



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL BAMBÚ GUADUA LAMINADO PARA USO ESTRUCTURAL**

**CAORI PATRICIA TAKEUCHI**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
BOGOTÁ, COLOMBIA  
2014**

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL BAMBÚ GUADUA  
LAMINADO PARA USO ESTRUCTURAL**

**CAORI PATRICIA TAKEUCHI**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de  
Doctor en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales

Director  
Ph.D. DORIAN LUIS LINERO SEGRERA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
BOGOTA COLOMBIA  
2014

*A Mauricio, Adriana Midori, Carolina Sumire,  
Melisa Yume, David Akari, a mis padres y a  
David Yamato, que siempre me han  
acompañado y apoyado. Gracias.*

## **Agradecimientos**

A Dios que siempre me ha acompañado y ayudado.

A Ernesto Rodríguez por su apoyo en la elaboración y adaptación de equipos y fabricación del material.

A Patricia Luna Tamayo, Jorge Lozano, Edgar Torres y Diana Ovalle por su colaboración durante la ejecución de la investigación.

Al profesor Dorian Luis Linero, director de proyecto, por su acompañamiento y sabios consejos.

A mi esposo e hijos por su colaboración y apoyo durante la ejecución del proyecto.

# TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION .....	1
1.1.	JUSTIFICACIÓN .....	2
1.2.	OBJETIVOS .....	4
1.3.	HIPOTESIS .....	5
1.4.	ALCANCE .....	5
2.	MARCO TEÓRICO .....	6
2.1.	BAMBÚ <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA</i> KUNTH .....	6
2.1.1	Morfología general del bambú guadua .....	6
2.1.2	Anatomía del culmo del bambú <i>Guadua angustifolia</i> Kunth .....	8
2.1.2.1	Fibras .....	10
2.1.2.2	Estructura del nudo .....	12
2.1.2.3	Parénquima .....	13
2.1.3	Comportamiento físico mecánico de la <i>Guadua angustifolia</i> .....	14
2.2	EL BAMBÚ <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA</i> KUNTH COMO MATERIAL COMPUESTO .....	16
2.3	BAMBÚ <i>GUADUA</i> LAMINADO PEGADO PRENSADO (BGLPP) .....	17
2.3.1	Introducción .....	17
2.3.2	Proceso de fabricación del BGLPP .....	20
2.3.3	El BGLPP como material compuesto multicapas .....	22
2.3.4	Comportamiento mecánico del BGLPP .....	22
2.4	RELACIONES ESFUERZO VS DEFORMACIÓN DE UN ELEMENTO INFINITESIMAL EN EL RANGO ELÁSTICO .....	24
2.4.1	Generalidades .....	24
2.4.2	Comportamiento ante sollicitación axial en una dirección en un material ortótropo .....	25
3.	ELABORACIÓN DE PROBETAS .....	27
3.1.	MATERIAL .....	27
3.2.	ELABORACIÓN DE LAMINAS .....	31
3.3.	ELABORACIÓN DE PROBETAS A PARTIR DE LAS LAMINAS DE GUADUA .....	34
3.3.1.	Elaboración de probetas a tensión paralela a la fibra.....	34
3.3.2.	Elaboración de probetas a compresión paralela a la fibra .....	36
3.3.3.	Elaboración de probetas a flexión paralela a la fibra .....	36
3.4.	ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO BGLPP.....	37
3.4.1.	Elaboración de tableros de bambú guadua laminado .....	37
3.4.2.	Elaboración de bloques de BGLPP.....	40
3.5.	ELABORACIÓN DE PROBETAS DE BGLPP.....	44
3.5.1.	Definición de tipos de probetas de BGLPP.....	44

3.5.2.	Esquemas y protocolo de corte de bloques para elaborar probetas.....	49
3.5.3.	Elaboración de probetas.....	53
<b>4.</b>	<b>ENSAYOS EN LÁMINAS DE GUADUA .....</b>	<b>59</b>
4.1	PROBETAS DE TENSIÓN EN LÁMINAS DE GUADUA .....	59
4.1.1	Ensayo de tensión paralela a la fibra .....	59
4.1.1.1	Descripción del ensayo .....	59
4.1.1.2	Cálculos y resultados .....	61
4.1.1.3	Formas de falla .....	64
4.1.2	Determinación del contenido de humedad .....	65
4.1.2.1	Descripción de los ensayos .....	66
4.1.2.2	Cálculos y resultados .....	66
4.1.3	Determinación de la densidad seca al aire .....	67
4.1.3.1	Descripción de los ensayos .....	67
4.1.3.2	Cálculos y resultados .....	67
4.1.4	Determinación del porcentaje de fibras .....	67
4.1.4.1	Descripción de los ensayos .....	68
4.1.4.2	Cálculos y resultados .....	71
4.1.4.3	Análisis de resultados .....	71
4.2	PROBETAS DE COMPRESIÓN EN LÁMINAS DE GUADUA .....	73
4.2.1	Ensayo de compresión paralela a la fibra .....	73
4.2.1.1	Descripción de los ensayos .....	73
4.2.1.2	Cálculos y resultados .....	74
4.2.1.3	Observaciones durante los ensayos .....	77
4.2.2	Determinación del contenido de humedad .....	78
4.2.2.1	Descripción de los ensayos .....	78
4.2.2.2	Resultados .....	79
4.2.3	Determinación de la densidad .....	79
4.2.3.1	Descripción de los ensayos .....	79
4.2.3.2	Resultados .....	79
4.2.3.3	Análisis de resultados .....	80
4.3	PROBETAS DE FLEXIÓN EN LÁMINAS DE GUADUA .....	82
4.3.1	Ensayo de flexión longitudinal .....	82
4.3.1.1	Descripción de los ensayos .....	82
4.3.1.2	Cálculos y resultados .....	83
4.3.1.3	Observaciones durante los ensayos .....	84
4.3.2	Determinación del contenido de humedad .....	85
4.3.2.1	Descripción de los ensayos .....	85
4.3.2.2	Resultados .....	86
4.3.3	Determinación de la densidad .....	86
4.3.3.1	Descripción de los ensayos .....	86
4.3.3.2	Resultados .....	86

4.3.3.3	Análisis de resultados .....	86
4.4	ENSAYOS FÍSICOS EN LÁMINAS UTILIZADAS PARA LA FABRICACIÓN DEL MATERIAL BGLPP .....	87
4.4.1	Determinación del contenido de humedad .....	87
4.4.1.1	Descripción de los ensayos .....	87
4.4.1.2	Resultados .....	88
4.4.2	Determinación de la densidad .....	88
4.4.2.1	Descripción de los ensayos .....	88
4.4.2.2	Resultados .....	88
4.4.2.3	Análisis de resultados .....	89
<b>5.</b>	<b>COMPRESIÓN EN BGLPP .....</b>	<b>90</b>
5.1	COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA EN PROBETAS DE BGLPP .....	91
5.1.1	Ensayo de compresión paralela a la fibra .....	91
5.1.1.1	Descripción de los ensayos .....	91
5.1.1.2	Cálculos y resultados .....	93
5.1.1.3	Observaciones durante los ensayos .....	96
5.1.2	Determinación de la densidad .....	99
5.1.2.1	Descripción de los ensayos .....	99
5.1.2.2	Resultados .....	99
5.1.3	Determinación del porcentaje de fibras .....	99
5.1.3.1	Descripción de los ensayos .....	99
5.1.3.2	Cálculos y resultados .....	102
5.1.4	Análisis de resultados .....	102
5.2	COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PERPENDICULAR AL PLANO DE LOS TABLEROS .....	105
5.2.1	Ensayo de compresión perpendicular a la fibra perpendicular al plano de tableros .....	105
5.2.1.1	Descripción de los ensayos .....	105
5.2.1.2	Cálculos y resultados .....	106
5.2.1.3	Observaciones durante los ensayos .....	110
5.2.2	Determinación de la densidad .....	113
5.2.2.1	Descripción de los ensayos .....	113
5.2.2.2	Resultados .....	113
5.2.3	Análisis de resultados .....	113
5.3	COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PARALELO AL PLANO DE LOS TABLEROS .....	114
5.3.1	Ensayo de compresión perpendicular a la fibra paralelo al plano de tableros .....	114
5.3.1.1	Descripción de los ensayos .....	114
5.3.1.2	Cálculos y resultados .....	115
5.3.1.3	Observaciones durante los ensayos .....	119

5.3.2	Determinación de la densidad.....	120
5.3.2.1	Descripción de los ensayos.....	120
5.3.2.2	Resultados.....	120
5.3.3	Determinación del porcentaje de fibras.....	120
5.3.3.1	Descripción de los ensayos.....	121
5.3.3.2	Cálculos y resultados.....	121
5.3.4	Análisis de resultados.....	121
<b>6.</b>	<b>TENSIÓN EN BGLPP.....</b>	<b>123</b>
6.1	TENSIÓN PARALELA A LA FIBRA EN PROBETAS DE BGLPP.....	124
6.1.1	Descripción de los ensayos.....	125
6.1.2	Cálculos y resultados.....	127
6.1.3	Observaciones durante los ensayos.....	128
6.1.4	Análisis de resultados.....	130
6.2	TENSIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PERPENDICULAR AL PLANO DE LOS TABLEROS EN PROBETAS DE BGLPP.....	131
6.2.1	Descripción de los ensayos.....	133
6.2.2	Cálculos y resultados.....	134
6.2.3	Observaciones durante los ensayos.....	138
6.2.4	Análisis de resultados.....	145
6.3	TENSIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PARALELO AL PLANO DE LOS TABLEROS EN PROBETAS DE BGLPP.....	147
6.3.1	Descripción de los ensayos.....	148
6.3.2	Cálculos y resultados.....	148
6.3.3	Observaciones durante los ensayos.....	151
6.3.4	Análisis de resultados.....	154
6.4	RELACIÓN ENTRE ESFUERZOS DE FALLAS DE TENSIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PARALELO Y PERPENDICULAR AL PLANO DE LOS TABLEROS.....	155
6.4.1	Relación entre esfuerzos de falla de tensión perpendicular a la fibra paralelo y perpendicular al plano de los tableros.....	156
6.4.2	Análisis de resultados.....	156
<b>7.</b>	<b>CORTANTE EN BGLPP.....</b>	<b>158</b>
7.1	CORTANTE PARALELO A LA FIBRA EN PROBETAS DE BGLPP.....	159
7.1.1	Descripción de los ensayos.....	161
7.1.2	Cálculos y resultados.....	162
7.1.3	Observaciones durante los ensayos.....	165
7.1.4	Análisis de resultados.....	169
7.2	CORTANTE PERPENDICULAR A LA FIBRA EN PROBETAS DE BGLPP.....	170
7.2.1	Descripción de los ensayos.....	171
7.2.2	Cálculos y resultados.....	172

7.2.3	Observaciones durante los ensayos .....	174
7.2.4	Análisis de resultados .....	180
<b>8.</b>	<b>FLEXIÓN EN BGLPP .....</b>	<b>182</b>
8.1	FLEXIÓN LONGITUDINAL EN PROBETAS CORTAS de BGLPP .....	183
8.1.1	Descripción de los ensayos .....	184
8.1.2	Cálculos y resultados .....	185
8.1.3	Observaciones durante los ensayos .....	189
8.1.4	Análisis de resultados .....	191
8.2	FLEXIÓN LONGITUDINAL EN PROBETAS LARGAS de BGLPP .....	193
8.2.1	Descripción de los ensayos .....	193
8.2.2	Cálculos y resultados .....	194
8.2.3	Observaciones durante los ensayos .....	200
8.2.4	Análisis de resultados .....	202
<b>9.</b>	<b>COLUMNAS Y VIGAS DE BGLPP .....</b>	<b>204</b>
9.1.	COMPORTAMIENTO DE COLUMNAS MACIZAS DE BGLPP .....	204
9.2.1	Elaboración .....	204
9.2.2	Descripción de los ensayos .....	204
9.2.3	Cálculos y resultados .....	206
9.2.4	Observaciones durante los ensayos .....	209
9.2.5	Análisis de resultados .....	211
9.2.	COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE BGLPP CON TABLEROS EN DOS DIRECCIONES .....	211
9.2.1	Elaboración .....	211
9.2.2	Descripción de los ensayos .....	212
9.2.3	Cálculos y resultados .....	213
9.2.4	Observaciones durante los ensayos .....	217
9.2.5	Análisis de resultados .....	218
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>219</b>
10.1.	CONCLUSIONES .....	219
10.2.	RECOMENDACIONES .....	222
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>223</b>

## ANEXOS

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Partes de la guadua.....	6
Figura 2.2. Edades de guadua y partes secundarias.....	7
Figura 2.3. Haz vascular del Bambú <i>Guadua Angustifolia</i> .....	8
Figura 2.4. Distribución de haces vasculares en <i>Guadua angustifolia</i> en una porción pared del culmo.....	9
Figura 2.5. Distribución de Fibras en la sección transversal de la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	10
Figura 2.6. Distribución Modelo de la estructura de la pared de la fibra.....	11
Figura 2.7. Mecanismos de conexión entre fibras.....	12
Figura 2.8. Haces vasculares en la región del nudo.....	13
Figura 2.9. Corte longitudinal del culmo de <i>Guadua angustifolia</i> .....	13
Figura 2.10. Imágenes SEM de almidones encontrados dentro de las células parénquimas de culmos de <i>Guadua angustifolia</i> .....	14
Figura 2.11. Falla por compresión paralela a las fibras.....	15
Figura 2.12. Elaboración de tableros de bambú a partir de esterillas en Tailandia.....	17
Figura 2.13. Bambúes laminados.....	18
Figura 2.14. Glubam.....	18
Figura 2.15. Técnica de Mahdavi para obtención de bambú para elementos laminados.....	19
Figura 2.16. Elaboración de paneles.....	19
Figura 2.17. Elaboración de bambú guadua compactado.....	19
Figura 2.18. Bambú guadua laminado prensado pegado.....	20
Figura 2.19. Esfuerzos en un elemento infinitesimal.....	24
Figura 3.1. Proceso de transformación del bambú guadua.....	27
Figura 3.2. Curado de la guadua en el sitio.....	28
Figura 3.3. Tramos de guadua de la parte inferior.....	29
Figura 3.4. Tramos de guadua de la parte media.....	29
Figura 3.5. Elaboración de tiras.....	29
Figura 3.6. Secado de tiras.....	30
Figura 3.7. Tiras de bambú guadua.....	31
Figura 3.8. Tiras de bambú guadua.....	31
Figura 3.9. Maquinado de tiras de guadua.....	32
Figura 3.10. Corte de lámina a lo ancho.....	33
Figura 3.11. Láminas con terminado a cuatro caras.....	33
Figura 3.12. Probetas de láminas de tensión paralela a la fibra Tipo 1.....	34
Figura 3.13. Probetas Tipo 1 de tensión paralela a la fibra.....	35
Figura 3.14. Probetas de tensión paralela a la fibra Tipo 2.....	35
Figura 3.15. Probetas de láminas de compresión paralela a la fibra.....	36
Figura 3.16. Probetas de láminas de flexión paralela a la fibra.....	36
Figura 3.17. Prensa de mesa para elaboración de tableros.....	37
Figura 3.18. Prensa de mesa para elaboración de tableros.....	38
Figura 3.19. Aplicación del adhesivo a los cantos de varias láminas.....	38

Figura 3.20. Tableros recién prensados .....	39
Figura 3.21. Tableros de 60cm de ancho.....	40
Figura 3.22. Prensa Riehle Bros .....	41
Figura 3.23. Molde para elaboración de bloques en BGLPP .....	41
Figura 3.24. Extremo pulido de probeta de compresión paralela a la fibra.....	42
Figura 3.25. Aplicación de adhesivo y armado de tableros en el molde .....	42
Figura 3.26. Proceso de prensado.....	43
Figura 3.27. Bloques de BGLPP .....	43
Figura 3.28. Asignación de sistema de coordenadas a bloques de BGLPP.....	44
Figura 3.29. Tipos de probetas a compresión.....	45
Figura 3.30. Tipos de probetas a tensión .....	46
Figura 3.31. Tipos de probetas a cortante.....	47
Figura 3.32. Probetas de flexión.....	48
Figura 3.33. Cortes iniciales .....	50
Figura 3.34. Esquema de corte para probetas de compresión C33.....	50
Figura 3.35. Probetas de flexión largas .....	51
Figura 3.36. Esquema de corte para probetas de compresión C11 y C22 .....	51
Figura 3.37. Esquema de corte para probetas de flexión cortas Fc11a y Fc11b. ....	52
Figura 3.38. Esquema de corte para probetas de corte V32,V23,V12,V13.....	52
Figura 3.39. Esquema de corte para probetas de tensión.....	53
Figura 3.40. Realización de cortes.....	54
Figura 3.41. Elementos prismáticos de BGLPP .....	54
Figura 3.42. Elaboración de probetas de tensión y flexión corta .....	55
Figura 3.43. Verificación y rectificación .....	55
Figura 3.44. Probetas de cortante .....	56
Figura 3.45. Probetas de cortante elaboradas .....	56
Figura 3.46. Taladro de banco y brocas.....	57
Figura 3.47. Probetas de tensión .....	57
Figura 3.48. Probetas de tensión terminadas .....	58
Figura 4.1. Probetas Tipo 1 .....	60
Figura 4.2. Probetas Tipo 260 .....	
Figura 4.3. Curvas carga desplazamiento.....	61
Figura 4.4. Curvas carga desplazamiento.....	62
Figura 4.5. Relación Esfuerzo deformación .....	62
Figura 4.6. Relación Esfuerzo deformación.....	63
Figura 4.7. Ensayo probeta T3.....	64
Figura 4.8. Probeta T4, probeta T8 y probeta T11 .....	65
Figura 4.9. Muestras para la determinación del contenido de humedad dentro de horno ...	65
Figura 4.10. Equipo utilizado para la determinación del contenido de humedad de las muestras .....	66
Figura 4.11. Imagen de lámina.....	68
Figura 4.12. Imágenes de partes la sección transversal de la porción de ensayos de la probeta T7.....	68

Figura 4.13. Imágenes de la sección transversal de la porción de ensayos de la probeta T7 .....	69
Figura 4.14. Cálculo de área de haces de fibras .....	70
Figura 4.15. Cálculo de área total de la sección rectangular .....	70
Figura 4.16. Módulo de elasticidad vs Porcentaje de fibra .....	71
Figura 4.17. Probeta de compresión C2 .....	74
Figura 4.18. Gráficas Esfuerzo vs $\delta/L$ de probetas a compresión paralela a la fibra .....	75
Figura 4.19. Gráficas esfuerzo deformación probetas C2, C5 y C9 .....	76
Figura 4.20. Relación Deformación transversal vs deformación longitudinal probetas C2, C5, C9.....	76
Figura 4.21. Ensayo probeta C7 .....	77
Figura 4.22. Ensayo probeta de compresión en láminas, probetas C1 a C10.....	78
Figura 4.23. Muestras para la determinación del contenido de humedad .....	79
Figura 4.24. Resistencia a compresión paralela a la fibra en función de la densidad .....	79
Figura 4.25. Ensayo de flexión.....	82
Figura 4.26. Gráfica carga desplazamiento probeta F5 .....	83
Figura 4.27. Ensayo de la probeta F5 .....	85
Figura 4.28. Muestras para la determinación del contenido de humedad .....	85
Figura 5.1 Tipos de probetas a compresión.....	90
Figura 5.2 Vistas de la Probeta 2C11 .....	91
Figura 5.3 Vistas transversales de las probetas .....	92
Figura 5.4. Ensayo de la probeta 1C1.....	92
Figura 5.5. Esfuerzo normal vs $\delta/L$ probetas a compresión C1.....	93
Figura 5.6. Relación esfuerzo deformación longitudinal probetas 1C11, 5C11 y 0C11 ....	94
Figura 5.7. Curvas Esfuerzo deformación longitudinal en dirección 1 y transversal en las direcciones 2 y 3 probetas 1C11, 5C11 y 0C11 .....	94
Figura 5.8. Curvas deformación transversal en las direcciones 2 y 3 en función de deformación longitudinal en dirección 1 probetas 1C11, 5C11 y 0C11.....	95
Figura 5.9. Ensayo probeta 1C11 .....	96
Figura 5.10. Estado final de la probeta 7C11. ....	97
Figura 5.11. Ensayo probeta 2C11 .....	98
Figura 5.12. Falla de la probeta 10C11 .....	98
Figura 5.13. Imágenes de la probeta 1C11 .....	101
Figura 5.14. Parte de la sección transversal de la probeta 10C11102 .....	105
Figura 5.15 Vistas de la Probeta 6C22 .....	105
Figura 5.16. Ensayo de las probetas C22 106 .....	106
Figura 5.17. Esfuerzo normal vs $\delta/L$ probetas a compresión C22.....	107
Figura 5.18. Rango elástico curvas esfuerzo vs deformación probetas 2C22, 4C22 y 9C22.....	108
Figura 5.19. Probetas C22 .....	109
Figura 5.20. Ensayo probeta 7C22 .....	111
Figura 5.21. Ensayo probeta 2C22 .....	111
Figura 5.22. Acercamiento de fisuras probetas 2C22 y 9C22 .....	112
Figura 5.23. Curva Carga Desplazamiento probetas .....	112

Figura 5.24 Probeta 1C33 .....	114
Figura 5.25. Esfuerzo normal vs $\delta/L$ probetas a compresión C33.....	115
Figura 5.26. Gráficas esfuerzo vs deformación $\epsilon_3$ probetas 1C33, 5C33 y 9C33.....	116
Figura 5.27. Gráfica Esfuerzo deformación vertical, horizontal probetas C33.....	117
Figura 5.28. Gráfica deformaciones horizontales en función de la deformación vertical de la probetas C33 .....	118
Figura 5.29. Ensayo probeta 8C33 visto desde la cara posterior.....	119
Figura 5.30. Gráficos Carga Desplazamiento probetas .....	120
Figura 6.1 Probetas a tensión.....	124
Figura 6.2 Probeta 8T11a .....	125
Figura 6.3 Probeta 3T11b .....	125
Figura 6.4. Probeta 5T11a .....	126
Figura 6.5. Probeta 5T11a .....	128
Figura 6.6. Probeta 7T11a .....	129
Figura 6.7. Probeta 6T11a .....	129
Figura 6.8. Probeta 5T11b.....	130
Figura 6.9. Probeta 3T22fa.....	131
Figura 6.10 Probeta 2T22pa .....	132
Figura 6.11 Probeta 4T22fb.....	132
Figura 6.12 Probeta 1T22pb .....	133
Figura 6.13. Montaje de probetas .....	134
Figura 6.14. Esfuerzo vs $\delta/L$ probetas a tensión T22fa .....	135
Figura 6.15. Esfuerzo vs $\delta/L$ probetas a tensión T22pa .....	135
Figura 6.16. Esfuerzo vs $\delta/L$ probetas a tensión T22fb.....	136
Figura 6.17. Esfuerzo vs $\delta/L$ probetas a tensión T22pb .....	136
Figura 6.18. Fisuras de falla, vista general y acercamiento de probetas T22fa.....	139
Figura 6.19. Gráficas carga desplazamiento probetas T22fa.....	139
Figura 6.20. Fisuras en probetas, vista general y acercamiento de probetas T22pa.....	140
Figura 6.21. Gráficas carga desplazamiento probetas T22pa.....	141
Figura 6.22. Vistas lateral izquierda, frontal, lateral derecha y posterior, posterior a la falla, de las probetas T22fb.....	142
Figura 6.23. Gráficas carga desplazamiento probetas T22fb .....	142
Figura 6.24. Falla de probetas T22pb .....	144
Figura 6.25. Gráficas carga desplazamiento probetas T22pb.....	144
Figura 6.26 Probeta 8T33a .....	147
Figura 6.27 Probeta 8T33b .....	147
Figura 6.28. Montaje de probetas .....	148
Figura 6.29. Esfuerzo vs $\delta/L$ probetas a tensión T33a .....	149
Figura 6.30. Esfuerzo vs $\delta/L$ probetas a compresión T33b .....	149
Figura 6.31. Vista frontal después de ensayo y acercamiento de fisuras de falla de las probetas.....	151
Figura 6.32. Fisuras por tensión diagonal.....	152
Figura 6.33. Gráficas carga desplazamiento probetas T33a.....	152
Figura 6.34. Probeta 5T33b después de ensayo, vistas .....	153

Figura 6.35. Gráficas carga desplazamiento probetas T33b.....	154
Figura 7.1. Tipos de probetas a corte.....	158
Figura 7.2 Orientación de fibras en probetas de cortante .....	159
Figura 7.3 Probeta V13.....	160
Figura 7.4 Probeta 1V12f.....	160
Figura 7.5. Ensayo de corte probeta 10V12f.....	161
Figura 7.6. Esfuerzo cortante promedio vs $\delta/L$ probetas a cortante V13 .....	162
Figura 7.7. Esfuerzo cortante promedio vs $\delta/L$ probetas a cortante V12 .....	163
Figura 7.8. Imágenes de la probeta 4V13 después de ensayo .....	165
Figura 7.9. Gráficos Carga Desplazamiento probetasV13 .....	166
Figura 7.10. Imágenes de la probeta 6V12f después de ensayo.....	166
Figura 7.11. Imágenes de la probeta 7V12f después de ensayo.....	167
Figura 7.12. Gráficos Carga Desplazamiento probetas1V12f.....	168
Figura 7.13. Imágenes de la probeta 3V12p después de ensayo 168	
Figura 7.14. Gráficos Carga Desplazamiento probetas1V12p y 2V12p .....	169
Figura 7.15 Probeta V23.....	170
Figura 7.16 Probeta 2V32f.....	171
Figura 7.17. Esfuerzo cortante promedio vs $\delta/L$ probetas a cortante V23 .....	172
Figura 7.18. Esfuerzo cortante promedio vs $\delta/L$ probetas a cortanteV32f y V32p.....	173
Figura 7.19. Probeta 9V23 después de .....	175
Figura 7.20. Gráficos Carga Desplazamiento probetas 3V23 y 9V23 .....	176
Figura 7.21. Trayectoria de fisuración de las probetas V32f.....	177
Figura 7.22. Gráficos Carga Desplazamiento probetas V32f.....	177
Figura 7.23. Falla de las probetas 8V32p, 4V32p y3V32p .....	179
Figura 7.25. Gráficos Carga Desplazamiento probetas 2V32p, 9V32p, 1V32p y 4V32p..	180
Figura 8.1 Tipos de probetas a Flexión .....	182
Figura 8.2 Sección transversal y vista lateral probetas 4Fc11a y 2Fc11b.....	183
Figura 8.3 Montaje ensayo probetas cortas .....	184
Figura 8.4. Gráfica esfuerzo deformación probeta 1Fc11a .....	185
Figura 8.5. Gráfica esfuerzo normal vs deformación probetas Fc11a y Fc11b.....	186
Figura 8.6. Gráfica esfuerzo cortante vs deformación angular probetas Fc11a y Fc11b ...	188
Figura 8.7. Probeta 1Fc11a.....	190
Figura 8.8. Probeta 1Fc11b.....	191
Figura 8.9 Montaje con medidas teóricas del ensayo probetas largas.....	193
Figura 8.10. Ensayo probetas 7FL11a y $\zeta$ 4FL11a.....	194
Figura 8.11. Gráfica esfuerzo deformación probeta 5FL11a.....	195
Figura 8.12. Esfuerzo normal vs deformación longitudinal probetas FL11a y FL11b .....	196
Figura 8.13. Gráfica esfuerzo deformación probetas FL11a.....	197
Figura 8.14. Esfuerzo cortante vs deformación angular probetas 3FL11a, 6FL11a y 7FL11a y 2FL11b, 5FL11b y 10FL11b.....	199
Figura 8.15. Diagramas carga desplazamiento probetas 3FL11a y 4FL11a .....	200
Figura 8.16. Probeta 4FL11a .....	201
Figura 8.17. Probeta 6FL11b al final del ensayo.....	201

