se observa en la Tabla 18.

Tabla 18. Calificación para cada tipo de conexión.

VALORACIÓN	CONEXIÓN										
	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3A	TIPO 3B	TIPO 4A	TIPO 4B	TIPO 5A	TIPO 5B	TIPO 6	TIPO 7	TIPO 8
Alta	6	12	18	18	3	9	3	3	6	3	18
Media	2	2	0	0	10	4	10	10	2	8	0
Baja	3	1	0	0	0	1	0	0	2	1	0
No	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
CALIFICACIÓN	11	15	18	18	13	14	13	13	13	12	18

De acuerdo a la tabla 18 se decidió escoger la conexión Tipo 3A, al ser una de las que obtuvo mayor calificación. A pesar que las conexiones tipo 3B y 8 obtuvieron el mismo resultado, estas no se escogieron debido a que para cargas grandes tanto en compresión como en tensión se necesitarían conexiones largas, ya que la resistencia de sus elementos conectores tales como clavos necesitan gran cantidad debido a su poca resistencia individual y con los adhesivos dependería en gran medida de sus componentes químicos.

Ésta conexión será estudiada, realizando los ensayos necesarios a tensión y a compresión para tener una base de diseño y que la haga segura para ser utilizada en una posible aplicación estructural.

3.2 CONEXIÓN TIPO 3A A COMPRESIÓN

Para conocer el comportamiento de este tipo de conexión a compresión se determinó el esfuerzo que se genera entre un perno de 1/2" y la madera Teca rolliza de pequeños diámetros, para lo cual fue necesario diseñar un tipo de probeta y una adecuación de la máquina de pruebas *MTS 647 Hydraulic Wedge Grip* que muestre el comportamiento de este sistema. En el ensayo se tomó como referencia la norma ASTM 5652-95⁸ la cual nos muestra métodos de prueba estándar para conexiones atornilladas en madera y productos madereros.

3.2.1 Probeta ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

Como se vio en el numeral 1.4, la longitud de las probetas en madera ensayadas a compresión deben ser menor o igual a 4 veces su diámetro promedio. En nuestro caso se cuenta con rollizas desde 8 cm de diámetro lo cual nos daría una longitud máxima de 32 cm, de acuerdo a esto se asume probetas de 25 cm, las cuales garantizan que no se presente pandeo en el ensayo. La distancia del perno al borde se toma como la distancia mínima que recomienda el título G de la NSR-10⁹ la cual es de 4 veces el diámetro del perno, respetando dicha condición se asumió 5,5 cm.

Aparte se debe garantizar que la falla en esta probeta sea por compresión, ya que en una situación real las rollizas que forman parte de una estructura, cuentan con áreas a cortante grandes debido a sus longitudes y si se hace probetas muy cortas puede ser que fallen por cortante. Si se asume probetas con diámetros grandes, siendo en este

⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Bolted Connections in Wood and Wood-Based Products. ASTM D5652.USA, 1995.

⁹ NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10. Edificaciones de Madera. Título G. Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

caso de 12 cm, se procede a calcular la resistencia a compresión y cortante de la probeta en esta condición.

Figura 37. Área compresión probeta ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

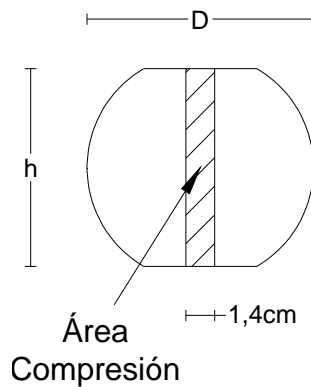
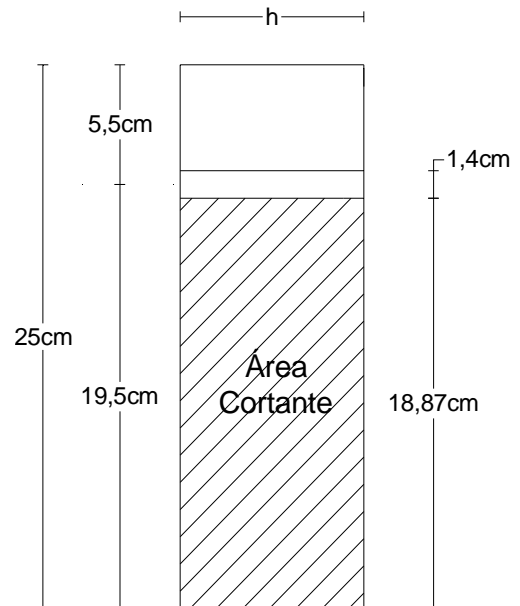


Figura 38. Área cortante probeta ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"



De acuerdo a la figura 37 se observa que el área a compresión es la transmitida por el perno a la madera.

El desbaste superficial para una rolliza de 12 cm de diámetro es de aproximadamente 2 cm entonces se asume h igual a 10 cm siendo h la distancia perpendicular entre las platinas, con lo cual se obtiene el área neta a compresión calculada de la siguiente manera:

$$\text{Área neta compresión} = h \times d = 10 \times 1,27 = 12,7 \text{ cm}^2$$

Teniendo el área neta a compresión y el esfuerzo a compresión de la Teca (5,247 KN/cm²) encontrado anteriormente se puede calcular la carga ultima en dicha situación

$$Pu \text{ compresión} = \text{Esfuerzo Compresion Teca} \times \text{Area neta Compresión}$$

$$Pu \text{ compresión} = 5,247 \frac{KN}{cm^2} \times 12,7 \text{ cm}^2 = 66,64 \text{ KN}$$

En figura 38 se muestra el área a cortante de la probeta para el ensayo a compresión y tomando las consideraciones anteriores se tiene que:

$$\text{Area neta cortante} = 18,87 \times 10 = 188,7 \text{ cm}^2$$

Debido a que en esta investigación no se evaluó el esfuerzo a cortante paralelo a las fibras de la madera, se tomo como valor dado en el numeral 1.6 que es de 1,11 KN/cm² para madera Teca seca al aire con un contenido de humedad del 12%¹⁰ y con esto se logra calcular la carga última a cortante de la forma siguiente:

$$Pu \text{ cortante} = \text{Esfuerzo Cortante Teca} \times \text{Area neta Cortante}$$

$$Pu \text{ cortante} = 1,11 \frac{KN}{cm^2} \times 188,7 \text{ cm}^2 = 209,46 \text{ KN}$$

De acuerdo a los resultados anteriores de las cargas ultimas a compresión y cortante paralelo a las fibras de la probeta se puede decir que la probeta fallará con una carga aproximada de 66,64 KN a compresión, ya que para que se produzca falla por cortante se necesitaría una carga aproximada de 3 veces la carga última a compresión.

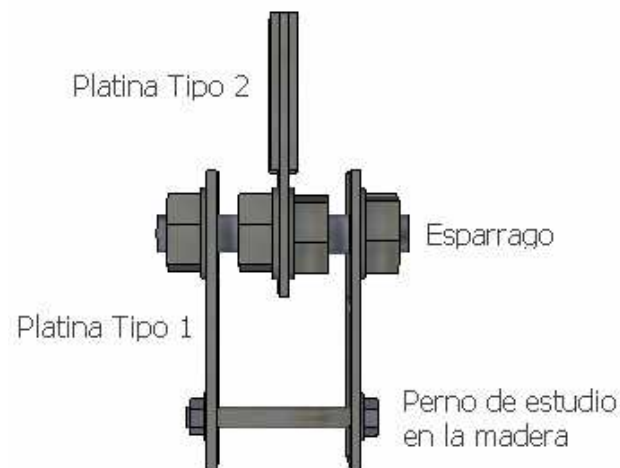
Es decir que la longitud de 25 cm es apropiada para este ensayo ya que no se pandeara ni fallará a cortante debido al perno.

¹⁰ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Ficha técnica Madera teca. Medellín-Colombia. Laboratorio de productos forestales, 1993.

3.2.2 Diseño de ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

Este ensayo se realizó mediante la utilización de la máquina de pruebas *MTS 647 Hydraulic Wedge Grip*, para lo cual fue necesario adecuar un dispositivo para transmitir la fuerza al perno y a su vez a la madera de manera correcta, una forma es la mostrada en la figura 39. En este sistema el punto crítico es el espárrago ya que se debe garantizar que no sufra desplazamientos considerables para que no afecte los resultados del ensayo.

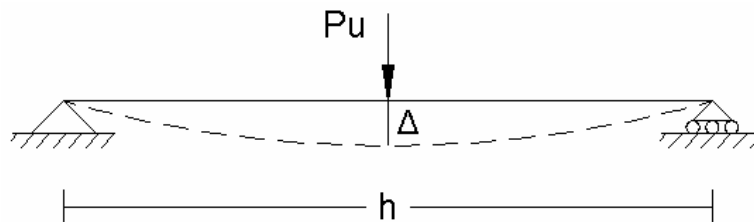
Figura 39. Adecuación de laboratorio para ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"



Esparrago

El espárrago se asumió de 1" (25,4 mm) de acero A490 ($F_y=880$ MPa, $F_u=1050$ MPa) el cual para el análisis se asimilo como viga simplemente apoyada en sus extremos con una carga puntal en el centro de 66,64 KN que es la carga que se predijo que resistiría la madera en este ensayo. La longitud depende de la variación de h en las probetas y estas están entre el rango de 7 a 10 cm, para el análisis se tomará $h=10$ cm que es la situación crítica.

Figura 40. Deflexión espárrago



Lo primero es chequear la deflexión máxima que de acuerdo a las características de la viga (ver figura 40) se riga de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta_{\max} = \frac{P_u h^3}{48EI}$$

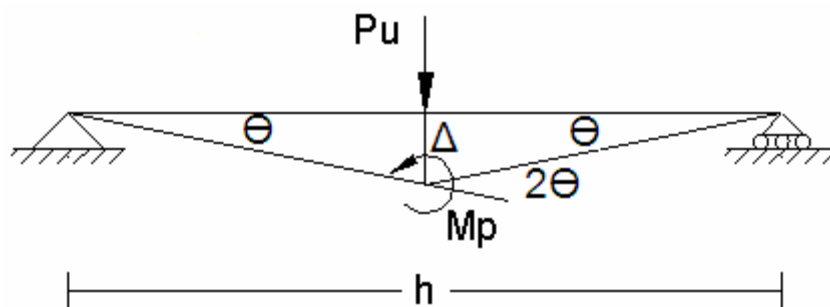
$$\Delta_{\max} = \frac{P_u h^3}{48E \left(\frac{\pi d^4}{32} \right)} = \frac{66,64 \times 10^3 \times 100^3}{48 \times 200000 \times \left(\frac{\pi 25,4^4}{32} \right)} = 0,169 \text{ mm}$$

Con este valor tan pequeño se logra garantizar que el espárrago no afecte los resultados del ensayo a compresión de la conexión a ensayar.

Análisis plástico

Debido a que la viga está simplemente apoyada el único momento plástico se generara en el punto medio que es donde se aplica la carga P_u como se muestra en la figura 41.

Figura 41. Momento plástico espárrago



$$P_u = 66,64 \text{ KN} \quad \Delta = \frac{h}{2} \theta$$

$$W_e = P_u \times \Delta \quad \text{Trabajo externo} \quad W_i = 2M_p \theta \quad \text{Trabajo interno}$$

Igualando el trabajo externo con el interno y suponiendo $h=10\text{cm}$ se obtiene que:

$$M_p = \frac{P_u \times h}{4} = 1666 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

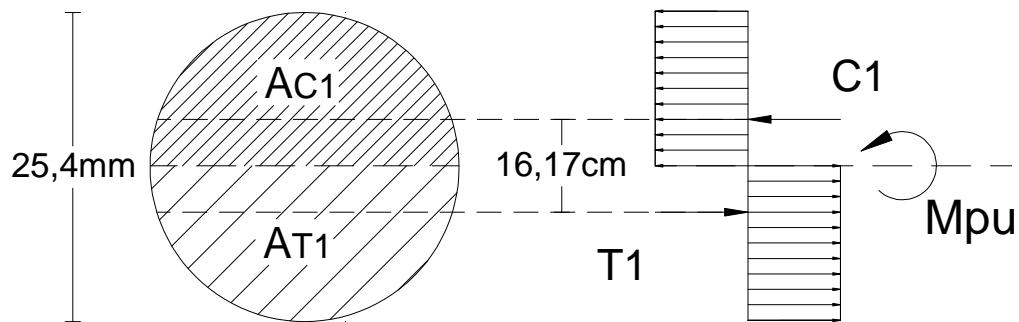
Suponiendo pandeo plástico se debe cumplir que $M_p \leq 1,5M_y$ donde M_y es:

$$M_y = F_y S_x = F_y \frac{I_x}{c} = 880 \times \left(\frac{\pi 25,4^4 / 32}{25,4 / 2} \right) = 2831,48 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

$$M_p \leq 1,5M_y \Rightarrow 1666 \text{ KN} \cdot \text{mm} \leq 4247,22 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

Cumple la desigualdad pero también se debe comparar con el momento plástico último M_{pu} .

Figura 42. Momento plástico último del esparrago



$$C1 = T1 = A_{C1} F_y = \frac{\pi \times 25,4^2}{8} \times 880 = 222,95 \text{ KN}$$

$$M_{Pu} = 222,95 \times 10^3 \times 16,17 = 3605,12 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

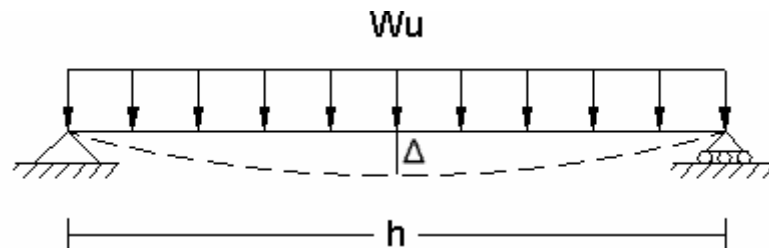
$$M_p \leq M_{pu} \Rightarrow 1666 \text{ KN} \cdot \text{mm} \leq 3605,12 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

Es decir que el espárrago cumplirá favorablemente tanto por deflexión como por resistencia del material a la carga última de la probeta de 66,64 KN.

Perno de estudio en la madera

Para este análisis se debe calcular la resistencia del perno en la madera para conocer su comportamiento durante el ensayo, como anteriormente se menciono el diámetro del perno será de 1/2" (12,7mm) y el material es acero A490 ($F_y=880$ MPa, $F_u=1050$ MPa). Para el análisis se asimilo este elemento como viga simplemente apoyada en sus extremos con una carga uniformemente distribuida generada por una carga puntual de 66,64 KN que es la carga que se predijo resistirá la probeta en este ensayo y al igual que para el espárrago se tomara la distancia entre apoyos h de 10 cm.

Figura 43. Deflexión perno en madera



$$W_u = \frac{P_u}{h} = \frac{66,64 \times 10^3}{100} = 666,4 \frac{N}{mm}$$

Lo primero es chequear la deflexión máxima que de acuerdo a las características de la viga (ver figura 43) se rige de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta_{\max} = \frac{5W_u h^4}{384 EI}$$

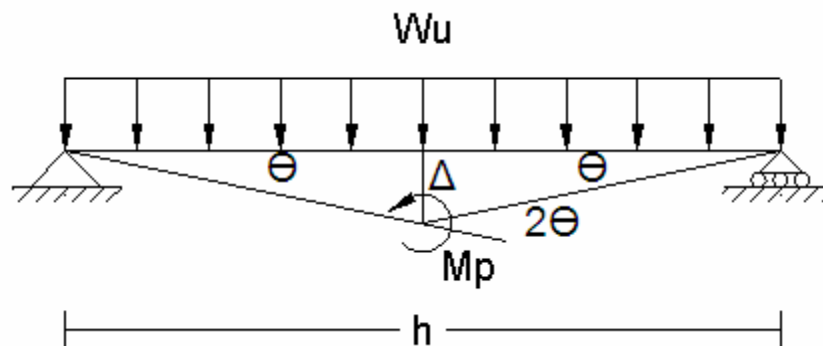
$$\Delta_{\max} = \frac{5W_u h^4}{384 E \left(\frac{\pi d^4}{32} \right)} = \frac{5 \times 666,4 \times 100^4}{384 \times 200000 \times \left(\frac{\pi 12,7^4}{32} \right)} = 1,69 \text{ mm}$$

Este valor es considerable ya que afectaría los resultados del desempeño de la probeta en el ensayo, pero ahora se debe mirar la resistencia del material.

Análisis plástico

Debido a que la viga esta simplemente a poyada el único momento plástico se generara en el punto medio como se muestra en la figura 44.

Figura 44. Momento plástico perno en madera



$$Wu = 666,4 \frac{N}{mm} \quad \Delta = \frac{h}{2} \theta$$

$$W_e = \frac{Wu h \Delta}{2} \quad \text{Trabajo externo} \quad W_i = 2M_p \theta \quad \text{Trabajo interno}$$

Igualando el trabajo externo con el interno y suponiendo $h=10\text{cm}$ se obtiene que:

$$W_e = W_i \Rightarrow M_p = \frac{Wu h^2}{8} = 833 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

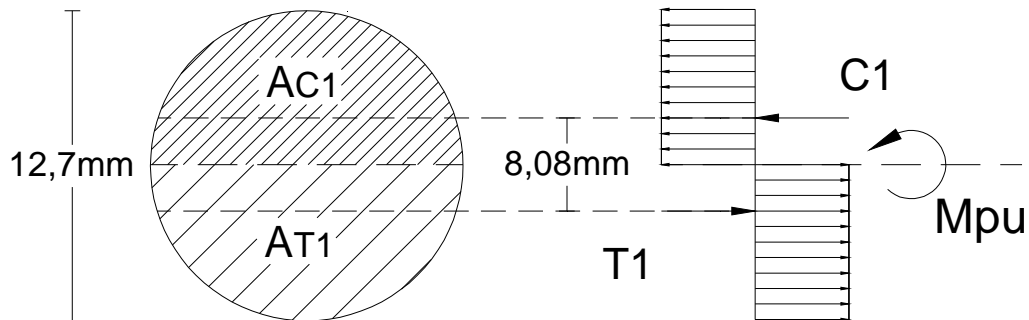
Suponiendo pandeo plástico se debe cumplir que $M_p \leq 1,5M_y$ donde M_y es:

$$M_y = F_y \times S_x = F_y \times \frac{I_x}{c} = 880 \times \left(\frac{\pi 12,7^4 / 32}{12,7 / 2} \right) = 353,93 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

$$M_p \leq 1,5M_y \Rightarrow 833 \text{ KN} \cdot \text{mm} \leq 530,9 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

No cumple la desigualdad pero también se debe comparar con el momento plástico último M_{pu} .

Figura 45. Momento plástico ultimo perno en madera



$$C1 = T1 = A_{C1} \times F_y = \frac{\pi \times 12,7^2}{8} \times 880 = 55,74 \text{ KN}$$

$$M_{Pu} = 55,74 \times 10^3 \times 8,08 = 450,36 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

$$M_p \leq M_{pu} \Rightarrow 833 \text{ KN} \cdot \text{mm} \leq 450,36 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

Además de los problemas de deflexiones que presenta el perno, el cálculo anterior indica que se tendrán problemas de resistencia del material a pesar de haber utilizado pernos grado 8, los cuales en el mercado son los de mayor resistencia, pero según la ASTM D5652-95¹¹ recomienda que el ensayo de la conexión se realice con los materiales y dimensiones que se prevea utilizar en condiciones reales, y debido a que la investigación se enfoca en encontrar la resistencia de un perno de 1/2" con esta conexión, al final se encontrará la resistencia del sistema de la madera con el perno.

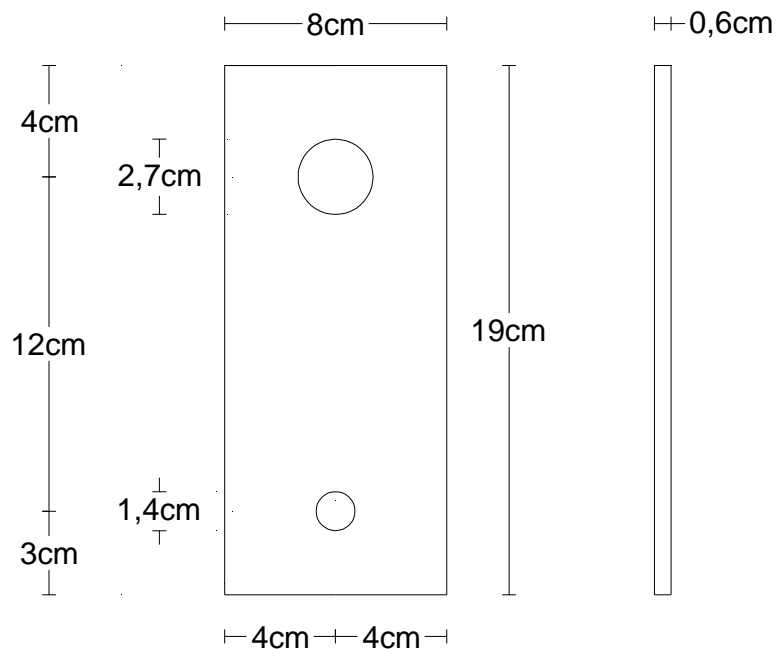
¹¹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Bolted Connections in Wood and Wood-Based Products. ASTM D5652.USA, 1995.

Platinas tipo 1

Se asume un espesor t de 6mm, y acero A-36 ($F_y = 253\text{MPa}$, $F_u = 408\text{MPa}$). Las dimensiones de estas platinas son las mostradas en la figura 46 cumpliendo las distancias al borde y entre pernos según el título F NSR-10¹².

Las platinas tipo 1 deben resistir por lo menos la mitad de la carga última de la probeta, debido a que son dos platinas paralelas las que estas asumiendo esta carga, es decir cada platina debe resistir 33,32 KN.

Figura 46. Platina Tipo 1



¹² NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10. Estructuras metálicas. Título F. Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

- Chequeo a compresión y pandeo flector

Primero se busca conocer el área total de la sección transversal de la platina.

$$Ag_{total} = 6 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} = 480 \text{ mm}^2$$

Asumiendo la dirección y como la paralela al espesor de la platina y x paralela al ancho, se hallan los momentos de inercia

$$I_x = 1440 \text{ mm}^4 \quad I_y = 256000 \text{ mm}^4$$

Con esto se ve que la platina en dirección x es donde presenta el menor momento de inercia lo cual nos indica que con respecto a este eje es que ocurrirá el pandeo de la platina, entonces se procede a analizar la platina en esta dirección.

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{Ag_{total}}} = 3 \text{ mm} \quad \text{Para } K=1 \text{ L} = 120 \text{ mm} \quad \frac{KL}{r_x} = 40$$

Después de encontrar el radio de giro, se asumió K de diseño igual a 1 que es para la condición en la cual un elemento sometido a compresión esta soportado por dos apoyos articulados, para luego encontrar la relación de esbeltez en x .

Ahora se comprueba si la sección es compacta para así poder encontrar el esfuerzo crítico F_{cr}

$$\lambda r = \frac{250}{\sqrt{F_y}} = 15,72 \quad \frac{b}{t} = \frac{26,5}{6} = 4,41$$

De lo anterior se ve que $\frac{b}{t} \leq \lambda r$, lo que dice que la sección de la platina es compacta, entonces:

$$\lambda c = \frac{KL}{\pi r_x} \sqrt{\frac{F_y}{E}} = 0,452 \leq 1,5$$

Como λc es menor a 1,5 se procede a calcular con la siguiente formula el esfuerzo critico F_{cr}

$$F_{cr} = 0,658^{\lambda c^2} F_y = 232,2 \text{ MPa}$$

Teniendo esto se puede calcular la carga última en compresión de la platina tipo 1 mediante la siguiente expresión.

$$\phi_c P_n = 0,85 A_g \text{ total } F_{cr} = 94,73 \text{ KN} \geq 33,32 \text{ KN}$$

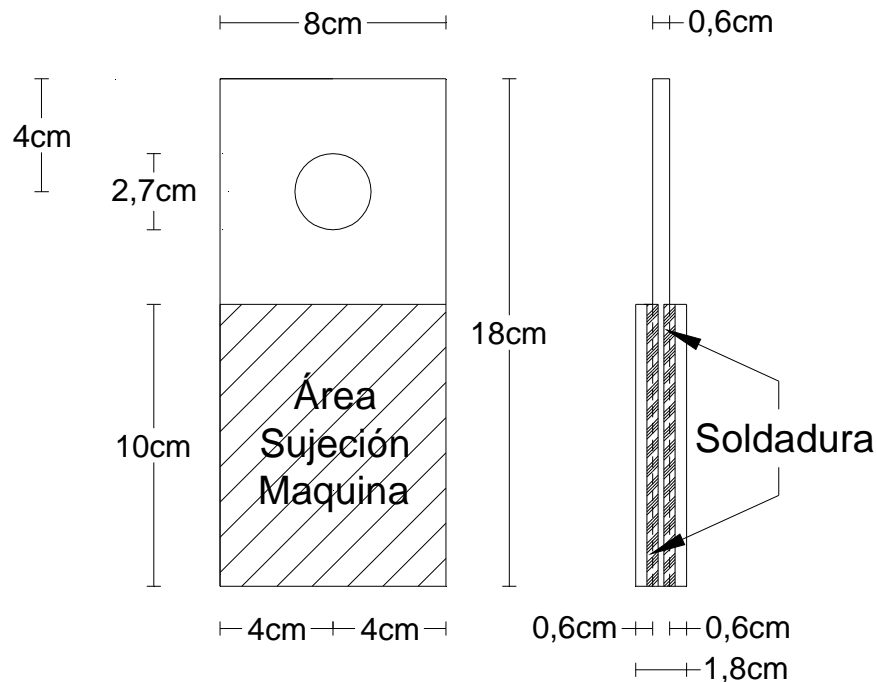
Esto nos dice que la platina tipo 1 resiste la carga de 33,32 KN en compresión del ensayo.