Figura 8.18. Diagramas carga desplazamiento probetas (a) 1FL11b y (b) 2FL11b.....	202
Figura 9.1. Material para elaboración de columnas.....	204
Figura 9.2. Esquema de columna con ejes coordenados .....	205
Figura 9.3 Montaje columnas 6C5-03 y 2C3-02 .....	206
Figura 9.4. Gráficas Esfuerzo crítico vs Relación de esbeltez .....	208
Figura 9.5. Gráfica ajustada de Esfuerzo crítico vs Relación de esbeltez .....	209
Figura 9.6 Curvas carga desplazamiento columnas 5C5-05, 5C4-01 y 8C1-01 y fotografías de probetas ensayadas 5C5-05, 5C4-01 y 8C1-01 .....	210
Figura 9.7. Vigas con tableros en dos direcciones .....	212
Figura 9.8. Montaje de ensayo Viga 1V-2.....	213
Figura 9.9. Gráficas Esfuerzo deformación vigas 1V-1, 1V-2 y 2V-2.....	215
Figura 9.10. Esfuerzo cortante deformación angular vigas 1V-1, 1V-2 y 2V-2. ....	216
Figura 9.11 Falla y curva carga desplazamiento viga 1V-2 .....	217

## LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1. Módulo de elasticidad, densidad y porcentaje de fibra .....	63
Tabla 4.2. Valores de densidad y resistencia a compresión paralela a la fibra .....	75
Tabla 4.3. Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.....	77
Tabla 4.4. Valores de esfuerzo en el límite de proporcionalidad, esfuerzo de rotura y módulo de elasticidad .....	84
Tabla 4.5. Espesor, contenido de humedad y densidad de láminas de fabricación .....	88
Tabla 5.1. Resistencia, Módulo de elasticidad y relaciones de Poisson.....	96
Tabla 5.2. Resistencia, esfuerzo en el límite de proporcionalidad, Módulo de elasticidad E2 y relaciones de Poisson. ....	110
Tabla 5.3. Esfuerzo máximo, Módulo de elasticidad y relación de Poisson probetas C33. ....	118
Tabla 6.1. Esfuerzo de fricción de probetas T11a con doble entalla.....	127
Tabla 6.2. Resistencia a tensión perpendicular a la fibra y esfuerzos de falla .....	137
Tabla 6.3. Resistencia a tensión perpendicular a la fibra y esfuerzos de falla .....	150
Tabla 6.4. Relación entre esfuerzos de tensión perpendicular a la fibra entre probetas T33 y T22.....	156
Tabla 7.1. Resistencia a cortante promedio probetas V13, V12p y V12f .....	164
Tabla 7.2. Carga máxima y esfuerzo cortante promedio máximo y resistencia a cortante perpendicular a la fibra .....	174
Tabla 8.1. Módulo de elasticidad probetas Fc11 .....	187
Tabla 8.2. Esfuerzo cortante máximo, Módulo de elasticidad a cortante.....	189
Tabla 8.3. Esfuerzo Rotura, Módulo de elasticidad .....	198
Tabla 8.4. Módulo de elasticidad a cortante en probetas FL11 .....	200
Tabla 9.1. Resistencia a compresión en probetas C5 .....	206
Tabla 9.2. Carga máxima esperada y carga máxima experimental .....	214
Tabla 9.3. Esfuerzo Rotura, Módulo de elasticidad .....	215
Tabla 9.4. Esfuerzo cortante máximo, Módulo de elasticidad a cortante.....	217

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo A Condiciones de sitio

Anexo B Espesores y longitud de entrenudos

Anexo C esquemas de corte lámina

Anexo D Calibración de la prensa de mesa

Anexo E Adhesivo utilizado

Anexo F Ensayos preliminares

Anexo G Ensayos Láminas

Anexo H Compresión en bambú guadua laminado

Anexo I Tensión en bambú guadua laminado

Anexo J Corte en bambú guadua laminado

Anexo K Flexión en bambú guadua laminado

Anexo L Curva Esfuerzo crítico relación de esbeltez

Anexo M Vigas en bambú guadua laminado

## RESUMEN

El bambú guadua es un material natural abundante en Colombia, renovable, biodegradable, ambientalmente amigable, cuya resistencia mecánica se adquiere en pocos años. Su transformación a un material laminado pegado prensado podría incrementar y facilitar su utilización como elemento estructural en la construcción de vivienda.

Con un material de estas características se podría tener una línea de producción completa que incluyera la elaboración del material en sí, la fabricación de elementos estructurales, como vigas, columnas, tableros de piso y paneles, y la elaboración previa de las uniones para un ensamble rápido y eficiente.

Se ampliaría también el campo de utilización del bambú guadua ya que el material compuesto bambú guadua laminado pegado prensado, BGLPP, es versátil, no tiene limitaciones en forma ni en dimensiones y con un proceso controlado de fabricación presenta una dispersión baja de valores de resistencia y de constantes elásticas permitiendo una mayor aceptación del bambú guadua por parte de diseñadores, constructores y usuarios.

El objetivo principal del presente estudio fue caracterizar mecánicamente el material BGLPP, ante sollicitaciones de compresión, tensión, cortante y flexión, mediante ensayos experimentales de modelos físicos.

Inicialmente se realizaron ensayos de láminas de bambú guadua para determinar la resistencia a compresión y a flexión y los módulos elásticos longitudinales del material base.

Posteriormente se realizaron ensayos de probetas de BGLPP ante diferentes sollicitaciones y en diferentes direcciones teniendo en cuenta su comportamiento como material ortótropo y se determinaron los valores de resistencia (a compresión y corte, paralelo y perpendicular a la fibra, a tensión perpendicular a la fibra y a flexión), de módulos elásticos (longitudinal y a cortante) y las relaciones de Poisson.

Finalmente se ensayaron elementos como vigas y columnas y se obtuvieron relaciones esfuerzo deformación en el primer caso y curvas de esfuerzo crítico en función de la relación de esbeltez en columnas

**Palabras Clave:** Bambú guadua laminado pegado prensado, valores de resistencia, módulos elásticos, relación de Poisson

## ABSTRACT

The bamboo guadua is an abundant natural material in Colombia, renewable, biodegradable, environmentally friendly, whose strength is acquired in a few years. Its transformation to a composite laminated material, BGLPP, may increase and facilitate its use as a structural element in the construction of housing.

With a material of this nature is possible to have a complete production line to include the preparation of the material itself, the manufacture of structural elements such as beams, columns, floor boards and panels, and prior preparation of joints for assembly fast and efficient.

The field of use of bamboo guadua would also be extended due the BGLPP because is versatile with no limitations in form or size and with low dispersion of resistance and elastic constants values under a controlled manufacturing process, allowing greater acceptance of bamboo guadua by designers, builders and users.

The main objective of this study was to characterize mechanically the BGLPP material under solicitations of compression, tension, shear and bending with experimental tests of physical models.

Initially, tests bamboo guadua sheets were performed to determine the compressive and bending strength and also, the elastic modulus of the base material.

Later, tests of BGLPP specimens were performed under different solicitations in different directions considering its behavior as orthotropic material. The resistance values (to compression, tension, shear and bending) were determined. Also, the elastic modulus (longitudinal and shear) and the Poisson's ratios were found.

Finally, elements such as beams and columns were tested. The relationships of stress-strain for the beams and critical stress slenderness ratio for the columns were obtained.

**Keywords:** laminated bamboo BGLPP, resistance values, elastic modulus, Poisson's ratio

## 1. INTRODUCCION

El presente capítulo es una introducción donde se encuentran la justificación, los objetivos y la estructura general del documento.

En el Capítulo 2, se presentan de manera breve la morfología general de la planta del bambú guadua, la anatomía de su tallo o culmo y las características mecánicas del bambú guadua rolliza para finalmente abordar el tema del bambú guadua laminado prensado pegado (BGLPP). Se hace mención a diferentes estudios sobre el bambú guadua y sobre el BGLPP más relacionados y de mayor relevancia para el presente estudio. Se mencionan también investigaciones desarrolladas sobre el bambú laminado no sólo con *Guadua angustifolia* sino con otras especies de bambú.

El Capítulo 3 describe el proceso de elaboración del material BGLPP y de las probetas utilizadas en el programa experimental. Se explica el corte en la planta del bambú guadua, el proceso de transformación hasta obtener las láminas, el prensado de las láminas para elaborar tableros y la fabricación del material BGLPP al prensar tableros. Se muestra la metodología seguida para la elaboración de los diferentes tipos de probetas.

En esta investigación se realizaron ensayos de tensión, compresión y flexión longitudinal en probetas de láminas sin nudos. El Capítulo 4 trata sobre estos ensayos en láminas incluyendo además ensayos de contenido de humedad, densidad y determinación del porcentaje de fibras.

El Capítulo 5 trata sobre los ensayos de compresión paralelo y perpendicular a la fibra en probetas de BGLPP. La determinación de los valores de resistencia, módulos elásticos y relaciones de Poisson. Se encuentra también, una parte dedicada a la determinación del porcentaje de fibras. Se presentan las curvas de carga vs desplazamiento, esfuerzo vs relación desplazamiento/longitud y esfuerzo vs deformación. Se hace una descripción del tipo de falla presentado.

Los ensayos de tensión paralela y perpendicular a la fibra en BGLPP y la determinación de la resistencia a tensión perpendicular a la fibra y del esfuerzo con el cual se presenta el deslizamiento entre las fibras y la matriz se tratan en el Capítulo 6. Se presentan las curvas de carga vs desplazamiento y esfuerzo vs relación desplazamiento/longitud y una descripción de la superficie de fisuras de las probetas ensayadas.

El comportamiento del material BGLPP ante sollicitaciones de cortante paralela y perpendicular a la fibra se presentan en el Capítulo 7. Se describen los ensayos realizados y las fallas. Se determina la resistencia a cortante paralela y perpendicular a la fibra y las relaciones entre la carga y el desplazamiento.

En el Capítulo 8 se presentan los ensayos de flexión en probetas cortas y en probetas largas de BGLPP. En el primer caso se determina el esfuerzo cortante máximo y en el segundo caso el esfuerzo de rotura. Se encuentran también las curvas de esfuerzo cortante vs deformación angular, el módulo de elasticidad a cortante, las curvas de esfuerzo normal vs deformación longitudinal y el módulo de elasticidad longitudinal.

El Capítulo 9 presenta el ensayo en columnas de BGLPP de diferentes relaciones de esbeltez, así como el ensayo de vigas. Con base en los resultados de los capítulos anteriormente mencionados, se elaboraron para el tipo de columna ensayado diferentes curvas que relacionan el esfuerzo crítico en función de la relación de esbeltez. Se presenta la curva de mejor ajuste y los esfuerzos críticos de las columnas ensayadas para contrastar los datos experimentales a los datos calculados al observar el ajuste de la curva. En este capítulo también se presentan los resultados del ensayo de vigas, el esfuerzo de rotura y el módulo de elasticidad longitudinal.

Por último, en el Capítulo 10 se presentan unas conclusiones generales del trabajo y algunas recomendaciones para estudios posteriores. Dentro de las recomendaciones, se encuentra estudiar con mayor profundidad el comportamiento a tensión paralela a la fibra, implementando ensayos donde se pueda encontrar la resistencia a tensión y los coeficientes de Poisson.

## 1.1. JUSTIFICACIÓN

El bambú guadua, especialmente la especie *Guadua angustifolia* Kunth, se encuentra de forma abundante en Colombia y se ha utilizado a lo largo de muchos años en la construcción como materia prima para la elaboración de casetones para aligeramiento de placas de concreto reforzado y esterilla para divisiones, muros y cielo rasos. También se ha utilizado como el material principal de viviendas y otras construcciones de uno y dos pisos de Bahareque encementado el cual es un sistema estructural de muros de carga construidos con un entramado de guadua o madera recubiertos de mortero adicionado a la NSR98 (AIS, 1999) en el Capítulo E7 Casas de uno y dos pisos en Bahareque encementado (AIS, 2002). En su forma natural (guadua rolliza) y a la vista, se utiliza para la construcción de cubiertas, puentes y viviendas; su diseño como elemento estructural actualmente está contemplado en la NSR 10 (AIS, 2010a) en el Título G Estructuras de madera y estructuras de guadua (AIS, 2010b).

Sin embargo, a pesar de que es un material natural, renovable, biodegradable, cuya resistencia mecánica se adquiere en pocos años, la utilización de la guadua rolliza para la construcción de vivienda es relativamente baja en comparación con el acero, el concreto y la mampostería. Esto se debe a que las investigaciones (Acuña & Pantoja, 2005; Ciro, Osorio, & Vélez, 2005; Ghavami & Marinho 2005; González & Takeuchi, 2007; González, Osorio, & García, 2002; Gonzalez, Hellwig, & Montoya, 2007; Luna, Lozano, Takeuchi, &

Gutierrez, 2012; Pacheco & Takeuchi, 2006; Prieto & Sánchez, 2000 entre otros), protocolos de ensayos para la caracterización del material (ICONTEC, 2007; ISO, 2004) y normas de diseño, como las mencionadas anteriormente, son relativamente recientes. Esto se ha visto reflejado en que este material no esté contemplado dentro de los programas regulares de los cursos de materiales, diseño y construcción de Ingeniería Civil.

También, las características propias del material como su sección circular variable (el diámetro y el espesor no son iguales para diferentes guaduas e incluso para una misma guadua ya que varían en altura), la distribución aleatoria de tabiques y las imperfecciones como rajaduras y torcimientos, son la causa de que los elementos que forman las estructuras se corten a la medida en obra y que las uniones se hagan una por una (para que un elemento encaje correctamente en el otro) haciendo que la construcción con el bambú guadua sea demorada.

Además, al ser la guadua rolliza un producto natural, sus propiedades físicas y mecánicas dependen de muchos factores como la edad, la geometría, la altura sobre el nivel de mar, las condiciones ambientales y topográficas, las características del suelo entre otros (Correal & Arbeláez, 2010; González, Montoya, & Bedoya, 2006; Osorio, Ciro, & Vélez, 2005; Osorio, Vélez, & Ciro, 2007), por lo que tienen un grado de variabilidad tan grande que hace que la resistencia que se asume para el diseño sea en muchos casos conservadora o que los ingenieros prefieran otros materiales con los que se tenga más certeza de su adecuado comportamiento ante condiciones de servicio y de resistencia.

La transformación de la guadua a un material laminado, pegado y prensado podría incrementar y facilitar su utilización como elemento estructural en la construcción de vivienda dado que es posible fabricar elementos mediante un proceso industrializado controlando sus dimensiones y sus propiedades mecánicas. Con un material de estas características se podría tener una línea de producción completa que incluyera la elaboración del material en sí (BGLPP), la fabricación de elementos (vigas, columnas, tableros de piso, paneles, etc) y la elaboración previa de las uniones de modo tal que el ensamble en el sitio definitivo sería eficiente y rápido.

Se ampliaría también el campo de utilización del bambú guadua ya que como material laminado pegado y prensado (BGLPP) es muy versátil, no tiene limitaciones en forma (los elementos pueden ser rectos o curvos, pueden ser macizos, en sección T, sección doble T o cajón) ni en dimensiones (la sección transversal puede tener la inercia y área que se necesite y la longitud puede ser la que se necesite para salvar grandes luces o alturas). Además tiene un alto potencial como material de construcción en comparación de la madera por ser un material renovable y con un área significativa de hectáreas ocupadas en el país (Flander & Rovers, 2009).

Por otro lado, se espera que el proceso controlado de fabricación del BGLPP reduzca la variación de la resistencia y constantes elásticas a un rango aceptable lo cual le daría mayor aceptación por parte de diseñadores, constructores y usuarios. Los factores de seguridad que actualmente son altos para la guadua rolliza, se podrían reducir haciendo el uso de la guadua más racional.

Por lo anterior, considerando que la guadua rolliza es un material dúctil con un buen comportamiento ante acciones externas, es importante también conocer el comportamiento mecánico del BGLPP.

Recientemente, se han desarrollado diferentes investigaciones sobre el comportamiento mecánico del BGLPP como (Correal & Ramirez, 2010; Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014; Cortes, Lozano, Rusinque, & Takeuchi, 2010; Cortés, 2009; Gonzalez, Hellwig, & Montoya, 2008a; González, Hellwig, & Montoya, 2008b; López & Correal, 2009) sin embargo es importante profundizar en el comportamiento elástico e inelástico del material y su forma de falla, ante diferentes solicitaciones de carga en dirección paralela y perpendicular a la fibra (y entre estos últimos perpendicular y paralelo al plano de los tableros) y determinar valores de resistencia y de constantes elásticas. Es necesario, también demostrar que el BGLPP es un material que con un adecuado proceso de fabricación, trabaja como un único material sin que las diferentes láminas se separen por falla de adherencia con el adhesivo utilizado.

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente estudio fue caracterizar mecánicamente el material compuesto bambú guadua laminado pegado prensado, BGLPP, ante solicitaciones de compresión, tensión, cortante y flexión, mediante ensayos experimentales de modelos físicos.

Los objetivos específicos fueron:

Determinar los módulos elásticos longitudinales a tensión, compresión y flexión en láminas de bambú guadua.

Determinar la densidad, contenido de humedad y porcentaje de fibras en láminas de bambú guadua.

Determinar la resistencia a compresión paralela y perpendicular a la fibra, las relaciones del esfuerzo normal vs deformación longitudinal, los módulos de elasticidad longitudinal y transversal y las relaciones de Poisson del material compuesto BGLPP.

Determinar la resistencia a tensión perpendicular a la fibra del material compuesto BGLPP.

Determinar el esfuerzo cortante máximo paralelo y perpendicular a la fibra del material compuesto BGLPP.

Determinar el esfuerzo cortante máximo y el módulo elástico de cortante, el esfuerzo de rotura y el módulo elástico longitudinal en ensayos de flexión del BGLPP.

Obtener la relación entre el esfuerzo crítico y la relación de esbeltez en columnas y la relación esfuerzo deformación en vigas de BGLPP.

### 1.3. HIPOTESIS

El material compuesto BGLPP reduce la dispersión de las características físicas y mecánicas del bambú guadua, permitiendo una mayor confiabilidad estructural.

### 1.4. ALCANCE

El BGLPP puede fabricarse de diferente forma según el tipo de prensado, la presión aplicada y el tiempo de presión, el curado, la orientación de las láminas, el tipo de pegante, el lugar de procedencia y la posición en altura de la planta del material base, el tamaño de las láminas. Esta investigación caracteriza el BGLPP fabricado bajo los siguientes parámetros:

Material base: *Guadua angustifolia* Kunth

Procedencia del material base: Parte inferior del culmo de guadas provenientes de un solo guadua (localizado en Ibama Cundinamarca).

Tipo de prensado: Prensado de láminas en una dirección. Dos etapas de prensado, en la primera para elaborar tableros y en la segunda para elaborar bloques de BGLPP. Presión aplicada de 0.6MPa a 0.7MPa en frío por un tiempo mínimo de 10 horas.

Dimensiones de láminas: entre 0.5mm y 0.9mm de espesor y longitud de 1.20m.

Pegante: Urea melanina formaldehído

Esto implicó que para la elaboración del BGLPP utilizado como material de las probetas y elementos estructurales; se realizara una supervisión de todo el proceso de fabricación desde el corte en la planta hasta la elaboración de las probetas manteniendo constantes, el lugar de procedencia del material base, los equipos, la mano de obra y los tiempos de espera y prensado en las diferentes etapas, la presión y el tipo de pegante para garantizar la trazabilidad del proceso.

## 2. MARCO TEÓRICO

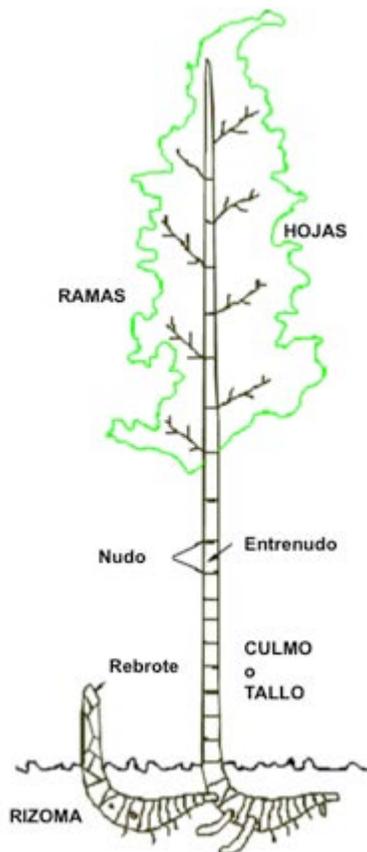
### 2.1. BAMBÚ *Guadua angustifolia* Kunth

La guadua es una gramínea nativa de la familia del bambú que se encuentra de forma abundante en Colombia donde hay cuatro especies. En la región central andina es abundante la presencia de la *Guadua angustifolia* Kunth, en los llanos orientales, Orinoquia y en la costa atlántica se encuentra la *Guadua Amplexifolia* y en el Amazonas y el corredor chocono se encuentran la *Guadua Superba* y la *Guadua Weberbauri* (Durán & Uribe, 2002).

#### 2.1.1 Morfología general del bambú guadua

Las partes principales de la guadua (Figura 2.1) son: el rizoma, el tallo o culmo, las ramas y las hojas. El *rizoma* es el sistema de soporte de la guadua. Tiene una parte superficial y una parte subterránea donde se encuentran las raíces de la planta, las cuales se ramifican y propagan generando brotes de nuevas guaduas.

Figura 2.1. Partes de la guadua



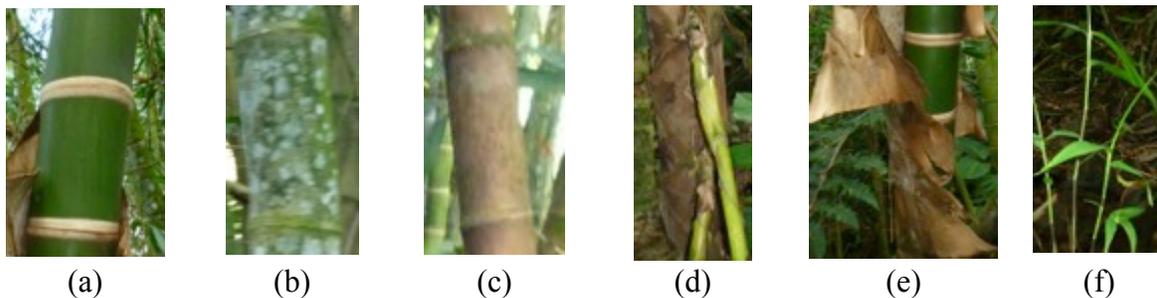
Fuente: Adaptación de Figura 1 de Camacho y Páez (Camacho & Páez, 2002)

El *culmo* del bambú guadua es su tallo y sale del rizoma. Se caracteriza por tener forma cilíndrica y hueca con segmentos formados por entrenudos, separados transversalmente por tabiques o nudos; la distancia entre los nudos puede variar entre 10cm y 40 cm de acuerdo a la variedad y posición en altura del culmo. El diámetro y el espesor de la pared del culmo disminuyen con la altura mientras la densidad, la concentración de fibras y la distancia entre nudos aumentan con ésta. Puede alcanzar alturas promedio de 18m a 20m y tener diámetros entre 5cm y 25cm.

A diferencia de la madera, el culmo no posee cambium y su crecimiento se realiza al alargarse los entrenudos. El proceso, que dura aproximadamente seis meses, comienza en el entrenudo inferior y termina en el superior disminuyendo paulatinamente su diámetro.

Cuando termina el desarrollo del tallo se inicia el proceso de maduración. La guadua antes de los 3 años es una guadua joven con coloración verde brillante (Figura 2.2(a)) y superficie libre de musgo, tiene un alto contenido de humedad, por lo cual al secarse, una vez se ha cortado para ser utilizada, presenta rajaduras y deformaciones, además es más susceptible de ser atacada por insectos. Entre 3 y 6 años de edad la guadua tiene su mayor resistencia y dureza siendo apta para la construcción, su tallo tiene una coloración verde oscura, líquenes y manchas de hongos (Figura 2.2(b)). Se conoce la guadua de esta edad como madura o adulta. Posteriormente, cuando la guadua está sobremadura o seca, el tallo toma un color amarillento y pierde resistencia (Figura 2.2(c)).

Figura 2.2. Edades de guadua (a) Guadua joven, (b) guadua madura, (c) guadua sobremadura y partes secundarias (d) yemas, (e) hojas caulinares y (f) hojas foliares



Fuente: Autor

Las *ramas* salen de las yemas que se encuentran por encima de las líneas de los nudos (Figura 2.2(d)) cuando ha terminado el proceso del desarrollo del culmo. Las *hojas caulinares* (Figura 2.2(e)) que se forman en cada uno de los nudos que aparecen, protegen la parte aérea de los rizomas, el tallo y las yemas en su proceso de formación y se desprenden una vez ha concluido este proceso. Las *hojas foliares* tienen forma alargada y longitudes entre 15 y 20 cm y anchos entre 2 y 5 cm (Figura 2.2(f)).

### 2.1.2 Anatomía del culmo del bambú *Guadua angustifolia* Kunth

El comportamiento mecánico del culmo del bambú ante diferentes solicitaciones y direcciones depende de su anatomía interna.

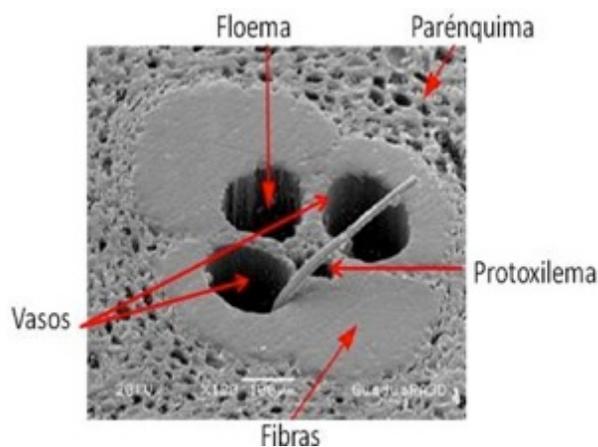
En la sección transversal de los culmos de los bambúes, incluyendo la *Guadua angustifolia* Kunth, se pueden distinguir: la corteza exterior, la capa interna, los haces vasculares y el tejido parenquimático.

La *corteza* es la parte exterior del culmo y tiene la función de proteger la parte interna e impedir el paso de agua que pueda deteriorar el tejido interno. Esta es la razón por la cual posee además de las células alargadas axialmente, propias del tejido, parejas de células cortas de corcho y sílice que le dan características de dureza e impermeabilidad. Las células de la epidermis están cubiertas además de una capa cutinizada de celulosa, en la *Guadua angustifolia* no se evidencia un recubrimiento de cera que se encuentra en otros bambúes (Londoño, Camayo, Riaño, & López, 2002).

La *capa interna*, está compuesta de capas de células que rodean la cavidad interna de la guadua.

Los *haces vasculares* están compuestos por el sistema conductivo (formado por dos vasos, el floema y el protoxilema), las células parenquimáticas entre los tubos que forman el sistema conductivo y los haces de fibras (Figura 2.3).

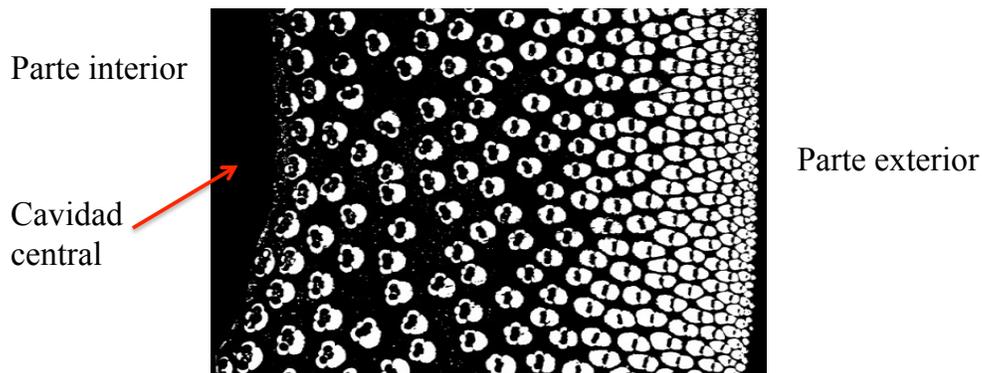
Figura 2.3. Haz vascular del Bambú *Guadua angustifolia*



Fuente: (Sánchez, del Real, & Rodríguez, 2010)

El tamaño, la forma y la distribución de los haces vasculares, varían en la sección transversal de la pared y a lo largo del culmo. En la pared del culmo se observa que en la zona cercana a la cavidad central los haces vasculares son más grandes y se encuentran más separados y en la medida que se acercan a la parte exterior son de menor tamaño y están más compactos (Figura 2.4). En sentido longitudinal, debido a la reducción gradual del espesor de la pared, los haces vasculares varían en forma, tamaño y distribución de entrenudo a entrenudo.

Figura 2.4. Distribución de haces vasculares en *Guadua angustifolia* en una porción de pared del culmo



Fuente: (Torres, Plata, Díaz, & Takeuchi, 2014)

Todas las partes que componen los haces vasculares, cumplen una función específica. El sistema conductivo, formado por el protoxilema, el floema y los vasos, es el responsable del transporte del agua y las sustancias en la planta; en las primeras etapas del crecimiento esta función recae en el protoxilema por ser el primer vaso que se forma y posteriormente, en la planta viva ya desarrollada los vasos garantizan el movimiento del agua por el tamaño y forma que tienen; y el floema, que en la *Guadua angustifolia* está compuesto de 14 a 25 tubos cribosos (Londoño et al., 2002), es el encargado del transporte de los asimilables.

Separando los tubos que conforman el sistema conductivo, se encuentran células parenquimáticas, más pequeñas que las de la matriz, unidas al tejido conductivo mediante punteaduras pequeñas y alternadas. Aislado el sistema conductivo se encuentran los haces de fibras, formadas por cadenas de celulosa resistentes a la tensión, que garantizan que el culmo soporte adecuadamente las sollicitaciones de flexión por viento y peso sin romperse.

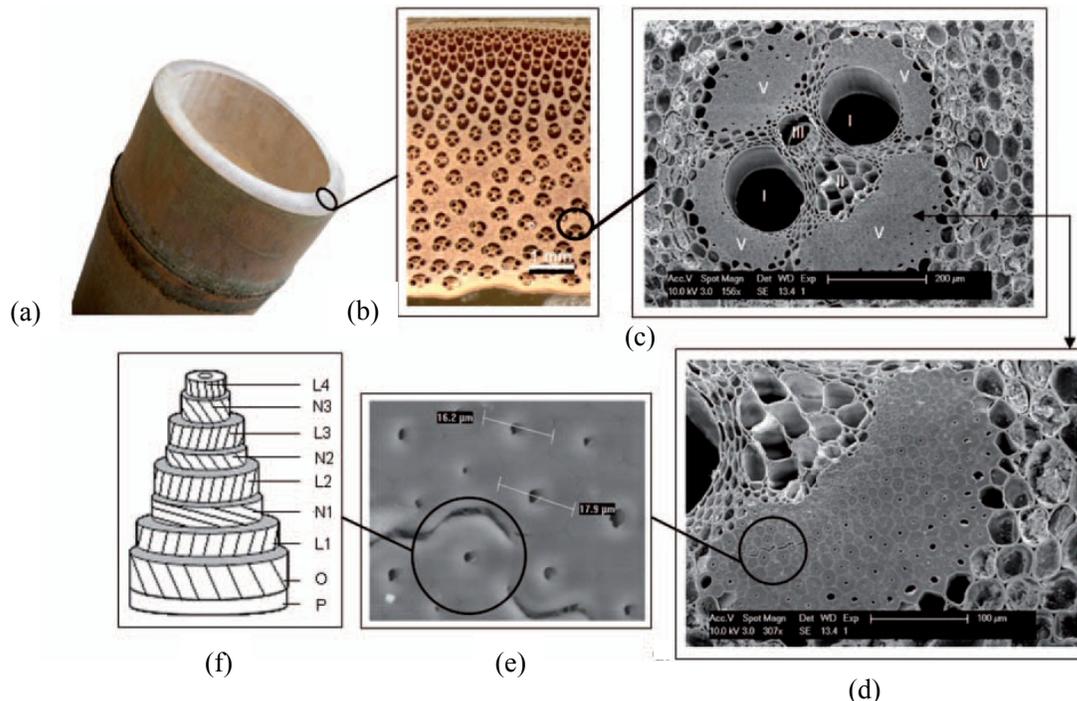
La matriz que rodea los haces vasculares es la *parénquima* la cual es responsable del almacenamiento y soporte de la planta.

### 2.1.2.1 Distribución de las fibras

En la Figura 2.5 tomada de (Osorio, Trujillo, Van Vuure, & Verpoest, 2011) se observa la distribución de las fibras. En la Figura 2.5(a) se observa un tramo de culmo de bambú *Guadua angustifolia*, en la Figura 2.5(b) la distribución de los haces vasculares en la pared del culmo, en la Figura 2.5(c) un haz vascular compuesto por vasos (I), floema (II), protoxilema (III), parénquima (IV) y haces de fibras, en la Figura 2.5(d) el haz de fibras cercano al floema, en la Figura 2.5(e) un acercamiento de éste donde se ven las fibras elementales con forma pentagonal y hexagonal y por último se aprecia en la Figura 2.5(f) el modelo de polilamelas propuesto por Liese (Liese, 1998).

Como se observa en la Figura 2.5(c), en el haz vascular se encuentran cuatro haces de fibras, los dos primeros rodean los vasos y los otros dos se encuentran junto al floema y al protoxilema. Los haces de fibras no se tocan entre sí en la parte media e interna de la pared del culmo, mientras que en las zonas de periferia y transición se unen rodeando el tejido conductivo (Londoño et al., 2002).

Figura 2.5. Distribución de Fibras en la sección transversal de la *Guadua angustifolia* Kunth



Fuente: (Osorio et al., 2011)

En la *Guadua angustifolia*, las fibras ocupan aproximadamente el 40% del volumen del culmo mientras que la parénquima el 51% y el tejido conductivo el 9%. En relación a la

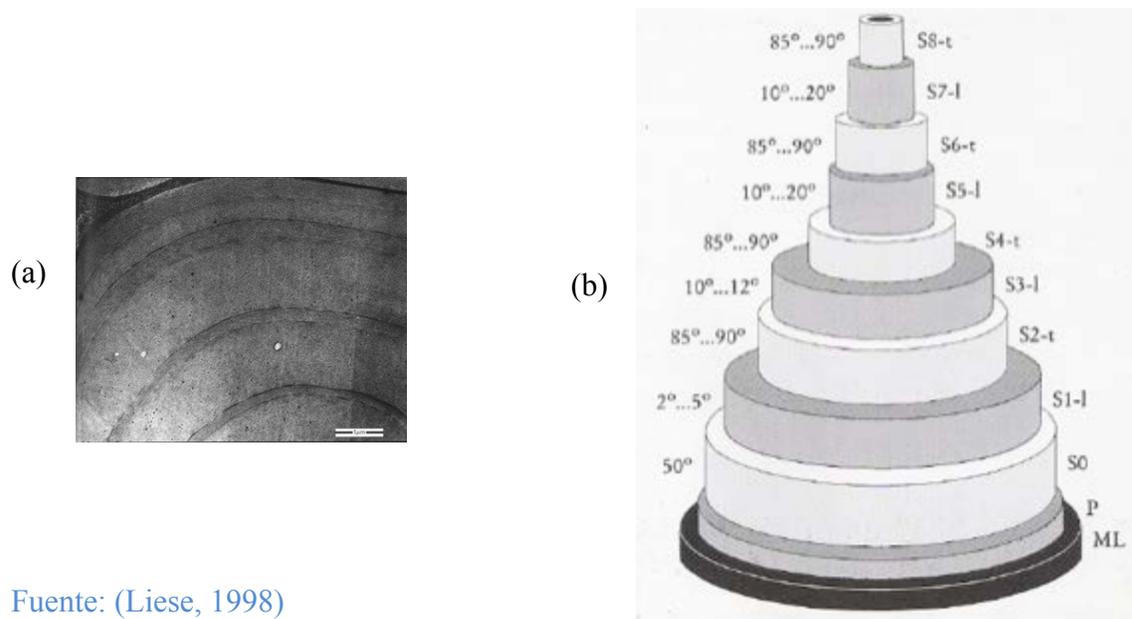
proporción de fibras con respecto a los haces vasculares, el porcentaje de fibra por haz vascular varía entre el 64.8% y el 97.2% en la pared del culmo; en la zona externa ocupa un 89.9% a 97.2% del haz vascular mientras que en la zona interna un 64.8% (Londoño et al., 2002).

### 2.1.2.2 Estructura de la pared celular de las fibras

Las fibras están formadas por cadenas de celulosa cuya unidad básica es la glucosa (compuesto orgánico originado en la fotosíntesis a partir de la combinación de agua y dióxido de carbono en presencia de luz solar). La glucosa se polimeriza formando cadenas de macromoléculas de celulosa, las cuales se unen para formar las microfibrillas.

Las células de la pared celular de las fibras están formadas por diferentes capas o lamelas de diferentes espesores (Figura 2.6(a)) donde las microfibrillas que las forman tienen diferente inclinación (Figura 2.5(f)). El número de lamelas varía en las fibras siendo mayor en los haces de fibra cercanos de la región adyacente a la corteza. En la Figura 2.6(b) se muestra un modelo de la estructura de la pared celular de la fibra de los bambúes (Liese, 1998). La pared está formada de afuera hacia adentro por la *lámina media* (ML), la *pared primaria* (P) y la *pared secundaria* (S) que a su vez está formada por diferentes lamelas. Estudios con microscopio electrónico muestran que la primera lamela de la pared secundaria tiene las microfibrillas orientadas  $50^\circ$  con respecto al eje de la célula, en las lamelas gruesas las microfibrillas se orientan en ángulos de  $2-5^\circ$ , aumentando a  $10-20^\circ$  hacia la parte interna y las microfibrillas de las lamelas angostas son transversales formando ángulos de  $85-90^\circ$ .

Figura 2.6. Distribución Modelo de la estructura de la pared de la fibra



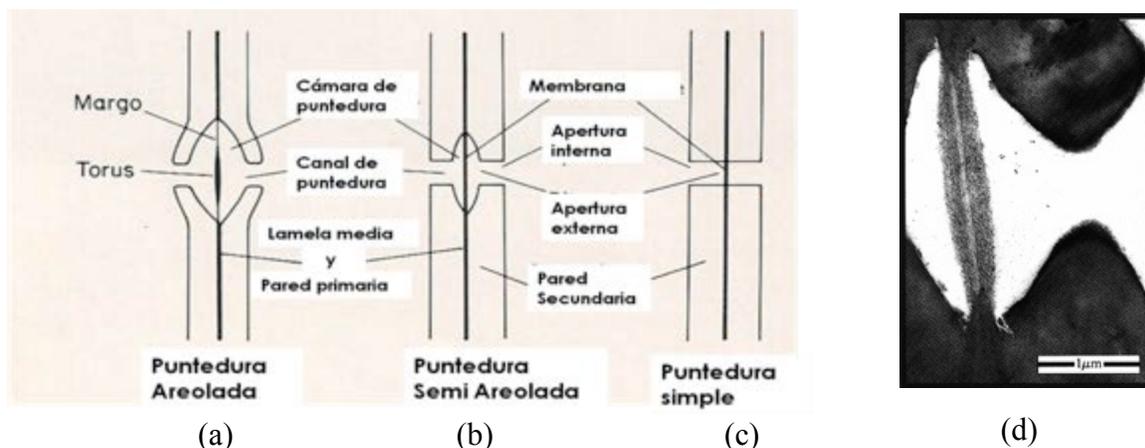
Fuente: (Liese, 1998)

En el modelo de la Figura 2.6(b) la nomenclatura de la derecha corresponde a la parte de la pared de la célula, la subdivisión de la pared secundaria (consecutivo) y la orientación de las microfibrillas de la respectiva lamela, longitudinal “l” para lamelas gruesas (en color oscuro) y transversal “t” para lamelas angostas (en color claro). La nomenclatura de la izquierda corresponde a la orientación en grados de las microfibrillas con respecto al eje de la célula.

Las fibras de los bambúes son más largas que las de maderas duras pero menores que las de maderas blandas, en la *Guadua angustifolia* miden en promedio aproximadamente 1.60mm con un ancho de 11µm. La longitud de las fibras varía en el espesor del culmo siendo más cortas en la parte externa y aumentando hacia el interior hasta llegar al tercio medio interior de la pared del bambú, cuando nuevamente empieza a disminuir su longitud.

Las fibras se conectan entre sí mediante punteaduras semiaeroladas con bordes y cámara muy pequeña (Figura 2.7). La membrana de la punteadura está formada por la lámina media y las paredes primarias de la fibra.

Figura 2.7. Mecanismos de conexión entre fibras: (a) punteadura areolada, (b) punteadura semi areolada, (c) punteadura simple y (d) fotografía de punteadura entre fibras en *Dendrocalamus Strictus*

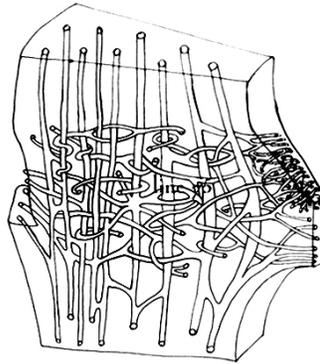


Fuente: (a) (b) y (c) (Meylan & Butterfield, 1972) y (d) (Liese, 1998)

### 2.1.2.3 Estructura del nudo

Mientras en los entrenudos los haces vasculares están orientados axialmente, en la región de los nudos algunos de estos se orientan horizontalmente. Como se observa en la Figura 2.8 la mayoría de los haces vasculares principales atraviesan longitudinalmente el nudo, en la zona externa se doblan ligeramente y en la zona interna se conectan al diafragma. Algunos ramas secundarias de las haces vasculares conectan la periferia con la zona interna y muchos pequeños haces se voltean horizontalmente y se doblan entrelazándose (Liese, 1998).

Figura 2.8. Haces vasculares en la región del nudo (Liese, 1998)

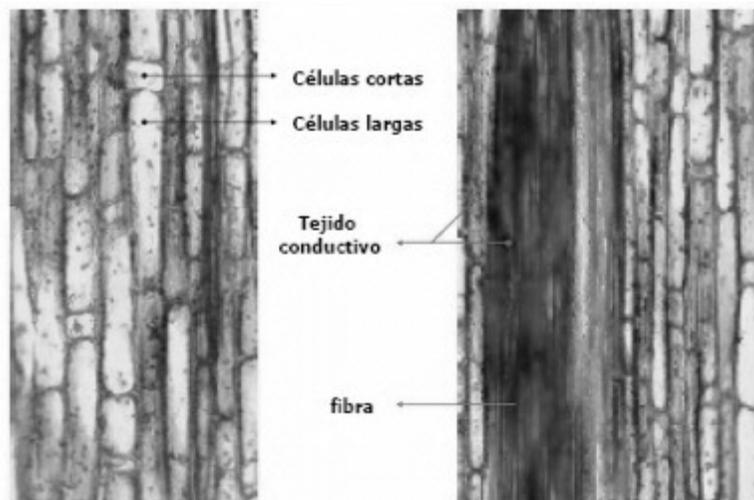


Fuente: (Liese, 1998)

#### 2.1.2.4 Parénquima

La parénquima es la matriz que rodea los haces vasculares. Hay dos tipos de células alternadas, alargadas y cortas (Figura 2.9). En estudios de culmos de diferentes edades (6 meses, 1 año y 7 años) se ha encontrado que el espesor de las paredes celulares de la parénquima de la *Guadua angustifolia* aumenta significativamente con la edad, el cual se correlaciona con el aumento del número de lamelas y posiblemente con el aumento de la resistencia a compresión con la edad (Rashid, 2003).

Figura 2.9. Corte longitudinal del culmo de *Guadua angustifolia*

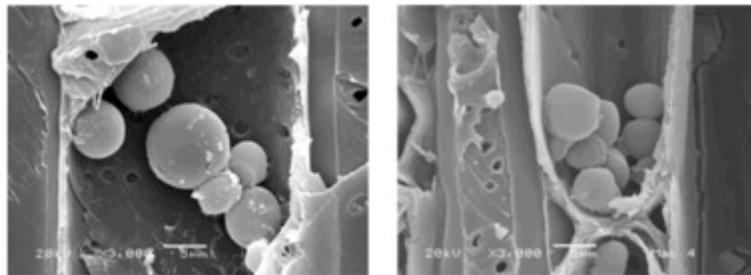


Fuente: (Londoño et al., 2002)

La parénquima es la encargada del almacenamiento y el soporte del culmo. En la Figura 2.10 se observan imágenes de células parénquimas de un culmo de *Guadua angustifolia* con almidones. La parénquima se relaciona con el contenido de humedad del bambú. Se ha

encontrado que el contenido de humedad de un culmo es mayor en la base que en la parte superior, esto se atribuye al porcentaje de parénquima que existe y que muestra la capacidad de almacenamiento que este tiene, ya que la diferencia del contenido de humedad en época lluviosa a época seca varía significativamente en los bambúes; por ejemplo en India se encontró un contenido de humedad en *Dendrocalamus strictus* de 144% en la base y 110% en la punta en agosto y de 81% y 39%, en junio (Liese, 1998).

Figura 2.10. Imágenes SEM de almidones encontrados dentro de las células parénquimas de culmos de *Guadua angustifolia*



Fuente: (Sánchez et al., 2010)

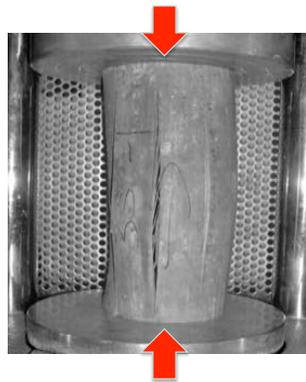
### 2.1.3 Comportamiento físico mecánico de la *Guadua angustifolia*

Por ser los haces de fibras, que en adelante se llamarán fibras, orientados axialmente, la guadua posee una alta resistencia a la tensión paralela a las fibras. La resistencia a la tensión de probetas extraídas de la pared externa es más alta que de la pared completa, debido a que la parte exterior es dura y tiene mayor cantidad de fibras. Por otro lado, la resistencia a la tensión en probetas con nudo es menor que en probetas sin nudo, debido a que el nudo es la parte débil de la guadua por la orientación de algunos haces vasculares. Carvajal y colaboradores (Carvajal, Ortegón, & Romero, 1981) encontraron valores promedio de resistencia a la tensión de 165MPa, 156MPa y 87MPa de probetas extraídas de la pared externa con nudo, de la pared completa sin nudo y de la pared completa con nudo respectivamente.

La resistencia a la compresión paralela a las fibras en columnas cortas es menor que la resistencia a la tensión (por lo menos en un 25%), aún considerando en el último caso, probetas de la pared completa con nudo. En sus trabajos Martín y Mateus (Martín & Mateus, 1981) encontraron esfuerzos máximos a compresión paralela a la fibra de 66MPa, para una humedad del 12% y una edad comprendida entre 3 y 5 años mientras que López y Silva (López & Silva, 2000) encontraron valores promedio de 44MPa, Martínez (Martínez, 1992) encontró valores de 34MPa, Durán y Uribe (Durán & Uribe, 2002) encontraron valores promedio de resistencia de 50MPa, mínimos de 38MPa y máximos de 62MPa y González (González, 2006) encontró un valor promedio de resistencia de 56MPa.

La menor resistencia a compresión paralela a las fibras, se debe a que la guadua está formada por fibras longitudinales fuertes, pero, a diferencia de la madera, no tiene fibras radiales que unan las fibras longitudinales, las cuales están en una matriz relativamente débil y blanda lo que hace que la resistencia a la tracción perpendicular a las fibras de la guadua sea muy pequeña. Al aplicar la fuerza vertical, se presenta una fuerza radial horizontal hacia afuera que separa las fibras debido a que no existe un mecanismo lo suficientemente fuerte que las mantenga unidas. Los tabiques ayudan en cierta medida, pero al tener un comportamiento pobre ante esfuerzos de tracción en su plano, simplemente se rompen, permitiendo la falla de compresión paralela a las fibras por la separación de las fibras longitudinales (Figura 2.11).

Figura 2.11. Falla por compresión paralela a las fibras



Fuente: (C. E. González, 2006)

Por tener únicamente fibras en sentido longitudinal, la resistencia al cortante paralelo a las fibras y a la tensión perpendicular a las fibras es muy baja. Para la *Guadua angustifolia*, Pantoja y Acuña (Pantoja & Acuña, 2005) encontraron en ensayos de cortante paralelo a la fibra valores de resistencia promedio de 7MPa y Pacheco (Pacheco, 2006) encontró un valor promedio de resistencia a la tracción perpendicular de 0.74MPa.

Dentro de las investigaciones de caracterización físico mecánica de la *Guadua angustifolia* rolliza es importante mencionar el proyecto “Validación de la *Guadua angustifolia* como elemento estructural para el diseño por el método de los esfuerzos admisibles” (Luna, Lozano, & Takeuchi, 2014; Universidad Nacional de Colombia, 2012) donde se hizo un estudio de las propiedades físico mecánicas de la guadua proveniente de tres regiones de Colombia (Cundinamarca, Quindío y Valle del Cauca) y de diferentes partes del tallo. Se siguió un protocolo de corte de los culmos, se elaboraron para cada uno, formatos de esquemas de corte de las diferentes probetas de compresión, tensión, cortante, torsión y flexión. A diferencia de otros estudios donde las probetas para un tipo de sollicitación provenían de pocos culmos, en este, las probetas para cada tipo de sollicitación se extrajeron de un amplio número de culmos de manera aleatoria. Todas las probetas se sumergieron en tanques de agua previamente. Se ensayaron, siguiendo los lineamientos de la NTC 5525

(ICONTEC, 2007), 227 probetas a compresión paralela a la fibra, 263 a cortante paralelo a la fibra, 221 a tensión paralelo a la fibra y 154 a compresión perpendicular a la fibra. También se realizaron 89 ensayos a flexión y 34 a torsión.

Por región (de las tres estudiadas de Colombia), se obtuvieron valores promedio de resistencia a compresión paralela a la fibra entre 32.3MPa a 33.9MPa con coeficientes de variación entre el 22.5% y 30% y de módulo de elasticidad longitudinal a compresión entre 8008MPa a 10169MPa con coeficientes de variación entre el 55.4 % y el 72.3% y valores promedio de resistencia a tensión paralela a la fibra entre 55.5MPa a 66.9MPa con coeficientes de variación entre el 18.5% y 22.2% y de módulo de elasticidad longitudinal a tensión entre 5668MPa a 7534MPa con coeficientes de variación entre el 36.5 % y el 44.2%-

Se encontraron valores promedio de resistencia a flexión entre 65.0MPa a 68.8MPa con coeficientes de variación entre el 26.0% y 48.2% y de módulo de elasticidad entre 13564MPa a 15052MPa con coeficientes de variación entre el 18.6% y el 74%, valores promedio de resistencia a cortante paralelo a la fibra entre 5.5MPa a 6.4MPa con coeficientes de variación entre el 17% y el 24% y de resistencia a compresión perpendicular a la fibra entre 2.5MPa a 5.2MPa con coeficientes de variación entre el 37.3% y el 41%. A partir de ensayos de compresión perpendicular a la fibra se determinó adicionalmente un módulo de elasticidad circunferencial de 419MPa a 750MPa con coeficientes de variación entre 68.4% a 99.34%.