Platinas tipo 2

Se asume un espesor t de 6mm, y son de acero A-36 ($F_y = 253\text{MPa}$, $F_u = 408 \text{ MPa}$). Las dimensiones de estas platinas son las mostradas en la figura 47 cumpliendo las distancias al borde según el titulo F NSR-10¹³.

¹³ NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10. Estructuras metálicas. Titulo F. Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Figura 47. Platina tipo 2



La máquina de ensayo transmitirá su carga en el área de sujeción indicada en la figura 47. Debido a que la maquina no cierra totalmente sus mordazas fue necesario colocar dos platinas de 6 mm de espesor a lado y lado unidas entre sí mediante líneas de soldadura mostradas anteriormente.

Si se realiza el mismo procedimiento hecho para la platina tipo 1, se encontrará que la carga última de esta platina que es de:

$$\phi_c P_n = 0,85 A_g \text{ total} \times F_{cr} = 102,24 \text{ KN} \geq 33,32 \text{ KN}$$

Esto nos dice que al igual que la platina tipo 1 resiste la carga de 33,32 KN en compresión del ensayo.

Soldadura

Además de esto se debe chequear que la soldadura también resista la carga. Si no se tiene en cuenta la fricción entre las platinas debido al aplastamiento generado por la máquina de ensayo, la soldadura en su totalidad debe resistir una carga igual a la máxima del ensayo que es de 66,64 KN.

La longitud total de soldadura es de 40 cm y un espesor aproximado de 3 mm divididos en 4 tramos, dos en cada lado. Con esto se puede encontrar la carga máxima soportada por la soldadura.

La soldadura utilizada tiene una resistencia nominal del electrodo $F_w = 252 \text{ MPa}$

$$\phi R_n = 0,75 F_w A_w = 0,75 \times 252 \times (3 \times 400) = 226,4 \text{ KN} \geq 66,64 \text{ KN}$$

Esto indica que la soldadura resistirá sobradamente la carga última de 66,64 KN.

3.2.3 Ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

Este ensayo tiene como objeto determinar el esfuerzo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2" (12.7mm), para madera rolliza de diámetros promedio entre 8 y 12 cm, con un contenido de humedad de 10,663% hallado en el numeral 2.1, la aplicación de carga se realizó mediante la máquina de prueba *MTS 647 Hydraulic Wedge Grip* la cual garantizó una tasa constante de deformación de 1mm/min.

En la figura 48 muestra el sistema de ensayo a compresión de la conexión tipo 3A donde sus elementos fueron dimensionados en los numerales 3.2.1. y 3.2.2.

Figura 48. Modelo de probeta ensayo a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

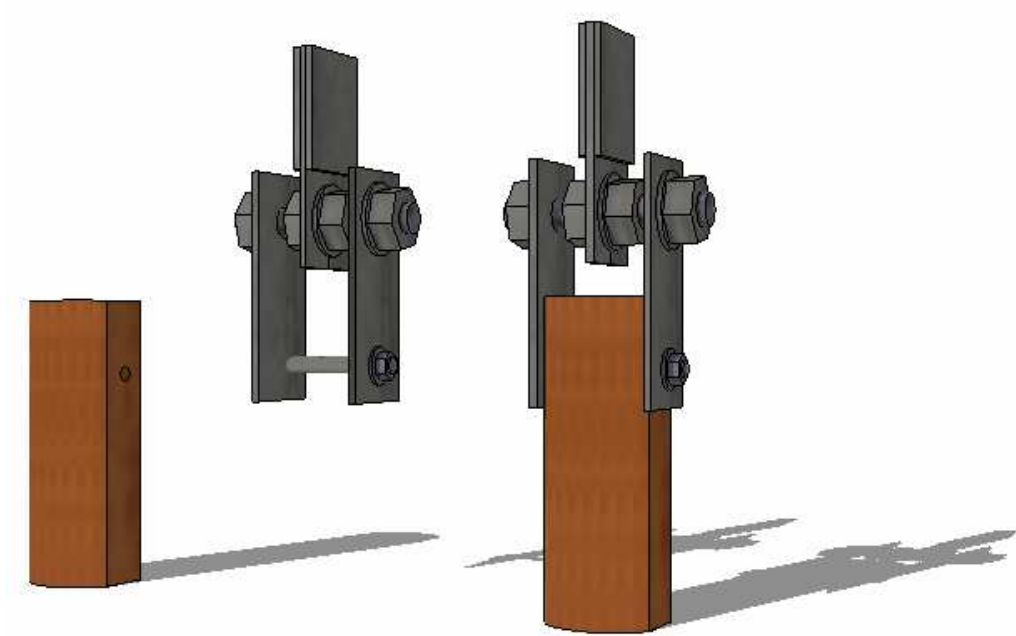


Figura 49. Ensayo probeta a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"



Se ensayaron un total de 11 probetas las cuales arrojaron las siguientes graficas de carga vs desplazamiento.

Gráfico 25. Probeta 1 resistencia conexión 3A a compresión con perno 1/2"

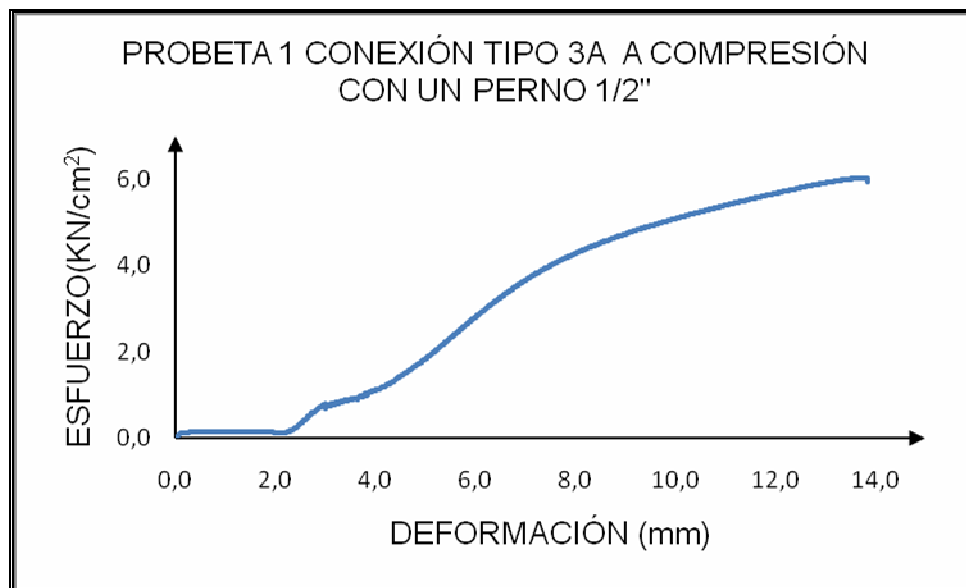


Gráfico 26. Probeta 2 resistencia conexión 3A a compresión con perno 1/2"

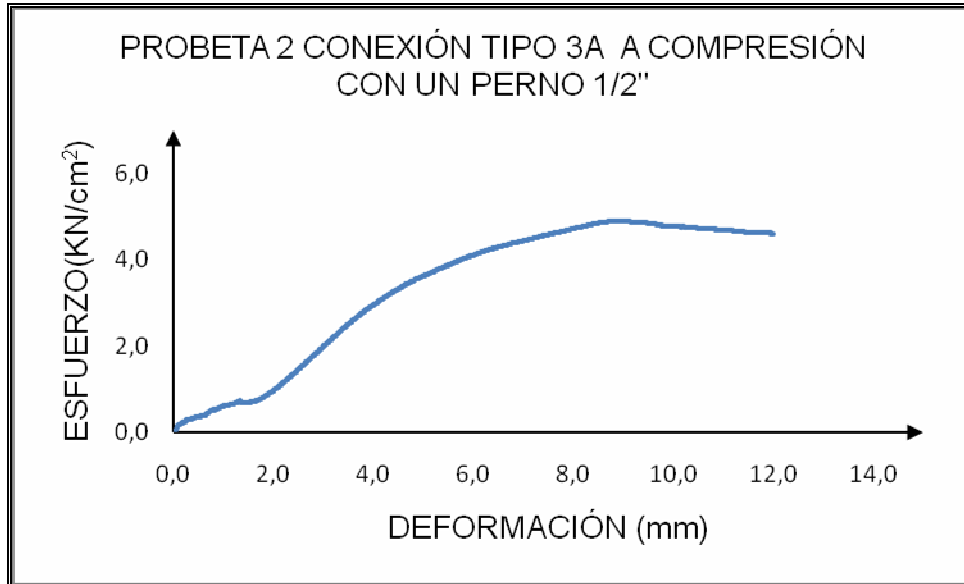


Gráfico 27. Probeta 3 resistencia conexión 3A a compresión con perno 1/2"

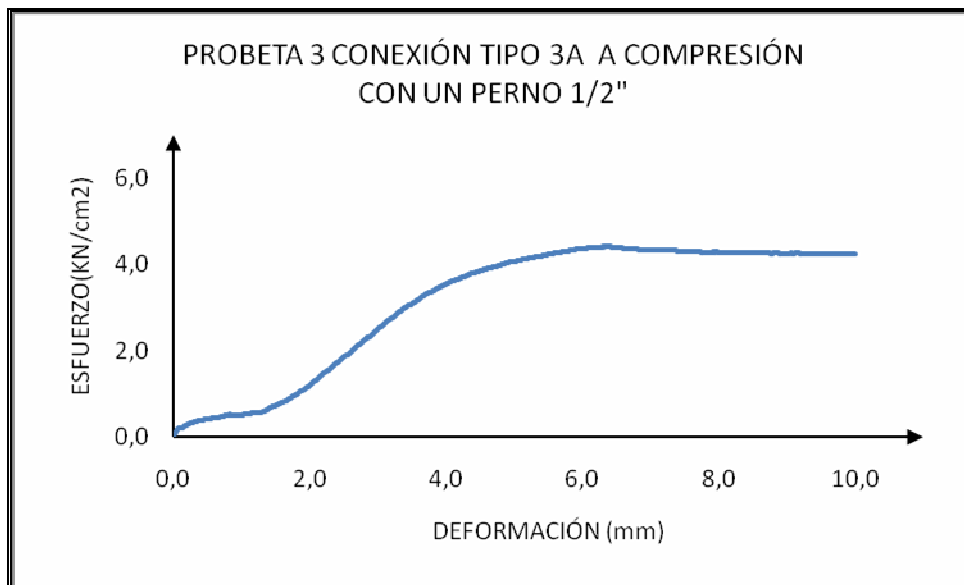


Gráfico 28. Probeta 4 resistencia conexión 3A a compresión con perno 1/2"

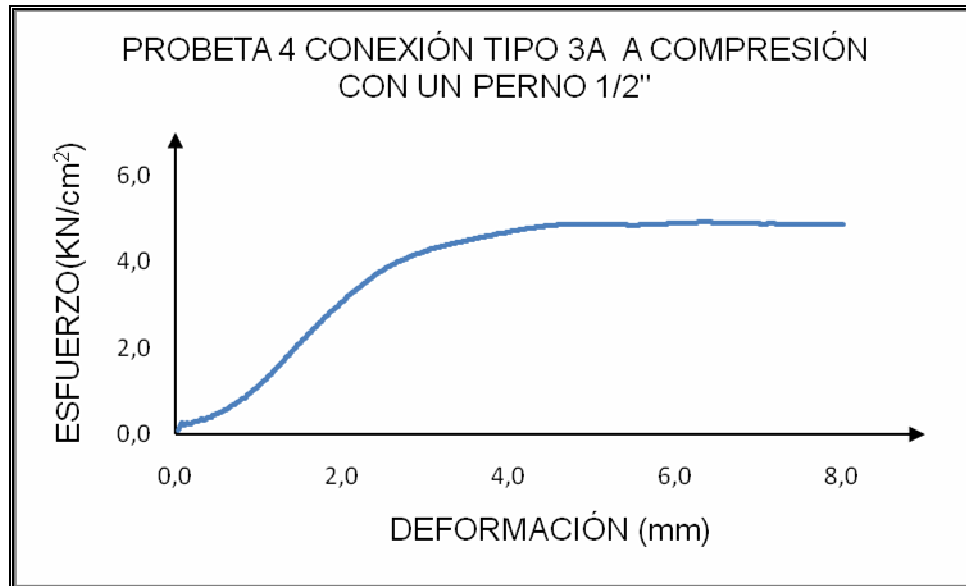


Gráfico 29. Probeta 5 resistencia conexión 3A a compresión con perno 1/2"

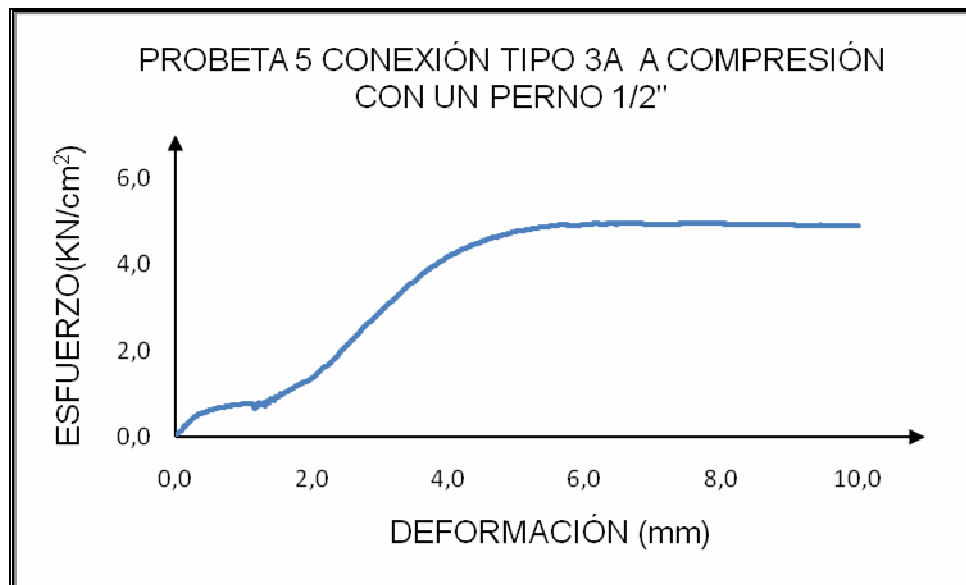


Gráfico 30. Probeta 6 resistencia conexión 3A a compresión con perno 1/2"

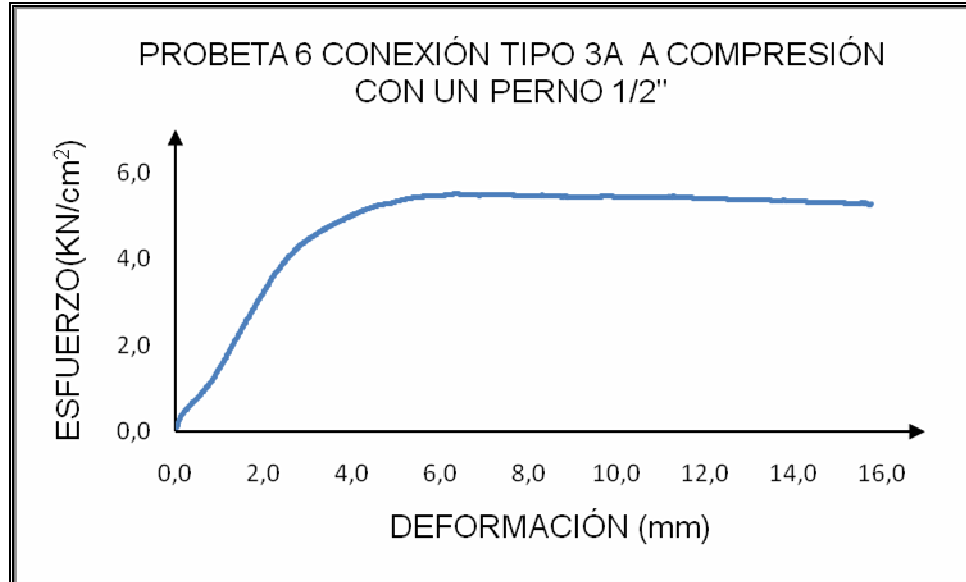


Gráfico 31. Probeta 7 resistencia conexión 3A a compresión con perno 1/2"

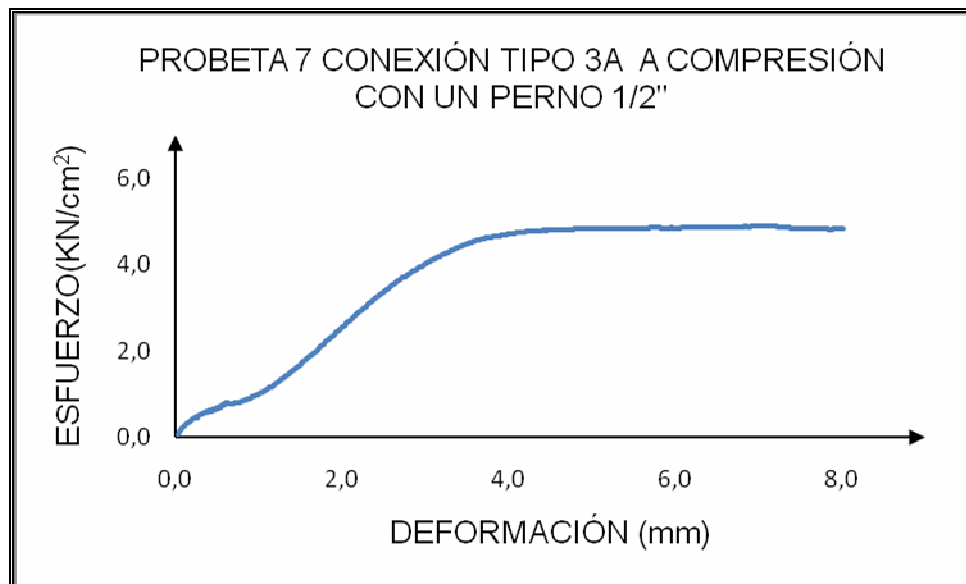


Gráfico 32. Probeta 8 resistencia conexión 3A a compresión con perno 1/2"

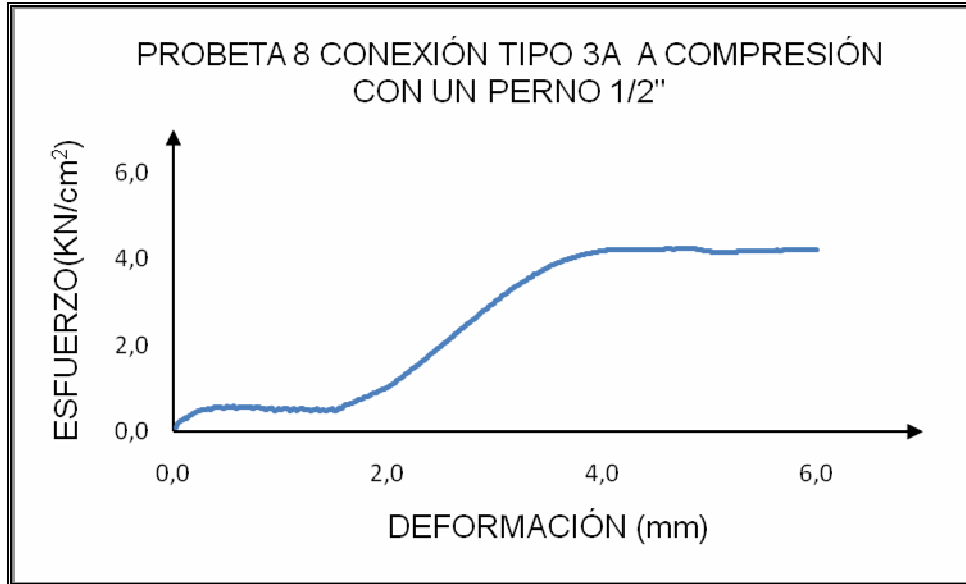


Gráfico 33. Probeta 9 resistencia conexión 3A a compresión con perno 1/2"

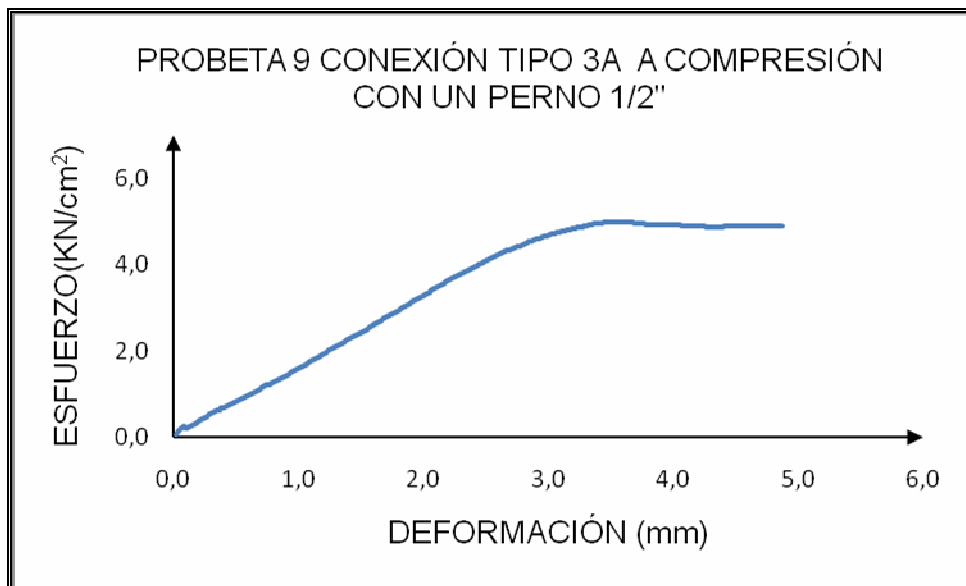


Gráfico 34. Probeta 10 resistencia conexión 3A a compresión con perno 1/2"

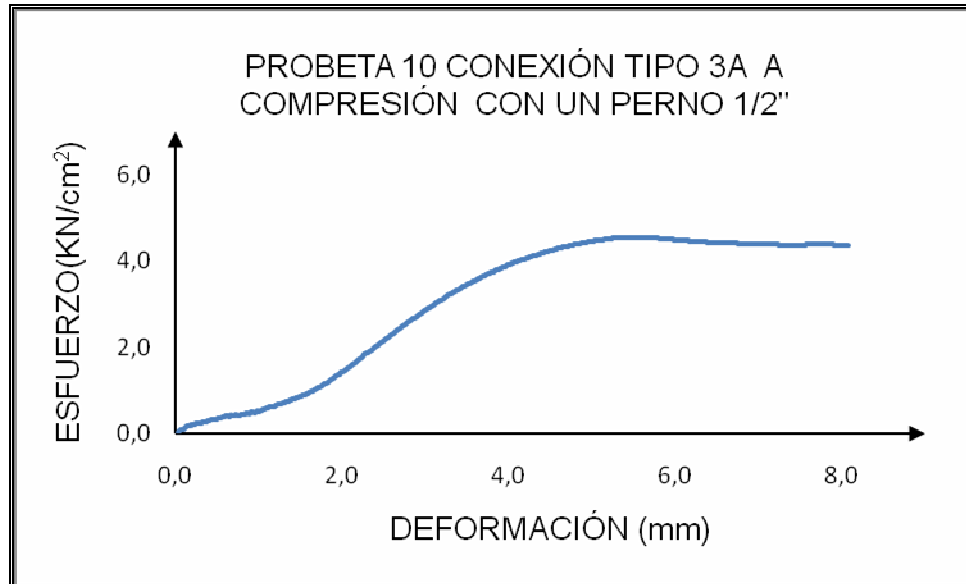
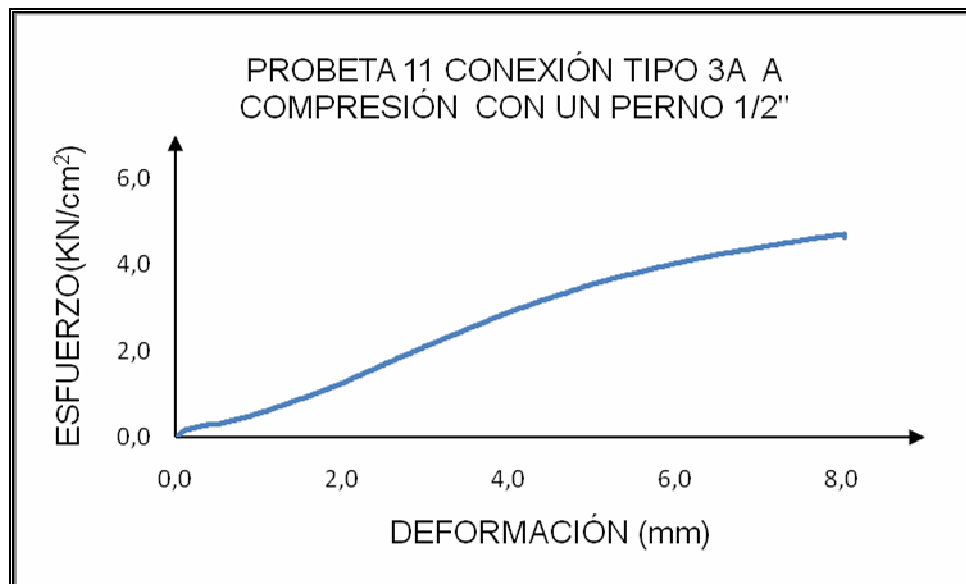


Gráfico 35. Probeta 11 resistencia conexión 3A a compresión con perno 1/2"



En la Tabla 19 se observan las cargas máximas alcanzadas por las probetas en compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2" que arrojó la máquina de pruebas *MTS 647 Hidraulic Wedge Grip*, los esfuerzos máximos a compresión generados por el área de contacto entre la madera y el correspondiente perno de 1/2" además de las características de cada probeta como el número de anillos de crecimiento y el porcentaje de duramen.