## 2.2 EL BAMBÚ *Guadua angustifolia* Kunth COMO MATERIAL COMPUESTO

Al estudiar la anatomía del culmo del bambú *Guadua angustifolia* se encuentra que este es un material compuesto de fibras reforzadas continuas unidireccionales, donde la matriz está formada por las células de parénquima que rodean los haces vasculares y las fibras serían el conjunto de haces de fibras que están axialmente orientados a lo largo del entrenudo del culmo.

Como el espesor de la pared del culmo del bambú disminuye con la altura, el porcentaje de fibras con respecto al área de la pared aumenta en altura por lo que se tiene una estructura macroscópica funcionalmente gradada (Amada & Untao, 2001).

Adicionalmente teniendo en cuenta que la separación de los haces vasculares disminuye desde la parte interna a la parte externa y el porcentaje de las fibras en los haces vasculares aumenta desde la parte interna a la externa, el cambio de la fracción volumétrica de fibras en la pared hacen que la estructura microscópica de los bambúes se considere funcionalmente gradada (Amada, Ichikawa, Munekata, Nagase, & Shimizu, 1997). Por ser

la *Guadua angustifolia* un bambú, se comporta como un material compuesto de fibras reforzadas continuas unidireccionales funcionalmente gradado.

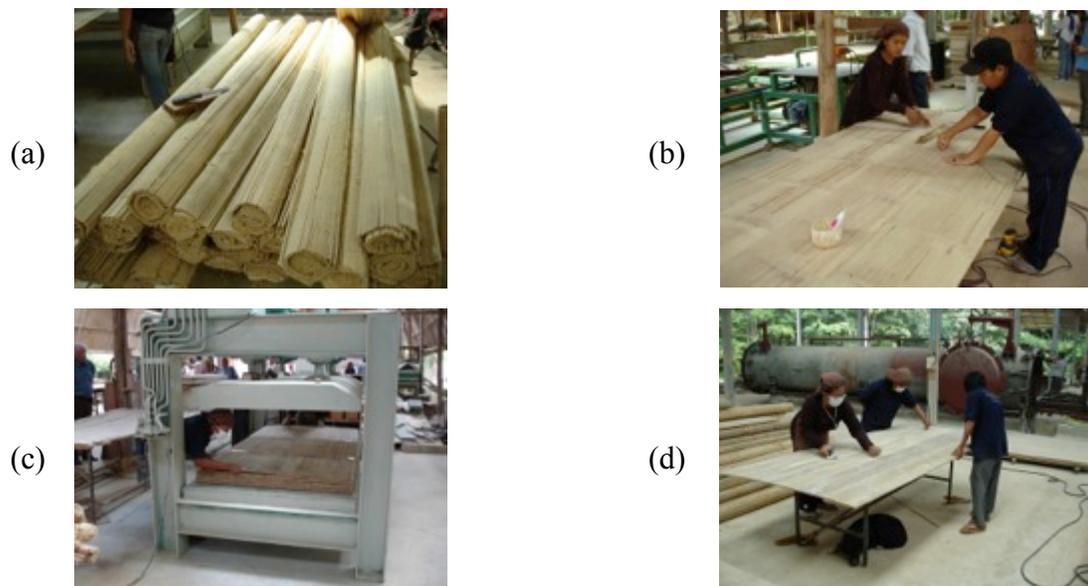
En el año 2004 Osorio y Trujillo (Osorio & Trujillo, 2004) encontraron una resistencia promedio a tensión de 642MPa y un módulo de elasticidad promedio de 26600MPa en haces de fibras de *Guadua angustifolia* Kunth. Posteriormente en ensayos a tensión de fibras individuales encontraron valores de resistencia de 800MPa y de módulo de elasticidad de 43000MPa (Osorio et al., 2011).

## 2.3 BAMBÚ GUADUA LAMINADO PEGADO PENSADO (BGLPP)

### 2.3.1 Introducción

Recientemente, se han desarrollado en diferentes lugares del mundo varias tecnologías para elaborar tableros y elementos de bambú prensados. En algunos casos, se elaboran esterillas de bambú (Figura 2.12(a)), a las cuales se les aplica adhesivo (Figura 2.12(b)), para luego ser prensadas en varias capas (Figura 2.12(c)), formando un tablero (Figura 2.12(d)).

Figura 2.12. Elaboración de tableros de bambú a partir de esterillas en Tailandia: (a) esterillas de bambú, (b) aplicación del adhesivo, (c) prensado y (d) tablero terminado

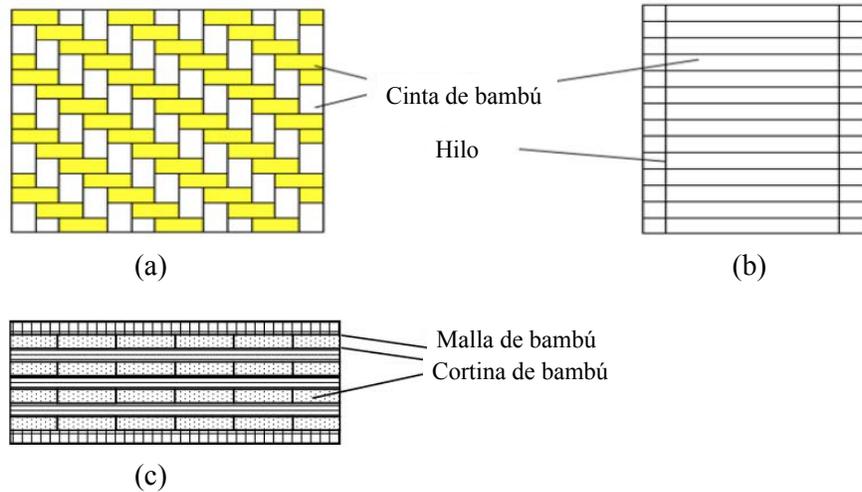


Fuente: Juan Carlos Camargo

Yan Xiao y colaboradores (Xiao, Shan, Yang, Li, & Chen, 2014; Yang, Xiao, & Lam, 2014) han realizado numerosas investigaciones sobre el comportamiento para uso estructural de tableros prensados (registrados como GluBam) elaborados con cintas de bambú entrelazadas manualmente en dos direcciones formando mallas (Figura 2.13(a)).

También se elaboran tableros prensados elaborados con cortinas de cintas de bambú en una dirección (Figura 2.13(b)), o combinando tableros elaborados con cintas de bambú en una y en dos direcciones como se observa en la Figura 2.13(c).

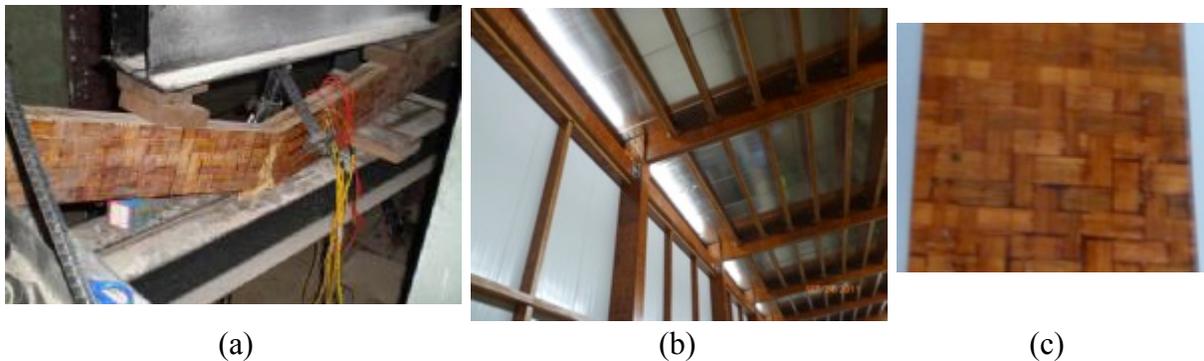
Figura 2.13. Bambúes laminados: (a) Mallas de bambú, (b) cortinas de bambú, (c) tableros elaborados con mallas y cortinas de bambú alternados.



Fuente: (Wang, Shyam, Chen, & Gao, 2009)

Se encuentran también resultados de ensayos en elementos estructurales como vigas de Glulam como el mostrado en la (Figura 2.14(a)) (Zhon, Xiao, Shan, & She, 2010). Así como construcciones con este tipo de material (Figura 2.14(b)).

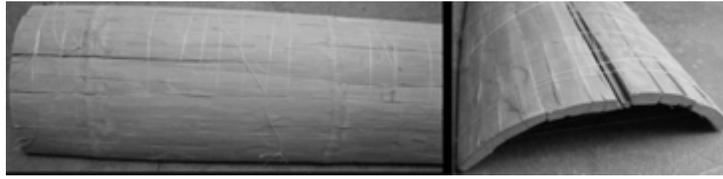
Figura 2.14. Glulam (a) Ensayo de vigas, (b) estructura y (c) acercamiento de columna



Fuente: (a) (Zhon, Xiao, Shan, & She, 2010), (b) y (c) autor.

Una tecnología diferente de elaborar tableros de bambú es la desarrollada por Madavi y colaboradores (Mahdavi, Clouston, & Arwade, 2012). En esta metodología (Figura 2.15) inicialmente se lija la superficie externa del bambú, se abre, se lija la superficie interna y se aplatna el material para finalmente prensarlo. Al realizar ensayos de flexión se encontró que las propiedades mecánicas son comparables con otros productos de bambú laminado.

Figura 2.15. Técnica de Mahdavi para obtención de bambú para elementos laminados



Fuente: (Mahdavi et al., 2012)

Archila (Archila, Ansell, & Walker, 2014) ha ensayado paneles de bambú *Guadua angustifolia* Kunth elaborados con piezas sin corteza, las cuales antes de ser utilizadas para la fabricación de los paneles, son prensadas bajo condiciones específicas de temperatura y presión (Figura 2.16). Con este proceso se disminuye el desperdicio del material de bambú.

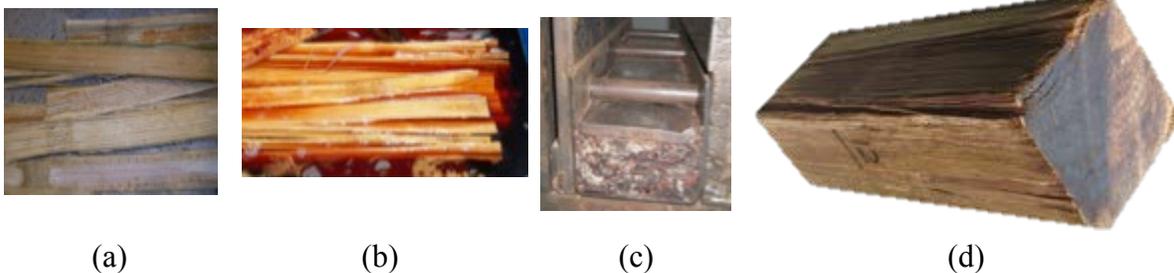
Figura 2.16. Elaboración de paneles (a) aplicación de presión y temperatura de piezas de bambú y (b) tablero conformado



Fuente: (Archila et al., 2014)

El material fibra de guadua compactada, se fabrica con láminas de poco espesor que pasan por unos rodillos que separan ligeramente sus fibras. A estas láminas se le coloca adhesivo para ser prensadas con calor (Figura 2.17). Se determinaron las propiedades mecánicas de este material así como los porcentajes de delaminación (Luna & Takeuchi, 2014; Torres, Luna, & Takeuchi, 2014).

Figura 2.17. Elaboración de bambú guadua compactado (a) láminas, (c) aplicación de adhesivo, (d) prensado y (e) producto final



Fuente: César Ardila

El proceso de fabricación de la madera de bambú laminada (laminated bambú lumber LBL) es similar al anterior solo que parte de esterillas. Sinha y colaboradores (Sinha, Way, & Mlasko, 2014) estudiaron el comportamiento del LBL con dos tipos diferentes de adhesivo y de GluBam ante diferentes solicitaciones. Nugroto y colaboradores estudiaron el comportamiento a flexión del LBL con diferentes formas de colocación de capas (Nugroto & Ando, 2001).

Otro proceso para elaborar elementos de bambú laminado pegado prensado consiste en obtener piezas con anchos y espesores constantes mediante procesos de mecanizado para luego ser prensados. Pereira & Beraldo (Pereira & Beraldo, 2010) han desarrollado el proceso de fabricación de probetas de bambú laminado colado – BLC de la especie *Dendrocalamus Giganteus*.

Yeh y Lin (Yeh & Lin, 2011) estudiaron el comportamiento de conexiones finger joint en elementos de bambú laminado pegado prensado solicitados a flexión. Los elementos se elaboraron con dos tipos de bambú, *Dendrocalamus latiflorus* y *Phyllostachys pubescens* de la parte baja, media y alta. También encontraron valores de resistencia a compresión y cortante en probetas de bambú laminado.

Li y colaboradores (Li, Zhang, Huang, & Deeks, 2013) estudiaron el comportamiento ante solicitaciones de compresión paralela a la fibra en probetas de bambú Mosso (*Phyllostachys pubescens*) laminado pegado prensado. Wang (Wan, 2005) realizó un análisis numérico de bambú laminado.

### 2.3.2 Proceso de fabricación del BGLPP

El BGLPP (Figura 2.18), se elabora al unir láminas de bambú guadua por sus caras, extremos y/o cantos con adhesivos para conformar elementos que funcionan como una unidad. En el BGLPP no se limita la sección, largo ni forma del elemento por lo cual se puede aprovechar al máximo las características y propiedades de la guadua y minimizar sus limitaciones y defectos.

Figura 2.18. Bambú guadua laminado prensado pegado



Fuente: Autor

El proceso del BGLPP inicia desde el aprovechamiento de los culmos de guadua, el corte por tramos y proceso de curado en el guadua y la obtención de tiras a partir de guadua rolliza las cuales pasan a un proceso de secado y posterior maquinado para ajustar tanto el ancho como el espesor. Obtenidas las láminas con terminado a cuatro caras se procede a realizar una selección, se les aplica el adhesivo y se prensan ya sea en frío o en caliente. A los elementos ya laminados se les da un tiempo de reposo, para que el pegante adquiera su resistencia antes del maquinado final para darles el terminado definitivo.

El adhesivo utilizado para unir las láminas afecta tanto la resistencia y la durabilidad del elemento, por tanto, se debe conocer su costo y sus características, la manera como interactúa con la lámina, su susceptibilidad a agentes biológicos y a diferentes condiciones ambientales, para hacer una cuidadosa selección del pegante más apropiado. El adhesivo utilizado en elementos estructurales debe garantizar que el elemento laminado sea durable ante las condiciones ambientales de humedad y temperatura y cumpla los requisitos de resistencia al fuego.

Como el laminado de guadua es hasta ahora incipiente, los adhesivos que se utilizan en el BGLPP son los de la madera laminada. En varias investigaciones realizadas con BGLPP se ha estudiado el comportamiento de estos al ser fabricados con urea formaldehído, resorcina fenol formol (RFF), melamina fenol formol (MUF), polivinil acetato (PVA) y algunos pegantes naturales de origen animal (Correal & Ramirez, 2010; Cortes, Lozano, Rusinque, & Takeuchi, 2010; González, Hellwig, & Montoya, 2009).

La urea formaldehído, la resorcina fenol formol (RFF) y la melamina fenol formol (MUF) son resinas formadas al reaccionar el formol (formaldehído) con urea, resorcina-fenol y melamina-urea respectivamente; y que son mezcladas con un catalizador para endurecerla. Las proporciones de la mezcla dependen del tipo de resina, la manejabilidad, el tiempo de fraguado y tiempo de armado de las piezas. Se pueden utilizar en procesos de prensado de elementos en frío o en caliente, donde el tiempo en que la presión se mantiene depende de la preparación de las mezclas, el tipo de proceso y la temperatura; los procesos de prensado en caliente necesitan menor tiempo de prensado.

La resistencia de la urea formaldehído bajo condiciones ambientales de alta temperatura y humedad es baja. La adición de melamina o resorcina mejora esta debilidad por lo cual la resorcina fenol formol y la melamina fenol formol son adhesivos termoestables con resistencia a condiciones agresivas y son recomendados para la elaboración de elementos estructurales.

Un adhesivo utilizado ampliamente por su bajo costo para la elaboración de madera contrachapada, aglomerados, tableros o simplemente para adherir madera es el PVA (adhesivo a base de polivinil acetato). Por su baja resistencia a la humedad, no es

recomendado para elaborar elementos estructurales y su uso se limita para elementos no estructurales que no sean de vital importancia para la estabilidad de la estructura.

El pegante natural de origen animal estudiado en la investigación de Cortés y colaboradores (Cortes et al., 2010) es un adhesivo natural a base de colágeno, utilizado en las carpinterías para pegar maderas. Aunque el producto laminado elaborado con este adhesivo alcanza altas resistencias mecánicas su uso debe restringirse para elementos no estructurales ya que ante la acción del fuego y de la humedad pierde su resistencia mecánica (Luna, Takeuchi, & Córdón, 2014; Rusinque, 2011).

### **2.3.3 El BGLPP como material compuesto multicapas**

El BGLPP es un material compuesto multicapa, donde cada capa es una lámina de guadua que es a su vez un material compuesto por las fibras y la matriz de parénquima. Aun cuando las láminas son materiales compuestos con fibras reforzadas continuas unidireccionales gradados es importante tener en cuenta que en algunos puntos la totalidad de las fibras no son paralelas entre sí por la presencia de nudos.

Como elemento compuesto multicapa, la falla se puede presentar en la lámina por rotura de las fibras solicitadas a tensión, pandeo de las fibras solicitadas a compresión, fractura de la matriz, falla de la matriz por compresión o falla de la unión fibra matriz por delaminación del material compuesto multicapas al fallar la unión entre láminas.

### **2.3.4 Comportamiento mecánico del BGLPP**

Como se mencionó en el capítulo de introducción se han realizado diferentes investigaciones sobre el comportamiento mecánico del BGLPP dentro de los cuales se puede mencionar:

La influencia de la disposición de las láminas teniendo en cuenta la variación de densidad en el espesor de la guadua se estudió en la Universidad Tecnológica de Pereira (González, Hellwig, & Montoya, 2008) donde se realizaron ensayos de corte a probetas con 3 tipos de pegantes y disposiciones diferentes de láminas (cara interior de una lámina en contacto con la cara exterior de su vecina y cara exterior de una lámina en contacto con la cara exterior de su vecina). En dicho estudio se encontró que para probetas de guadua laminada que utilizaban Melaminha Rzeim II como adhesivo, las probetas con posición de caras interior-cara exterior se cumplían los requerimientos de esfuerzo cortante último de la DIN EN 392.

Díaz y colaboradores (Díaz, Cruz, & Chávez, 2013) ensayaron a flexión probetas con diferentes disposición de láminas y encontraron para cada caso valores de densidad y resistencia.

López (López & Correal, 2009) realizó un estudio exploratorio del potencial estructural de laminados en guadua al ensayar probetas de BGLPP fabricado con polivinilo de acetato ante diferentes solicitaciones (compresión y tensión paralela y perpendicular a la fibra; corte paralelo a la fibra y flexión) donde se encontraron valores de resistencia ante estas solicitaciones y módulos de elasticidad. Los coeficientes de variación estuvieron entre el 5% y 22%.

Correal y colaboradores (Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014) reportan valores de propiedades físicas, resistencias y constantes elásticas de BGLPP ante diferentes solicitaciones.

Para evaluar la influencia del tipo de pegante en el comportamiento mecánico del BGLPP Cortés (Cortes et al., 2010) realizó ensayos ante diferentes solicitaciones a 712 probetas elaboradas con cuatro tipos diferentes de pegantes (urea melanina formaldehído, Fenol formol resorcinol, polivinilo de acetato y pegante natural de origen animal).

Se ha evaluado también el comportamiento de elementos fabricados con BGLPP como vigas (Gonzalez, Hellwig, & Montoya, 2008; Hackmayer, Rodríguez, & Takeuchi, 2010; Rodríguez & Takeuchi, 2010), columnas (Alvarado, Moreno, & Takeuchi, 2010), paneles (J. Correal & Varela, 2012) y tableros de piso (Pinilla, 2010) y de estructuras como cerchas (Barreto, 2003) y estructuras tensegrity (Durán M. , 2003). En el trabajo de investigación “Elaboración de tablas y gráficos de diseño a flexión de vigas de Guadua laminada pegada prensada” (Rodríguez, 2011) se encontró que el módulo de elasticidad a flexión y el módulo elástico de cortante varían con la disposición de las láminas en vigas macizas solicitadas a flexión en un porcentaje importante, una de las razones por lo cual ocurre se debe a la disposición gradada de las fibras de la lámina; si las láminas trabajan horizontalmente dentro del elemento, se presentan capas horizontales de menor y mayor densidad alternas (la concentración de fibras es más alta en el lado de la lámina que corresponde a la cara externa que en el otro lado que corresponde a la capa interna) mientras que cuando las láminas trabajan verticalmente se presentan capas alternas de menor y mayor densidad verticales; como el elemento está solicitado a flexión el comportamiento es mejor en el segundo caso.

En los trabajos anteriores se encontró que cuando se tiene un buen manejo en la fabricación del elemento laminado (como presión, dosificación y tiempos de manejo del adhesivo, mano de obra etc) las fallas por delaminación (donde se ve la presencia de adhesivo) no se presentan.

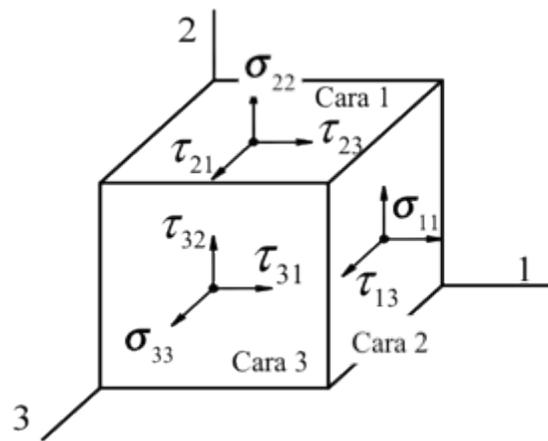
Las conexiones entre elementos se han estudiado en la Universidad de los Andes. Quiroga (Quiroga, 2009) realizó un estudio acerca de la influencia de nodos y uniones dentadas en laminados de guadua y Atoche (Atoche, 2009) evaluó el comportamiento estructural de conexiones de guadua laminada.

## 2.4 RELACIONES ESFUERZO VS DEFORMACIÓN DE UN ELEMENTO INFINITESIMAL EN EL RANGO ELÁSTICO

### 2.4.1 Generalidades

En la Figura 2.19 se observa un elemento infinitesimal en un sistema de ejes cartesianos 1, 2, 3 donde se representan los esfuerzos normales que actúan<sup>1</sup>  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  y  $\sigma_{33}$  y los esfuerzos cortantes<sup>2</sup>  $\tau_{12}$ ,  $\tau_{13}$ ,  $\tau_{23}$ ,  $\tau_{21}$ ,  $\tau_{31}$  y  $\tau_{32}$

Figura 2.19. Esfuerzos en un elemento infinitesimal



Fuente: Autor

Si se escribe la relación entre los esfuerzos  $\sigma$  y las deformaciones  $\epsilon$  como:

$$\epsilon = C \sigma \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde  $\epsilon$  y  $\sigma$  son los vectores de deformación y esfuerzo respectivamente y  $C$  es la matriz de flexibilidad.

Para materiales ortótropos, con simetría en tres planos ortogonales y comportamiento diferente en tres direcciones la Ecuación 2.1. se podría escribir de manera ampliada como:

<sup>1</sup> El esfuerzo normal  $\sigma_i$  actúa en la cara  $i$  la cual es perpendicular al eje  $i$

<sup>2</sup> El esfuerzo cortante  $\tau_{ij}$  actúa en la cara  $i$  y tiene una dirección paralela al eje  $j$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.2

Los coeficientes de la matriz de flexibilidad se expresan en función de las constantes elásticas del material. En materiales isotrópicos, se tienen 2 constantes elásticas independientes: el módulo de elasticidad y el módulo elástico a cortante que son los mismos en todas las direcciones. Sin embargo, en materiales ortótropos como el bambú se tendrían 9 constantes independientes: los módulos elásticos longitudinales en las tres direcciones coordenadas  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$  y los módulos elásticos a cortante  $G_{21}$ ,  $G_{31}$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{32}$ ,  $G_{13}$  y  $G_{23}$ .

#### 2.4.2 Comportamiento ante sollicitación axial en una dirección en un material ortótropo

Si siguiendo el procedimiento descrito por Vinson y Sieralowski (Vinson & Sieralowski, 2002) al considerar un ensayo axial en la dirección 1, la ecuación 2.1 tendría la forma de:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ -\nu_{21}\epsilon_1 \\ -\nu_{31}\epsilon_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.3

donde  $\nu_{ij}$ , es el valor negativo de la relación entre la deformación en la dirección  $i$  y la deformación en la dirección  $j$  debido a una carga aplicada en  $j$ , denominado coeficiente de Poisson.

Por tanto las deformaciones en las direcciones 1, 2 y 3 serían:

$$\epsilon_1 = c_{11} \sigma_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_1}$$

Ecuación 2.4

donde  $E_1$  es el módulo de elasticidad en la dirección 1.

$$\varepsilon_2 = c_{21} \sigma_{11} = -\nu_{21} \varepsilon_1 = -\nu_{21} \frac{\sigma_{11}}{E_1} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$\varepsilon_3 = c_{31} \sigma_{11} = -\nu_{31} \varepsilon_1 = -\nu_{31} \frac{\sigma_{11}}{E_1} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Por tanto:

$$c_{11} = 1/E_1, \quad c_{21} = -\nu_{21}/E_1, \quad c_{31} = -\nu_{31}/E_1 \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Para un ensayo axial en la dirección 2, siguiendo el mismo procedimiento, se tendría:

$$c_{12} = -\nu_{12}/E_2, \quad c_{22} = 1/E_2, \quad c_{32} = -\nu_{32}/E_2 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Y si se realiza el ensayo axial en la dirección 3, se tendría:

$$c_{13} = -\nu_{13}/E_3, \quad c_{23} = -\nu_{23}/E_3, \quad c_{33} = 1/E_3 \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Como la matriz de flexibilidad es simétrica se establece una relación entre los coeficientes de Poisson y los módulos de Young de la forma:

$$\frac{\nu_{ij}}{\nu_{ji}} = \frac{E_j}{E_i} \quad (i, j=1,2,3) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

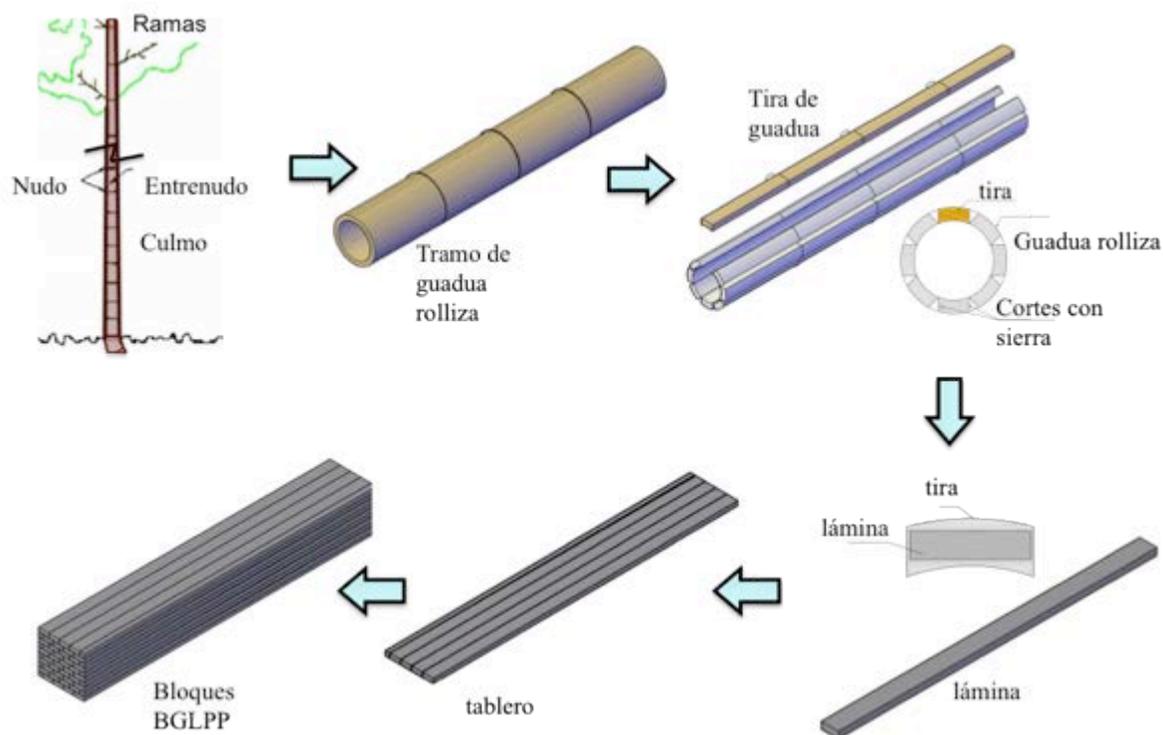
La Ecuación (2.10) es de gran importancia y ampliamente usada en el análisis de materiales compuestos.

### 3. ELABORACIÓN DE PROBETAS

El proceso de elaboración de los elementos ensayados comienza con el corte del bambú guadua en el sitio, hasta el afinado de las probetas. Este proceso incluye, la obtención del material natural, el curado en sitio, el corte e inmunización de los tramos, la obtención y secado de las tiras de guadua, la elaboración de las láminas, el prensado, curado y cepillado de los tableros, el prensado, curado y cepillado de los elementos macizos y finalmente, el corte y afinado de las probetas.

En la Figura 3.1 se muestra un esquema del proceso de transformación del bambú guadua hasta obtener el material compuesto bambú guadua laminado pegado prensado BGLPP.

Figura 3.1. Proceso de transformación del bambú guadua



Fuente: Autor

#### 3.1. MATERIAL

Las probetas se extraen del bambú *Guadua angustifolia* Kunth proveniente de un guadua natural, localizado en el corregimiento de Ibama del municipio de Yacopí de la región de Rionegro al norte del departamento de Cundinamarca en Colombia (Anexo A).

Para el corte o aprovechamiento del material natural, se seleccionaron 110 guaduas por su diámetro, estado de madurez y alineación con respecto a su eje longitudinal en los primeros tramos. El diámetro de los tallos medido a 1m desde la unión entre el rizoma y el culmo, estaba entre 15cm y 25cm. Se utilizaron guaduas maduras lo más rectas posibles.

El corte se realizó con motosierra y machete por encima del cuarto nudo, aproximadamente a 1m del inicio del tallo o culmo, entre las 12½ de la noche y 5½ de la madrugada en cuarto menguante. Las guaduas cortadas se dejaron en la misma planta para un curado en sitio por un tiempo de 2 meses (Figura 3.2).

Figura 3.2. Curado de la guadua en el sitio: (a) vista general, (b) acercamiento del corte



(a)



(b)

Fuente: Autor

Posterior al curado en sitio, se dividió la guadua. De la parte inferior del culmo, se cortaron dos o tres tramos para un total de 270 tramos y de la parte media un tramo largo por culmo. La parte superior de la guadua, enredada con las ramas y copas de otras guaduas por la densidad del guadual natural, se dejó en el sitio de corte, para facilitar su retiro, una vez sus hojas y ramas se hubieran secado; retiro que se realizó unos meses después para dejar limpio el guadual y utilizar estas partes de la guadua.

A los tramos de la parte inferior, más adecuados para la elaboración de laminados por su mayor espesor, se les aplicó por inyección una solución de ácido bórico y bórax en una proporción de 50 gramos de cada componente por litro de agua. Posteriormente fueron apilados en el sitio acondicionado para tal fin dentro del mismo guadual (Figura 3.3).

Figura 3.3. Tramos de guadua de la parte inferior: (a) vista de frente, (b) vista de lado



Fuente: (a) Ernesto Rodríguez y (b) Autor

Los tramos de la parte media se apilaron en sitios cercanos a donde fueron cortados, para su posterior utilización en otras aplicaciones diferentes a la producción de laminados (Figura 3.4).

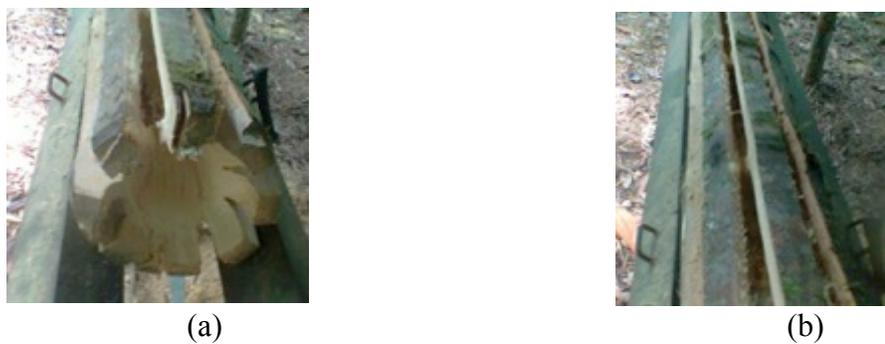
Figura 3.4. Tramos de guadua de la parte media



Fuente: Autor

Con el fin de facilitar su transporte, la guadua rolliza se dividió longitudinalmente en 8 tiras utilizando una sierra de discos paralelos como se observa en la Figura 3.5. Los residuos que quedaron por esta actividad se utilizaron para compostaje para abono del mismo guadua l u otros cultivos.

Figura 3.5. Elaboración de tiras: (a) extremo de guadua cortada, (b) parte media

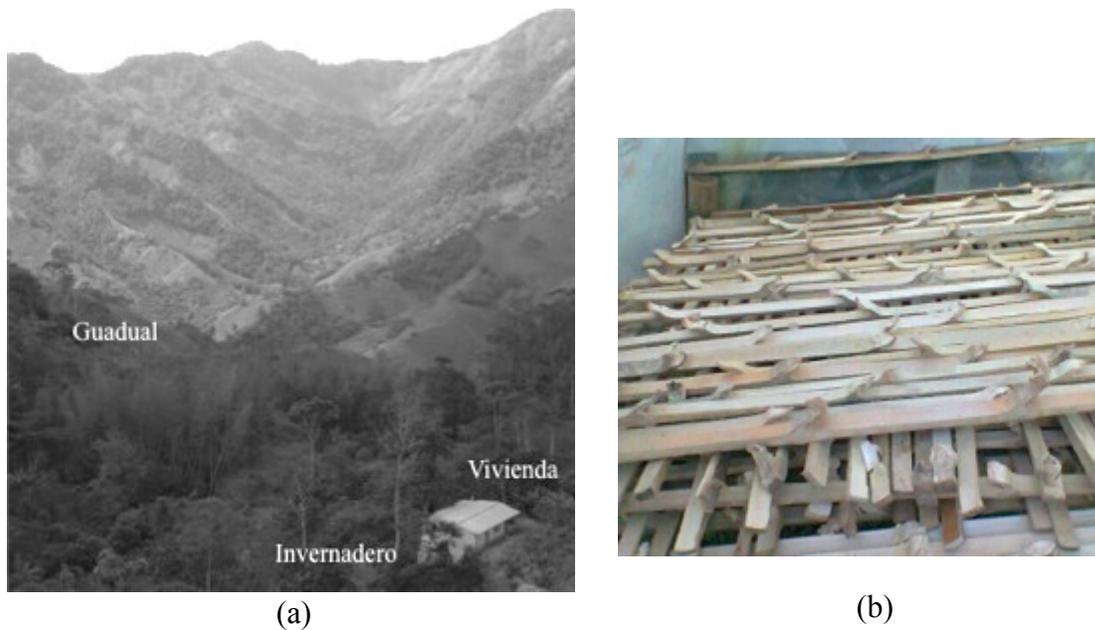


Fuente: Ernesto Rodríguez

Antes de la obtención de las tiras de bambú guadua, fueron determinados los espesores en los extremos del 50% de los tramos (con cuatro medidas en cada extremo) y la distancia entre sus nudos. En el Anexo B, se encuentran los datos registrados para 135 tramos, así como valores promedio de espesores, longitudes máximas, mínimas y promedio de los entrenudos y número de entrenudos. Los espesores promedio de los tramos medidos variaron desde 8.3mm en el extremo superior del tolete 63 hasta 31.8mm en el extremo inferior del tramo 5. Las longitudes de los entrenudos variaron desde 15cm para el tramo 31 que tenía 7 entrenudos completos hasta 48cm para el tramo 101 que tenía apenas 2 entrenudos completos.

Una vez obtenidas las tiras de bambú guadua, se les aplicó la misma solución de bórax y ácido bórico por aspersión y posteriormente se secaron en un invernadero de plástico localizado afuera del guadual, dentro de la misma finca, por un tiempo de 22 días. En la Figura 3.6(a) se observa una vista general desde la carretera del guadual, de la vivienda de la finca y del invernadero y en la Figura 3.6(b) se observan algunas tiras secándose dentro del invernadero.

Figura 3.6. Secado de tiras: (a) Localización del invernadero (b) vista interior



Fuente: (a) Autor y (b) Ernesto Rodríguez

Una vez las tiras de bambú guadua se secaron, se transportaron a las instalaciones de la Universidad Nacional sede Bogotá, Figura 3.7(a), donde fueron almacenadas en condiciones adecuadas, protegidas del sol y la lluvia y con suficiente aireación para evitar su deterioro, Figura 3.7(b).

Figura 3.7. Tiras de bambú guadua: (a) grupos transportados, (b) almacenamiento



(a)



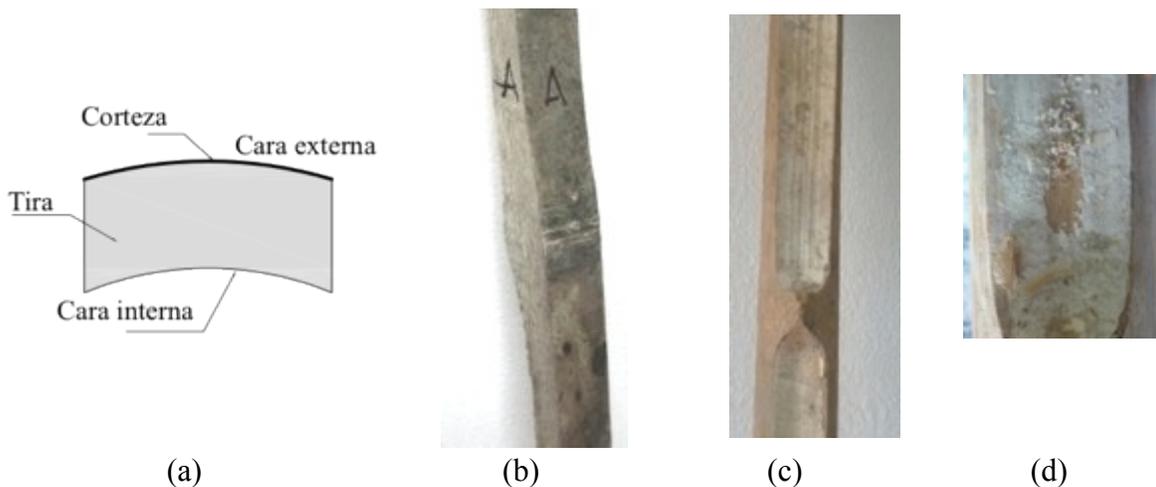
(b)

Fuente: Autor

### 3.2. ELABORACIÓN DE LAMINAS

Las tiras de bambú guadua cuya sección transversal se muestra en el esquema de la Figura 3.8(a), no son rectas, tienen en la cara externa la corteza, Figura 3.8(b) así como protuberancias tanto en la cara externa como en la cara interna, Figura 3.8(c), por la presencia de los tabiques o nudos. Sobre la superficie de la cara interna existe una capa lisa y suave, Figura 3.8(d), que no permite que exista adherencia.

Figura 3.8. Tiras de bambú guadua: (a) esquema sección transversal, (b) acercamiento de la cara exterior, (d) acercamiento de la cara interior y (e) capa superficial de la cara interior



(a)

(b)

(c)

(d)

Fuente: Autor

Para obtener las láminas utilizadas en los ensayos de caracterización mecánica, inicialmente se retiraron las protuberancias, la corteza y la parte interna de las tiras con una sierra de banco. Después se pasaron las tiras por el cepillo de carpintería hasta obtener un espesor constante y por una planeadora hasta que uno de los cantos fuera plano. Finalmente,

apoyándose en el canto plano, con la sierra de banco se cortó el otro canto para tener un ancho constante de lámina como se observa en la Figura 3.9.

Siguiendo el anterior procedimiento se elaboraron 14 láminas, de las cuales las primeras 10 fueron utilizadas para elaborar probetas de láminas ensayadas a tensión y compresión paralela a la fibra, y flexión. Con las otras 4 se elaboraron probetas de láminas ensayadas a tensión paralela a la fibra.

Figura 3.9. Maquinado de tiras de guadua: (a) corte lado interno, (b) retiro de corteza, (c) cepillado, (d) planeado de un borde longitudinal o canto, (e) corte del otro canto, (f) lámina después de proceso



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

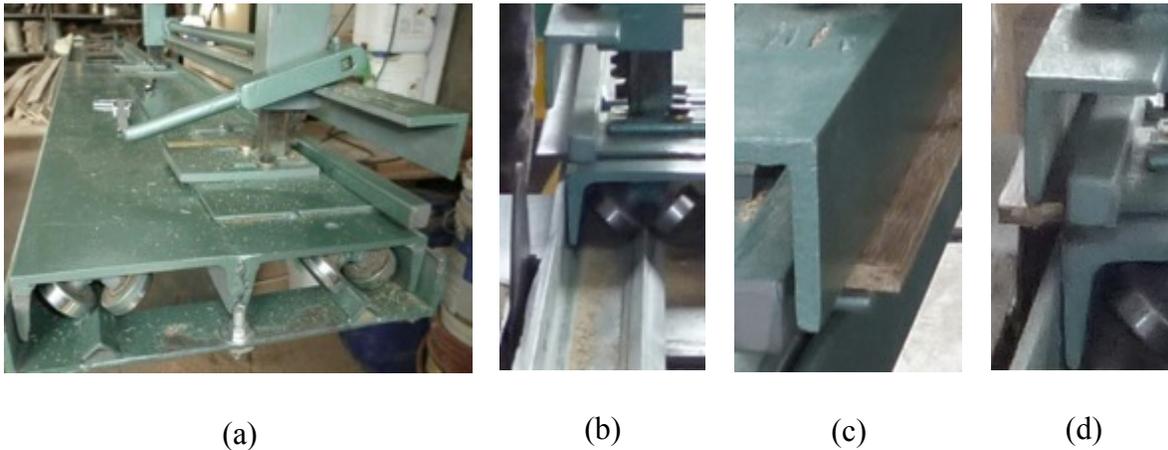
Fuente: Autor

Para el procesamiento de las láminas utilizadas para la elaboración del material compuesto BGLPP, se fabricó un carro guía adaptado a una sierra de carpintería que permite tener de manera rápida, láminas de ancho y espesor constantes.

El carro guía, tiene dos partes, una fija que se sujeta al banco de la sierra y una móvil que se desplaza sobre la parte fija a lo largo de unas guías. La tira de bambú guadua se coloca sobre una platina y se mantiene fija en toda su longitud por un ángulo. Uno de sus lados se apoya en un perfil sólido de sección cuadrada y el otro se encuentra libre para permitir su corte por la sierra. Es posible desplazar horizontalmente el conjunto formado por el perfil cuadrado y el ángulo para realizar los cortes longitudinales de la lámina a la medida deseada. La Figura 3.10(a) muestra el carro guía, la Figura 3.10(b) una vista parcial frontal

del carro guía y de la sierra, la Figura 3.10(c) un acercamiento de la vista posterior donde se observa la lámina colocada y la Figura 3.10(d) corresponde a una vista frontal del corte.

Figura 3.10. Corte de lámina a lo ancho: (a) vista general de carro guía, (b) sierra circular y parte móvil de carro guía, (c) colocación y fijación , (d) corte de un canto

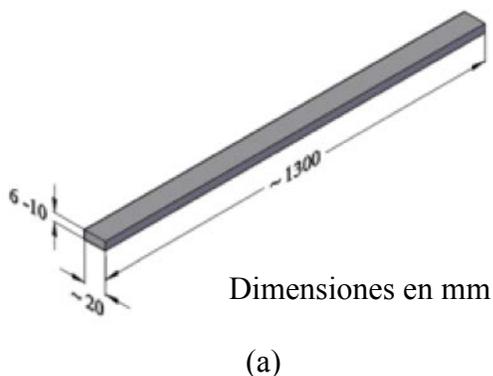


Fuente: Autor

Después de un corte inicial por las partes externas e internas, las tiras de guadua se clasificaron en grupos de acuerdo a su espesor. Por grupos, se cortaron los lados o cantos de las láminas en la sierra de banco con el carro guía garantizando así que tuvieran el mismo ancho a lo largo de su longitud y los cantos rectos. Posteriormente se cortaron las caras para que las láminas tuvieran espesores uniformes.

Con este proceso se obtuvieron grupos de láminas con el mismo espesor. Los grupos obtenidos fueron de 6, 7, 8, 9 y 10mm. En la Figura 3.11(a) se observa un esquema de una lámina y en la Figura 3.11(b) se observan las láminas obtenidas después del proceso de transformación a partir de las tiras de bambú guadua.

Figura 3.11. Láminas con terminado a cuatro caras: (a) esquema, (b) vista general



Fuente: Autor

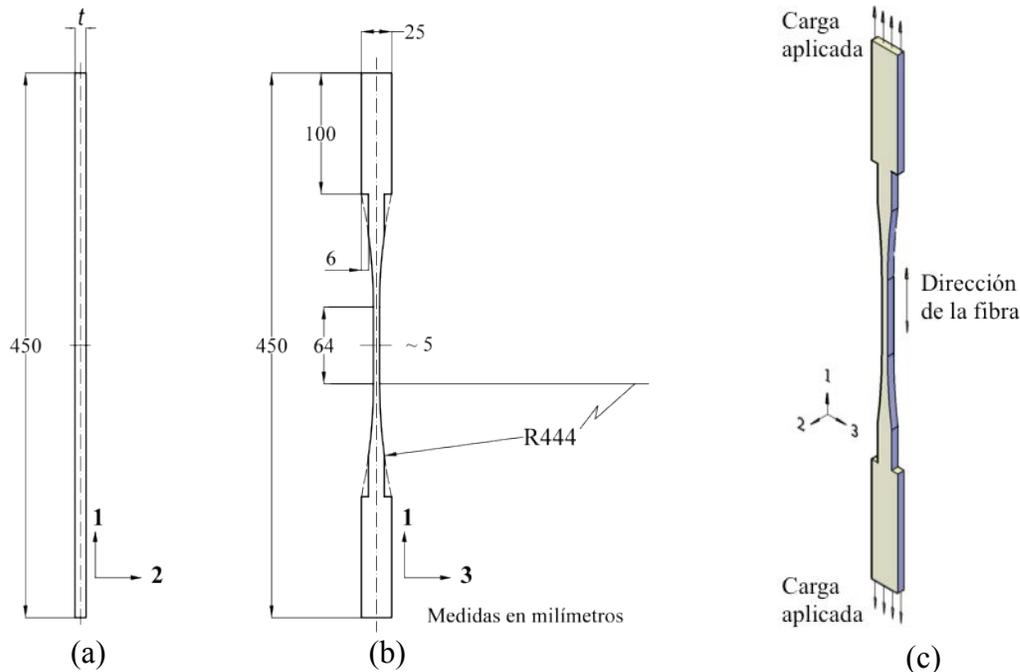
### 3.3. ELABORACIÓN DE PROBETAS A PARTIR DE LAS LAMINAS DE GUADUA

A partir de las primeras 10 láminas producidas se elaboraron diferentes probetas evitando la presencia de nudos. Tales probetas corresponden a los ensayos de tensión y compresión paralela a la fibra y flexión. Para cada una de estas láminas se realizó un esquema con la localización de los cortes necesarios para la elaboración de las probetas (esquemas de corte), donde se tuvo en cuenta la longitud de las láminas, la longitud de las probetas y la posición de los nudos. En el Anexo C se presentan los esquemas de corte de las probetas de estas 10 láminas. Posteriormente, se procesaron 10 láminas más, para elaborar probetas de tensión paralela a la fibra con diferente geometría.

#### 3.3.1. Elaboración de probetas a tensión paralela a la fibra

Se elaboraron dos tipos de probetas a tensión paralela a la fibra. Se observa en la Figura 3.12 la geometría de las probetas Tipo 1. Estas probetas son de espesor constante  $t$ , igual al espesor original de las láminas, Figura 3.12(a). El ancho es variable como se observa en la Figura 3.12(b). Vistas de frente, estas probetas son similares a las utilizadas para el ensayo de tensión paralela al grano en muestras de madera ASTM D143 (ASTM, 1994). En la Figura 3.12(c) se ilustra la dirección de la carga aplicada y de las fibras.

Figura 3.12. Probetas de láminas de tensión paralela a la fibra Tipo 1: (a) vista lateral, (b) vista frontal y (c) esquema de la dirección de la carga y de la fibra



Fuente: Autor

Para elaborar las probetas, se trazó la geometría en la lámina con una plantilla y con una sierra sin fin, se realizaron cortes iniciales de manera continua entre la parte ancha de los extremos y la porción central. Posteriormente se realizaron los cortes rectos correspondientes a las zonas de transición para finalmente limarlas y lijarlas. En la Figura 3.13 se observan las probetas Tipo 1 terminadas.

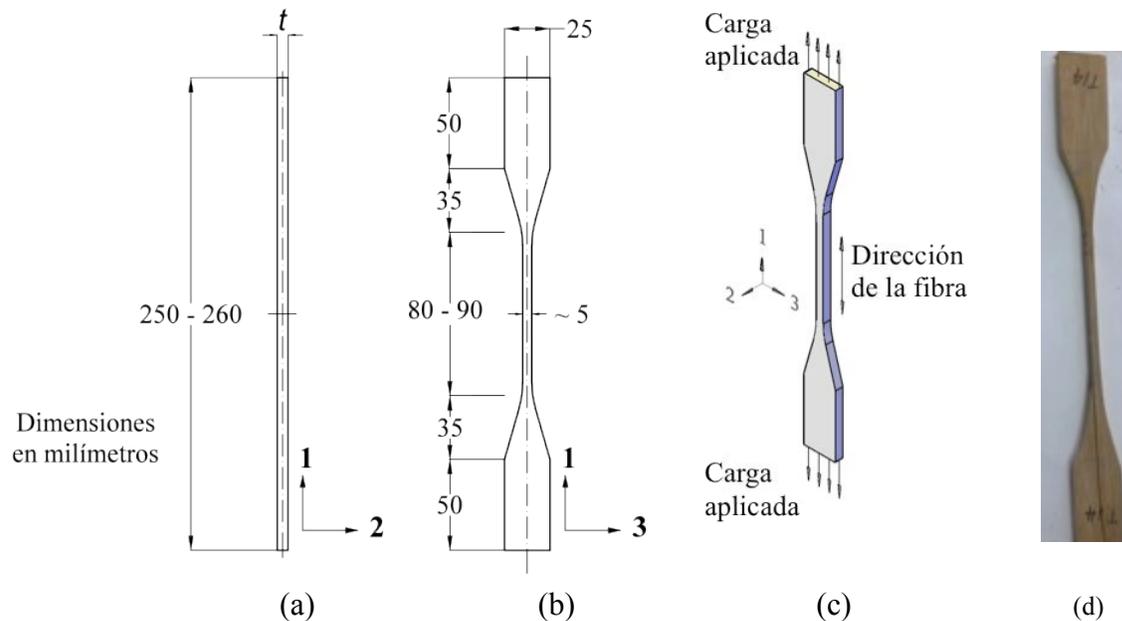
Figura 3.13. Probetas Tipo 1 de tensión paralela a la fibra



Fuente: Autor

La Figura 3.14 muestra las probetas a tensión Tipo 2. Esta probetas cuyo espesor  $t$  corresponde al espesor original de la lámina (Figura 3.14(a)), tienen una forma ahusada. De manera similar a las probetas Tipo 1, la porción central es más angosta que las porciones de los extremos, sin embargo, la transición entre estas dos zonas es gradual sin cambios bruscos (Figura 3.14(b), Figura 3.14(c) y Figura 3.14(d)). Estas probetas son similares a las utilizadas para el ensayo de tensión paralela a la fibra en muestras de *Guadua angustifolia* Kunth según la NTC 5525 (ICONTEC, 2007) con excepción de que no tienen nudo.