Tabla 19. Resultado de probetas a compresión conexión tipo 3 A con un perno de 1/2"

	Diámetro Promedio	h Promedio	Anillos De Crecimiento	% Duramen	Carga Máxima KN	Esfuerzo Máximo KN/cm²
Probeta 1	10,67	9,43	13	72	72,305	6,037
Probeta 2	10,43	9,3	13	38	57,785	4,892
Probeta 3	10,75	8,8	13	37	49,261	4,408
Probeta 4	9,57	7,85	10	52	49,016	4,917
Probeta 5	9,02	7,6	10	55	47,95	4,968
Probeta 6	9,23	7,4	11	54	51,823	5,514
Probeta 7	7,62	7,05	12	39	43,826	4,895
Probeta 8	7,49	6,67	15	40	35,954	4,244
Probeta 9	8,93	7,03	11	56	44,562	4,991
Probeta 10	10,45	8,3	13	38	47,926	4,547
Probeta 11	10,45	9,1	14	48	54,355	4,703

Con los datos encontrados anteriormente, se realizó un análisis estadístico, para el cual se usó la distribución de T de Student con 10 grados de libertad, y estimando un intervalo de confianza del 95 % arrojando los siguientes datos:

Esfuerzo máximo a compresión para la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

- Esfuerzo promedio 4,92 KN/cm²
- Desviación estándar 0,502 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [4,284 – 5,556] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,302 – 1,230] KN/cm²

En las siguientes figuras se muestra el modo de fallas de dos probetas, una en la cual se detuvo el ensayo cuando la carga máxima fue alcanzada y esta empezó a descender, es decir falla a compresión en la zona del perno (ver figura 50) y otra probeta a la cual se siguió aplicando carga hasta que fallará totalmente, en este intervalo se observó que la probeta seguía resistiendo carga pero no mayor a la máxima, y debido a que se seguía desplazando el perno, se generó un aplastamiento mayor en la zona de contacto del perno con la madera generando esfuerzos en todas las direcciones dando como resultado una falla a cortante progresiva de la misma (ver figura 51).

Figura 50. Aplastamiento producido por de un perno de 1/2" en la conexión tipo 3A a compresión



Figura 51. Corte generado posterior al aplastamiento de un perno de 1/2" en la conexión tipo 3A a compresión



Adicionalmente a esto en la figura 52 muestra la falla por flexión en los pernos como se calculo en el numeral 3.2.2

Figura 52. Forma de fallada de pernos de 1/2" en la conexión tipo 3A a tensión



3.3 CONEXIÓN 3A A TENSIÓN

Para conocer el comportamiento de este tipo de conexión a tensión con un perno de 1/2" con la madera Teca rolliza de pequeños diámetros, fue necesario diseñar un tipo de probeta y una adecuación de la máquina de pruebas *MTS 647 Hydraulic Wedge Grip* que muestre el comportamiento de este sistema, en el ensayo se tomó como referencia la norma ASTM 5652-95¹⁴ la cual nos muestra métodos de prueba estándar para conexiones atornilladas en madera y productos madereros.

3.3.1 Probeta ensayo a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

En esta probeta se considero una distancia al borde de 6.5 cm, esto según la tabla G.6.3-3 NSR-10¹⁵ que recomienda que sea mayor a 5 veces el diámetro del perno a utilizar que en este caso es de 1/2" (1,27cm).

Para garantizar que la falla de la probeta fuera en un solo perno, se colocó en un extremo de la probeta uno y en el otro dos pernos en fila separados a una distancia de 4 veces el diámetro de éste, es decir 5 cm, también recomendado por la NSR 10 capítulo G, lo anterior permite que se tenga más área a cortante de un lado que del otro tal como se muestra en la figura 54.

La longitud total de la probeta es de 25 cm y para el cálculo de resistencia de la misma se asume al igual que para las probetas del ensayo a compresión un diámetro de la rolliza de 12 cm y una distancia h de 10cm.

¹⁴ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Bolted Connections in Wood and Wood-Based Products. ASTM D5652.USA, 1995.

¹⁵ NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10. Edificaciones de Madera. Título G. Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Figura 53. Tensión probeta ensayo de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

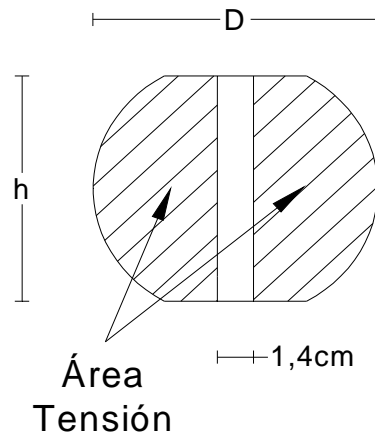
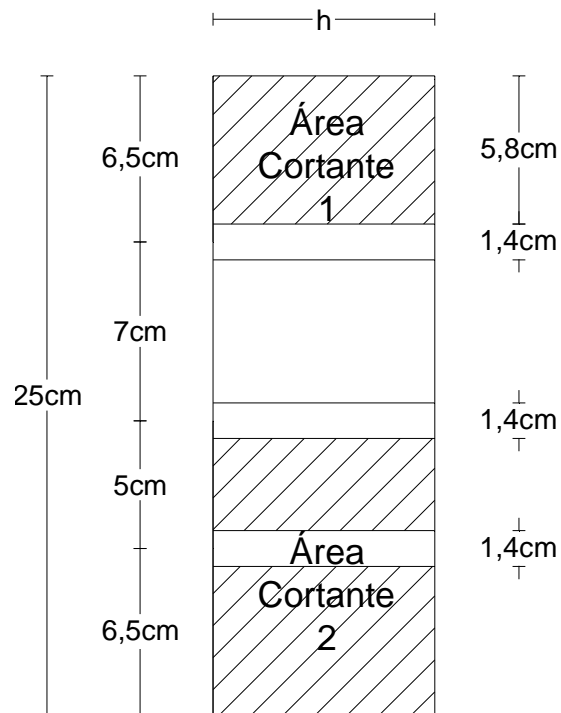


Figura 54. Área cortante probeta ensayo tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"



En el numeral 2.2 se halló el valor del esfuerzo a tensión paralelo a las fibras igual a $19,23 \text{ KN/cm}^2$ y del numeral 1.6 se tomó el cortante paralelo a las fibras igual a $1,11 \text{ KN/cm}^2$ ¹⁶.

De acuerdo a la figura 53 se puede ver que el área neta a tensión, que para una rolliza de 12cm es aproximadamente $52,23 \text{ cm}^2$.

Teniendo el área neta a tensión y el esfuerzo a tensión de la Teca se calcula la carga última en dicha situación.

$$Pu \text{ tensión} = \text{Esfuerzo Tensión Teca} \times \text{Area neta Tensión}$$

$$Pu \text{ tensión} = 19,23 \frac{\text{KN}}{\text{cm}^2} \times 52,23 \text{ cm}^2 = 1004,38 \text{ KN}$$

En figura 54 se muestran las áreas 1 y 2 a cortante de la probeta para el ensayo a tensión, en este caso solo se analizará el extremo con menor área a cortante es decir la número 1 que es donde se producirá la falla y donde se analizará su comportamiento.

$$\text{Area neta cortante} = 5,8 \times 10 = 58 \text{ cm}^2$$

$$Pu \text{ cortante} = \text{Esfuerzo Cortante Teca} \times \text{Area neta Cortante}$$

$$Pu \text{ cortante} = 1,11 \frac{\text{KN}}{\text{cm}^2} \times 58 \text{ cm}^2 = 64,38 \text{ KN}$$

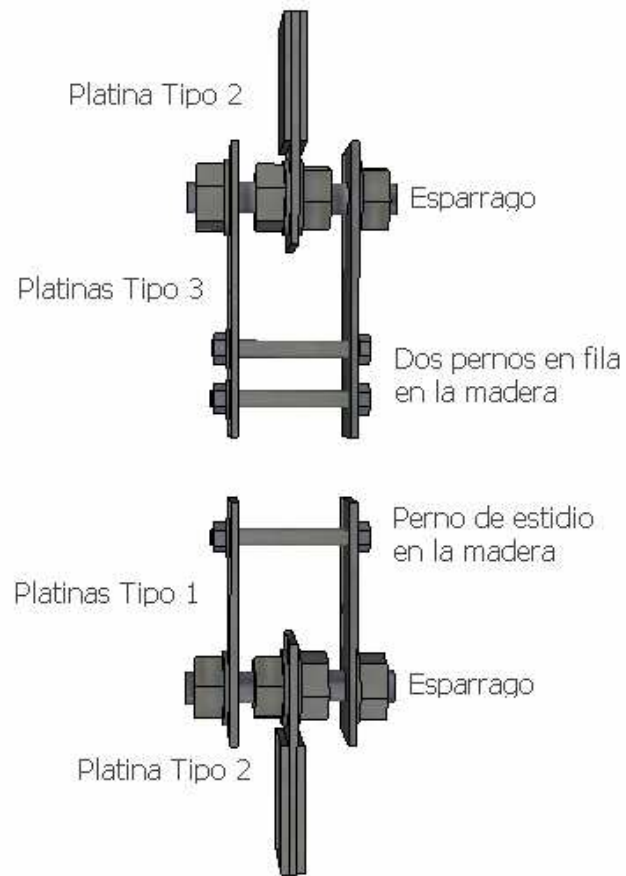
¹⁶ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Ficha técnica Madera teca. Medellín-Colombia. Laboratorio de productos forestales, 1993.

De acuerdo a los resultados anteriores se puede decir que la probeta fallará con una carga aproximada de 64,38 KN a cortante, ya que para que se produzca falla por tensión se necesitaría una carga aproximada de 15 veces esta carga.

3.3.2 Diseño de ensayo a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

Al igual que el ensayo a compresión de esta conexión se realizó mediante la utilización de la máquina de pruebas *MTS 647 Hydraulic Wedge Grip* y también fue necesario adecuar un dispositivo para transmitir la fuerza al perno y a su vez a la probeta de manera correcta, una forma es la mostrada en la figura 55, en esta los elementos críticos son los espárragos ya que se debe garantizar que no sufra desplazamientos considerables para que no afecte los resultados del ensayo.

Figura 55. Adecuación de laboratorio para ensayo a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"



Esparragos

Los esparrago tiene las mismas características que los analizados anteriormente para el ensayo a compresión ,es decir ,estos son de 1" (25,4 mm) de acero A490 ($F_y=880$ MPa, $F_u=1050$ MPa), solo que en este caso estará soportando una carga de 64,38 KN la cual es menor o muy parecida a la considerada para el chequeo previamente hecho que fue con una carga de 66,64 KN, con esto se puede afirmar que los esparragos se comportarán de manera correcta en este ensayo.

Perno de estudio en la madera

Como se mencionó anteriormente el diámetro del perno será de 1/2" (12,7mm) y el material es acero A490 ($F_y=880$ MPa, $F_u=1050$ MPa).

Se hicieron las mismas consideraciones y análisis anteriormente hechas, y debido a las similitudes de las cargas se obtiene que el perno de estudio en la madera no soportara la carga.

Dos pernos en fila en la madera

Debido a que se tiene dos pernos en fila se puede asumir que cada perno soportará la mitad de la carga última es decir 32,19 KN y haciendo el mismo análisis que para el perno de estudio en la madera se tiene que:

$$\Delta_{\max} = 0,82 \text{ mm}$$

$$M_p = 402,35 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

$$1,5M_y = 530,90 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

$$M_{pu} = 450,36 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

Con estos resultados se puede decir que por resistencia del material los pernos soportarán la carga, ya que el momento plástico M_p es menor que $1,5M_y$ y M_{pu} , además la deflexión máxima se puede decir que es un valor aceptable para el ensayo.

Platinas tipo 1

Esta platina es la misma que se utilizó para el ensayo a compresión de la conexión, la cual se puede ver en la figura 46, pero en este caso la platina estará a tensión, resistiendo por lo menos la mitad de la carga última a tensión de la probeta debido a que son dos platinas paralelas las que están asumiendo esta carga, es decir cada platina debe resistir 32,19 KN.

Para esta platina se analizará el extremo donde se encuentra el orificio de 2,7 cm para el análisis a tensión, que es donde se reduce más el área neta de la sección transversal de esta y el análisis por cortante se hará en el otro extremo que es donde se tiene menor área a cortante.

Estado límite de fluencia:

$$A_{g \text{ total tension}} = 6 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} = 480 \text{ mm}^2$$

$$P_u = 0,9F_y A_g = 0,9 \times 253 \times 480 = 109,3 \text{ KN} \geq 32,19 \text{ KN}$$

Con lo anterior se ve que la platina cumple en el anterior estado y ahora se debe comprobar el estado límite de fractura por tensión:

$$A_{neta\ tension} = 6\text{ mm} \times (80 - 27)\text{ mm} = 318\text{ mm}^2$$

$$P_u = 0,75F_u A_n = 0,75 \times 408 \times 318 = 97,31\text{ KN} \geq 32,19\text{ KN}$$

También cumplió, ahora por último se analizará el estado límite de servicio o bloque cortante, esta vez en el extremo donde se tienen los orificios de 1,4 cm:

$$\text{Área bruta por tensión } A_{gt} = 6 \times 80 = 480\text{ mm}^2$$

$$\text{Área neta por tensión } A_{nt} = 6 \times (80 - 14) = 396\text{ mm}^2$$

$$\text{Área bruta por cortante } A_{gv} = 6 \times 30 = 180\text{ mm}^2$$

$$\text{Área neta por cortante } A_{nv} = 6 \times (30 - 14/2) = 138\text{ mm}^2$$

$$F_u A_{nt} = 408 \times 396 = 161.558$$

$$0,6F_u A_{nv} = 0,6 \times 408 \times 138 = 33.782,4$$

Cuando $F_u A_{nt} \geq 0,6F_u A_{nv}$ entonces la resistencia nominal ϕR_n será:

$$\phi R_n = 0,75 (0,6F_y A_{gv} + F_u A_{nt})$$

$$\phi R_n = 0,75 (0,6 \times 253 \times 180 + 408 \times 396) = 141,66\text{ KN} \geq 32,19\text{ KN}$$

De acuerdo con lo anterior se comprueba que la platina soportará los tres estados límites para elementos a tensión con la carga de ensayo.

Platinas tipo 2

Tienen un espesor t de 6mm, y son de acero A-36 ($F_y = 253\text{MPa}$, $F_u = 408\text{MPa}$). Las dimensiones de estas platinas son las mostradas en la figura 47.

Debido a la similitud con la platina 1 se tiene la misma sección transversal y se obtendrá los mismos resultados de los dos primeros estados solo que ahora los se debe comparar con 64,38 KN, haciendo esto se tiene que:

$$\text{Estado limite de fluencia } P_u = 109,3 \text{ KN} \geq 64,38 \text{ KN}$$

$$\text{Estado limite de fractura por tracción } P_u = 97,31 \text{ KN} \geq 64,38 \text{ KN}$$

El estado límite de servicio o bloque cortante para este caso se hace con el mismo procedimiento anterior, solo que para el extremo donde se tiene el orificio de 2,7 cm, dándonos como resultado:

$$\phi R_n = 164,98 \text{ KN} \geq 64,38 \text{ KN}$$

De acuerdo con lo anterior se comprueba que esta platina soportará los tres estados límites para elementos a tensión con la carga de ensayo.

Además de esto se debe comprobar que la soldadura resista ésta carga y en el análisis de esta platina a compresión se encontró la carga última resistida por la soldadura que es de 226,4 KN, esto sin tener en cuenta la fricción entre las platinas debido al

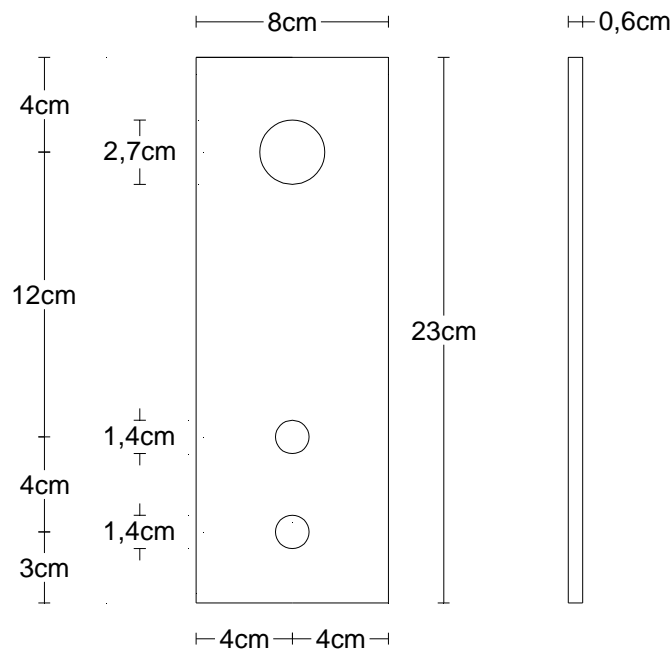
aplastamiento generado por la máquina de ensayo, esto indica que la soldadura resistirá sobradamente la carga última de 64,38 KN.

Platinas tipo 3

Esta platina al igual que las otras tiene un espesor de 6 mm y de acero A-36 ($F_y = 253$ MPa, $F_u = 408$ MPa), las dimensiones son las mostradas en la figura 56.

Para esta platina se analizará el extremo donde se encuentra el orificio de 2,7 cm el cual es donde se reduce más el área neta de la sección transversal de esta y además es donde se tiene menor área a cortante en comparación con el otro extremo.

Figura 56. Platina tipo 3



Al igual que la platina tipo 1 estará a tensión resistiendo por lo menos la mitad de la carga última a tensión de la probeta debido a que son dos platinas paralelas, las que estas asumiendo esta carga, es decir cada platina debe resistir 32,19 KN.

Haciendo su respectivo análisis se tiene que:

Estado limite de fluencia $P_u = 109,3 \text{ KN} \geq 32,19 \text{ KN}$

Estado limite de fractura por tracción $P_u = 97,31 \text{ KN} \geq 32,19 \text{ KN}$

Estado límite de servicio o bloque cortante $\phi R_n = 164,98 \text{ KN} \geq 32,19 \text{ KN}$

3.3.3 Ensayo a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

Este ensayo tiene como objeto determinar el esfuerzo a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2" (12.7mm), para madera rolliza de diámetros promedio entre 8 y 12 cm, con un contenido de humedad de 10,663% hallado en el numeral 2.1, la aplicación de carga se realizó mediante la máquina de prueba *MTS 647 Hydraulic Wedge Grip* la cual garantizó una tasa constante de deformación de 1mm/min.

En la figura 57 se muestra el sistema de ensayo a compresión de la conexión tipo 3A donde sus elementos fueron dimensionados en los numerales 3.3.1 y 3.3.2.

Figura 57. Probeta ensayo a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

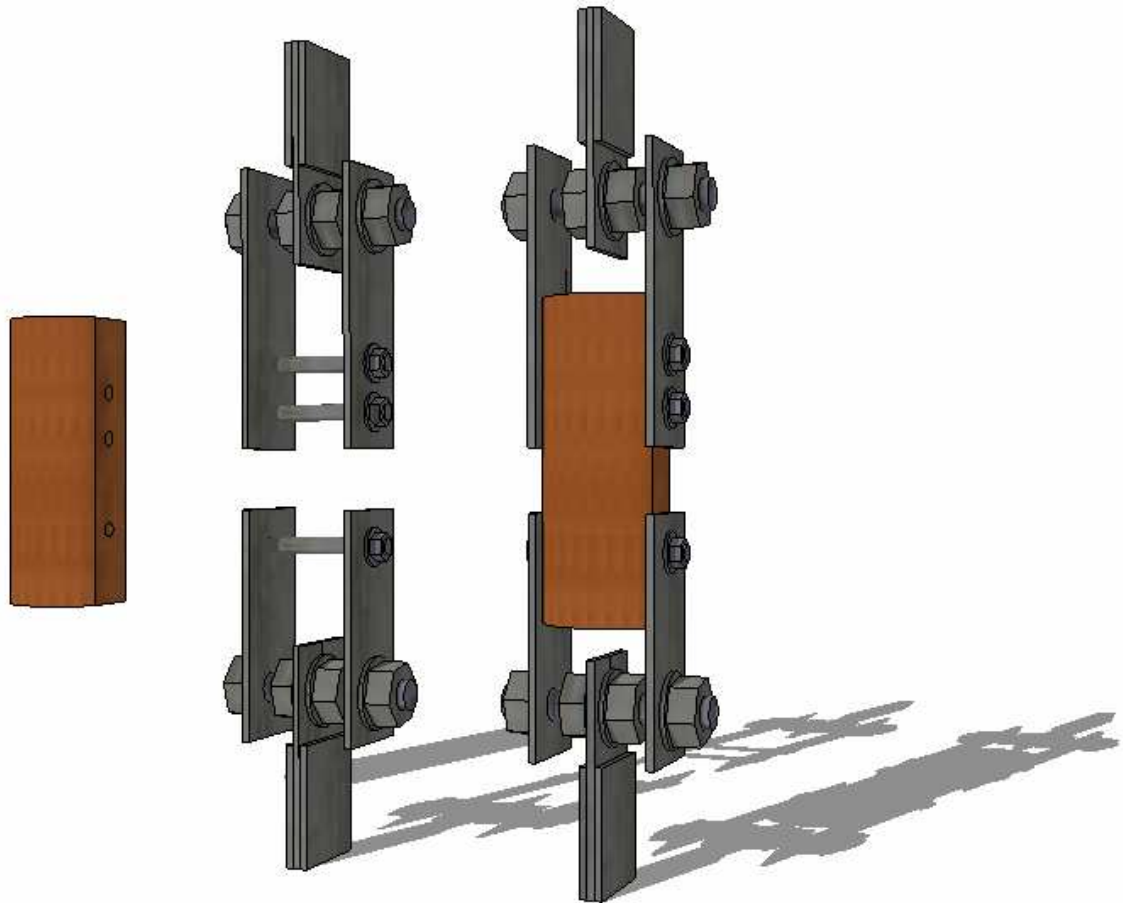


Figura 58. Ensayo probeta a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"



Se ensayaron un total de 11 probetas las cuales arrojaron las siguientes graficas de carga vs desplazamiento.

Gráfico 36. Probeta 1 resistencia conexión 3A a tensión con perno 1/2"

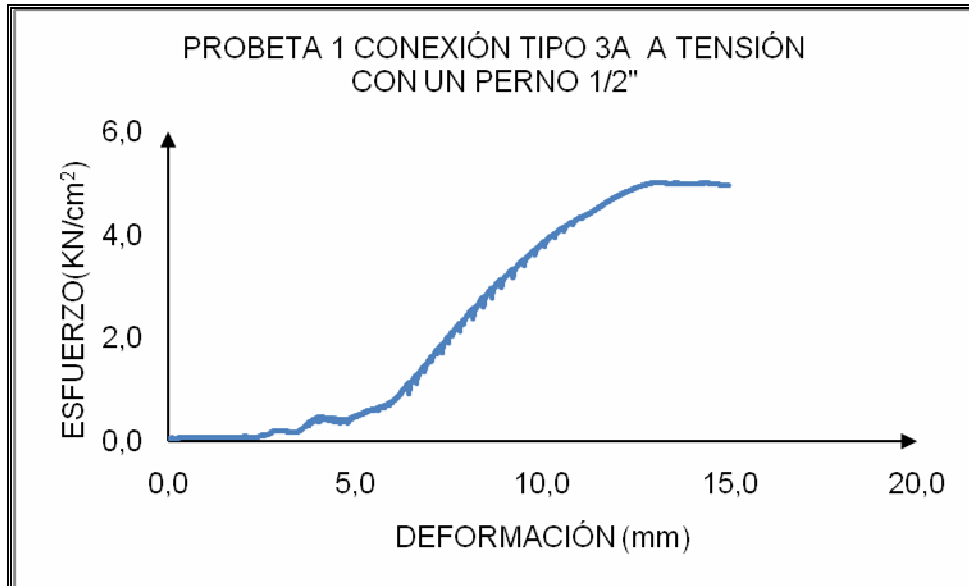


Gráfico 37. Probeta 2 resistencia conexión 3A a tensión con perno 1/2"

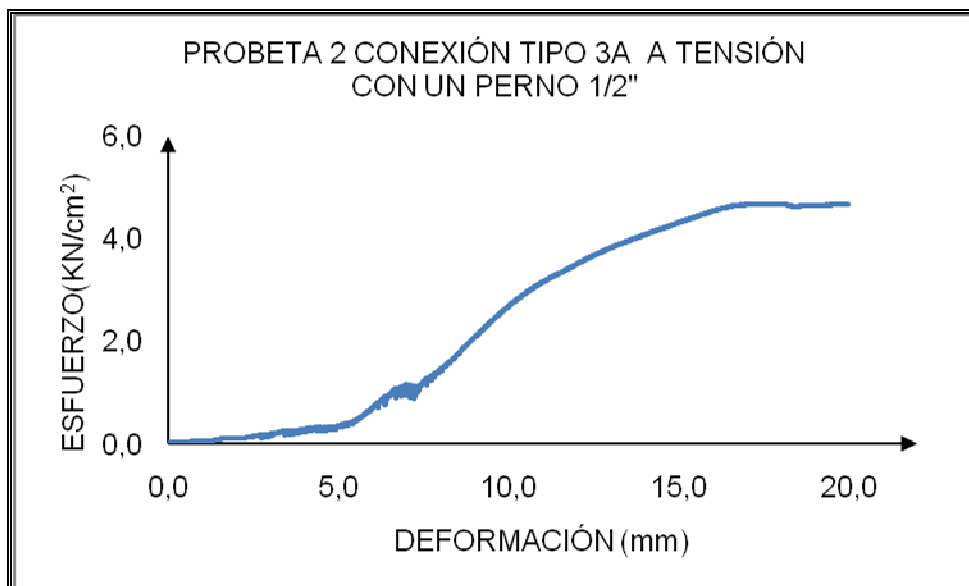


Gráfico 38. Probeta 3 resistencia conexión 3A a tensión con perno 1/2"