Figura 3.14. Probetas de tensión paralela a la fibra Tipo 2: (a) vista lateral, (b) vista frontal, (c) dirección carga y fibra y (d) probeta T11

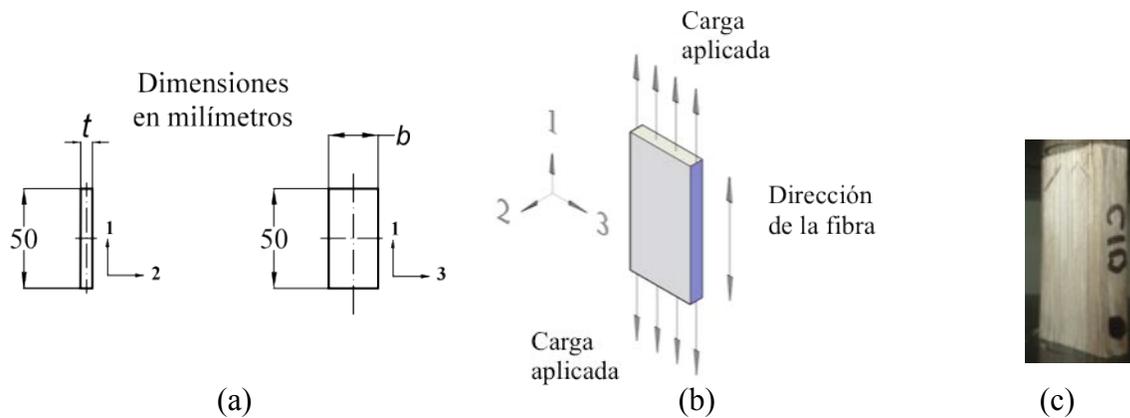


Fuente: Autor

### 3.3.2. Elaboración de probetas a compresión paralela a la fibra

Las probetas para ser ensayadas a compresión paralela a la fibra son prismáticas con espesor  $t$  que corresponde al espesor de la lámina y ancho  $b$  que corresponde al ancho de la lámina. Fueron elaboradas de 50mm de alto. La relación entre la altura y la dimensión mayor de la sección transversal es de 2 a 1. En la Figura 3.15 se muestra la geometría de las probetas de lámina para ser ensayadas a compresión paralela a la fibra y una fotografía de la probeta C10.

Figura 3.15. Probetas de láminas de compresión paralela a la fibra: (a) dimensiones, (b) dirección de la carga y de la fibra y (c) probeta C10

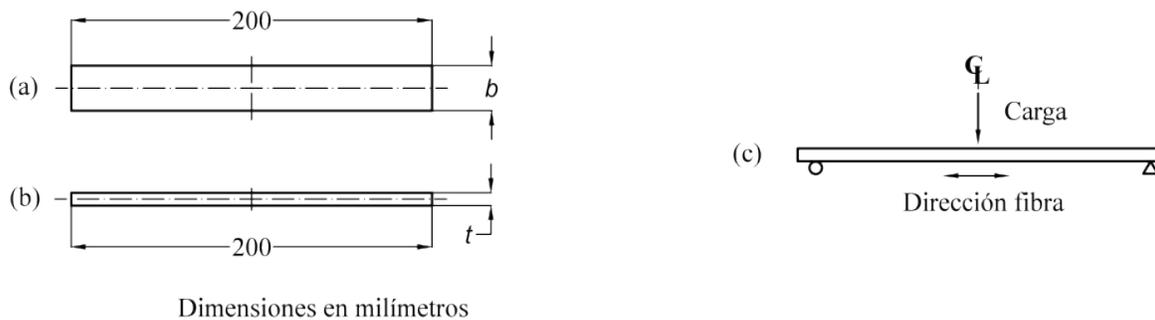


Fuente: Autor

### 3.3.3. Elaboración de probetas a flexión paralela a la fibra

La geometría de las probetas de lámina para ser ensayadas a flexión paralela a la fibra se observa en la Figura 3.16. En estas probetas el espesor  $t$  corresponde al espesor de la lámina y el ancho  $b$  corresponde al ancho de la lámina. La longitud de las probetas fue de 200mm.

Figura 3.16. Probetas de láminas de flexión paralela a la fibra: (a) vista superior, (b) vista lateral



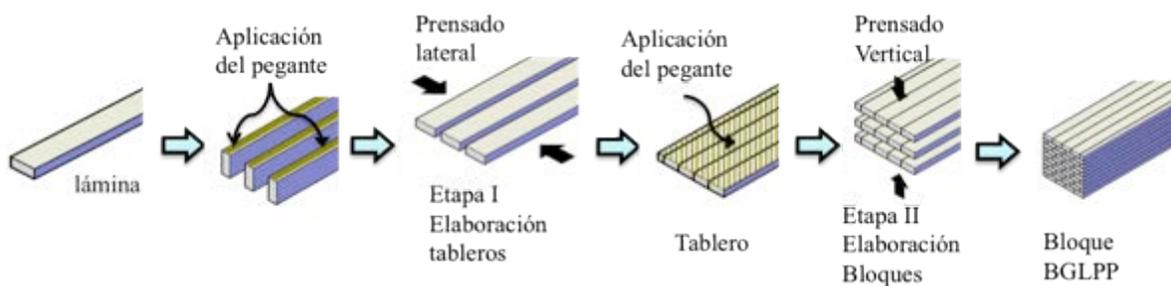
Fuente: Autor

### 3.4. ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO BGLPP

El bambú guadua laminado prensado pegado BGLPP, es un material compuesto conformado por un conjunto de láminas de bambú guadua, prensadas y pegadas entre sí. Para la elaboración de este material, se implementó un nuevo proceso de fabricación diferente al utilizado en la elaboración de las probetas preliminares de esta investigación y de proyectos anteriores desarrollados en la Universidad Nacional de Colombia (Cortés, 2009; Luna, Takeuchi, & Cerdón, 2014; Universidad Nacional de Colombia, 2012).

El proceso de fabricación del material compuesto BGLPP se realizó en dos etapas. En la primera etapa se prensaron y pegaron láminas individuales para formar tableros y en la segunda etapa se prensaron tableros para elaborar bloques macizos, de sección mínima de 11cm x 11cm y 130 cm de longitud (Figura 3.17).

Figura 3.17. Prensa de mesa para elaboración de tableros



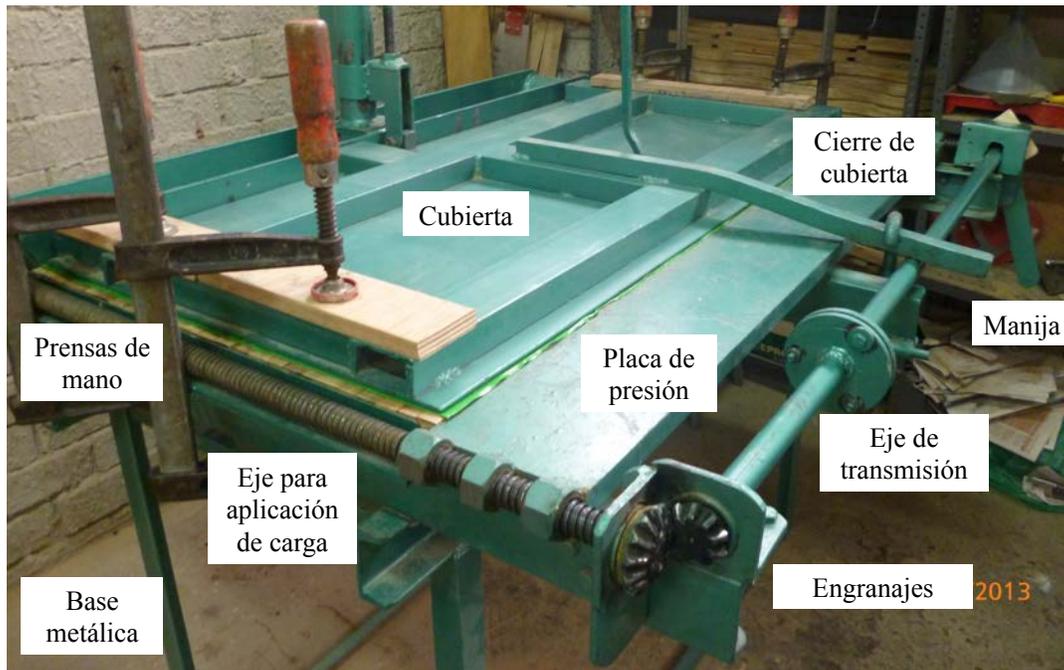
Fuente: Autor

Se elaboraron 10 bloques con 40 tableros a partir de 1000 láminas aproximadamente. Cada vez que se prensaban tableros se cortaban los extremos de las láminas para que tuvieran el largo deseado para el prensado (en este caso 1.20m). Se realizaron 3 cortes en las láminas; un primer corte en un extremo (inicial) para rectificarlo, el segundo corte se realizaba en el otro extremo (final) al igual que el primero para tener una superficie pareja y el tercer corte en el extremo final, para que la lámina midiera 1.20m.

#### 3.4.1. Elaboración de tableros de bambú guadua laminado

Para la elaboración de tableros se fabricó la prensa de mesa manual que se muestra en la Figura 3.18. En esta prensa, al girar la manija gira el eje de transmisión el cual engrana con dos ejes unidos a una placa que aplica presión de manera continua a los lados de las láminas en sentido transversal a las mismas. Mediante una escala angular se mide el ángulo de giro de la manija y se calcula la fuerza aplicada por la placa de presión (Anexo D).

Figura 3.18. Prensa de mesa para elaboración de tableros



Fuente: Autor

En esta prensa de mesa es posible fabricar tableros de 120cm de largo y 60cm de ancho o dimensiones menores. El espesor de la placa de presión es de 3cm, por lo cual es posible prensar 3 tableros de 1cm de espesor o el número equivalente de tableros dependiendo del espesor. Para evitar que las láminas se levanten en el momento de aplicar la presión, la prensa tiene una cubierta pesada que se asegura en la parte delantera con un gancho.

Para la elaboración de los tableros, se utilizó Urea Melanina Formaldehido como adhesivo cuyas características se presentan en el Anexo E. El adhesivo se aplicó simultáneamente a varias láminas de igual espesor, en sus cantos o lados, de manera manual como se observa en la Figura 3.19.

Figura 3.19. Aplicación del adhesivo a los cantos de varias láminas



Fuente: Autor

Una vez aplicado el pegante, las láminas fueron colocadas en la prensa de mesa para formar los tableros. En el momento de la colocación, se procuró que las caras con mayor densidad de fibras estuvieran del mismo lado del tablero, aun cuando no siempre fue posible, porque visualmente y al tacto en algunos casos, era difícil diferenciar las caras externas de las internas.

Para un fácil desmoldeo, se colocó plástico en la base de la prensa, entre tableros y por encima del último tablero. Inicialmente se prensó una fila de tableros, pero se observó que la presión de la cubierta no era suficiente, por lo cual se decidió colocar prensas de mano en los lados de la cubierta, logrando así tableros con buen terminado. Con este proceso fueron prensados hasta tres filas de tableros.

Al comienzo, se elaboraron tableros de 11cm de ancho, pero posteriormente se decidió trabajar con tableros de 60cm de ancho y cortar franjas de 11cm de ancho. Para la elaboración de los tableros, se aplicó una presión aproximada de 0.7 MPa (Anexo D) a temperatura ambiente. Se dejó el material prensando por un tiempo mínimo de 10 horas.

En la Figura 3.20 y en la Figura 3.21, se observan 5 tableros de 11cm y dos tableros de 60cm de ancho respectivamente, una vez retirada la presión y levantada la cubierta.

Figura 3.20. Tableros recién prensados



Fuente: Autor

Figura 3.21. Tableros de 60cm de ancho



Fuente: Autor

Una vez fabricados los tableros se dejaron 5 días en reposo, antes de darle el acabado final a sus caras con el cepillo de carpintería, para dar el tiempo necesario para que el adhesivo alcance su resistencia máxima. Se obtuvieron tableros desde 5mm hasta 8mm de espesor final.

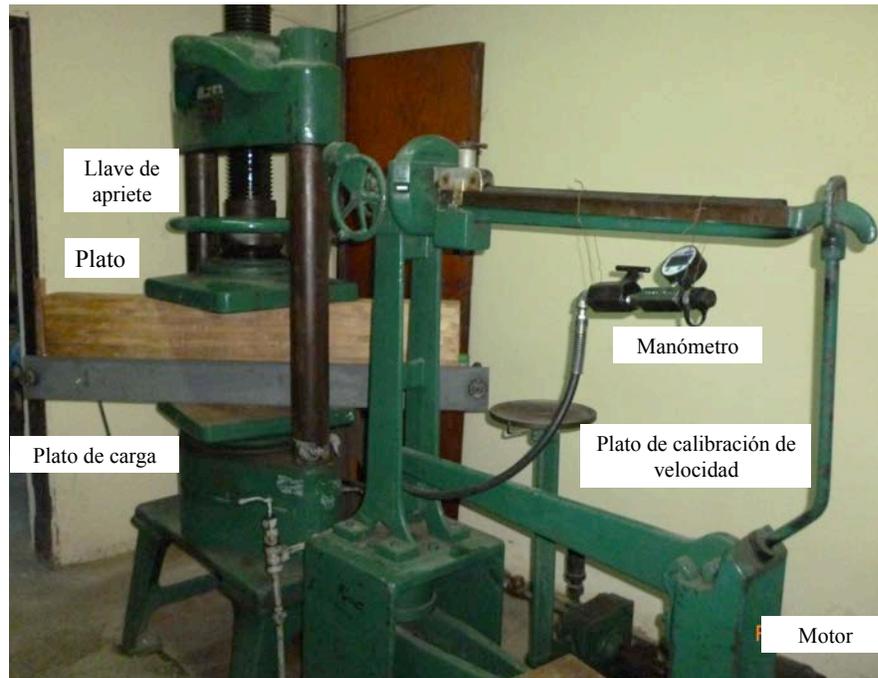
### 3.4.2. Elaboración de bloques de BGLPP

Para la elaboración de los bloques de material compuesto BGLPP, se utilizó una prensa de laboratorio que mantiene la carga en el tiempo y que se muestra en la Figura 3.22. La prensa consta del plato superior de ajuste, el plato inferior de carga, la instalación hidráulica y el motor, el plato de calibración de velocidad y el sistema de medición.

El plato superior, se encuentra unido a una rótula y a un eje roscado, el cual se puede subir y bajar manualmente, girando una llave de apriete circular. El plato inferior, igualmente unido a una rótula, se desplaza verticalmente y es el encargado de la aplicación de la carga. La instalación hidráulica, consta de un tanque de depósito de aceite y las tuberías e instalaciones, que permiten que circule el aceite al prenderse el motor y suba el plato de carga.

Es posible variar la velocidad de aplicación de la carga al girar el plato controlador que cierra o abre el paso del aceite. Adicional al sistema de medición del equipo, se colocó un manómetro, para medir la presión aplicada. La prensa de laboratorio mantiene la carga, aun cuando el motor se encuentre apagado hasta que se abre la llave de descarga.

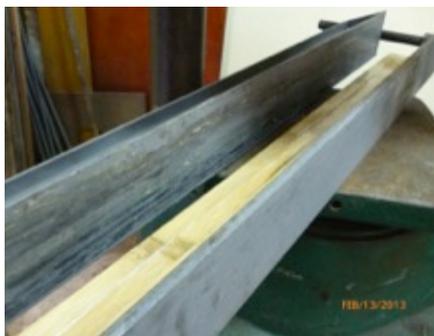
Figura 3.22. Prensa Riehle Bros



Fuente: Autor

Se fabricó un molde especial para la fabricación de los bloques de BGLPP de dimensiones máximas 12cm x 12cm x 120cm (Figura 3.23). El molde está conformado por dos partes unidas mediante ejes roscados. La primera parte, con sección transversal angular, conforma la base y una pared del molde. Los tableros se colocan sobre la base, alineados contra la pared. La segunda parte, con sección transversal en forma de doble T de aletas desiguales, es móvil y se puede deslizar, para el ajuste lateral de los tableros. El molde una vez cerrado, conforma una U que impide que los tableros se desalíneen en el momento de la aplicación de la carga vertical.

Figura 3.23. Molde para elaboración de bloques en BGLPP (a) abierto y (b) cerrado



(a)



(b)

Fuente: Autor

Antes del prensado de los bloques se realizó un armado en seco. Teniendo en cuenta los resultados encontrados por González y otros (González, Hellwig, & Montoya, 2008), se organizaron los tableros de manera que la cara con mayor densidad de fibras estuviera en contacto con una cara de menor densidad de fibras. Adicionalmente, se seleccionaron y organizaron los tableros para que las juntas verticales entre láminas que conforman un tablero, no coincidieran con las juntas verticales de los tableros vecinos. En la Figura 3.24, se muestra el extremo pulido de una probeta de compresión paralela a la fibra, donde se observan las caras con mayor densidad de cada una de las láminas, así como la unión vertical entre láminas.

Figura 3.24. Extremo pulido de probeta de compresión paralela a la fibra



Fuente: Autor

Posterior al armado en seco, se aplicó de manera manual el adhesivo (urea melanina formaldehido) a los tableros como se observa en la Figura 3.25(a), antes de ser colocados en el molde, (Figura 3.25(b) y Figura 3.25(c)), el cual ya se encontraba posicionado en la prensa por su peso.

Figura 3.25. Aplicación de adhesivo y armado de tableros en el molde



(a)



(b)



(c)

Fuente: Autor

Como los platos superior e inferior, sólo tenían 45 cm de lado y el material a prensar tenía una longitud de 120cm, el molde se localizó sobre la diagonal de los platos y se utilizó una viga de gran inercia de bambú guadua laminado para el ajuste inicial y como reacción de la carga vertical ascendente aplicada (Figura 3.26).

Figura 3.26. Proceso de prensado: (a) vista general y (b) vista lateral con acercamiento.



Fuente: Autor

Se aplicó una carga de 8000N (la presión de aplicación con la prensa fue de 350 psi y el cilindro de la máquina es de 8" de diámetro) y como el área de los tableros fue de 120cm x 11cm la presión en el material fue de 0.6MPa. El uso del manómetro fue importante para verificar que la presión se mantuviera. A los 15 minutos, a las 2 horas y a las 6 horas se verificó la presión y se aplicó la fuerza adicional necesaria para mantener la presión. El tiempo de prensado fue mayor a 10 horas.

Se fabricaron en total 10 bloques de 120cm de longitud, 11cm de ancho y altura mínima de 11.5cm (Figura 3.27). Los bloques se dejaron en reposo por 8 días antes de rectificar sus caras laterales y proceder a la elaboración de probetas.

Figura 3.27. Bloques de BGLPP (a) Estado inicial, (b) rectificación de bloques



Fuente: Autor

### 3.5. ELABORACIÓN DE PROBETAS DE BGLPP

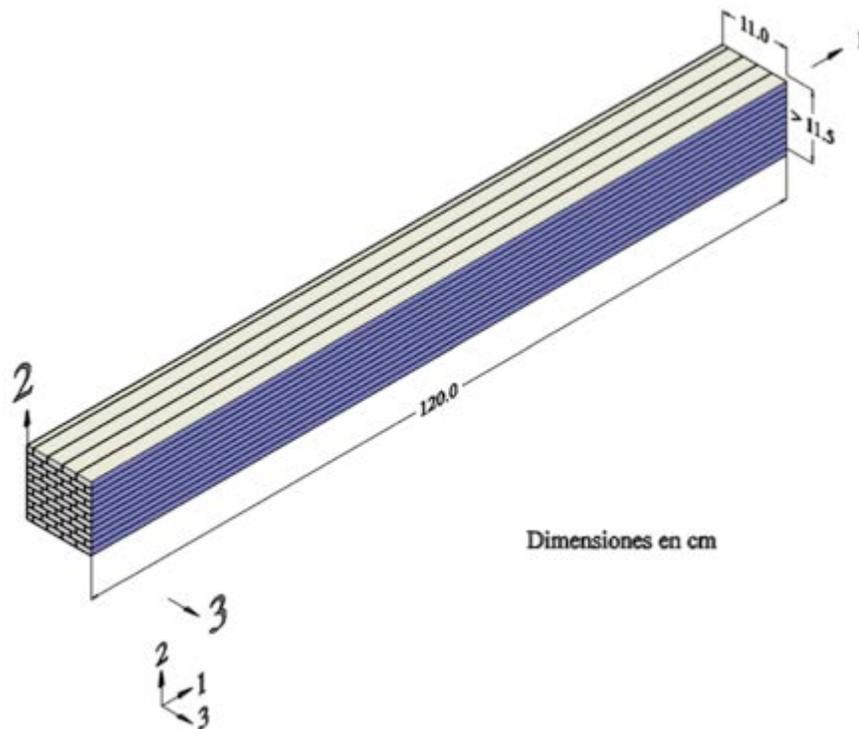
De los bloques del material compuesto BGLPP se elaboraron las probetas para los diferentes ensayos mecánicos. Tales ensayos permiten estudiar los fenómenos de flexión, cortante, compresión y tensión.

#### 3.5.1. Definición de tipos de probetas de BGLPP

Con base en los resultados de resistencia a compresión paralela a la fibra y módulo de elasticidad longitudinal a compresión obtenidos en ensayos preliminares, y que se encuentran en el Anexo F, se decidió elaborar 10 probetas de cada tipo para realizar como mínimo 8 réplicas de cada ensayo.

Para facilitar la identificación de cada tipo de probetas se utilizó el sistema coordenado mostrado en la Figura 3.28 para los bloques de BGLPP, en el cual la dirección 1 es paralela a las fibras y el plano 23 ilustra la sección transversal de las láminas entrelazadas.

Figura 3.28. Asignación de sistema de coordenadas a bloques de BGLPP



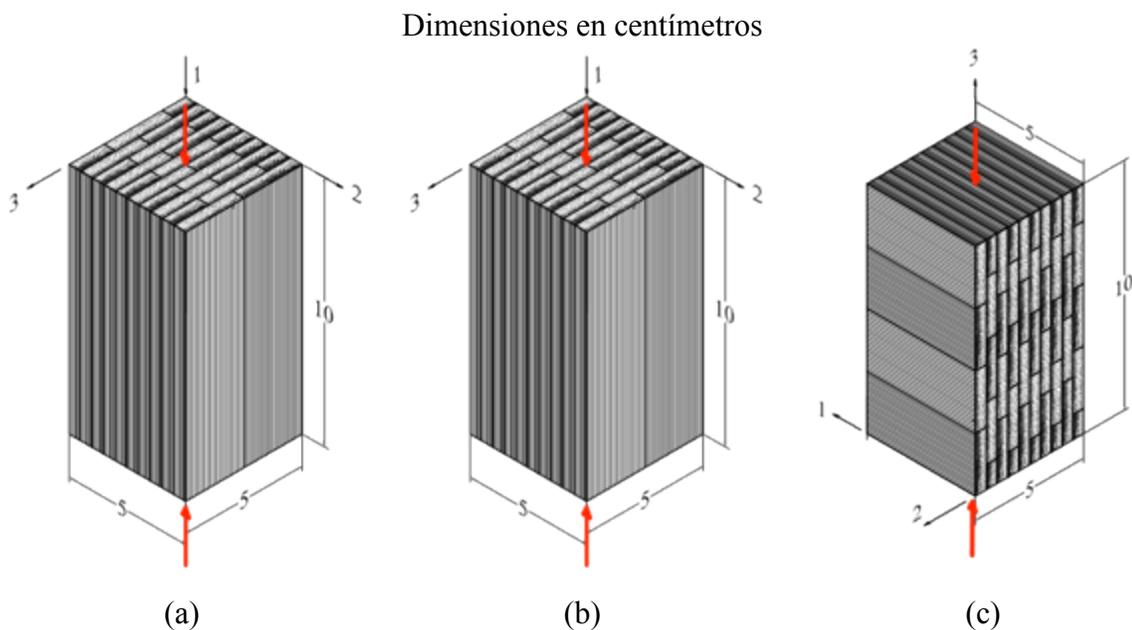
Fuente: Autor

Con base en este sistema de coordenadas, la nomenclatura del tipo de las probetas se compone por una primera parte alfabética y por una segunda parte numérica. En ocasiones existe una tercera parte alfabética. La primera parte indica el tipo de sollicitación aplicado a

las probetas, C para compresión, T para tensión, V para corte, Fc para flexión en probetas cortas y FL para flexión en probetas largas. La segunda parte está compuesta por dos caracteres numéricos, que corresponden a la dirección del esfuerzo aplicado y a la dirección normal al plano donde actúa tal esfuerzo. La tercera parte, cuando existe, se utiliza para diferenciar los tipos de probetas con iguales sollicitaciones pero que se diferencian entre sí en alguna característica en particular, por ejemplo si la sección crítica corresponde al plano de unión entre láminas o se encuentra donde sólo existen fibras.

Se definió que las probetas para los ensayos a compresión, fueran de sección cuadrada y relación alto ancho de 2. La sección prevista inicialmente fue de 5cm x 5cm x 10cm. Se definieron tres tipos de probetas a compresión. Las probetas C11, Figura 3.29(a), son aquellas sollicitadas a esfuerzo axial paralelo a la fibra, las probetas C22, Figura 3.29(b), son aquellas sollicitadas a esfuerzo axial perpendicular a la fibra y perpendicular al plano de unión entre tableros y las probetas C33, Figura 3.29(c), son aquellas sollicitadas a esfuerzo axial perpendicular a la fibra y paralelo al plano de unión entre tablero.

Figura 3.29. Tipos de probetas a compresión: (a) C11, (b) C22 y (c) C33



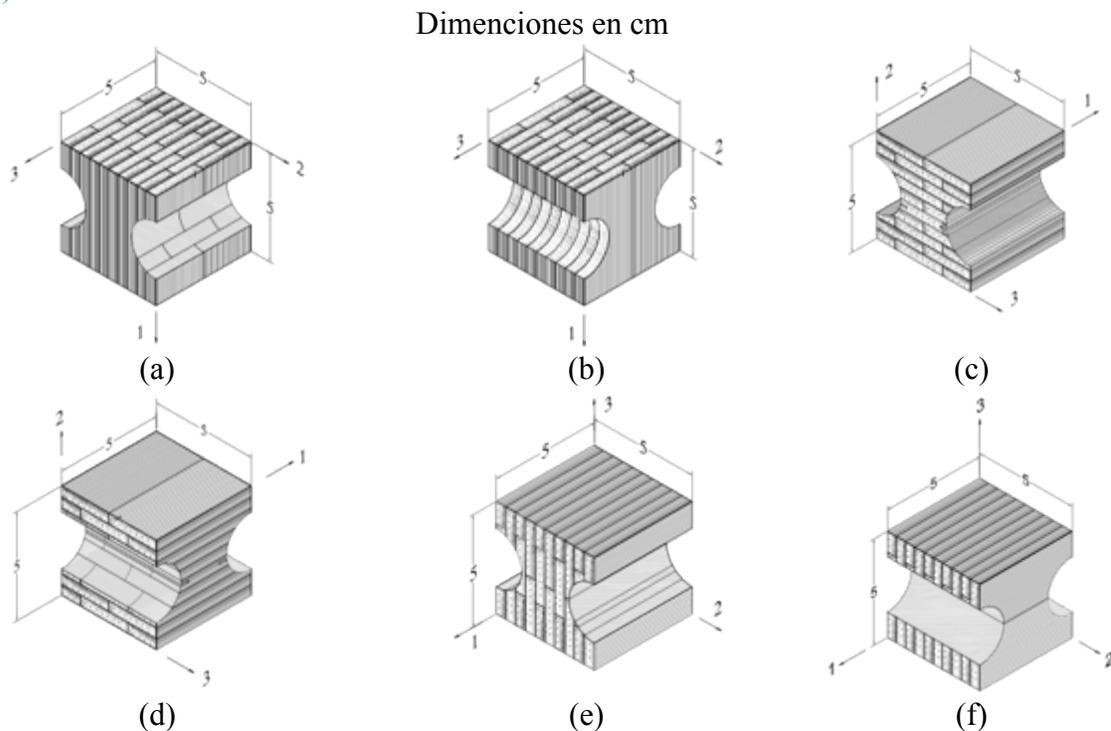
Fuente: Autor

Los ocho tipos de probetas de tensión (Figura 3.30), se elaboran a partir de cubos cuya arista mide 5cm. Su geometría está definida, por el retiro de dos semicilindros de 1.3cm de radio en su cara circular.

Las probetas T11a y T11b, son aquellas solicitadas a esfuerzo axial paralelo a la fibra. En el primer caso el eje longitudinal de los semicilindros es paralelo al eje 3 como se observa en la Figura 3.30(a), y en el segundo, es paralelo al eje 2 como se muestra en la Figura 3.30(b). El resto de probetas a tensión, están solicitadas a esfuerzo axial perpendicular a la fibra.

En las probetas T22fa y T22pa, Figura 3.30(c), el esfuerzo axial está aplicado en la dirección del eje 2, por lo cual es perpendicular al plano de unión entre tableros. En estos casos el eje longitudinal de los semicilindros es paralelo al eje 1. La diferencia entre los dos tipos de probetas radica en que la sección crítica (la menor área resistente), se encuentra localizada en la parte media de láminas donde hay fibras como es el caso de las probetas T22fa o en el plano de unión entre tableros donde se encuentra la pega horizontal, probetas T22pa. La reducción de área en la zona crítica se hizo con entallas. Las probetas T22fb, Figura 3.30(d), y T22pb son similares a las probetas anteriormente mencionadas, la diferencia radica en que el eje longitudinal de los semicilindros es paralelo al eje 3.

Figura 3.30. Tipos de probetas a tensión: (a) T11a, (b) T11b, (c) T22fa, (d) T22fb, (e) T33a y (f) T33b



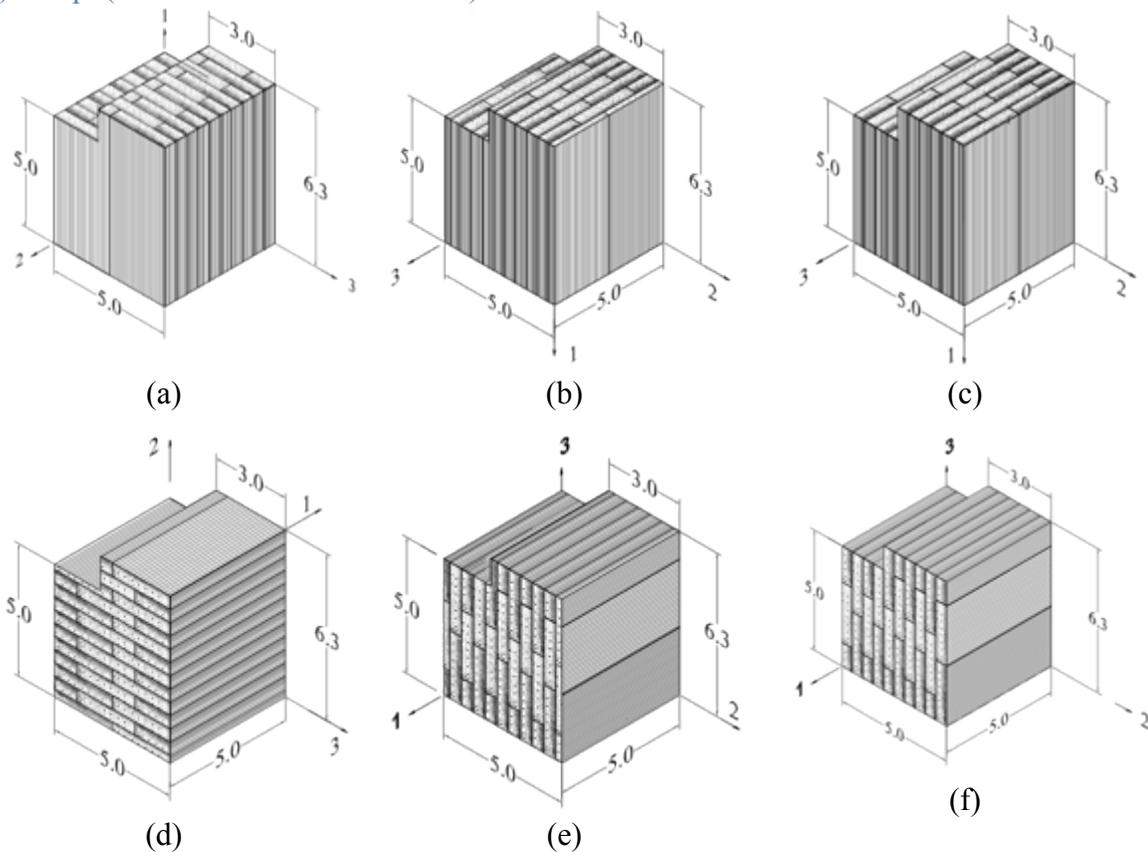
Fuente: Autor

En las probetas T33a, Figura 3.30(e) y T33b, Figura 3.30(f) la sollicitación a tensión es perpendicular a la fibra, sin embargo, con respecto a las probetas T22, la posición de las

láminas es diferente, y el área crítica, atraviesa zonas alternadas de mayor y menor densidad de fibras en cada lámina. En el caso de las probetas T33a el eje longitudinal de los semicilindros es paralelo al eje 1 y en el caso de las probetas T33b es paralelo al eje 2.

Las probetas de cortante fueron elaboradas a partir de prismas de sección transversal cuadrada de 5cm de lado y altura igual a 6.3cm. De los seis tipos, tres corresponden a cortante paralelo a la fibra y tres a cortante perpendicular a la fibra. En las probetas V13 mostradas en la Figura 3.31(a), la sollicitación de cortante es paralela al eje 1 y se aplica en el plano 3, perpendicular al plano de pega entre tableros. Por esta razón el cortante es resistido por zonas donde se alterna la baja y alta concentración de fibras de las láminas que se encuentran en el plano de cortante.

Figura 3.31. Tipos de probetas a cortante: (a) V13, (b) V12f, (c) V12p, (d) V23, (e) V32f, (f) V32p (dimensiones en centímetros)



Fuente: Autor

En las probetas V12, la sollicitación de cortante es paralela al eje 1 y se aplica en el plano 2, paralelo al plano de pega entre tableros. En este caso, el plano de cortante de cada lámina, atraviesa zonas relativamente uniformes de distribución de fibras. En las probetas V12f (Figura 3.31(b)), el plano de cortante pasa en medio de láminas en zonas donde hay fibras y

en las probetas V12p (Figura 3.31(c)), el plano de cortante pasa por la línea de pega entre tableros.

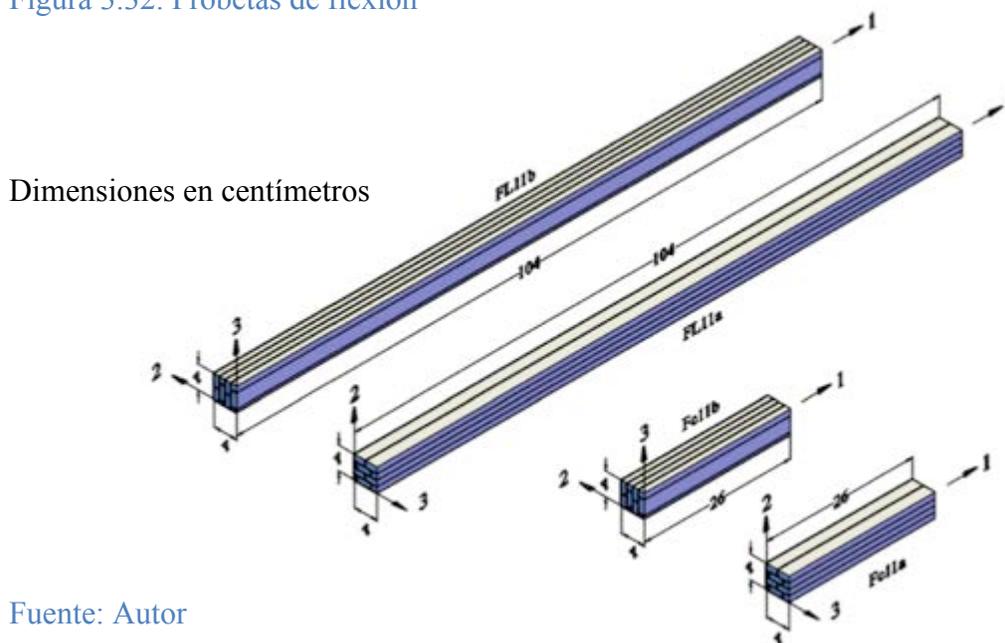
En las probetas V23 (Figura 3.31(d)), la sollicitación de cortante es paralela al eje 2 y se aplica en el plano 3, por lo cual es perpendicular al plano de pega entre tableros. Por esta razón el cortante es resistido por zonas alternadas de baja y alta concentración de fibras de las láminas que atraviesan el plano de cortante.

En las probetas V32, la sollicitación de cortante es perpendicular a la fibra y es paralela al plano de pega entre tableros. En las probetas V32f (Figura 3.31(e)), el plano de cortante atraviesa zonas relativamente uniformes de distribución de fibras y en las probetas V32p (Figura 3.31(f)), el plano de cortante pasa por la línea de pega entre tableros.

Las probetas ensayadas a flexión tienen una sección transversal cuadrada de 4cm de lado y su eje longitudinal es paralelo a las fibras del material BGLPP, es decir al eje coordenado 1. Por tanto, el esfuerzo normal asociado a la flexión actúa en dirección 1 sobre un plano cuya normal es paralela al eje 1. Las probetas largas, FL11, tienen una relación luz a altura de 25 y las probetas cortas una relación luz a altura de 6. Considerando que para el ensayo de flexión es necesario que la longitud de las probetas sea mayor a la luz, la longitud de las probetas largas fue de 104cm (2cm más en cada lado) y de las probetas cortas de 26cm (1cm más a cada lado).

En la Figura 3.32 se observan los cuatro tipos de probetas de flexión. Por cada longitud, hay dos tipos de probetas, cambia la orientación de las láminas en el momento del ensayo.

Figura 3.32. Probetas de flexión



Fuente: Autor

En las probetas largas FL11a y cortas Fc11a la aplicación de la carga es perpendicular al plano de unión entre tableros, por lo cual, los esfuerzos normales por flexión a una distancia determinada del eje neutro, se encuentran con una distribución de fibras por lámina relativamente uniforme. En el caso de las probetas largas FL11b y cortas Fc11b, los esfuerzos normales por flexión a una distancia determinada del eje neutro, se encuentran con una distribución por lámina de zonas alternadas de alta y baja concentración de fibras.

### **3.5.2. Esquemas y protocolo de corte de bloques para elaborar probetas**

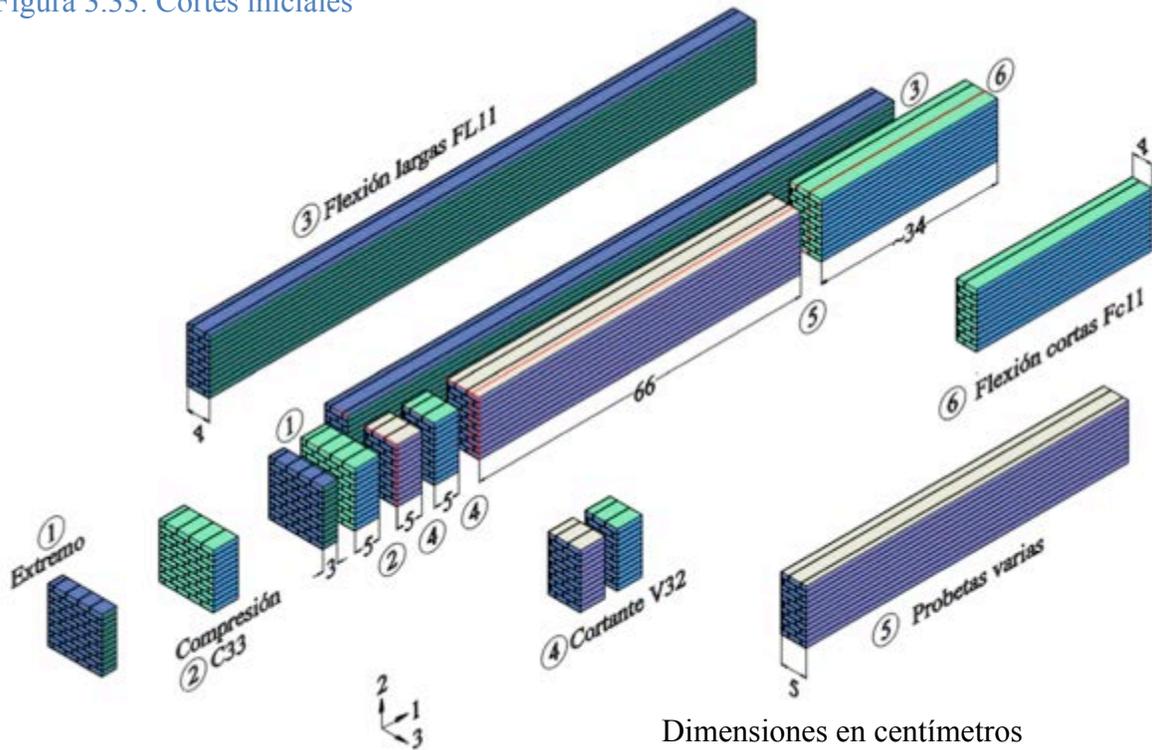
Para elaborar el número de probetas deseado, se fabricaron en total 10 bloques de material compuesto BGLPP de forma que de cada uno de los bloques se obtuviera una probeta de cada tipo.

El esquema de corte de los bloques para producir probetas considera la pérdida de 3mm de material por el espesor del disco de la sierra y de 1mm por el de la hoja de segueta. El protocolo de corte adoptado consistió en: realización de cortes iniciales al bloque de BGLPP, elaboración de probetas de compresión C33 y flexión larga FL11, realización de cortes de una porción de bloque para probetas de compresión, corte y tensión y finalmente elaboración de probetas de compresión C11 y C22, flexión cortas Fc11, cortante V32, cortante V13, V12 y V23 y tensión.

La realización de los cortes iniciales numerados y mostrados en la Figura 3.33 consisten en: despunte de 3cm en uno de los extremos para descartar material extremo defectuoso, corte transversal de 5cm para probetas de compresión perpendicular C33, corte longitudinal de tableros de 4cm de espesor para probetas de flexión largas FL11, extracción de dos tacos de 5cm de ancho de la porción restante del bloque para probetas de cortante perpendicular V32f y V32p, obtención de un bloque de 66cm de longitud y 5cm de ancho para la elaboración de probetas de compresión, cortante y tensión y finalmente, corte de un tablero de 34cm de longitud y 4cm de espesor del pedazo restante, para la elaboración de probetas de flexión cortas Fc11.

Una vez realizados los cortes iniciales se observó que el despunte de 3cm por los posibles defectos en las uniones entre láminas o entre tableros (debido a que estos elementos pueden tener menores espesores en sus extremos por el paso por el cepillo de carpintería) era insuficiente por lo cual el material apartado para la elaboración de las probetas de compresión C33, tenía varios vacíos algunos de estos profundos siendo imposible su utilización para la elaboración de estas probetas. También se encontró que en el segundo corte, a 8cm del borde, el material era sano.

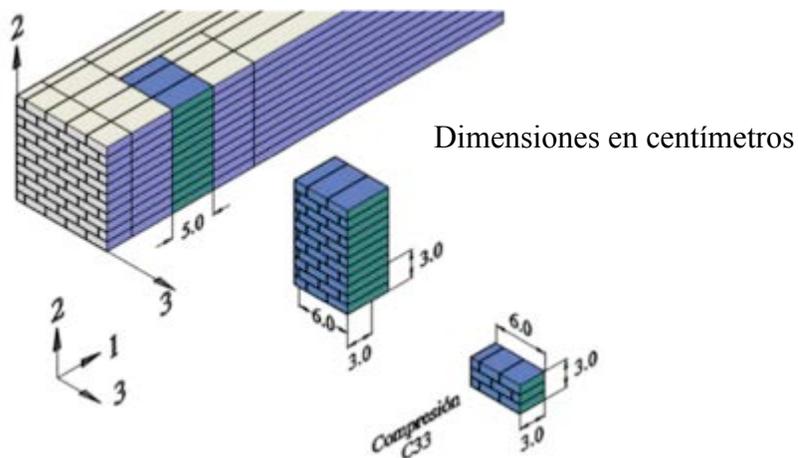
Figura 3.33. Cortes iniciales



Fuente: Autor

Las probetas de compresión C33 se obtuvieron de uno de los tacos destinados inicialmente para las probetas de cortante V32 y reservado como material de respaldo. Las dimensiones de las probetas C33 fueron 3x3x6cm, manteniendo así la relación alto lado de 2. En la Figura 3.34 se observan los cortes para la elaboración de las probetas de compresión C33.

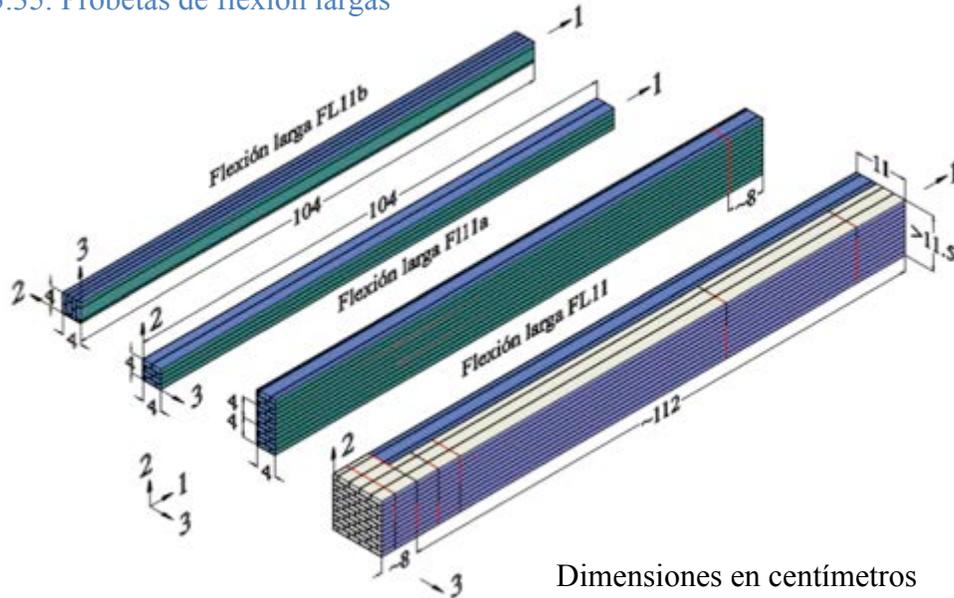
Figura 3.34. Esquema de corte para probetas de compresión C33



Fuente: Autor

La Figura 3.35 corresponde a la elaboración de probetas de flexión largas FL11a y FL11b. Se siguieron los siguientes pasos: Despunte de 8cm en el extremo no intervenido de los tableros de 4cm de espesor y 112cm de largo y realización de cortes longitudinales de 4cm de altura.

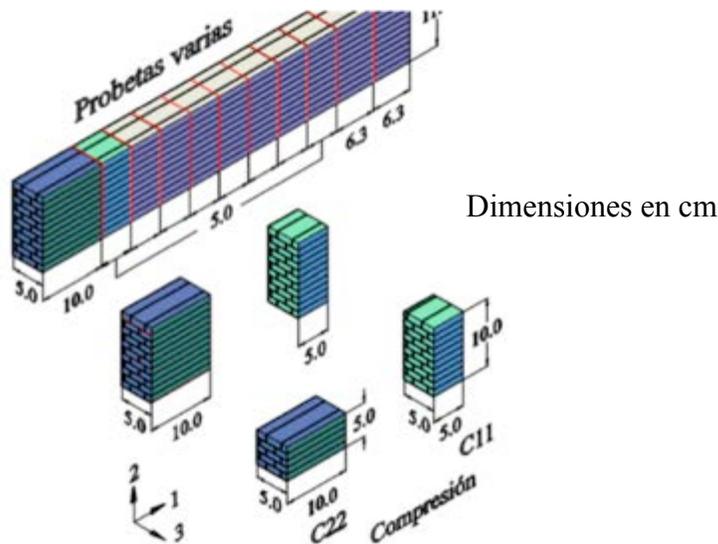
Figura 3.35. Probetas de flexión largas



Fuente: Autor

En la Figura 3.36 se muestran los esquemas de corte del bloque de 66cm de largo y 5cm de ancho y de las probetas de compresión C11 y C22.

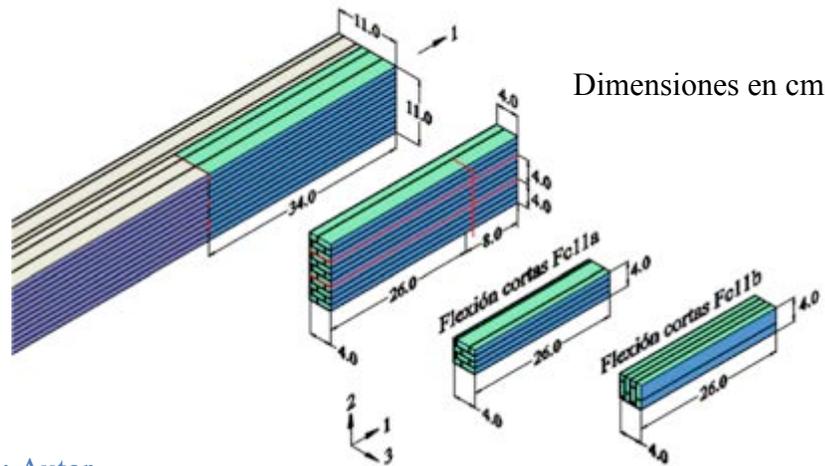
Figura 3.36. Esquema de corte para probetas de compresión C11 y C22



Fuente: Autor

Para elaborar las probetas de flexión cortas Fc11a y Fc11b, se realiza un corte de 8cm del extremo no intervenido de los tableros de 4cm de espesor y 34cm de largo y posteriormente se realizan los cortes longitudinales de 4cm de altura mostrados en la Figura 3.37.

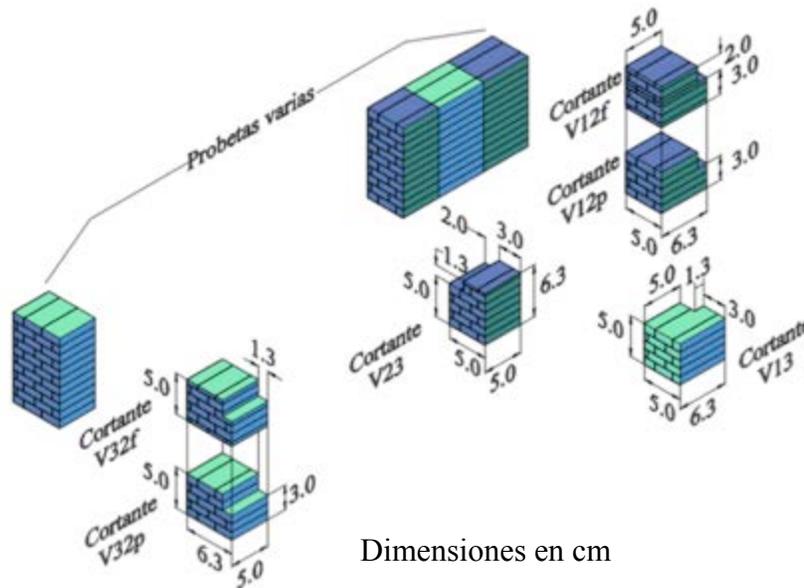
Figura 3.37. Esquema de corte para probetas de flexión cortas Fc11a y Fc11b.