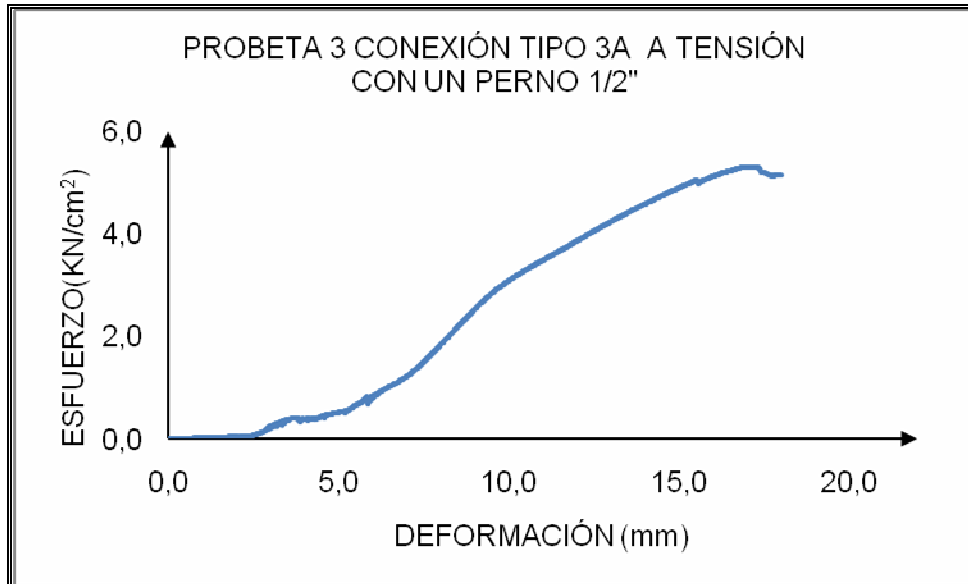


Gráfico 39. Probeta 4 resistencia conexión 3A a tensión con perno 1/2"

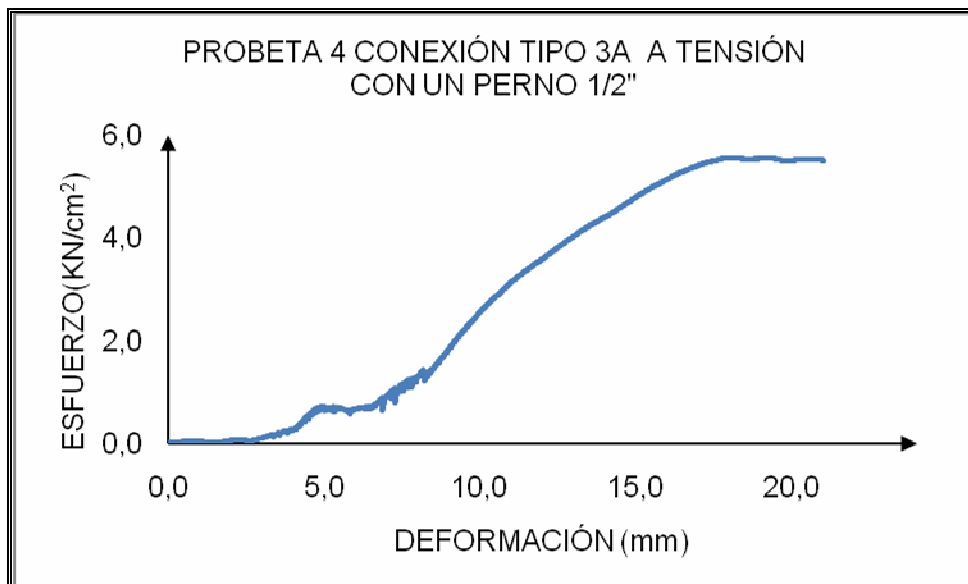


Gráfico 40. Probeta 5 resistencia conexión 3A a tensión con perno 1/2"

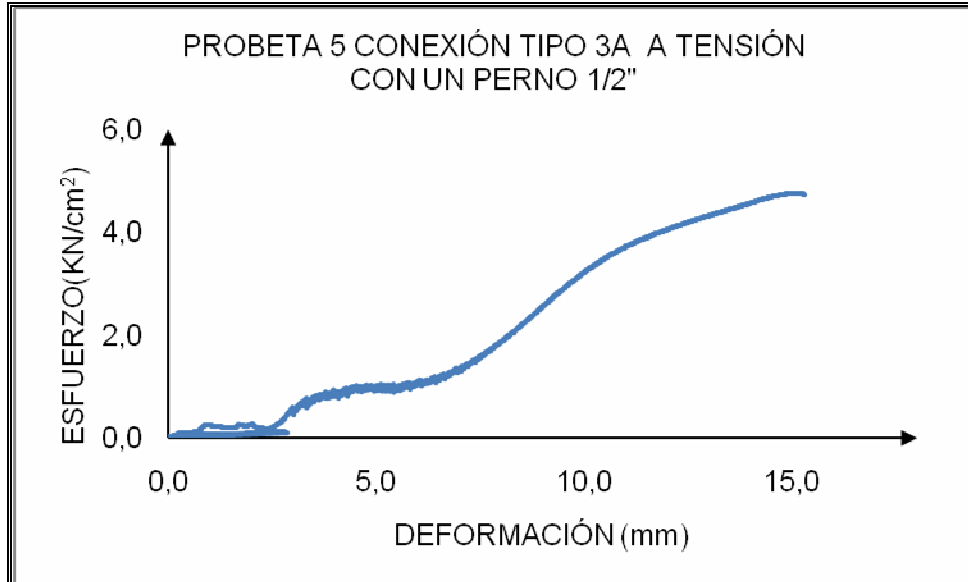


Gráfico 41. Probeta 6 resistencia conexión 3A a tensión con perno 1/2"

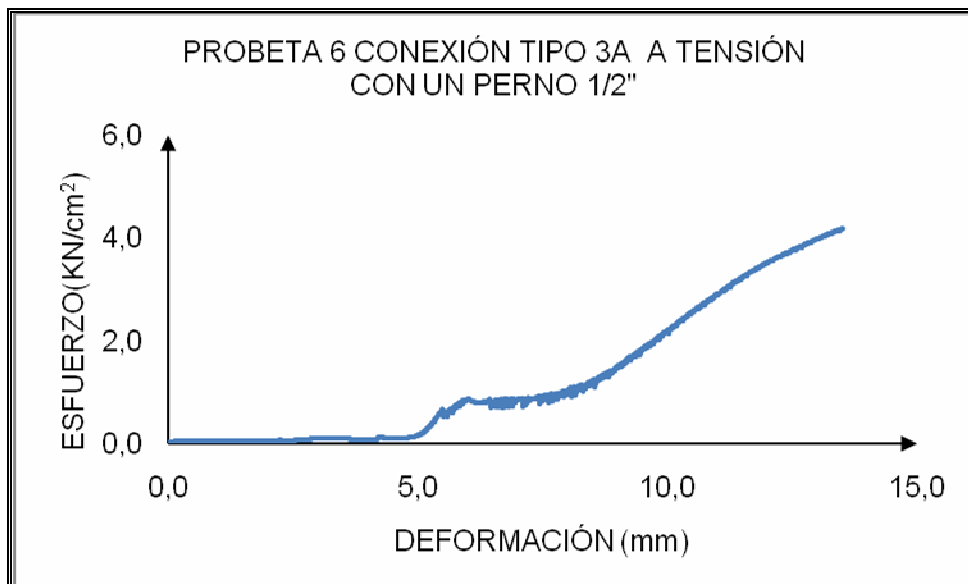


Gráfico 42. Probeta 7 resistencia conexión 3A a tensión con perno 1/2"

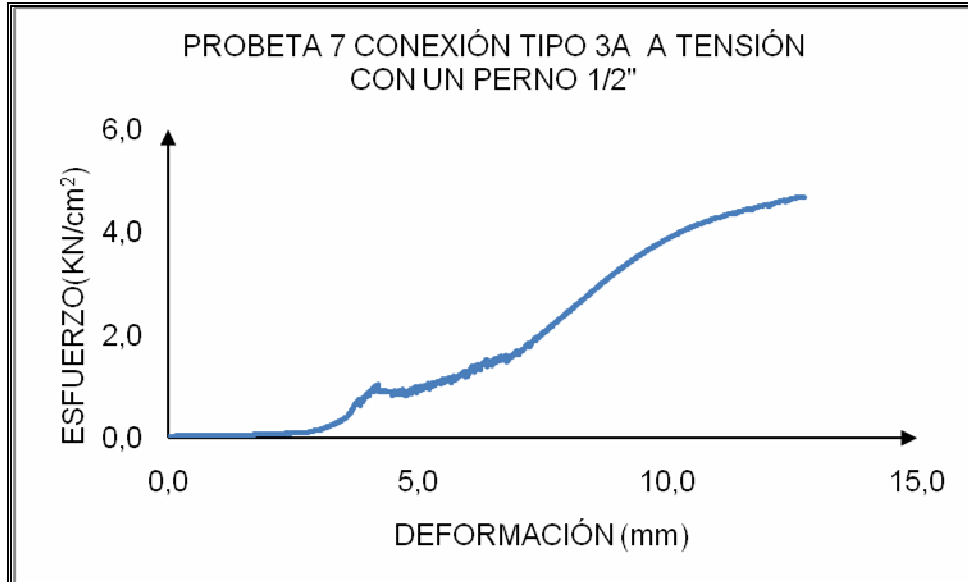


Gráfico 43. Probeta 8 resistencia conexión 3A a tensión con perno 1/2"

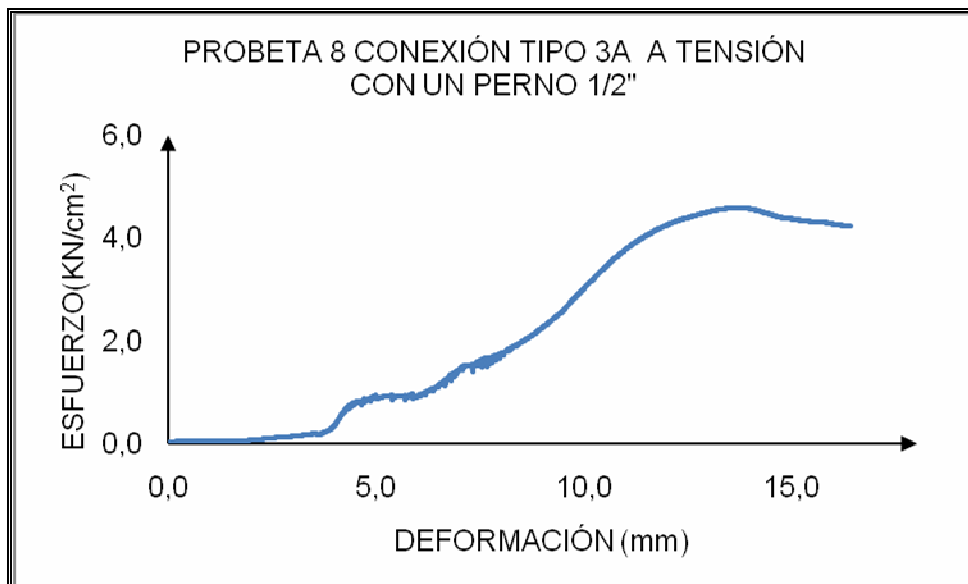


Gráfico 44. Probeta 9 resistencia conexión 3A a tensión con perno 1/2"

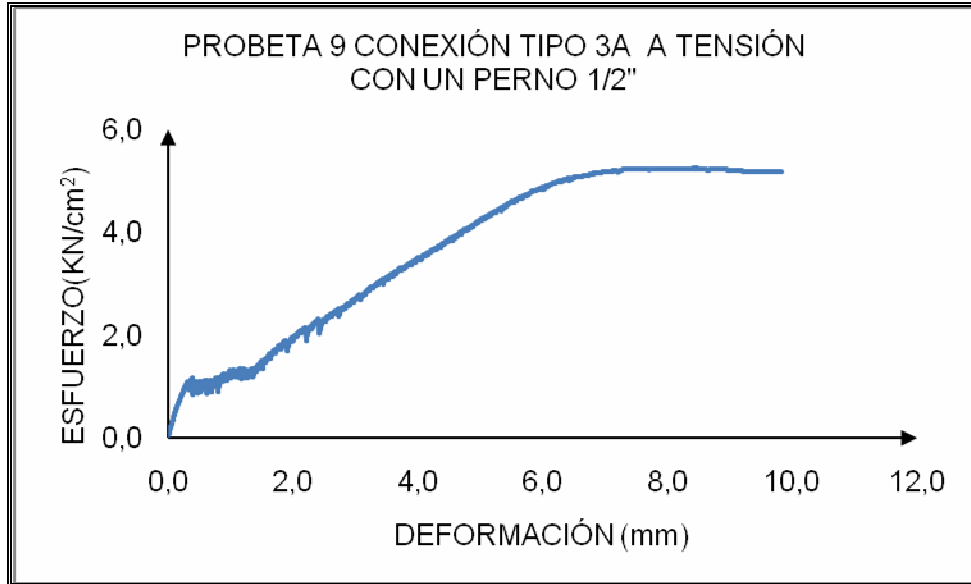


Gráfico 45. Probeta 10 resistencia conexión 3A a tensión con perno 1/2"

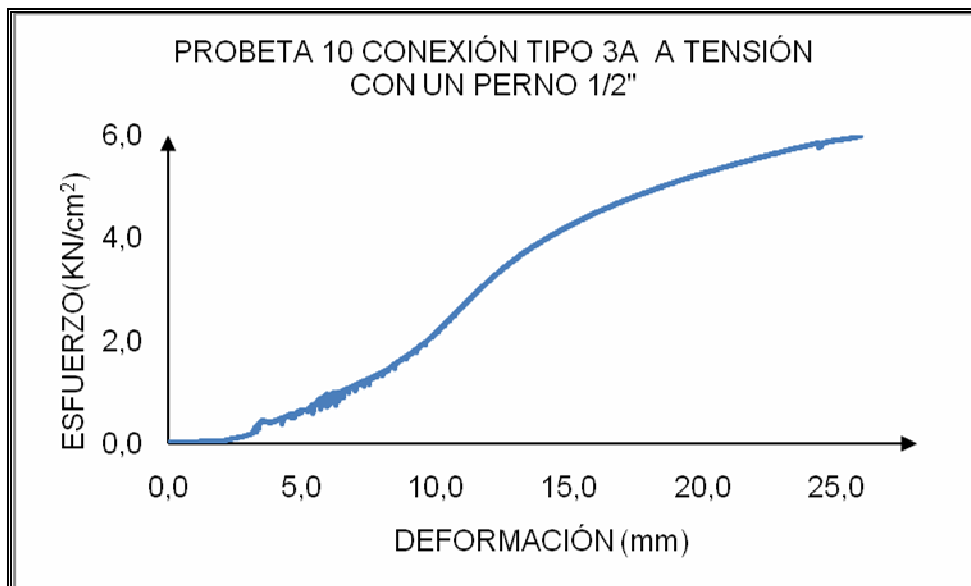
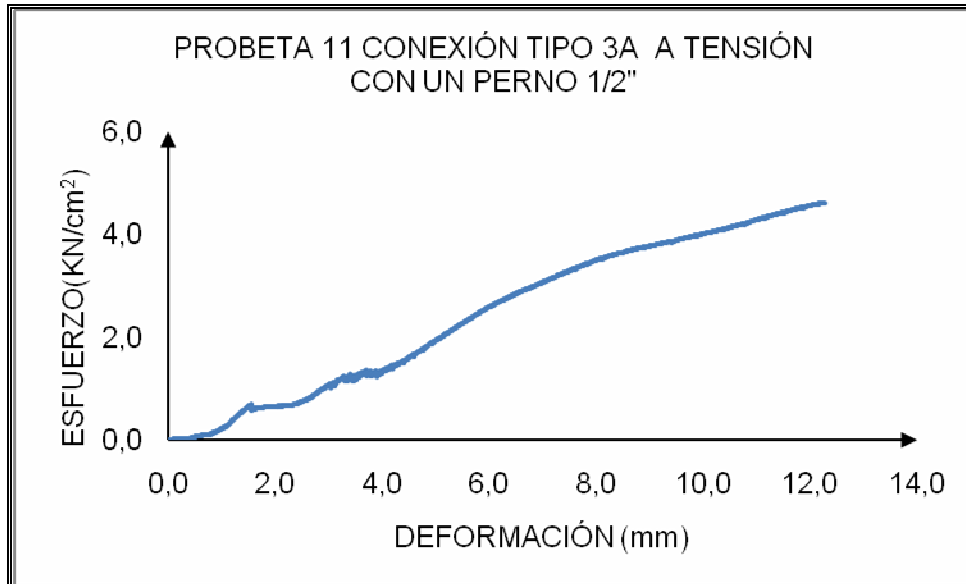


Gráfico 46. Probeta 11 resistencia conexión 3A a tensión con perno 1/2"



En la Tabla 20 se observan las cargas máximas alcanzadas de las probetas a tensión de la conexión tipo 3A que arrojo la máquina de pruebas *MTS 647 Hydraulic Wedge Grip*, los esfuerzos máximos a tensión generados por el área de contacto entre la madera y el correspondiente perno de 1/2" a una distancia de 6,5 cm del borde, además de las características de cada probeta como el numero de anillos de crecimiento y el porcentaje de duramen.

Tabla 20. Resultado de probetas a tensión conexión tipo 3 A con un perno de 1/2"

	Diámetro Promedio	h Promedio	Anillos De Crecimiento	% Duramen	Carga Máxima KN	Esfuerzo Máximo KN/cm²
Probeta 1	9,74	7,7	12	62	48,938	5,004
Probeta 2	10,53	9,5	12	38	56,536	4,686
Probeta 3	11,23	9,4	11	45	63,373	5,308
Probeta 4	10,03	9,15	11	40	64,584	5,558
Probeta 5	10,6	8,88	13	71	53,721	4,764
Probeta 6	11,09	8,85	12	54	47,08	4,189
Probeta 7	10,17	8,1	12	37	48,252	4,691
Probeta 8	10,27	7,95	13	39	46,377	4,593
Probeta 9	7,34	6,62	12	48	44,081	5,243
Probeta 10	11,24	9,5	12	31	72,087	5,975
Probeta 11	10,61	9,3	13	24	55,541	4,702

Con los datos encontrados anteriormente, se realizó un análisis estadístico, para el cual se usó la distribución de T de Student con 10 grados de libertad, y estimando un intervalo de confianza del 95 % arrojando los siguientes datos:

Esfuerzo máximo a tensión para la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

- Esfuerzo promedio 4,974 KN/cm²
- Desviación estándar 0,507 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [4,331 – 5,617] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,305 – 1,244] KN/cm²

Las siguientes figuras muestran el modo de fallas de las probetas y de los pernos como se predijo anteriormente:

Figura 59. Forma de fallada a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"



Figura 60. Probetas falladas a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"



Figura 61. Forma de fallada de pernos de 1/2" en la conexión tipo 3A a tensión



3.4 PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CONEXIÓN TIPO 3A CON MADERA ROLLIZA

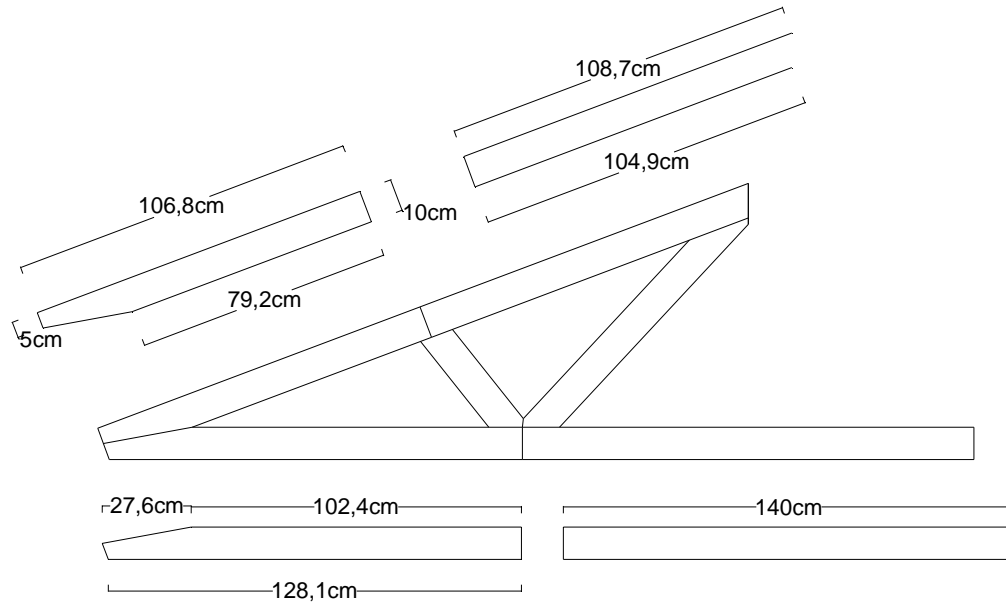
Para la construcción de una estructura en la que se sabe que los elementos estarán sometidos a fuerzas axiales y si se requiere usar madera rolliza con conexiones tipo 3A se debe realizar el siguiente procedimiento:

- Dimensiones y despiece
- Selección de rollizas
- Medición y marcación
- Corte de los elementos
- Desbaste de los extremos
- Elaboración de platinas
- Perforaciones en madera y platinas
- Ensamble

3.4.1 Dimensiones y despiece

Para proceder a la elaboración de una estructura en madera, primero que todo se debe disponer de los planos con despieces de la misma donde se indique las longitudes de cada elemento, los ángulos entre ellos y diámetros necesarios.

Figura 62. Dimensiones y despiece



3.4.2 Selección de las rollizas

Se debe realizar la selección de rollizas rectas, libres de rajaduras que pudieran afectar la estructura, además de esto se escogen aquellas de diámetros similares con el fin de hacer una estructura uniforme, y no sea necesario desbastar demasiado los elementos para que al enfrentarlos coincidan creando uniones precisas, además se debe evitar los nudos de la madera en los extremos de los elementos a tensión ya que afectaría considerablemente la resistencia de la conexión.

Figura 63. Selección de las rollizas



3.4.3 Medición y marcación

Teniendo la madera seleccionada, se procede a realizar la marcación en esta de las longitudes necesarias para los elementos que se cortarán.

Figura 64. Medición y marcación



3.4.4 Corte de los elementos

Los cortes se pueden realizar usando una sierra de disco de mínimo 12" adecuada para los pequeños diámetros manejados.

Ya que la sección transversal de la madera no es homogénea, puede presentarse inestabilidad generando dificultad en el momento del corte, por lo que se recomienda asegurar los elementos restringiendo su movimiento o rotación para tener un corte limpio, además de tener seguridad para el operario.

Con el fin de tener cortes con ángulos exactos fue necesario construir un mecanismo un poco rustico pero eficaz, está conformado por una tabla a la que en su parte inferior se colocó una pequeña tabla que sirve como guía para deslizarla en una ranura de la mesa de la sierra, aparte de esto sobre la tabla se atornilla otra pieza de madera la cual dará el ángulo necesario además de servir de apoyo para sujetar la rolliza mediante prensas. En la figura 65 se puede ver claramente este mecanismo.

Figura 65. Corte de los elementos



3.4.5 Desbaste de los extremos

Se debe realizar un desbaste en los extremos de los elementos de madera con el fin obtener una superficie de apoyo para las platinas que forman parte de la conexión tipo 3A. En este caso se realizó con la ayuda de una lijadora hasta contar con el h (distancia entre platinas) necesario en cada elemento.

Figura 66. Desbaste de los extremos



3.4.6 Elaboración de las platinas

Teniendo las dimensiones necesarias, es posible elaborarlas de dos formas, una puede ser cortando las platinas de cada elemento de madera y luego se soldarlas en sus extremos; otra manera es cortar de un placa la forma definitiva de la patina. Teniendo elaboradas las platinas se procede a las perfóralas de acuerdo al diseño con el fin de que coincidan con las perforaciones de la madera.

3.4.7 Perforaciones en madera

Teniendo marcada la ubicación de los orificios donde irán ubicados los pernos tanto en la madera como en las platinas, se procede a realizarlos con taladros eléctricos de columna o de mano, que para este caso se usa una broca de 14 mm que es lo recomendado por la norma NSR para pernos de ½” en la madera y en platinas.

Figura 67. Perforaciones en madera y platinas



3.4.8 Ensamble

Si los cortes de los elementos de madera y metálicos se realizan con precisión, en el momento de ensamble estos calzaran perfectamente y solo resta la colocación de arandelas y pernos para fijar las piezas.

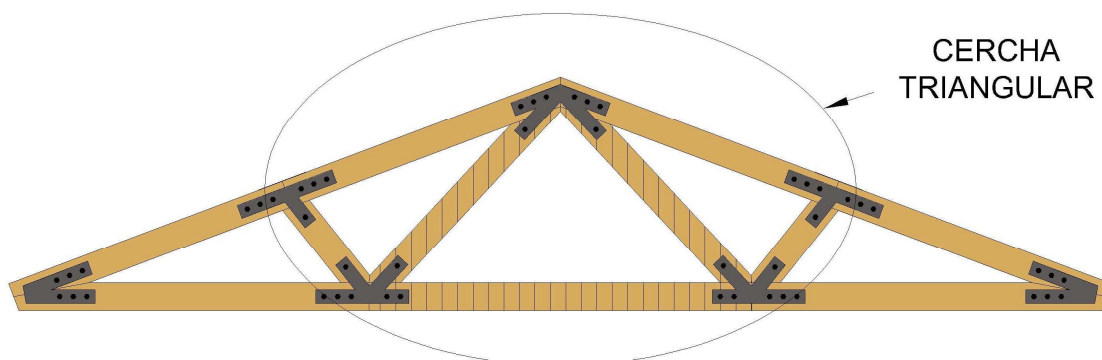
Figura 68. Ensamble



4. EVALUACIÓN DE CERCHA EN LABORATORIO – APLICACIÓN DE LA CONEXIÓN TIPO 3A

Se quiere presentar una metodología para evaluar a escala real el comportamiento de cerchas. Con el fin de mostrar una aplicación de la conexión tipo 3A, se diseña una cercha para cubierta tipo W y se evalúa su comportamiento mediante un ensayo a escala real, para esto se ensayara solo su parte central la cual se puede ver en la figura 69 y se llamo cercha triangular.

Figura 69. Cercha W



Si se quiere realizar una cercha con este tipo de madera, es decir con diámetros promedio de 9 cm, la resistencia de los elementos a tensión están por el orden de los 1200 KN, mientras los de compresión 270 KN, esto si se considera como columna corta la cual debe tener una longitud menor a 70 cm de acuerdo a su esbeltez, si se tiene una longitud mayor se reducirá su resistencia debido al pandeo. Por ejemplo si se aumenta la longitud a 100 cm su resistencia baja considerablemente a 79 KN. De acuerdo a esto se puede decir que los elementos críticos de una cercha realizada con esta madera de estudio son los sometidos a compresión debido a su baja resistencia comparada a los de tensión.

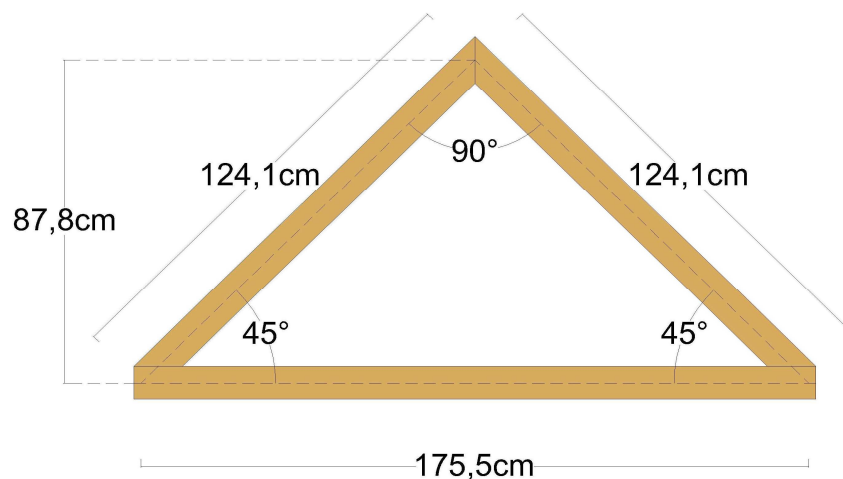
Es por esto que es necesario evaluar el comportamiento de uno de estos elementos en una cercha a escala real lo cual se muestra a continuación.

4.1 ENSAYO CERCHA TRIANGULAR

El principal objetivo de este ensayo es comprobar la resistencia de un perno a compresión en una conexión real, debido a que probablemente el área de la sección transversal o parte de ella estaría aportando resistencia a la conexión debido a su acomodamiento en la estructura.

En las características de la cercha se contempla, que el elemento resistirá mayor carga que la conexión, para esto se supone las dimensiones de la figura 70. Los elementos son de madera teca rolliza de diámetros promedio 8,7 cm, y un contenido de humedad de 10,663 % conectados mediante un perno en cada extremo.

Figura 70. Cercha triangular con conexiones tipo 3A con un perno de 1/2"



4.1.1 Peso propio de los elementos

De acuerdo a la densidad hallada en el numeral 2.2 la cual fue de $0,677 \text{ gr/cm}^3$ se obtuvo los pesos de cada elemento de acuerdo a su sección transversal y su longitud esto se muestra en la tabla 21.

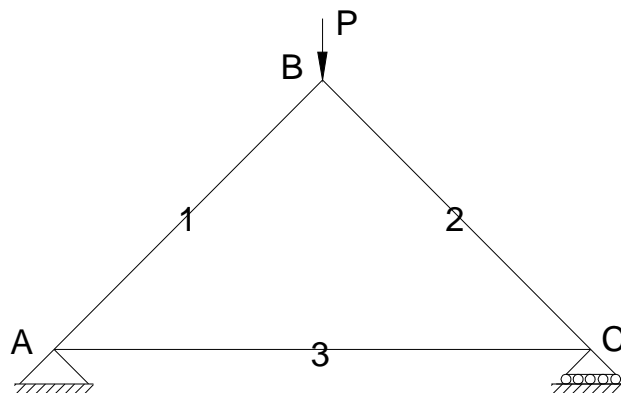
Tabla 21. Elementos cercha triangular

ELEMENTO	Dprom cm	LONGITUD cm	PESO KN
1	8,5	124,1	0,048
2	8,5	124,1	0,048
3	9	175,5	0,076
Total			0,171

4.1.2. Carga máxima de la cercha

Debido a que en el ensayo solo se aplicará la carga P en el nodo B tal como se muestra en la figura 71, se dejan planteadas las cargas sobre los elementos en función de esta.

Figura 71. Diagrama de cuerpo libre cercha triangular



4.1.2.1 Carga de elementos en función de la carga P

La cercha y las cargas sobre esta son simétricas y como no existen fuerzas horizontales aplicadas, se puede decir que las reacciones de los apoyos son iguales y sus valores corresponden a la mitad de la carga puntual y el peso propio total de la cercha, entonces:

$$A_y = C_y = \frac{P}{2} + 0,0855$$

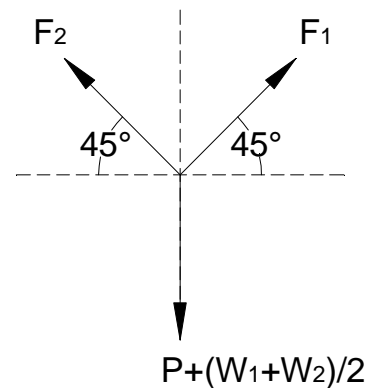
Analizando nodo a nodo de la cercha se obtiene que:

Nodo B

$$\sum F_x = 0$$

$$F_1 \operatorname{sen}(45^\circ) - F_2 \operatorname{sen}(45^\circ) = 0$$

$$\Rightarrow F_1 = F_2$$



$$\sum F_y = 0$$

$$2F_1 \cos(45^\circ) - P - \frac{(W_1 + W_2)}{2} = 0$$

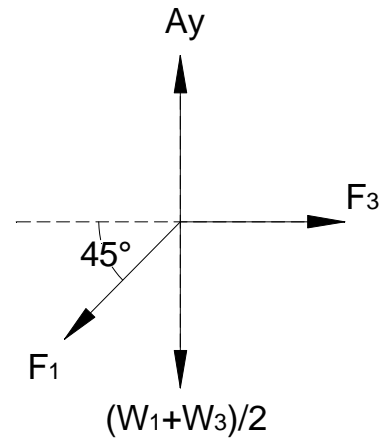
$$\Rightarrow F_1 = F_2 = 0,707P + 0,034$$

Nodo A

$$\sum F_x = 0$$

$$-F_1 \cos(45^\circ) + F_3 = 0$$

$$\Rightarrow F_3 = 0,5P + 0,024$$



4.1.2.2 Resistencia ultima de los elementos

Elementos sometidos a compresión

Los elementos sometidos a compresión son el 1 y 2, debido a su similitud de dimensiones se analizará uno de ellos a continuación.

Primero se halla la esbeltez, que para elementos circulares macizos es:

$$\lambda = \frac{le}{d} \quad [\text{NSR 10 G.4.3-4}]$$

Donde d es el diámetro del elemento y le es la longitud efectiva que se calcula con la formula:

$$le = K lu \quad [\text{NSR 10 G.4.3-1}]$$

Donde K que es el coeficiente de longitud efectiva, que para elementos articulados en ambos extremos K es igual a 1 y l_u es la longitud no soportada lateralmente en la dirección considerada.

$$l_e = K l_u = 1 \times 124,1 = 124,1 \text{ cm}$$

Entonces la esbeltez es:

$$\lambda = \frac{l_e}{d} = \frac{124,1}{8,5} = 14,6$$

Ahora se evalúa que tipo de columna es, ya que puede ser corta, intermedia o larga para lo cual se debe encontrar C_k que es la relación de esbeltez para la cual la columna tiene una carga admisible se $2/3 F'_c$ An el cual se calcula con la formula:

$$C_k = 0,7025 \sqrt{\frac{E}{F'_c}} \quad [\text{NSR 10 G.4.3-3}]$$

El módulo de elasticidad y el esfuerzo admisible en compresión paralelo a las fibras fueron los encontrados en el numeral 2.3 lo cuales son 621,75 y 5,247 KN/cm² respectivamente.

$$C_k = 0,7025 \sqrt{\frac{621,75}{5,247}} = 7,65$$

Con esto se puede decir que el elemento se considera como una columna larga que se encuentra en la siguiente desigualdad:

$$C_k < \lambda < 50 \quad [\text{NSR 10 G.4.3.2.2}]$$

Y se aplica la carga admisible para columnas largas con sección circular:

$$N_{adm} = 0,2467 \frac{E A}{\lambda^2} \quad [\text{NSR 10 G.4.3-9}]$$

$$N_{adm} = 0,2467 \frac{621,75 \times (\pi \times 8,5^2 / 4)}{14,6^2} = 43,76 \text{ KN}$$

Entonces se ve que el elemento a compresión puede resistir una carga admisible de 43,76 KN.

Elementos sometidos a tensión

Este elemento es el 3 además como se sabe la limitante de este es el área de la sección transversal, su resistencia es dada por la siguiente fórmula:

$$N = F_t A_n \quad [\text{NSR 10 G.4.2-1}]$$

Donde F_t es el esfuerzo a tensión que se halló en el numeral 2.4 el cual es de 19,227 KN/cm² y A_n es el área neta de la sección transversal, es decir, el área total de la sección transversal menos el área transversal generada por el orificio, que para pernos de 1/2" es de 1,4 cm, entonces A_n es aproximadamente 54 cm² para una rolliza desbastada con diámetro promedio de 9 cm. Teniendo esto se puede obtener la resistencia máxima de este elemento a tensión:

$$N = 19,227 \times 54 = 1038,26 \text{ KN}$$

Se comparan las resistencias de los elementos a compresión con el de tensión y como se puede observar la resistencia de este último fue mucho mayor, aproximadamente 23 veces más que la carga de 43,76 KN a compresión.

Entonces se puede concluir que la cercha fallará cuando el elemento más crítico falle, que en este caso es el elemento 1, del cual se obtuvo la ecuación de la fuerza axial en función de la carga P en el numeral 4.1.1.2.1 donde se puede calcular igualando la carga del elemento con la carga mencionada de esta manera:

$$F_1 = F_2 = 0,707P + 0,034 \Rightarrow P = \frac{F_1 - 0,034}{0,707} = \frac{43,76 - 0,034}{0,707} = 61,84 \text{ KN}$$

Es decir la carga máxima de la cercha por resistencia de los elementos es de 61,84 KN

4.1.3 Resistencia ultima de la conexión con un perno de 1/2"

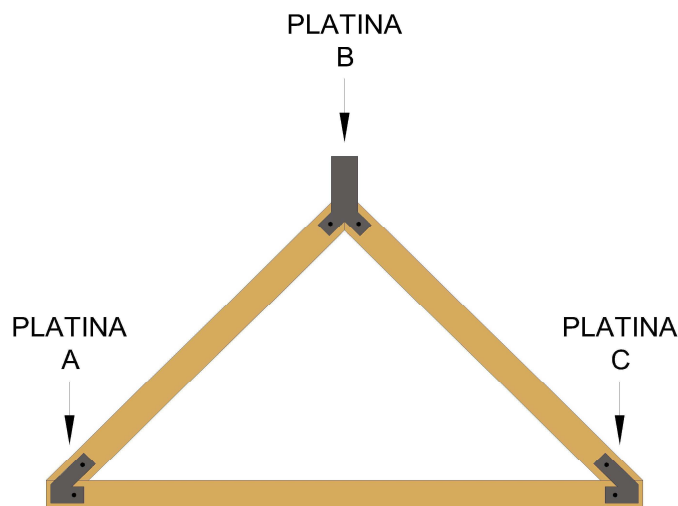
Conociendo los valores de esfuerzos a compresión de 4,92 KN/cm² y el de tensión de 4,974 KN/cm² de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2" halladas en los numerales 3.2.3 y 3.3.3, y sabiendo que la distancia h entre platinas para esta cercha fue de 7,5 cm en promedio, se calcula la resistencia del perno en la conexión tipo 3A para esta cercha, las cuales fueron de 39,81 KN a compresión y 47,28 KN a tensión. De acuerdo a estos resultados se concluye teóricamente que en la cercha fallará primero la conexión antes que el elemento.

Entonces la carga máxima soportada por la cercha es de 56,3 KN.

4.1.4 Diseño de platinas

En la siguiente figura se muestran las platinas conectoras necesarias para la realización de la cercha, estas se dimensionaron de acuerdo a la ubicación de pernos en la madera y a las distancias mínimas a los bordes en la platina.

Figura 72. Platinas cercha triangular con conexiones tipo 3A con un perno de 1/2"

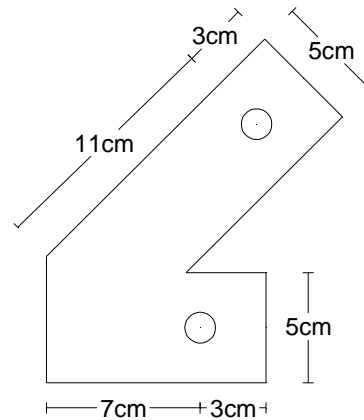


4.1.4.1 Platinas A y C

A estas platinas llegan dos elementos, uno a tensión que se puede considerar como una columna de 11 cm con apoyo empotrado en un extremo y articulado en otro, y otro elemento a tensión en el cual se analizará los límites a fluencia, fractura por tracción y bloque cortante.

El acero es A-36 ($F_y=253$ MPa, $F_u=408$ MPa), espesor 4 mm y orificios de 14 mm que por norma es el orificio para pernos de 1/2".

Figura 73. Platinas A y C cercha triangular



De acuerdo a lo anterior se tiene que:

Chequeo compresión

$$A_g = 200 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_c = 0,862$$

$$I = 266,7 \text{ mm}^4$$

$$F_{cr} = 185,27 \text{ MPa}$$

$$r = 1,154 \text{ mm}$$

$$\phi_c P_n = 31,49 \text{ KN}$$

$$\frac{KL}{r} = 76,21$$

De acuerdo a esto la platina soportará el ensayo ya que se supone que la conexión del elemento 1 o 2 en este punto resistirá 21,88KN que corresponde a la mitad de la carga que soporta el elemento a compresión ya que esta la soportan dos platinas paralelas que hacen parte de la conexión.

Chequeo a tensión

Estado limite de fluencia $P_u = 45,54 \text{ KN}$

Estado limite de fractura por tracción $P_u = 44,06 \text{ KN}$

Bloque cortante $\phi R_n = 47,71 \text{ KN}$

Según esto debe resistir la carga aplicada sobre el elemento 3 la cual se halla de acuerdo a la ecuación de carga en función de la carga P, es decir:

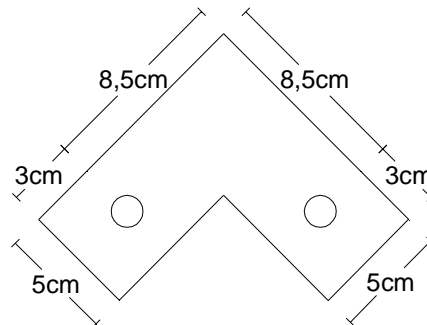
$$F_3 = 0,5P + 0,024 = 0,5 \times 61,84 + 0,024 = 30,94 \text{ KN}$$

Entonces se puede concluir que platina A y C con un espesor de 4 mm es suficiente para las condiciones del ensayo.

4.1.4.2 Platinas B

Esta platina tiene las mismas especificaciones que las A y B pero con las dimensiones mostrada en la siguiente figura, al ser un platina simétrica a la cual llegan los elementos 1 y 2 en compresión con la misma carga de 43,76 KN, se supone una columna corta con un extremo empotrado y otro articulado, con una distancia entre apoyos de 8,5 cm.

Figura 74. Platinas B cercha triangular



Analizando esto se tiene que:

$$A_g = 200 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_c = 0,666$$

$$I = 266,7 \text{ mm}^4$$

$$F_{cr} = 210,05 \text{ MPa}$$

$$r = 1,154 \text{ mm}$$

$$\phi_c P_n = 35,71 \text{ KN}$$

$$\frac{KL}{r} = 58,59$$

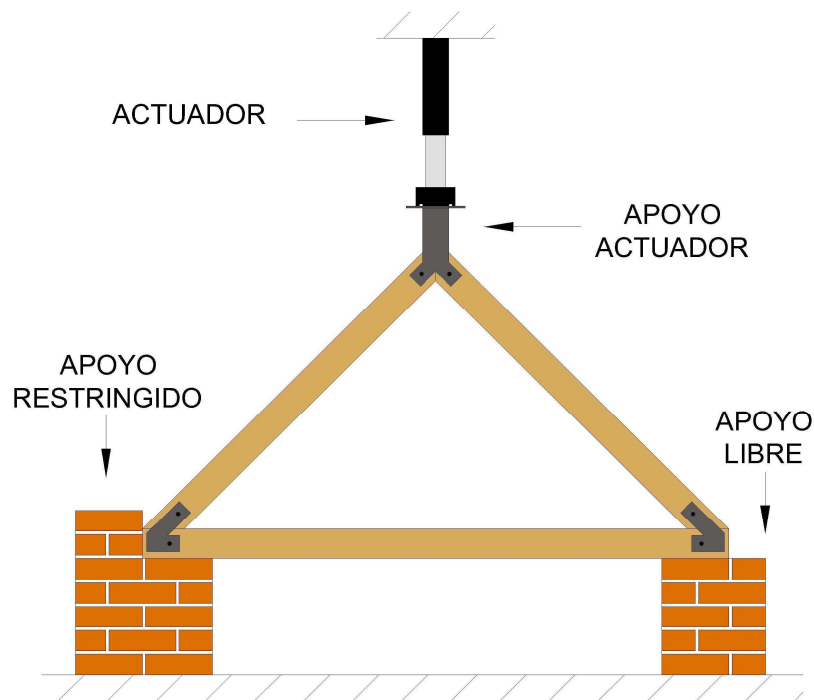
Entonces se puede concluir que platina B con el espesor de 4 mm es suficiente para las condiciones del ensayo.

4.1.5 Diseño del ensayo de cercha triangular

En la realización del ensayo de la cercha triangular, se soporto sobre apoyos hechos en ladrillo, donde uno de ellos genera restricción de movimiento horizontal. El apoyo del actuador permite que este aplique la carga sobre las platinas y no sobre la madera, esto

se hizo con el fin de no tener problemas de aplastamiento de la madera en el punto de contacto, ya que es lo que sucede realmente en esta parte de una cercha tipo W, además ninguno de los elementos soportan cargas distribuidas como los pares o piernas, por que los elementos que la conforman se consideran como dos diagonales y un tirante.

Figura 75. Ensayo cercha triangular



4.1.6 Ensayo cercha triangular

Para este ensayo el protocolo de carga que se realizó fue el siguiente:

De acuerdo a la carga máxima de la cercha esperada de 56,3 KN, se dividió el ensayo en 3 etapas cada una de estas con una aplicación de carga de 20 KN aplicándola a un velocidad de 1mm/min, la cual fue igual a la usada para en ensayo de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2", en las cuales se medirá la deformación y recuperación de los nodos B y C.

En el ensayo solo se logró realizar la primera etapa ya que la cercha presentó problemas en los nodos A y C, debido a la rotación de las platinas que generó un gran desplazamiento de 66 mm del nodo B sin recuperación y la falla del elemento 2. La carga máxima alcanzada fue de 15,73 KN.

Figura 76. Modo de falla de la cercha triangular



Figura 77. Modo de falla del nodo A de la cercha triangular



Figura 78. Modo de falla del nodo C de la cercha triangular



Figura 79. Modo de falla del nodo B de la cercha triangular



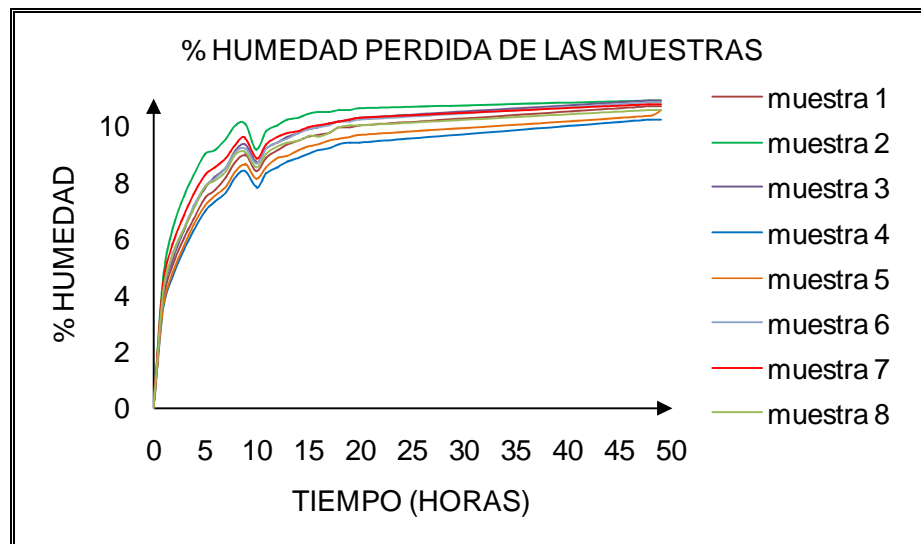
Se ve que el problema se presenta en los apoyos de la cercha ya que las reacciones de éstos no lo transmiten a las platinas si no a la madera.

5. ANÁLISIS DE DATOS

5.1 CONTENIDO DE HUMEDAD

Las graficas de pérdida de humedad mostraron un comportamiento semejante en todas las muestras. El pico negativo que se observa en la grafica indica un aumento de humedad en las muestras ya que se hizo un receso en el proceso de secado, ya que la madera ya estaba por debajo de la humedad de equilibrio y su tendencia fue de absorber humedad del ambiente.

Gráfico 47. % Humedad perdida por las muestras de ensayo



Datos del ensayo

Numero de muestras: 8

Dimensión de muestras: 1" en dirección de las fibras según ASTM D143-09

Resultados del ensayo

- % Contenido de humedad promedio 10,663%.
- Precisión 10 mg o 0,01 g
- Desviación estándar 0,23%.
- Intervalo de confianza para la media [10,320 – 11,005] %.
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,219 – 2,637] %.

5.2 DENSIDAD

La densidad promedio de la madera teca para la investigación fue $0,677 \text{ gr/cm}^3$ y comparándola con la densidad mostrada en la ficha técnica realizada por la Universidad Nacional de Colombia dice que para esta madera seca al aire la densidad es de $0,61 \text{ gr/cm}^3$ esto nos indica que la madera puede variar su densidad de acuerdo a la zona de crecimiento, humedad relativa del ambiente, la densificación del cultivo, la edad, entre otros factores que pueden influir en las diferencia de resultados de un estudio a otro.

Datos del ensayo

Numero de muestras: 8

%Contenido de humedad: 10,677%

Dimensión de muestras: 1" en dirección de las fibras según ASTM D143-09

Resultados del ensayo

- Densidad promedio $0,677 \text{ gr/cm}^3$
- Desviación estándar $0,035 \text{ gr/cm}^3$
- Intervalo de confianza para la media $[0,643 - 0,711] \text{ gr/cm}^3$
- Intervalo de confianza para la desviación estándar $[0,020 - 0,061] \text{ gr/cm}^3$

5.3 COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

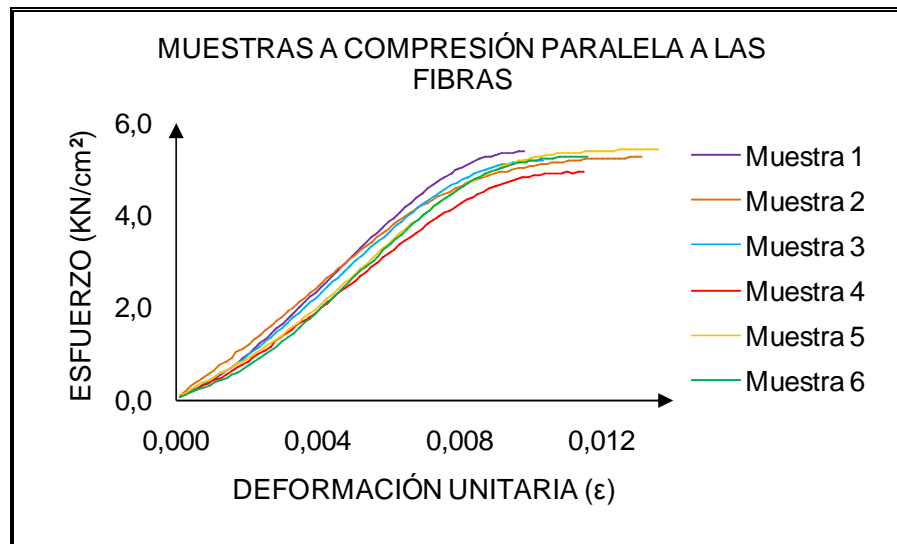
Para el ensayo a compresión se probaron dos tipos de muestras, las de sección rectangular dimensionada según la norma ASTM D143-09 ¹⁷ y la de sección circular con medula.

En los distintos ensayos no se observó cambios de resistencia a compresión en relación con las características físicas de las probetas, tales como número de anillos de crecimiento, relación entre el duramen y la albura, etc.

5.3.1 Compresión paralela a las fibras (muestras sección rectangular)

En el gráfico 48 de esfuerzo vs deformación unitaria de las muestras ensayadas se observa que en general ninguna de las muestras presentó una variación considerable respecto a su comportamiento, además de tener un punto de falla similar en carga y deformación.

Gráfico 48. Compresión paralela a las fibras muestras rectangulares



Datos del ensayo

Numero de muestras: 6

%Contenido de humedad: 10,677%

Dimensión de muestras: 1"x1"x4" según ASTM D143-09¹⁷

Resultados del ensayo

Esfuerzo máximo de compresión paralela a las fibras

- Esfuerzo máximo promedio 5,247 KN/cm²
- Desviación estándar 0,178 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [5,060 – 5,434] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,107 – 0,437] KN/cm²

¹⁷ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for small clear specimens of Timber. ASTM D143-09.USA, 2009.

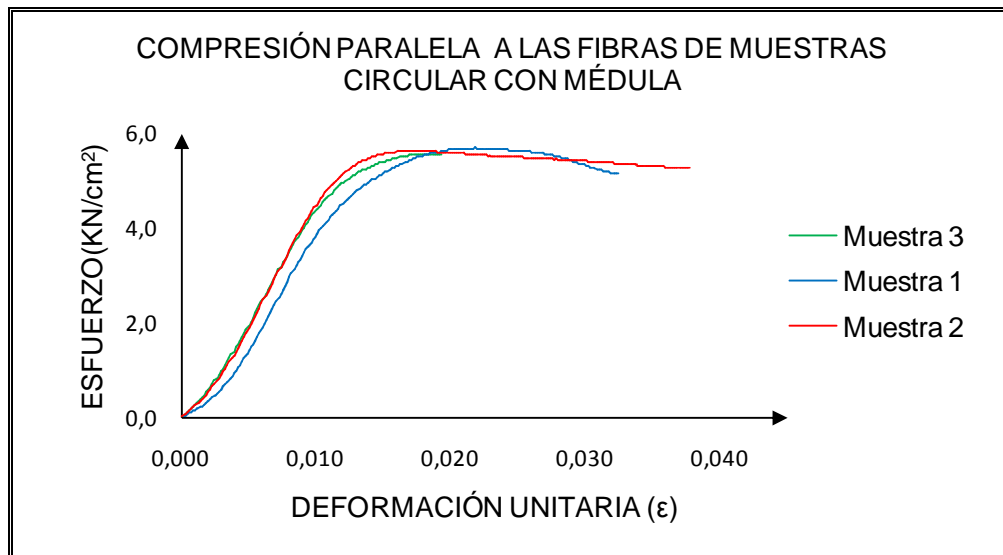
Módulo de elasticidad de compresión paralela a las fibras

- Módulo de elasticidad promedio 621,75 KN/cm²
- Desviación estándar 42,62 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [577,01 - 666,48] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [26,61 - 104,55] KN/cm²

5.3.2 Compresión paralela a las fibras (muestras sección circular con medula)

Comparando los resultados de este ensayo con los de las probetas de sección rectangular las cuales no tienen defectos, se cree éstas muestras resistirían menos carga al tener un defecto como lo es la medula, sin embargo se ve que tanto el esfuerzo máximo como el módulo de elasticidad son mayores aproximadamente 6 y 4% respectivamente, a pesar de esto en la investigación se decidió regirla por un norma internacional como lo es la ASTM y este tipo de probetas no están contemplada en la misma, además el número de pruebas hechas no son suficientes para afirmar con claridad esto.

Gráfico 49. Compresión paralela a las fibras muestras circulares con medula



Datos del ensayo

Numero de muestras: 3

%Contenido de humedad: 10,677%

Dimensión de muestras: 5 cm de diámetro y 10 cm de altura

Resultados del ensayo

Esfuerzo máximo de compresión paralela a las fibras

- Esfuerzo máximo promedio 5,61 KN/cm²
- Desviación estándar 0,061 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [5,503 – 5,718] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,050 – 0,608] KN/cm²

Módulo de elasticidad de compresión paralela a las fibras

- Módulo de elasticidad promedio 650,607 KN/cm²
- Desviación estándar 34,43 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [589,57 - 710,54] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [28,34 - 342,21] KN/cm²

5.4 TENSIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

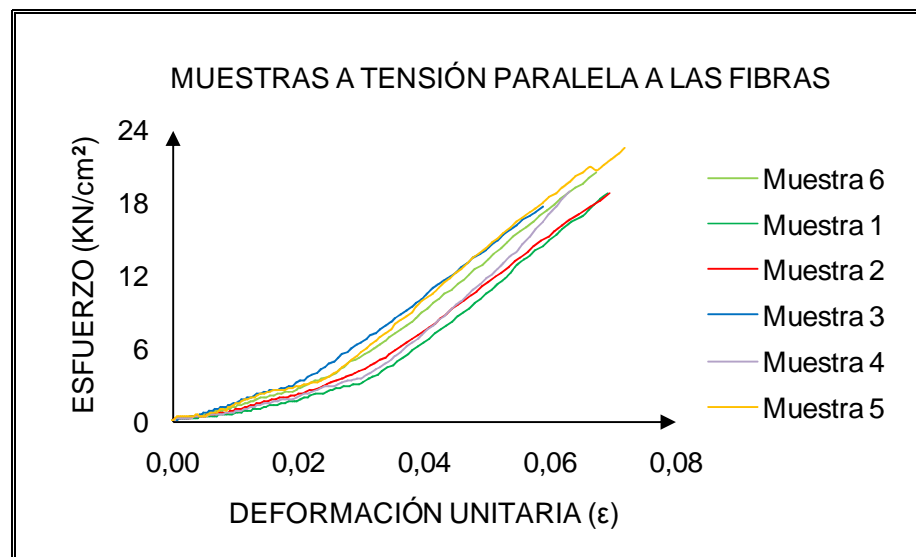
Se observó que las muestras con mayor número de anillos de crecimientos en la sección transversal presentaban mayores esfuerzos, pero en los módulos de elasticidad no se observó ninguna tendencia ni tampoco alguna relación con los cambios físicos de muestra a muestra, esto se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 22. Muestras ensayo a tensión paralela a las fibras

	# ANILLOS DE CRECIMIENTO	ESFUERZO MÁXIMO KN/cm ²	MÓDULO DE ELASTICIDAD KN/cm ²
muestra 1	4	18,691	413,1
muestra 2	6	18,708	381,3
muestra 3	4	17,641	385,3
muestra 4	6	18,87	467,4
muestra 5	9	22,427	427,1
muestra 6	11	19,023	415,1

En general se puede decir que las muestras tienen la misma tendencia (ver gráfica 50) y que se obtuvieron valores grandes de esfuerzo a estas condiciones en comparación con los esfuerzos máximos a compresión.

Gráfico 50. Tensión paralela a las fibras muestras de ensayo



Datos del ensayo

Numero de muestras: 6

%Contenido de humedad: 10,677%

Dimensión de muestras: según ASTM D143-09¹⁸

Resultados del ensayo

Esfuerzo máximo de tensión paralela a las fibras

- Esfuerzo promedio 19,227 KN/cm²
- Desviación estándar 1,641 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [17,504 – 20,950] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,987 – 4,027] KN/cm²

¹⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for small clear specimens of Timber. ASTM D143-09.USA, 2009.

Módulo de elasticidad de tensión paralela a las fibras

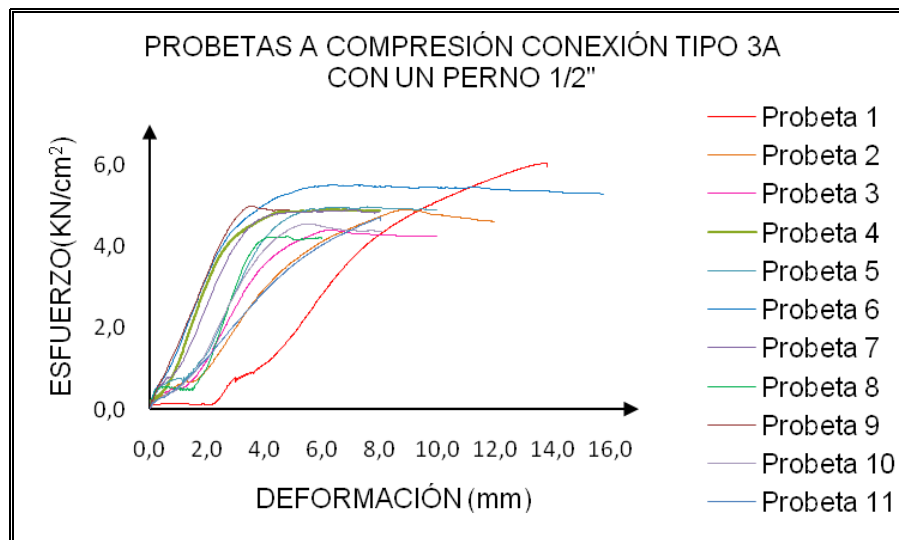
- Módulo de elasticidad promedio 414,88 KN/cm²
- Desviación estándar 31,38 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [381,986 - 447,781] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [18,847- 76,894] KN/cm²

5.5 RESISTENCIA DE LA CONEXIÓN TIPO 3A CON UN PERNO DE 1/2" A FUERZAS AXIALES

5.5.1 Resistencia a compresión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

En la gráfica se observa una primera zona en la cual se presentó el acomodamiento de las probetas, después de esto mostraron una tendencia similar.

Gráfico 51. Compresión de probetas de la conexión tipo 3A con perno de 1/2"



Datos del ensayo

Numero de probetas: 11

%Contenido de humedad: 10,677%

Resultados del ensayo

Esfuerzo máximo a compresión para un perno de 1/2 " en la conexión tipo 3A

- Esfuerzo promedio 4,92 KN/cm²
- Desviación estándar 0,502 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [4,284 – 5,556] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,302 – 1,230] KN/cm²

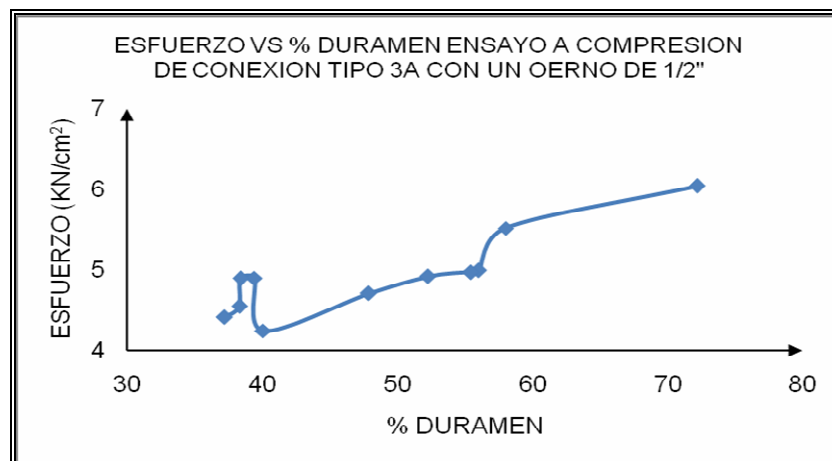
Si se ordenan los valores de esfuerzo de cada probeta de acuerdo a su porcentaje de duramen, se puede ver que éste afecta claramente el valor del esfuerzo último siendo directamente proporcionales (ver tabla 23)

Tabla 23. Variación del esfuerzo con respecto al duramen

% Duramen	Esfuerzo Máximo KN/cm ²
72	6,037
58	5,514
56	4,991
55	4,968
52	4,917
48	4,703
40	4,244
39	4,895
38	4,892
38	4,547
37	4,408

Si se hace una grafica de esfuerzo vs % duramen se observa que existe la relación, pero no una tendencia clara del comportamiento con este número de probetas.

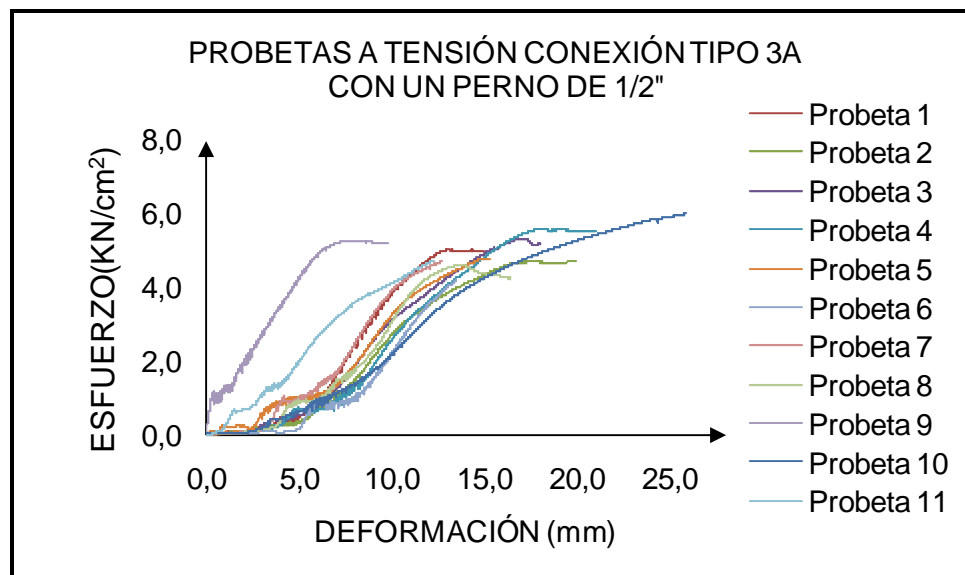
Gráfico 52. Esfuerzo Vs % duramen ensayo a compresión de conexión tipo 3A con un perno de 1/2"



5.5.2 Resistencia a tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2"

Al igual que las graficas del ensayo a compresión estas presentaron una zona de acomodamiento pero más larga, esto se debe a que estas probetas tenían tres pernos, los cuales probablemente no estaban paralelos por errores de elaboración de las mismas, además estas presentaron mayores deformaciones para llegar a la falla.

Gráfico 53. Tensión de probetas de la conexión tipo 3A con perno de 1/2"



Datos del ensayo

Numero de muestras: 11

%Contenido de humedad: 10,677%

Resultados del ensayo

Esfuerzo máximo a tensión para un perno de 1/2 " en la conexión tipo 3A

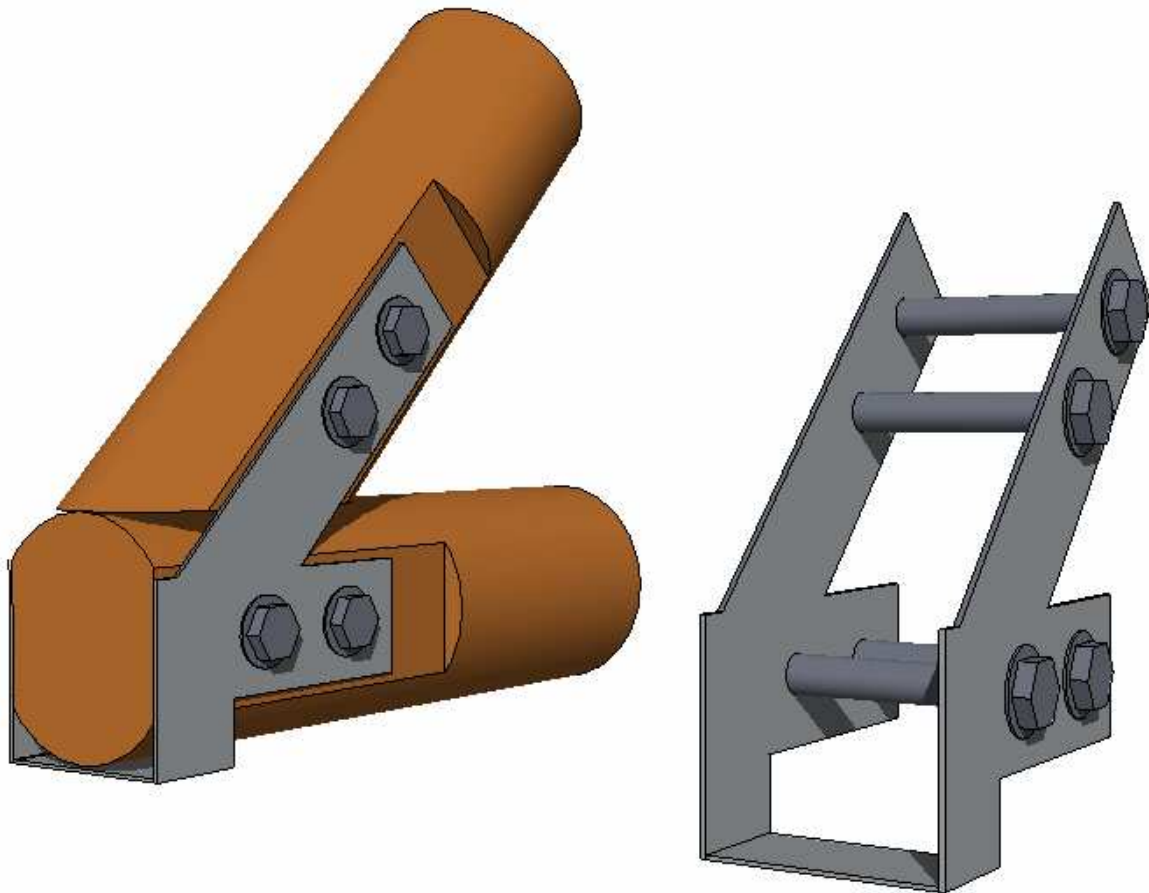
- Esfuerzo promedio 4,974 KN/cm²
- Desviación estándar 0,507 KN/cm²
- Intervalo de confianza para la media [4,331 – 5,617] KN/cm²
- Intervalo de confianza para la desviación estándar [0,305 – 1,244] KN/cm²

En este caso no se vio afectados los resultados del ensayo por el porcentaje de duramen contenido en cada probeta, es decir la cantidad de duramen en una conexión a tensión no influye en su resistencia.

5.6 EVALUACIÓN DE CERCHA EN LABORATORIO – APLICACIÓN DE LA CONEXIÓN TIPO 3A

En el ensayo se presentó un problema en los apoyos de la cercha, ya que las reacciones de éstos no se transmitieron a las platinas si no a la madera, es por esto que se propone una solución para la conexión de los apoyos la cual se puede ver en la siguiente figura:

Figura 80. Conexión tipo 3A para los apoyos



Esta conexión en los apoyos impide el giro de las platinas que fue lo que sucedió en el ensayo, además evita el aplastamiento de la madera en los puntos de descanso y sirve como punto de anclaje en los muros.

En este sistema se debe garantizar que las fuerzas sean concéntricas y colocar como mínimo dos pernos en línea, ya que esto también ayuda a evitar el giro si se genera excentricidad de las fuerzas en el nodo.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La humedad de la madera en esta investigación fue la de una madera seca al aire lo que se comprobó con el ensayo de humedad, del cual se obtuvo como resultado 10,66%, que según el título G de la NSR-10 se clasifica como madera seca.

La densidad de la madera fue de $0,677\text{gr/cm}^3$ que según la NSR-10 se clasifica como madera tipo B y comparándola con la ficha técnica de la universidad Nacional de Colombia en la cual es de $0,61\text{ gr/cm}^3$, se puede deducir que la madera es un material que cambia de acuerdo a muchos factores, tales como el clima, la zona de crecimiento, el seguimiento, tipo de cultivo, entre otros. Por esto se considera que el valor hallado se puede tomar como referencia para la zona de donde se obtuvieron las muestras, es decir, la zona Antioqueña colombiana.

De acuerdo a lo anterior se concluye que al ser mayor la densidad encontrada, es lógico que la resistencia a la compresión paralela a las fibras de la madera teca estudiada también lo fuera. De los ensayos se obtuvo como resultado un esfuerzo a compresión máximo de $5,247\text{ KN/cm}^2$, un valor alto comparado con los $3,36\text{ KN/cm}^2$ que proporciona la ficha técnica de la universidad nacional de Colombia. Con esto se ratifica que la madera es un material que no se le puede generalizar sus propiedades.

Al igual que otros tipos de maderas, la teca obtuvo esfuerzos máximos a tensión mucho mayores que a los de compresión, siendo estos valores de $19,277$ y $5,247\text{ KN/cm}^2$ respectivamente, con los que se indica que es aproximadamente 3,5 veces mayor. Sabiendo esto se puede concluir que es difícil que un elemento de este tipo falle por resistencia del material, por lo que se debe enfocar en el diseño de la conexión.

De los esfuerzos máximos que se encontraron en el ensayo de un perno de $\frac{1}{2}$ " a compresión y tensión en madera teca rolliza de pequeños diámetros, se observa que fueron bastante similares los resultados de $4,92$ y $4,97\text{ KN/cm}^2$, lo que indica que la

distancia mínima al borde en elementos a tensión garantiza la igualdad con la compresión, es por eso que se supone que la tabla G.6.13-3 de la NSR 10, solo da un valor de resistencia de pernos en doble cizallamiento sin discriminar el tipo de carga del elemento. De acuerdo a la norma la carga admisible para fuerzas paralelas a las fibras de una madera tipo B, para un perno en doble cizallamiento de $\frac{1}{2}$ " y 10 cm de largo es de 4330 KN, es decir un esfuerzo de $0,34 \text{ KN/cm}^2$, el cual es aproximadamente 14 veces menor que el valor encontrado en este estudio. También se observó una tendencia al aumento de resistencia en esta conexión a compresión en relación con el porcentaje de duramen contenido en las pobretas, mientras que para tensión no.

En una cercha construida con este material la limitante de resistencia de carga de la misma se ve afectada por los elementos en compresión debido al pandeo, ya que por conexión tanto en tensión como en compresión el tipo de conexión estudiada presenta gran resistencia con pocos elementos de unión, por lo que se recomienda al tener este problema colocar en las estructuras elementos de apoyo intermedios para crear una restricción lateral que impida este fenómeno en dichos elementos.

En el proceso constructivo es muy importante que los cortes y perforaciones hechas tanto en las rollizas como en las platinas sean lo más precisas posible, para que en el momento de ensamblarlos las caras queden bien enfrentadas y los pernos estén perpendiculares a los elementos ya que esto le dará mayor estabilidad a la estructura. Además se debe garantizar que en los nodos las fuerzas sean concéntricas, es decir que los cortes y perforaciones queden axialmente alineados con las platinas.

Si se quiere realizar una cercha con este tipo de madera, es decir con diámetros promedio de 9 cm, la resistencia de los elementos a tensión están por el orden de los 1200 KN, mientras los de compresión 270 KN, esto si se considera como columna corta la cual debe tener una longitud menor a 70 cm de acuerdo a su esbeltez, si se tiene una longitud mayor se reducirá su resistencia debido al pandeo. Por ejemplo si se aumenta la longitud a 100 cm su resistencia baja considerablemente a de 270 a 79 KN. De

acuerdo a esto se puede decir que los elementos críticos de una cercha realizada con esta madera de estudio son los sometidos a compresión debido a su baja resistencia comparada a los de tensión.

Se recomienda que en investigaciones posteriores se estudie y realice ensayos en las conexiones de cerchas a escala real, enfocándose principalmente en los apoyos. A pesar de que el ensayo de la cercha no presentó los resultados esperados, se puede tomar como experiencia para un nuevo estudio donde se modifique el sistema de unión de los apoyos por la propuesta en este trabajo.

En el mercado aun no existe una maquina que realice los desbastes de las rollizas para este tipo de conexión, de tal forma que se genere mayor precisión y estética de la estructura final, esto se puede idear y llevar a cabo como parte adicional a esta investigación si se quiere llevar a niveles industrializados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for small clear specimens of Timber. ASTM D143-09.USA, 2009.
- [2] ----- . Standard Test Methods for evaluating allowable properties for grades of structural lumber. ASTM D2915-03 .USA, 2003.
- [3] ----- . Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials. ASTM D2395-07 .USA, 2007.
- [4] ----- . Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material. ASTM D4761-05 .USA, 2005.
- [5] ----- . Standard Practice for Sampling Forest Trees for Determination of Clear Wood Properties. ASTM D5536-94 .USA, 1994.
- [6] ----- . Standard Test Methods for Bolted Connections in Wood and Wood-Based Products. ASTM D5652-95.USA, 1995.
- [7] ----- . Standard Test Methods for Direct moisture content measurement of wood and wood-Base Materials. ASTM D4442-07.USA, 2007.
- [8] ----- . Standard test methods of static test of lumber in structural sizes. ASTM D198-09. USA, 2009.
- [9] ----- .Standard Practice for Probability sampling of materials. ASTM E105-04. USA, 2004.

- [10]** ALPO RANT – MAUNUS. Round small-diameter for construction. FINLAND. Technical research centre of Finland, 1999.
- [11]** AL-KHATTAT, Ibrahim. Light prestressed segmented arch (LPSA) bridges: A demonstration of sustainable engineering. USA. Structural Engineering International, Research article, 2008.
- [12]** BROUGHTON, J.G. And HUTCHINSON, A.R. Adhesive systems for structural connections in timber. UK. Joining Technology Research Centre and Oxford Brookes University. Oxford, 2001.
- [13]** CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA. Manual-La construcción de vivienda en madera. Chile. Corporación Chilena de la Madera.
- [14]** DE VRIES, Peter A. and GARD, Wolfgang F. Small diameter round wood observation tower. Netherlands. Delf University Technology.
- [15]** ECKELMAN, .A. and SENFT, J.F. Truss system for developing countries using small diameter round wood and dowel nut construction. USA: Purdue University.
- [16]** GOMEZ, Antonio Maria. Conferencia de concreto I, primera parte. Colombia: .Universidad la Gran Colombia y Universidad Nacional de Colombia.
- [17]** GOTTSTEIN, J. W. Use of plantation hardwood thinnings as roundwood in construction. Australian. The National Educational Trust of the Australian Forest Products Industry, 1999.
- [18]** GOVAERE, Georges; CARPIO, Isabel y CRUZ, Luis. Descripción anatómica, durabilidad y propiedades físicas y mecánicas de Tectona Grandis. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

- [19]** GUTIERREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. México: Centro de Investigación de Matemáticas – Guanajuato, Centro universitario de ciencias exactas e ingenierías y Universidad de Guadalajara.
- [20]** JUMAAT, Zamin and MURTY Bona. Yield Load prediction of timber joints using nail diameter and timber specific gravity. Malaya: University of Malaya, 2008.
- [21]** JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA. Manual de diseño para maderas del Grupo Andino.3a.Edición Preliminar. Lima, Peru.PADT-REFORT, 1984.
- [22]** KEI, Sawata; SASAKI, Takanobu; DOI, Shuichi and LIJIMA, Yasuo. Effect of decay on shear performance of dowel-type timber joints. Japan. The Japan Wood Research Society, 2008.
- [23]** KERMANI, Abdy. Structural timber design. Edinburgh: Napier University and Blackwell Science Ltd, 1999.
- [24]** KNAEBE, Mark. Roundwood kiosks: Construction and assembly .USA. Forest Products Laboratory.
- [25]** KUG-BO, Shim; WOLFE, Ronald and BEGEL, Marshall. Nailed mortised-plate connections for small-diameter round timber. USA: Forest Products Laboratory and KOREA: Korea Forestry Research Institute.
- [26]** ----- . Powder-driven-nail connections for round timber. USA: Forest Products Laboratory and KOREA: Korea Forestry Research Institute.

- [27]** NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10. Edificaciones de Madera. Titulo G. Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- [28]** ----- . Estructuras metálicas. Titulo F. Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- [29]** OTERO CHANS, Dolores; ESTEVEZ CIMADEVILA, Javier and GUTIERREZ, Emilio Martin. Influence of the geometric and material characteristics on the strength of glued joints made in chestnut timber. España: University of Coruña, 2008.
- [30]** PORTEOUS, Jack and KERMANI, Abdy. Structural timber design to Eurocode 5. Blackwell Science Ltd, 2007.
- [31]** SALAZAR CONTRERAS, Jaime. Determinación de la resistencia y parámetros elásticos de Maderas colombianas .Colombia.
- [32]** SAWATA, Kei and YASUMAURA Motoi. Estimation of yield strengths of bolted timber joints by nonlinear analysis and yield theory. Japan: Shizuoka University, 2003.
- [33]** SENA. Seminario sobre: Secado de la Madera. Medellín-Colombia, 1987. Pagina web: www.lablaa.org/blaavirtual/ciencias/sena/carpinteria/madera/madera2c.htm
- [34]** THÉPAUT, Rémi and HISLOP, Patrick. Round timber in construction: An introduction.UK. Forestry Commission, 2003.
- [35]** UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Wood as an engineering material. USA. Forest Products Laboratory.

- [36]** UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Ficha técnica Madera teca. Medellín-Colombia. Laboratorio de productos forestales, 1993.
Pagina web: <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Teca.pdf>
- [37]** VARGAS ARANGUA, Raúl Andrés. Diseño y ensayo de uniones para cercha de madera. Valdivia- Chile: Universidad Austral de Chile ,2003.
- [38]** VISCARRA, Silverio. Guía Para el secado de la madera en hornos. Bolivia. Proyecto de Manejo forestal Sostenible BOLFOR.
- [39]** WOLFE, Ronald W., GJINOLLI, Agron E. and KING, John R. Dowel-nut connection in Douglas-fir peeler cores.USA. United States Department of Agriculture, 2000.
- [40]** -----Space - frame connection for small-diameter round timber. USA. Forest Products Laboratory.
- [41]** <http://www.eltecal.com/Usos.html>

ANEXO A

PROPUESTA DE ENSAYO CERCHA TIPO W A ESCALA REAL

CONTENIDO

	Pág.
1. PROPUESTA DE ENSAYO CERCHA TIPO W A ESCALA REAL.....	202
1.1 CÁLCULO DE LA CARGA APLICADA A LA CERCHA.....	202
1.1.1 Peso propio de los elementos.....	202
1.1.2. Carga máxima de la cercha.....	203
1.1.2.1 Carga elementos en función de la carga P.....	204
1.1.2.2 Resistencia ultima de los elementos.....	208
1.1.3 Carga en los elementos y número de pernos.....	211
1.1.4 Diseño de platinas.....	213
1.1.4.1 Platina cercha tipo 1.....	213
1.1.4.2 Platina cercha tipo 2.....	215
1.1.4.3 Platina cercha tipo 3.....	217
1.1.4.4 Platina cercha tipo 4.....	218
1.2 DISEÑO DE ENSAYO.....	220
1.2.1 Cercha actuadora.....	220
1.2.1.1 Dimensionamiento.....	220
1.2.1.2 Carga en los elementos.....	224
1.2.1.3 Diseño de elementos.....	225
1.3 ENSAYO.....	228

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Elementos cercha W.....	203
Tabla 2. Resistencia de pernos de 1/2" por línea conexión tipo 3A para h=8,5 cm....	212
Tabla 3. Carga y numero de pernos en elementos de la cercha tipo W.....	212
Tabla 4. Carga de los elementos de la cercha actuadora.....	225

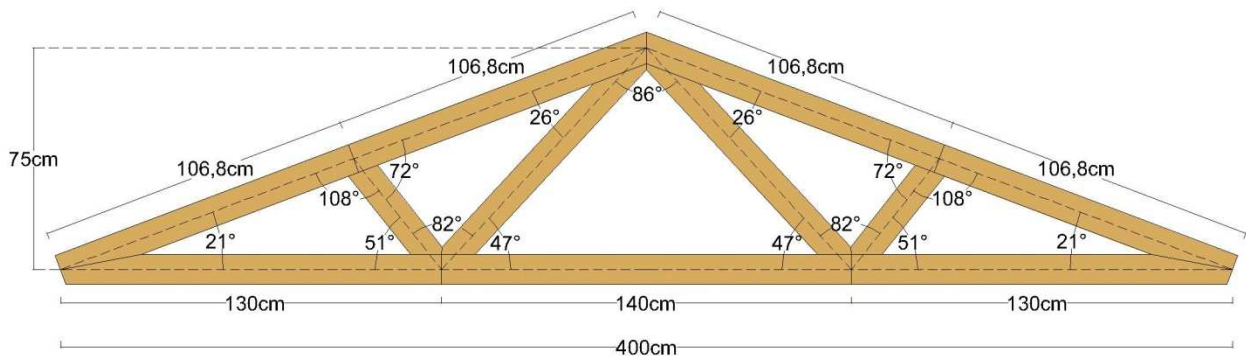
LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Dimensiones de la cercha W.....	202
Figura 2. Diagrama de cuerpo libre cercha tipo W.....	204
Figura 3. Desbaste del elemento para conexión tipo 3A.....	211
Figura 4. Platinas cercha de estudio con conexión tipo 3A.....	213
Figura 5. Platina cercha tipo 1.....	214
Figura 6. Platina cercha tipo 2.....	216
Figura 7. Platina cercha tipo 3.....	217
Figura 8. Platina cercha tipo 4.....	219
Figura 9. Cercha actuadora ensayo cercha tipo W.....	221
Figura 10. D.C.L. Cercha actuadora ensayo cercha tipo W.....	222
Figura 11 Sección transversal elementos cercha actuadora.....	226
Figura 12. Cercha tipo W con madera teca rolliza sin ensamblar.....	229
Figura 13. Ensayo cercha.....	229

1. PROPUESTA DE ENSAYO CERCHA TIPO W A ESCALA REAL

Esta propuesta pretende evaluar una cercha tipo W de 4m de luz (ver figura 1), con elementos de madera teca rolliza de diámetros promedio entre 9 y 10,83 cm, y un contenido de humedad de 10,663 %.

Figura 1. Dimensiones de la cercha W



1.1 CÁLCULO DE LA CARGA APLICADA A LA CERCHA

Se quiere encontrar la máxima carga que puede soportar esta cercha optimizando las conexiones de tal manera que ésta falle por resistencia de los elementos.

1.1.1 Peso propio de los elementos

De acuerdo a la densidad hallada en el numeral 2.2 la cual fue de 0,677 gr/cm³ se obtuvo los pesos de cada elemento de acuerdo a su sección transversal y su longitud, esto se muestra en la tabla 1.

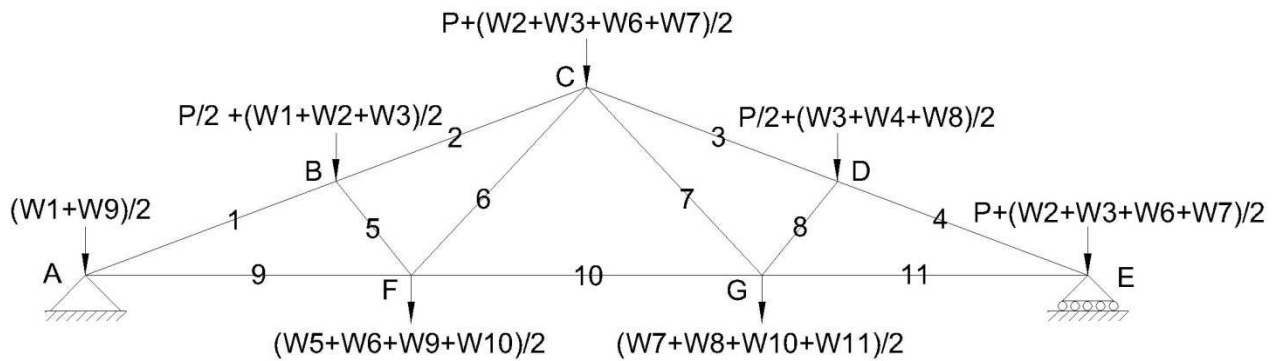
Tabla 1. Elementos cercha W

ELEMENTO	D Prom. cm	LONGITUD cm	PESO KN
1	9	106,8	0,046
2	9,83	106,8	0,055
3	9,75	106,8	0,054
4	10,83	106,8	0,067
5	8,5	42,02	0,016
6	8,75	102,59	0,042
7	9,25	102,59	0,047
8	9,5	42,02	0,02
9	10	130	0,069
10	10,25	140	0,078
11	9,17	130	0,058
Total			0,552

1.1.2. Carga máxima de la cercha

Para la determinación de las fuerzas axiales en los elementos, las cargas distribuidas en los pares o tirantes se consideraron como cargas puntuales equivalentes aplicadas en los nudos correspondientes (NSR 10 G.8.1.2), es decir, las cargas distribuidas sobre los elementos se aplicaron como cargas puntuales en los nodos B, C y D como se muestra en la figura 2, además de los pesos propios W de los elementos.

Figura 2. Diagrama de cuerpo libre cercha tipo W



1.1.2.1 Carga elementos en función de la carga P

Debido a que la cercha y las cargas sobre ésta son simétricas y que no existen fuerzas horizontales, se puede decir que las reacciones de los apoyos son iguales y su valor es la mitad de las cargas puntuales y el peso propio total de la cercha, entonces:

$$A_y = E_y = P + 0,277$$

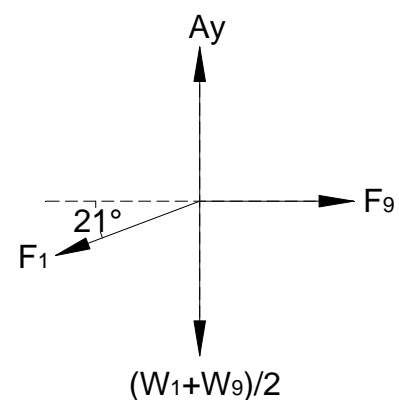
Analizando nodo a nodo de la cercha se obtiene que:

Nodo A

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y - \frac{W_1 + W_9}{2} - F_1 \text{sen}(21^\circ) = 0$$

$$\Rightarrow F_1 = 2,79P + 1,384$$



$$\sum F_x = -F_1 \cos(21^\circ) + F_9 = 0$$

$$\Rightarrow F_9 = 2,60P + 1,292$$

Nodo B

$$\sum F_y = 0$$

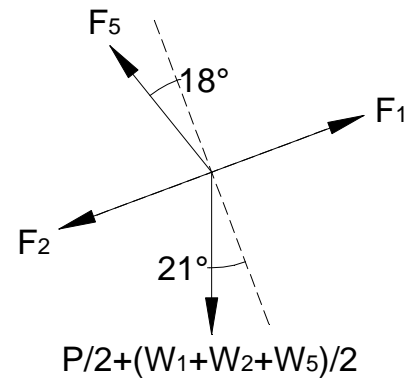
$$F_5 \cos(18^\circ) - \left(\frac{P}{2} + \frac{W_1 + W_2 + W_5}{2} \right) \cos(21^\circ) = 0$$

$$\Rightarrow F_5 = 0,49P + 0,058$$

$$\sum F_x = 0$$

$$F_1 - F_2 - F_5 \sin(18^\circ) - \left(\frac{P}{2} + \frac{W_1 + W_2 + W_5}{2} \right) \sin(21^\circ) = 0$$

$$\Rightarrow F_2 = 2,46P + 1,346$$



Nodo F

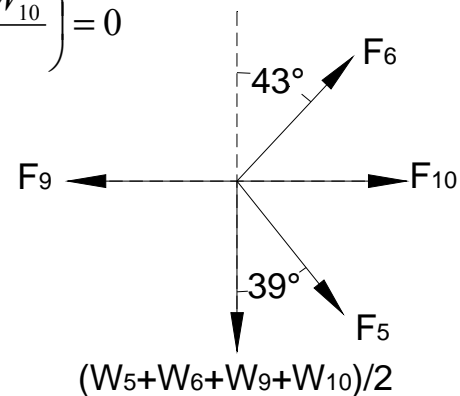
$$\sum F_y = 0$$

$$F_6 \cos(43^\circ) - F_5 \cos(39^\circ) - \left(\frac{W_5 + W_6 + W_9 + W_{10}}{2} \right) = 0$$

$$\Rightarrow F_6 = 0,52P + 0,202$$

$$\sum F_x = 0$$

$$F_6 \sin(43^\circ) + F_5 \sin(39^\circ) + F_{10} - F_9 = 0$$



$$\Rightarrow F_{10} = 1,94P + 1,118$$

Nodo E

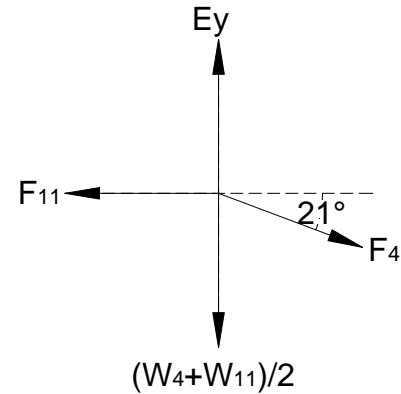
$$\sum F_y = 0$$

$$E_y - \frac{W_4 + W_{11}}{2} - F_4 \text{ sen}(21^\circ) = 0$$

$$\Rightarrow F_4 = 2,79P + 1,372$$

$$\sum F_x = F_4 \cos(21^\circ) - F_{11} = 0$$

$$\Rightarrow F_{11} = 2,60P + 1,282$$



Nodo D

$$\sum F_y = 0$$

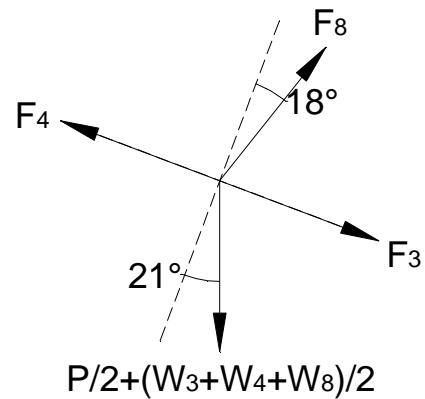
$$F_8 \cos(18^\circ) - \left(\frac{P}{2} + \frac{W_3 + W_4 + W_8}{2} \right) \cos(21^\circ) = 0$$

$$\Rightarrow F_8 = 0,49P + 0,068$$

$$\sum F_x = 0$$

$$F_3 - F_4 + F_8 \text{ sen}(18^\circ) + \left(\frac{P}{2} + \frac{W_3 + W_4 + W_8}{2} \right) \text{ sen}(21^\circ) = 0$$

$$\Rightarrow F_3 = 2,46P + 1,326$$



Nodo G

$$\sum Fy = 0$$

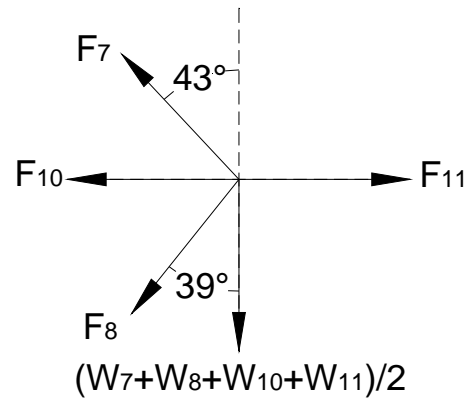
$$F_7 \cos(43^\circ) - F_8 \cos(39^\circ) - \left(\frac{W_7 + W_8 + W_{10} + W_{11}}{2} \right) = 0$$

$$\Rightarrow F_7 = 0,52P + 0,212$$

$$\sum Fx = 0$$

$$-F_7 \operatorname{sen}(43^\circ) - F_8 \operatorname{sen}(39^\circ) + F_{11} - F_{10} = 0$$

$$\Rightarrow F_{10} = 1,94P + 1,092$$



Nodo D (nodo de prueba de cierre)

$$\sum Fy = 0$$

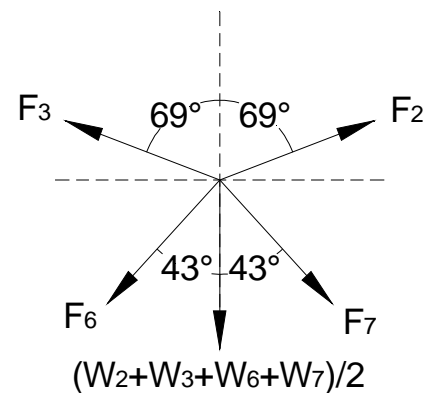
$$(F_2 + F_3) \cos(69^\circ) - (F_7 + F_6) \cos(43^\circ) - \left(\frac{W_2 + W_3 + W_6 + W_7}{2} \right) = 0$$

$$\Rightarrow 0 = 0$$

$$\sum Fx = 0$$

$$(F_2 - F_3) \operatorname{sen}(69^\circ) + (F_7 - F_6) \operatorname{sen}(43^\circ) = 0$$

$$\Rightarrow 0 = 0$$



1.1.2.2 Resistencia ultima de los elementos

Elementos sometidos a compresión

Los elementos sometidos a compresión son los 1, 2, 3, 4, 5 y 8 y como se sabe los elementos a compresión tienden a fallar por pandeo, es decir los de mayor longitud van a ser los más críticos, de acuerdo a esto son el 1, 2, 3 y 4 que tienen igual longitud, pero el elemento 1 es el que tiene menor área transversal, ya que es el de menor diámetro promedio y debido a esto es el elemento que se analizara a continuación.

Primero se halla la esbeltez, que para elementos circulares macizos es:

$$\lambda = \frac{le}{d} \quad [\text{NSR 10 G.4.3-4}]$$

Donde d es el diámetro del elemento y le es la longitud efectiva que se calcula con la formula:

$$le = K lu \quad [\text{NSR 10 G.4.3-1}]$$

Donde K que es el coeficiente de longitud efectiva, que para elementos articulados en ambos extremos K es igual a 1 y lu es la longitud no soportada lateralmente en la dirección considerada.

$$le = K lu = 1 \times 106,8 = 106,8 \text{ cm}$$

Entonces la esbeltez es:

$$\lambda = \frac{le}{d} = \frac{106,8}{9} = 11,87$$

Ahora se evaluara que tipo de columna es, ya que puede ser corta, intermedia o larga, para esto se debe encontrar C_k que es la relación de esbeltez para la cual la columna tiene una carga admisible se $2/3 F'c$ An el cual se calcula con la formula:

$$C_k = 0,7025 \sqrt{\frac{E}{F'c}} \quad [\text{NSR 10 G.4.3-3}]$$

El módulo de elasticidad y el esfuerzo admisible en compresión paralelo a las fibras fueron los encontrados en el numeral 2.3 los cuales son 621,75 y 5,247 KN/cm² respectivamente.

$$C_k = 0,7025 \sqrt{\frac{621,75}{5,247}} = 7,65$$

Con esto se puede decir que el elemento se considera como una columna larga que se encuentra en la siguiente desigualdad:

$$C_k < \lambda < 50 \quad [\text{NSR 10 G.4.3.2.2}]$$

Y se aplica la carga admisible para columnas largas con sección circular:

$$N_{adm} = 0,2467 \frac{E A}{\lambda^2} \quad [\text{NSR 10 G.4.3-9}]$$

$$N_{adm} = 0,2467 \frac{621,75 \times (\pi \times 9^2 / 4)}{11,87^2} = 69,25 \text{ KN}$$

Entonces se ve que el elemento a compresión puede resistir una carga admisible de 69,25 KN y al ser este el elemento crítico se convierte en la carga máxima soportada por todos los elementos en compresión de la cercha.

Elementos sometidos a tensión

Estos son los elementos 6, 7, 9, 10, y 11 además como se sabe la limitante de estos es el área de la sección transversal, es decir, el elemento crítico es que el que tenga menor diámetro promedio, en este caso es el elemento 6 con 8,75 cm de diámetro promedio y su resistencia es dada por la siguiente fórmula:

$$N = F'_t A_n \quad [\text{NSR 10 G.4.2-1}]$$

Donde F'_t es el esfuerzo a tensión que se halló en el numeral 2.4 el cual es de 19,227 KN/cm² y A_n es el área neta de la sección transversal, es decir, el área total de la sección transversal menos el área transversal que genera el orificio, que para pernos de 1/2" es de 1,4 cm, entonces A_n es aproximadamente 47 cm². Teniendo esto se puede obtener la resistencia máxima de este elemento a tensión:

$$N = 19,227 \times 47 = 903,7 \text{ KN}$$

Se comparan las resistencias de los elementos en compresión y tensión y como se puede observar la resistencia de los elementos en compresión fue mucho menor, aproximadamente 13 veces menos con una carga de 69,25 KN.

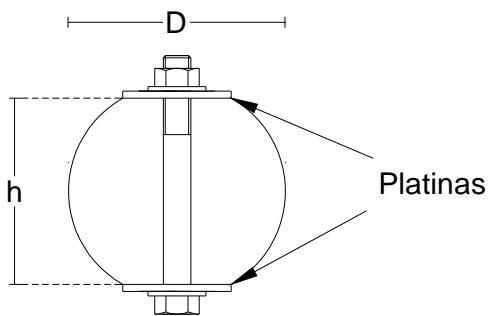
Entonces se puede concluir que la cercha fallara cuando el elemento más crítico falle, que en este caso es el elemento 1, del cual se obtuvo la ecuación de la fuerza axial en función de la carga P en el numeral 1.1.2.1 donde se puede calcular igualando la carga del elemento con la carga mencionada de esta manera:

$$F_1 = 2,79P + 1,384 \quad \Rightarrow \quad P = \frac{F_1 - 1,384}{2,79} = \frac{69,25 - 1,384}{2,79} = 24,3 \text{ KN}$$

1.1.3 Carga en los elementos y número de pernos

Teniendo en cuenta que esta cercha se realizará con conexiones tipo 3A, requerirá de desbaste en los extremos de los elementos, obteniéndose una distancia h entre las platinas de una misma conexión, en este caso h es aproximadamente 8,5 cm para todos los elementos, la cual se muestra en la figura siguiente:

Figura 3. Desbaste del elemento para conexión tipo 3A



De acuerdo a esto y a los esfuerzos máximos a compresión y tensión de la conexión tipo 3A con un perno de 1/2" halladas en los numerales 3.2.3 y 3.3.3 respectivamente, se obtiene la resistencia del perno a estas solicitaciones. Además basándose en los coeficientes de reducción de la tabla G.6.3-2 de la NSR 10 para número de pernos en línea en uniones con elementos de acero, se obtiene la siguiente tabla.

Tabla 2. Resistencia de pernos de 1/2" por línea conexión tipo 3A para h=8,5 cm

CONEXIÓN TIPO 3A PARA h=8,5 cm	NUMERO DE PERNOS DE 1/2 " POR LÍNEA			
	1	2	3	4
Resistencia a compresión (KN)	45,12	90,25	124,54	151,61
Resistencia a tensión (KN)	53,59	107,17	147,90	180,05

La carga P a la cual la cercha teóricamente fallara es de 24,3 KN, a continuación se procede a remplazarla en las ecuaciones de carga de cada elemento que están en función de ésta halladas en el numeral 1.1.2.1, con estos valores y con la resistencia de los pernos en línea se puede saber cuántos de ellos requiere cada elemento, esto se muestra en la siguiente tabla.

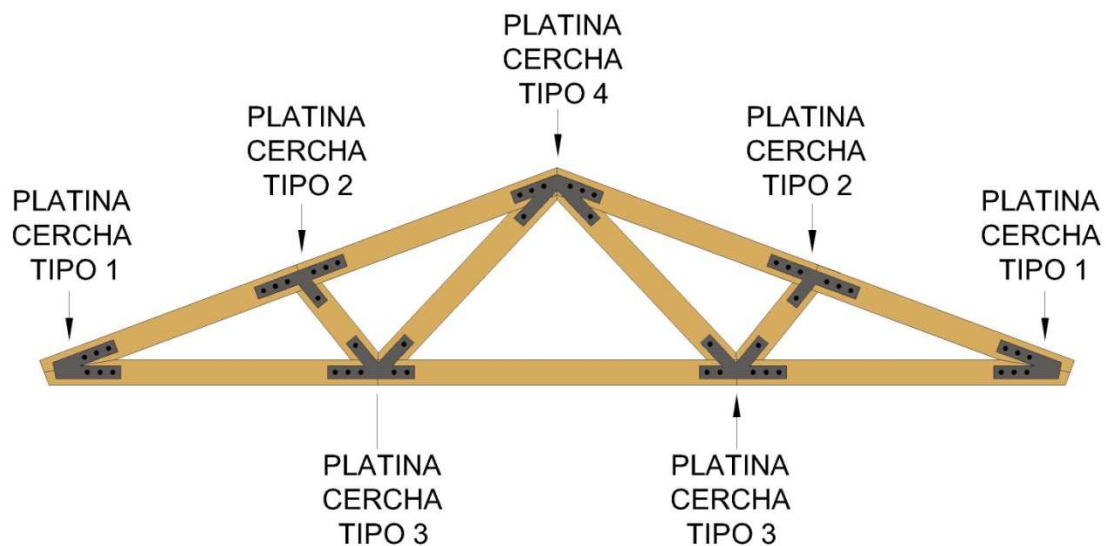
Tabla 3. Carga y numero de pernos en elementos de la cercha tipo W

ELEMENTO	SOLICITUD	CARGA AXIAL KN	# PERNOS 1/2"
1	Compresión	69,2	2
2	Compresión	61,1	2
3	Compresión	61,1	2
4	Compresión	69,2	2
5	Compresión	12,0	1
6	Tensión	12,8	1
7	Tensión	12,8	1
8	Compresión	12,0	1
9	Tensión	64,5	2
10	Tensión	48,3	1
11	Tensión	64,5	2

1.1.4 Diseño de platinas

En la figura siguiente se muestran las platinas conectoras necesarias para la realización de la cercha, éstas se dimensionaron de acuerdo a la ubicación de pernos en la madera y a las distancias mínimas a los bordes en la platina.

Figura 4. Platinas cercha de estudio con conexión tipo 3A



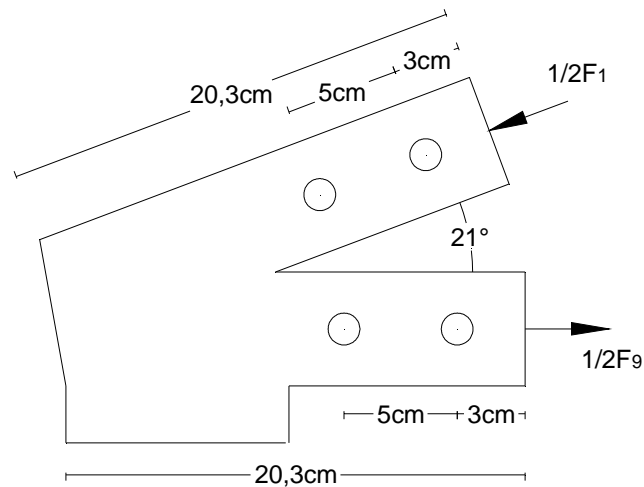
1.1.4.1 Platina cercha tipo 1

Esta platina tiene las dimensiones mostradas en la figura 5, ahora se debe buscar un espesor que cumpla con las cargas solicitadas.

Primero se analizará el segmento de platina que conecta el elemento 1 o 4, el cual se encuentra a compresión, si se asume este elemento como columna corta de 3 cm de longitud, espesor de 4 mm y acero A-36 ($F_y=253$ MPa; $F_u=408$ MPa), y analizándola en

la dirección más crítica que es la paralela al espesor, usando el mismo procedimiento hecho para el diseño de platinas del ensayo a compresión de la conexión tipo 3A se tiene que:

Figura 5. Platina cercha tipo 1



$$A_g = 200 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_c = 0,235$$

$$I = 266,67 \text{ mm}^4$$

$$F_{cr} = 247,204 \text{ MPa}$$

$$r = 1,154 \text{ mm}$$

$$\phi_c P_n = 42,025 \text{ KN}$$

$$\frac{KL}{r} = 20,78$$

Es decir la platina resiste una carga de 42,02 KN y la carga que se predice en el ensayo es de $\frac{F_1}{2} = 34,6 \text{ KN}$, lo cual cumple.

Ahora con este mismo espesor se analiza el segmento de platina que conecta el elemento 9 o 11, estos se encuentran a tensión con una fuerza de 64,5 KN es decir cada segmento debe resistir por lo menos la mitad de esta carga ya que son dos platinas las que trabajan en conjunto para lo cual se analiza igual que las platinas a tensión del ensayo a tensión de la conexión tipo 3A en donde se tiene en cuenta la carga ultima de fluencia, de fractura por tracción y bloque cortante, entonces se obtiene lo siguiente.

$$\text{Estado limite de fluencia } P_u = 43,36 \text{ KN}$$

$$\text{Estado limite de fractura por tracción } P_u = 45,94 \text{ KN}$$

$$\text{Bloque cortante } \phi R_n = 47,36 \text{ KN}$$

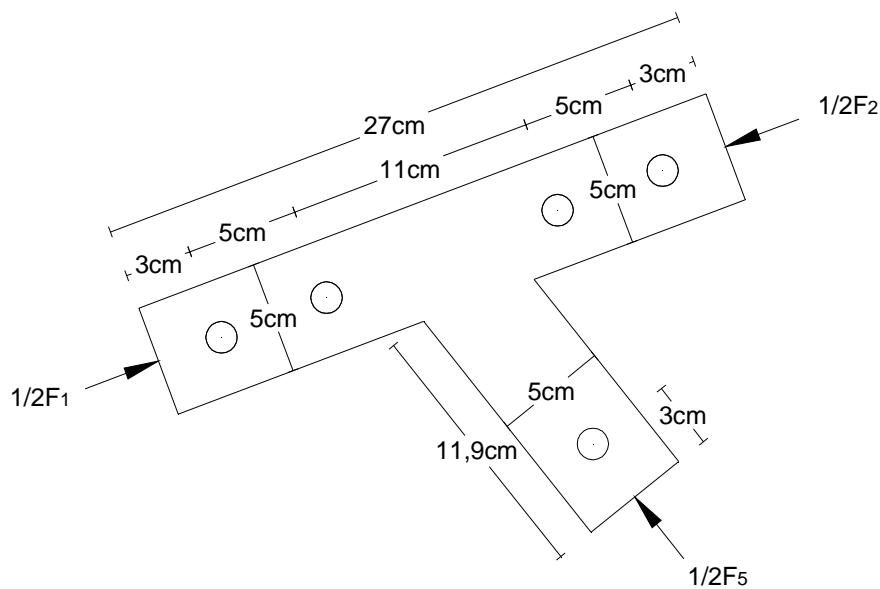
Esto indica que el espesor de 4 mm es lo más conveniente aunque un poco alto, pues no se sabe aun si esta sea la carga que soportaran los elementos de la cercha ya que son valores teóricos.

1.1.4.2 Platina cercha tipo 2

Al igual que la anterior platina se supone el mismo acero pero el espesor de 5 mm ya que los tres elementos que llegan a ella están a compresión, esta platina tiene una mayor longitud lo cual tiende a generar mayor pandeo. Para el chequeo, las dimensiones de este tipo de platina se muestran a continuación:

Al suponer esta platina con la misma sección y sus tres fuerzas concurrentes a compresión, se puede concluir que donde se puede generar mayor pandeo es en el segmento largo de 27 cm el cual se puede idealizar como una columna con distancia entre apoyos articulados de 11 cm, entonces haciendo el respectivo análisis se tiene que:

Figura 6. Platina cercha tipo 2



$$A_g = 250 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_c = 0,862$$

$$I = 520,83 \text{ mm}^4$$

$$F_{cr} = 1785.27 \text{ MPa}$$

$$r = 1,44 \text{ mm}$$

$$\phi_c P_n = 39,36 \text{ KN}$$

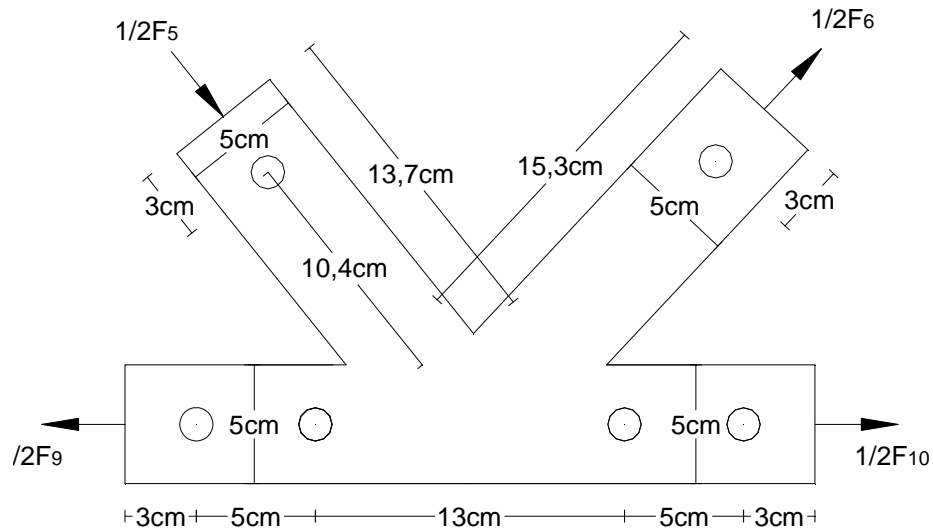
$$\frac{KL}{r} = 76,21$$

Es decir la platina cumple la solitud de carga máxima que es de $\frac{F_1}{2} = 34,6 \text{ KN}$

1.1.4.3 Platina cercha tipo 3

Esta platina para fines prácticos se asume de 5mm y presenta 2 zonas críticas, una es donde llegan los elementos 10 y 11 que se encuentra a tensión y la otra es donde llega el elemento 5 a compresión que se asume como una columna con un apoyo articulado y otro empotrado y una separación de 10,4 cm, haciendo esto se tiene:

Figura 7. Platina cercha tipo 3



Chequeo para elemento en tensión:

$$\text{Estado limite de fluencia } P_u = 56,92 \text{ KN}$$

$$\text{Estado limite de fractura por tracción } P_u = 55,08 \text{ KN}$$

$$\text{Bloque cortante } \phi R_n = 59,63 \text{ KN}$$

Chequeo para elemento en compresión:

$$A_g = 250 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_c = 0,652$$

$$I = 520,83 \text{ mm}^4$$

$$F_{cr} = 1785,27 \text{ MPa}$$

$$r = 1,44 \text{ mm}$$

$$\phi_c P_n = 44,98 \text{ KN}$$

$$\frac{KL}{r} = 57,64$$

Es decir esta platina con estas especificaciones cumplirá las condiciones de carga tanto la de compresión que es de 6 KN como la de tensión que es de 32,22 KN.

1.1.4.4 Platina cercha tipo 4

Debido a la simetría de la platina se puede analizar como dos elementos independientes, como una columna articulada y empotrada en cada extremo

respectivamente, con una separación de 6,4 cm y otro como elemento a tensión. Asumiendo el mismo acero A-36 y espesor de 5 mm se tiene que:

Elemento a compresión:

$$A_g = 250 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_c = 0,401$$

$$I = 520,83 \text{ mm}^4$$

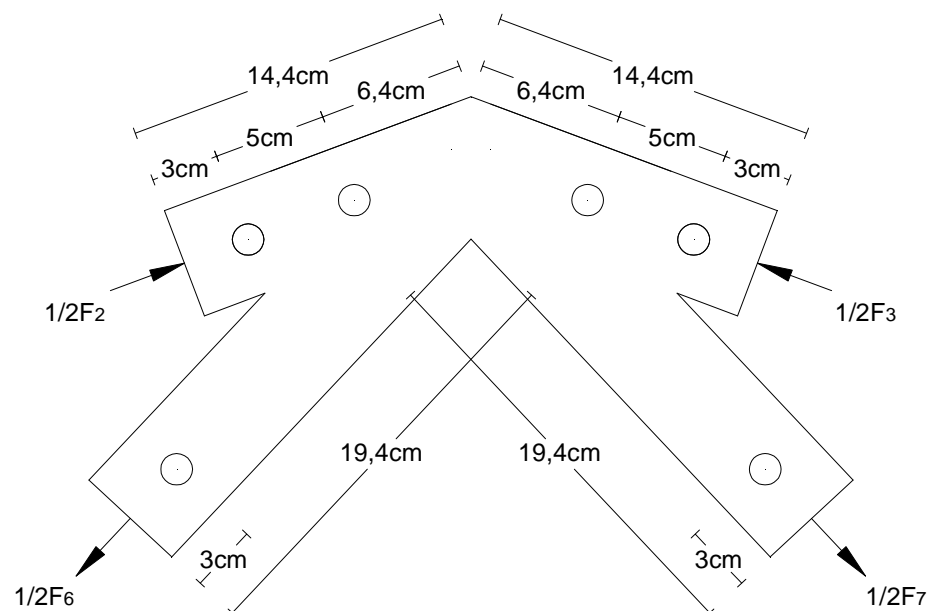
$$F_{cr} = 236,48 \text{ MPa}$$

$$r = 1,44 \text{ mm}$$

$$\phi_c P_n = 50,52 \text{ KN}$$

$$\frac{KL}{r} = 35,47$$

Figura 8. Platina cercha tipo 4



Elemento a tensión

Estado limite de fluencia $P_u = 56,92 \text{ KN}$

Estado limite de fractura por tracción $P_u = 55,08 \text{ KN}$

Bloque cortante $\phi R_n = 56,78 \text{ KN}$

Es decir esta platina con estas especificaciones cumplirá las condiciones de carga tanto la de compresión que es de 34,6 KN como la de tensión que es de 6,4 KN.

1.2 DISEÑO DE ENSAYO

1.2.1 Cercha actuadora

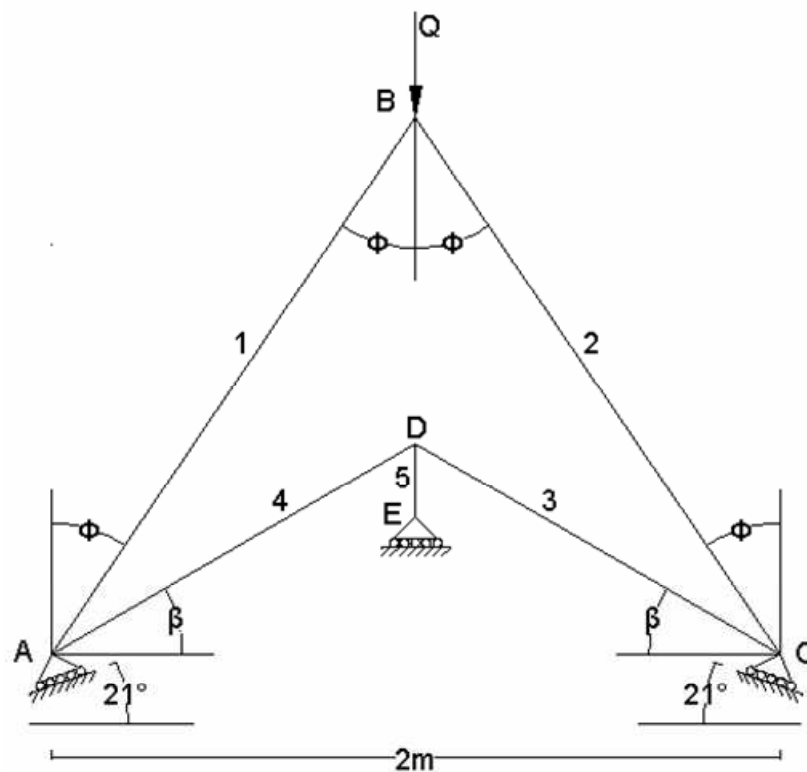
El laboratorio disponible para realizar la prueba a la cercha cuenta con un marco en el que se ubica un actuador, con el cual se debe generar las cargas calculadas sobre la cercha de estudio. Debido a que el actuador transmite la carga a un solo punto, fue necesario diseñar otra cercha que se llamo actuadora ,esta recibe la carga del actuador y la transmite a los nodos B, C Y D de la cercha de estudio, con cargas P/2, P y P/2 respectivamente.

1.2.1.1 Dimensionamiento

Se considera que la mejor forma de lograr este resultado es con una cercha según la figura 84.

En los apoyos A y C se generan reacciones perpendiculares a la cercha que tiene una pendiente de 21° , esto debido a que la cercha actuadora esta simplemente apoyada sobre ella, además se debe garantizar que la componente vertical de las reacciones sea igual a $P/2$, entonces las reacciones en estos apoyos son:

Figura 9. Cercha actuadora ensayo cercha tipo W



Reacción en A:

$$R_A = Ax + Ay = R_A \text{sen}(21^\circ) \hat{i} + R_A \text{cos}(21^\circ) \hat{j}$$

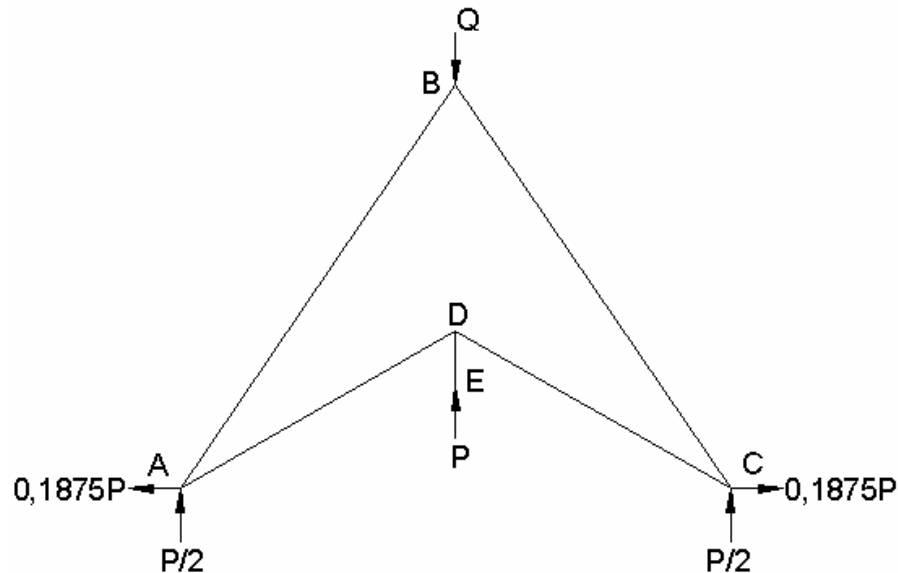
Donde

$$Ay = \frac{P}{2} \Rightarrow R_A = \frac{P}{2 \cos(21^\circ)} = 0,534P$$

$$Ax = R_A \sin(21^\circ) = 0,534P \sin(21^\circ) = 0,1875P$$

Por simetría las reacciones en A son iguales que en C, y en E la reacción que se necesita es P vertical, es decir el diagrama de cuerpo libre de la cercha actuadora queda de la siguiente manera:

Figura 10. D.C.L. Cercha actuadora ensayo cercha tipo W



Si se hace sumatoria de fuerzas verticales del sistema se obtiene que $Q=2P$

Ahora se debe encontrar que ángulos β y ϕ me generan las cargas solicitadas en los puntos A, E, y C.

Nodo B

$$\sum F_x = 0$$

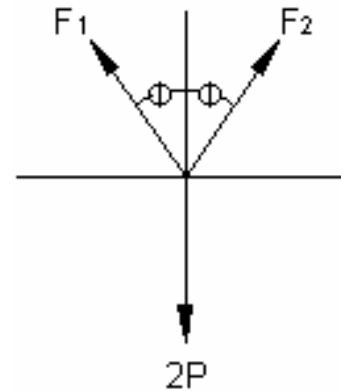
$$F_1 \operatorname{sen}(\phi) - F_2 \operatorname{sen}(\phi) = 0$$

$$\Rightarrow F_1 = F_2$$

$$\sum F_y = 0$$

$$2F_1 \cos(\phi) - 2P = 0$$

$$\Rightarrow F_1 = F_2 = \frac{P}{\cos(\phi)}$$

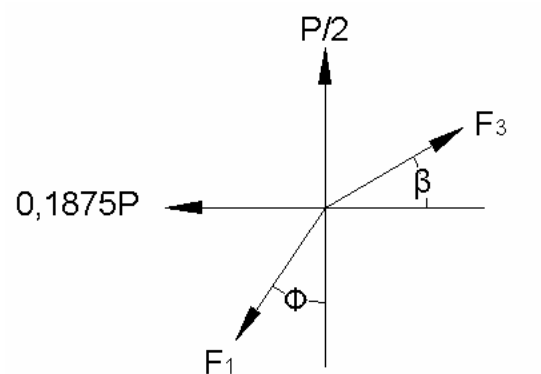


Nodo A

$$\sum F_x = 0$$

$$F_3 \cos(\beta) - F_1 \operatorname{sen}(\phi) - 0,1875P = 0$$

$$\Rightarrow F_3 = \frac{P \tan(\phi) + 0,1875P}{\cos(\beta)}$$



$$\sum Fy = 0$$

$$F_3 \operatorname{sen}(\beta) - F_1 \cos(\phi) + \frac{P}{2} = 0$$

$$\Rightarrow F_3 = \frac{P}{2 \operatorname{sen}(\beta)}$$

Igualando estas dos últimas ecuaciones se tiene que:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{1}{2 \tan(\beta)} - 0,1875 \right)$$

Ahora si se supone $\beta = 30^\circ$ entonces $\phi = 34^\circ$, estos son unos de los infinitos ángulos que puede tener la cercha actuadora para generar la carga que se necesita sobre la cercha de estudio.

1.2.1.2 Carga en los elementos

Reemplazando los ángulos β y ϕ con los valores encontrados en el numeral anterior y la carga P como 24,3 KN se tiene que:

Tabla 4.Carga de los elementos de la cercha actuadora

ELEMENTO	SOLICITUD	CARGA AXIAL KN
1-2	Compresión	29,3
3-4	Tensión	24,3
5	Compresión	24,3

1.2.1.3 Diseño de elementos

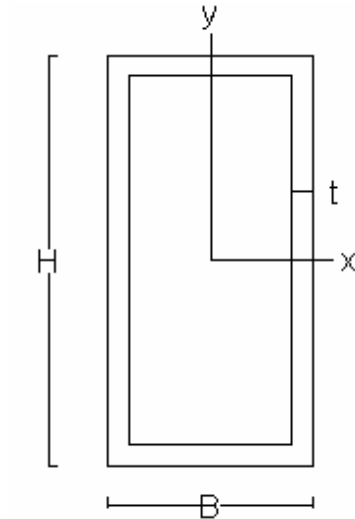
Para la elaboración de esta cercha se decide usar tubos rectangulares de acero A-36 ($F_y = 253\text{MPa}$, $F_u = 408\text{MPa}$), para los cuales se debe garantizar que cumplan con los requerimientos de carga del ensayo y que sus deformaciones sean bajas.

Elementos 1 y 2

- Chequeo compresión y pandeo flector

Primero se asume rectangular la sección transversal del tubo teniendo las siguientes características.

Figura 11 Sección transversal elementos cercha actuadora



$$H = 100\text{mm}$$

$$B = 50\text{mm}$$

$$t = 2\text{mm}$$

$$A_{g\text{ total}} = 286\text{mm}^2$$

$$I_x = 4,17 \times 10^6\text{mm}^4$$

$$I_y = 1,04 \times 10^6\text{mm}^4$$

Con esto se ve que el elemento en dirección y es donde presenta el menor momento de inercia, lo cual indica que con respecto a este eje es que ocurrirá el pandeo, entonces se procede a analizar en esta dirección.

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_{g\text{ total}}}} = 59,32\text{ mm} \quad \text{Para } K=1 \text{ L} = 1800\text{ mm} \quad \frac{KL}{r_y} = 30,34$$

Después de encontrar el radio de giro, se asume K de diseño igual a 1 que es para la condición en la cual un elemento sometido a compresión no tiene restricción de momentos en sus dos apoyos, teniendo esto y la longitud del elemento de 1800mm se encuentra la relación de esbeltez en x .

Ahora se comprueba si la sección es compacta para así poder encontrar el esfuerzo crítico F_{cr} .

Elementos verticales de la sección

$$\lambda_r = \frac{1700}{\sqrt{F_y}} = 106,87 \quad \frac{b}{t} = \frac{100}{2} = 50$$

Elementos horizontales

$$\lambda_r = \frac{500}{\sqrt{F_y}} = 31,43 \quad \frac{b}{t} = \frac{50}{2} = 25$$

De lo anterior se ve que todos los elementos cumplen con la condición $\frac{b}{t} \leq \lambda_r$ lo que dice que sección es compacta, entonces:

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r_y} \sqrt{\frac{F_y}{E}} = 0,344 \leq 1,5$$

Como λ_c es menor a 1,5 se procede a calcular con la siguiente formula el esfuerzo crítico F_{cr} .

$$F_{cr} = 0,658^{\lambda_c^2} F_y = 240,81 \text{ MPa}$$

Teniendo el esfuerzo crítico se puede calcular la carga última mediante la siguiente expresión.

$$\phi_c P_n = 0,85 A_g \text{ total } F_{cr} = 60,58 \text{ KN} \geq 29,3 \text{ KN}$$

Elementos 3 y 4

Estos se encuentran a tensión y su resistencia se calcula de la siguiente manera:

$$\phi P_n = 0,9 F_y A_g = 67,4 \text{ KN}$$

Esto dice que los elementos con esta sección resiste la carga de 29,3 KN en compresión solicitada por el ensayo.

1.3 ENSAYO

Para utilizar y comprobar los datos encontrados en la investigación se prueba una cercha tipo w, a la cual se le diseñaron anteriormente sus elementos y conexiones.

En la realización de este ensayo se ubica la cercha en los apoyos y se alinea verticalmente con ayuda de las escuadras que también creara un apoyo lateral a ésta para evitar el volcamiento. Luego de tener ubicada la cercha se apoya la cercha actuadora sobre ésta que a su vez se encuentra conectada con el actuador. Después de esto se ubican deformímetros en ceros para cada nodo y se comienza el ensayo aplicando una carga de 5 KN para cada medición de deformación hasta que la cercha falle.

En la figura 12 se muestra claramente como se dispondría los diferentes componentes en el ensayo.

El protocolo de carga se propone de la siguiente manera:

La carga será en 5 etapas, donde en cada una se aplica el 20, 40 ,60 ,80 y 100% de la carga máxima esperada a una velocidad de 1 mm/seg, en cada aplicación se mide la deformación y recuperación de la cercha, para luego ser analizados y encontrar hasta que carga se encuentra en la zona elástica la cercha.

Figura 12. Cercha tipo W con madera teca rolliza sin ensamblar



Figura 13. Ensayo cercha