Fuente: Autor

En la Figura 3.38 se observa el esquema de corte para las probetas de cortante. Para elaborar las probetas de cortante, se extraen los prismas de 5x5x6.3cm con la orientación mostrada en la Figura 3.38, después se eliminan bloques pequeños de 2x5x1.3cm, teniendo especial cuidado con las probetas V32 y V12, para que el plano de cortante se encuentre localizado en la pega (probetas V32p y V12p) o en la fibra (probetas V32f y V12f).

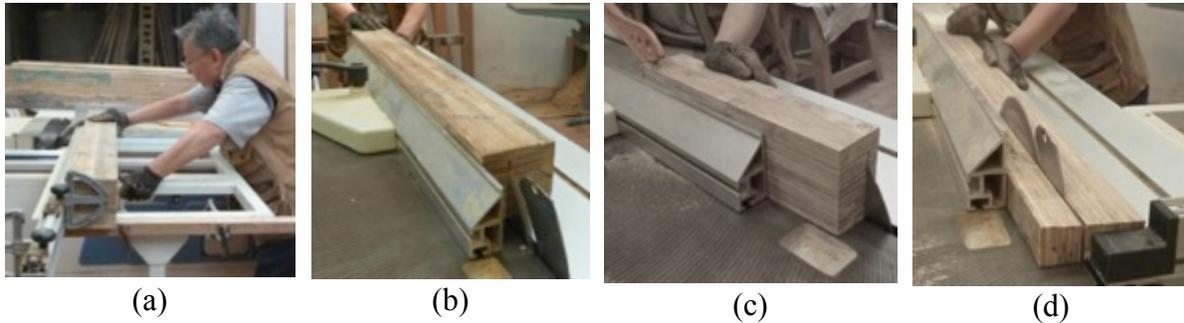
Figura 3.38. Esquema de corte para probetas de corte V32, V23, V12 y V13



Fuente: Autor



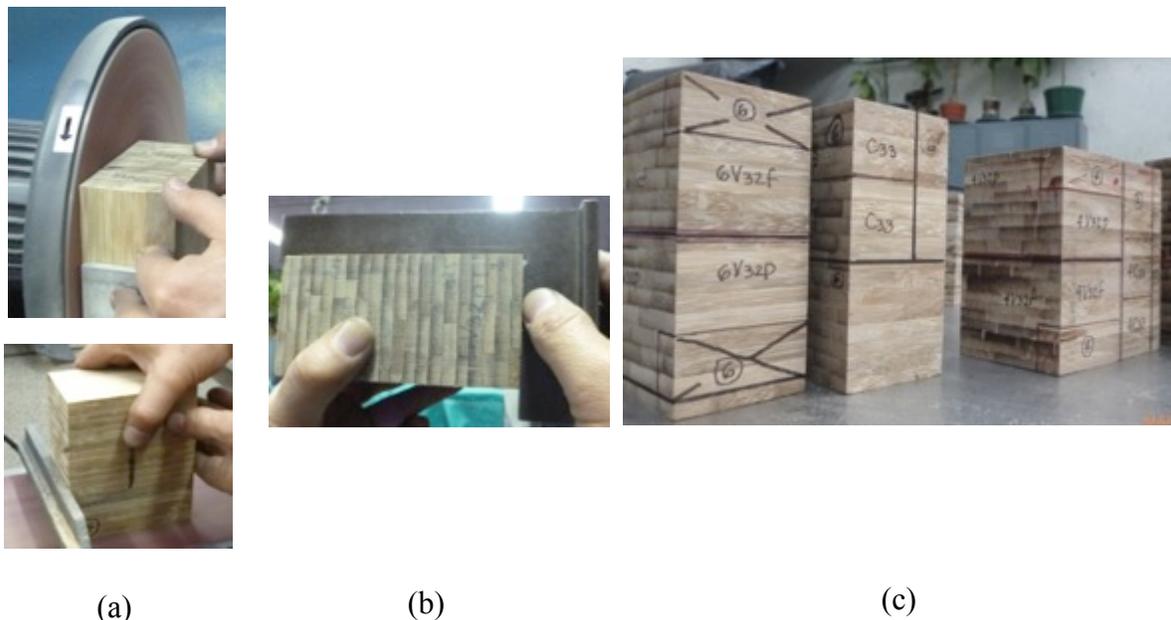
Figura 3.40. Realización de cortes: (a) despunte y cortes transversales iniciales, (b) primer corte longitudinal, (c) corte longitudinal de bloque de probetas pequeñas y (d) elaboración de probetas de flexión larga



Fuente: Autor

Como los cortes de los tacos para las probetas de cortante V32 y compresión C33 se hicieron con la sierra grande con la cual se hicieron los cortes iniciales y las probetas de flexión largas, antes de elaborar estas probetas se rectificaron sus lados utilizando lijadoras de disco y de banda, Figura 3.41(a) y Figura 3.41(b). Posteriormente se trazaron los cortes como se observa en la Figura 3.41(c).

Figura 3.41. Elementos prismáticos de BGLPP (a) Rectificación y (b) trazado de cortes

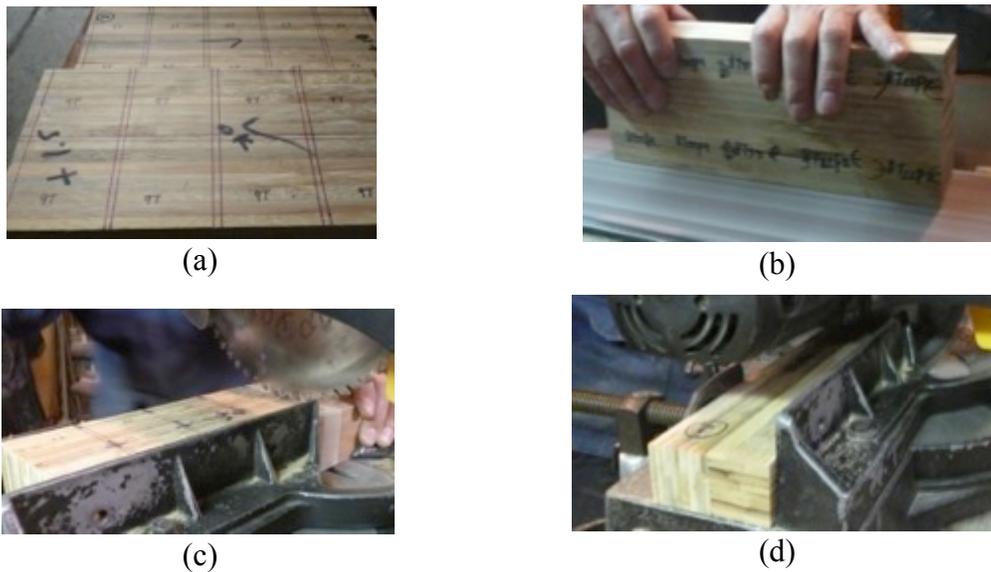


Fuente: Autor

El bloque de probetas cortas se separó en dos bloques, un bloque para probetas de compresión y cortante y el otro para probetas de tensión. Cada uno de estos bloques, fue

rectificado antes de proceder al trazado y corte de las probetas individuales, los cuales, por seguridad y precisión se hicieron con una acolilladora, (Figura 3.42(a), (b) y (c)). De esta manera, se elaboraron las probetas de compresión C11 y C22, los prismas para las probetas de cortante V13, V12 y V23 y los cubos para las probetas de tensión. Para la elaboración de los prismas para las probetas de cortante V32 y para rectificar los extremos de las probetas de flexión corta se utilizó igualmente la acolilladora, Figura 3.42(d).

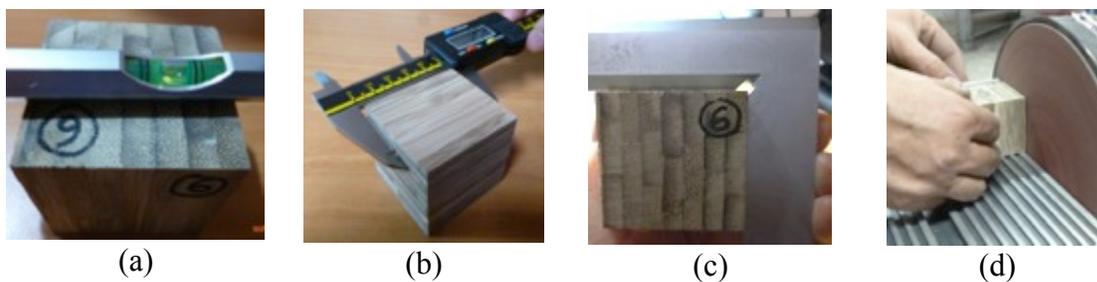
Figura 3.42. Elaboración de probetas de tensión y flexión corta: (a) Bloque para la elaboración de probetas de tensión, (b) rectificado de bloques, (c) corte de cubos de tensión y, (d) corte final de probetas de flexión corta



Fuente: Autor

Una vez cortadas las probetas de compresión, los prismas para las probetas de cortante y los cubos para las probetas de tensión, se verificaron las medidas de los lados, aristas y ángulos con escuadra, nivel y calibrador y se rectificaron con lijadoras de banda y disco como se observa en la Figura 3.43.

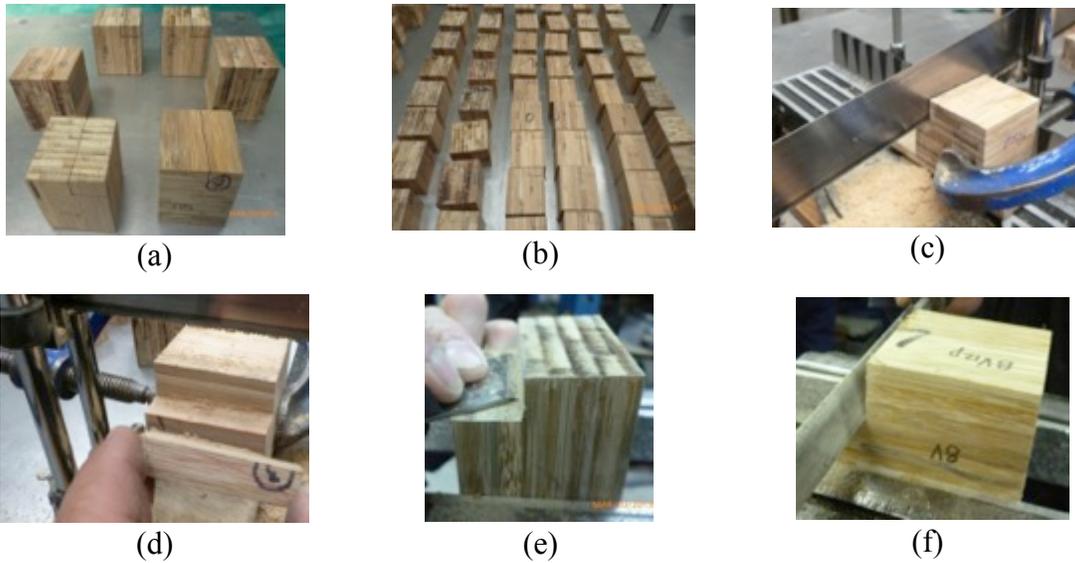
Figura 3.43. Verificación y rectificación con (a) nivel, (b) calibrador, (c) escuadra y (d) lijadora de disco



Fuente: Autor

La elaboración de las probetas de cortante (Figura 3.44), consistió en el trazado de los cortes para los seis tipos de probetas, el retiro del material a extraer en dos pasos con una segueta manual con guías para garantizar el paralelismo de estos, el terminado final del corte con cuchilla y lima hasta obtener las probetas mostradas en la Figura 3.45.

Figura 3.44. Probetas de cortante (a) tipos de probetas a cortante, (b) clasificación de probetas, (c) primer corte con segueta, (d) segundo corte con segueta, (e) arreglo con cuchilla y, (f) terminado final con lima.



Fuente: Autor

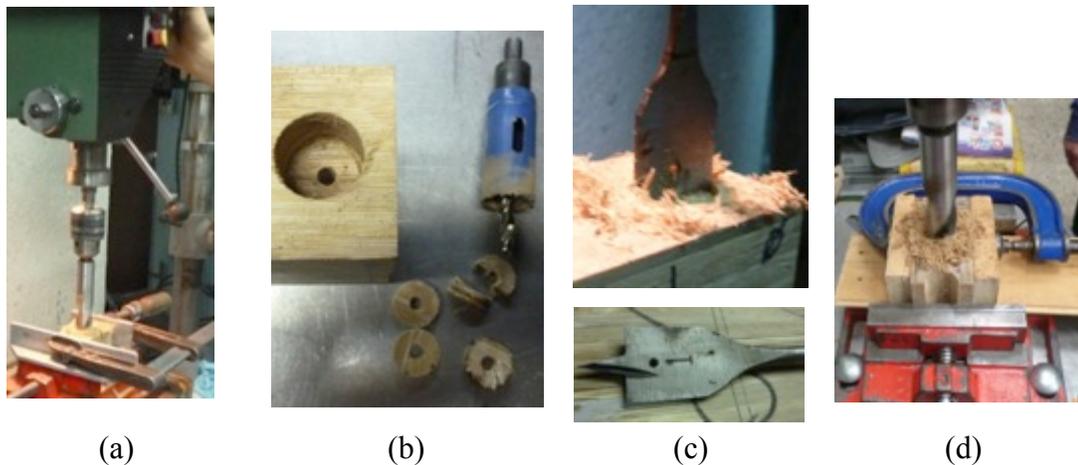
Figura 3.45. Probetas de cortante elaboradas



Fuente: Autor

Para elaborar las perforaciones de las probetas de tensión se utilizó un taladro de banco, al cual se le colocaron diferentes tipos de brocas como sierra copa, broca espátula con gavilán y broca de tornillo, dependiendo de la orientación de las láminas en las probetas (Figura 3.46). Para este material compuesto, BGLPP, se afilaron frecuentemente los bordes de las brocas con esmeril. La perforación se realizó en parejas de probetas, las cuales estaban prensadas para evitar movimientos durante la operación.

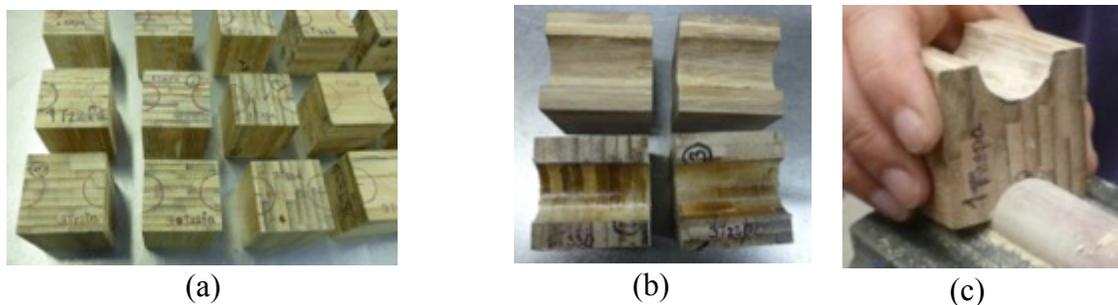
Figura 3.46. Taladro de banco y brocas



Fuente: Autor

Una vez realizada la perforación se lijó su superficie interna. En la Figura 3.47 se observa el trazado de las probetas, la superficie interna después de la perforación y el lijado interno y en la Figura 3.48, las probetas ya terminadas.

Figura 3.47. Probetas de tensión (a) trazado, (b) superficie interna y (c) lijado de superficie interna



Fuente: Autor

Figura 3.48. Probetas de tensión terminadas



Fuente: Autor

## 4. ENSAYOS EN LÁMINAS DE GUADUA

Para una mayor comprensión del comportamiento mecánico del material compuesto BGLPP, se realizaron ensayos de tensión y compresión paralela a la fibra y flexión longitudinal en láminas de guadua sin nudo. De la misma manera se realizaron ensayos de densidad y contenido de humedad. El presente capítulo trata de los ensayos realizados a las láminas.

### 4.1 PROBETAS DE TENSIÓN EN LÁMINAS DE GUADUA

#### 4.1.1 Ensayo de tensión paralela a la fibra

Los ensayos de tensión paralela a la fibra en lámina, se realizaron en especímenes sin nudo en una máquina universal de ensayos a una velocidad de 0.01mm/s (0.6mm/min). En total se realizaron 13 ensayos, 9 ensayos con probetas Tipo 1 cuya geometría se muestra en la Figura 3.12 y 4 ensayos con probetas Tipo 2 (Figura 3.14).

Para identificar cada una de las probetas, estas fueron marcadas con una letra T mayúscula seguida por un número, el cual corresponde a la lámina de donde fueron elaboradas. Las probetas del Tipo 1 fueron las T1 a la T9 y las probetas Tipo 2 las T11 a la T14.

A cada una de las probetas se les colocó un deformímetro eléctrico unidireccional localizado dentro de la porción de ensayo para determinar su módulo de elasticidad longitudinal a tensión. La lectura de la deformación se realizó con una unidad acondicionadora de señales.

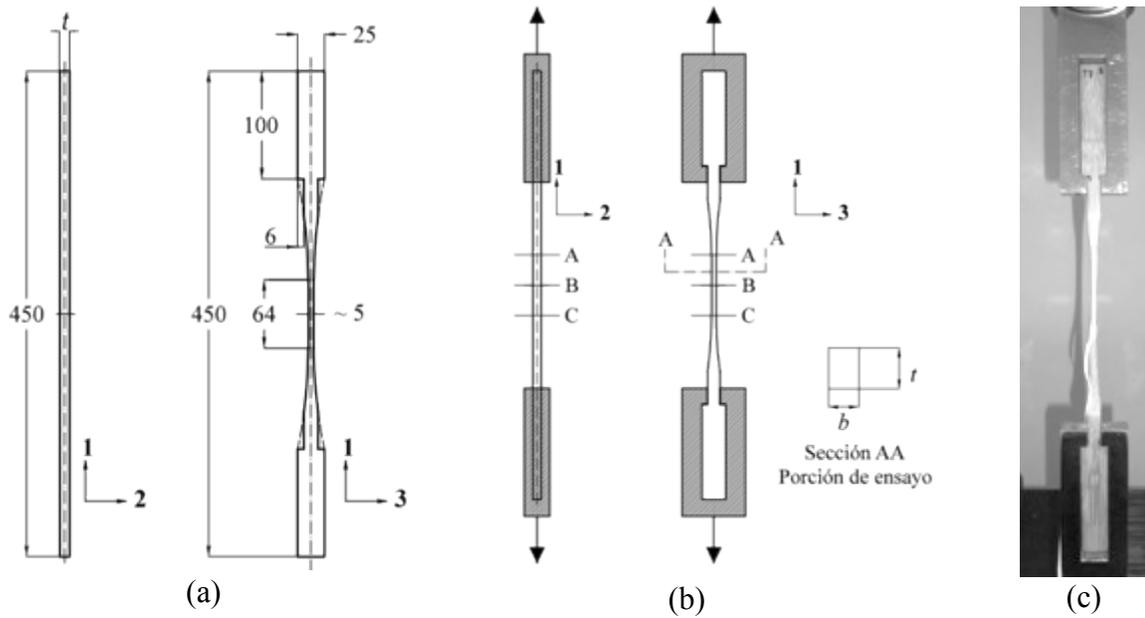
De cada probeta, fueron tomadas tres medidas de ancho y espesor de la porción de ensayo; al comienzo, en la parte media y al final. Con base en estas medidas, se calculó el área crítica a tensión,  $A$ , como la multiplicación del promedio de las tres medidas tomadas del ancho,  $b$ , y el promedio de las tres medidas tomadas del espesor de la lámina,  $t$  (Tabla G.1 del anexo G).

##### 4.1.1.1 Descripción del ensayo

###### Probetas Tipo 1

En la Figura 4.1 se observa la geometría y forma de sujeción de las probetas Tipo 1. En este caso, los extremos entran de forma ajustada dentro de los soportes y la carga de tensión se ejerce en los cuatro puntos de apoyo donde hay un cambio brusco de sección.

Figura 4.1. Probetas Tipo 1: (a) geometría, (b) porción de ensayo y (c) probeta T7

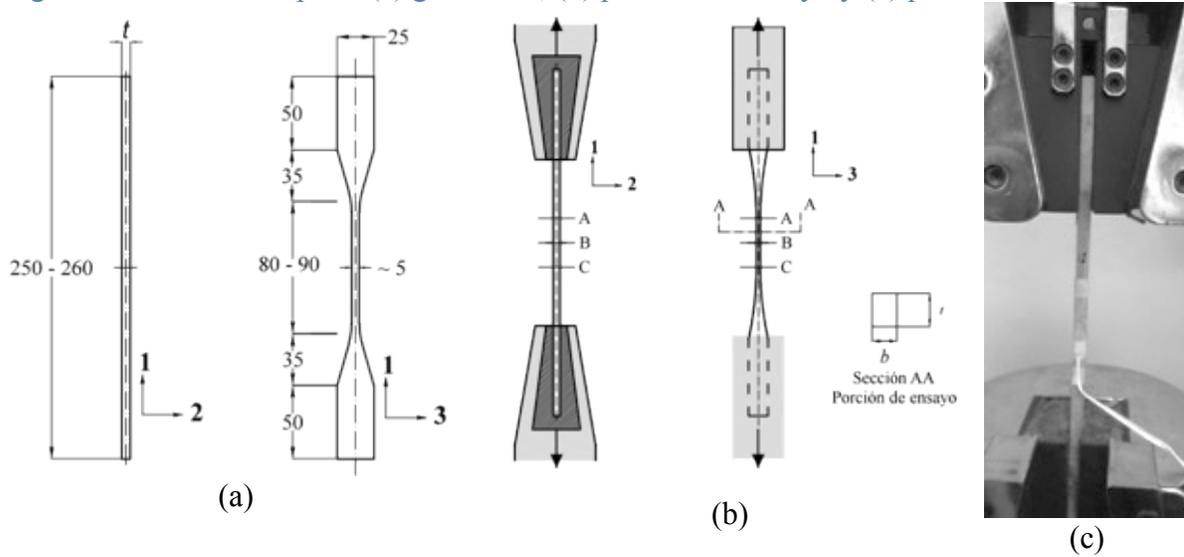


Fuente: Autor

### Probetas Tipo 2

La Figura 4.2 corresponde al ensayo de las probetas Tipo 2. Se muestra la geometría y forma de sujeción. En estos ensayos, los soportes aprietan los extremos de las probetas y están diseñados para que a medida que se incremente la carga, se comprima la probeta evitando que se deslice.

Figura 4.2. Probetas Tipo 2: (a) geometría, (b) porción de ensayo y (c) probeta T12



Fuente: Autor

#### 4.1.1.2 Cálculos y resultados

El esfuerzo normal de tensión,  $\sigma_t$ , fue calculado con base en la Ecuación 4.1 donde  $P$  es la fuerza aplicada y  $A_t$  el área de la sección transversal mínima de la probeta.

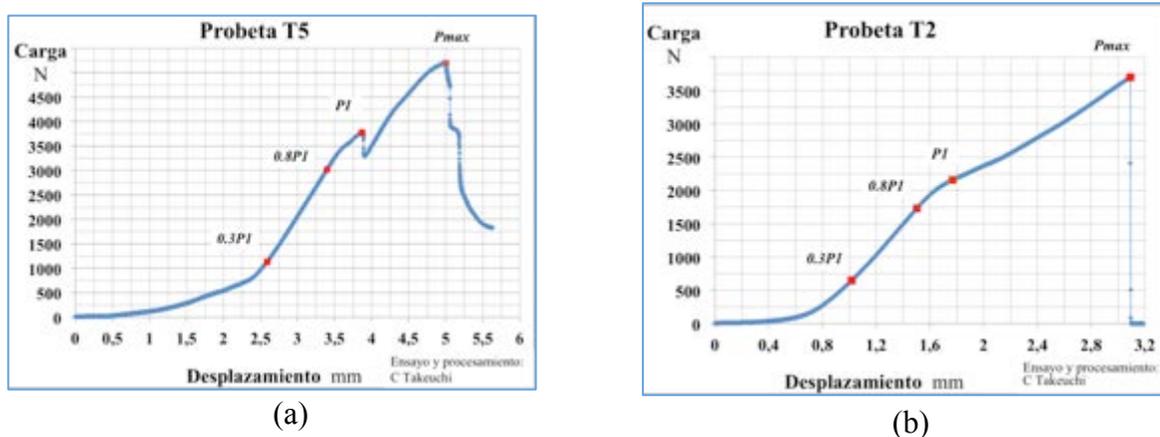
$$\sigma_t = \frac{P}{A_t} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

En el caso de que la falla de la probeta fuera por tensión paralela a la fibra, se calculó la resistencia a tensión paralela a la fibra,  $F_t$ , con base en la Ecuación 4.2 donde  $P_{max}$  es la fuerza última aplicada y  $A_t$  el área de la sección transversal de la probeta mínima de la probeta.

$$F_t = \frac{P_{max}}{A_t} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

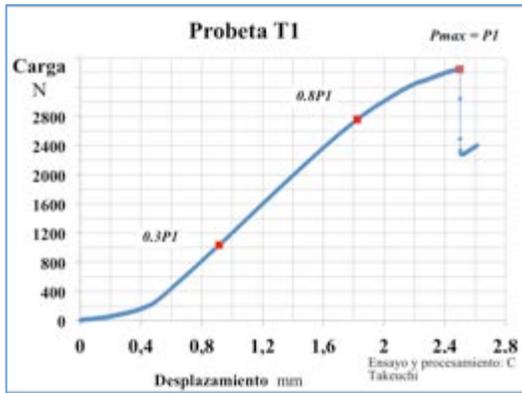
Antes de determinar el módulo de elasticidad longitudinal a tensión de las probetas ensayadas e instrumentadas con deformímetros eléctricos se estudiaron las curvas carga desplazamiento para observar la forma de la curva, la parte de acomodamiento y la transición entre el comportamiento elástico e inelástico así como cambios en el comportamiento de la gráfica antes de la carga máxima como pérdidas de carga (Figura 4.3(a)) y cambios de pendiente (Figura 4.3(b)). Se determinó para cada ensayo la carga máxima  $P_{max}$ , y la carga correspondiente al primer cambio notorio de comportamiento  $P_I$ , el cual en algunas ocasiones fue igual a la carga máxima (Figura 4.4(a)) y (Figura 4.4(b)) En la sección G.1.1 del anexo G se encuentran las curvas carga desplazamiento con estos valores, para las probetas de tensión.

Figura 4.3. Curvas carga desplazamiento (a) T5 y (b) T2

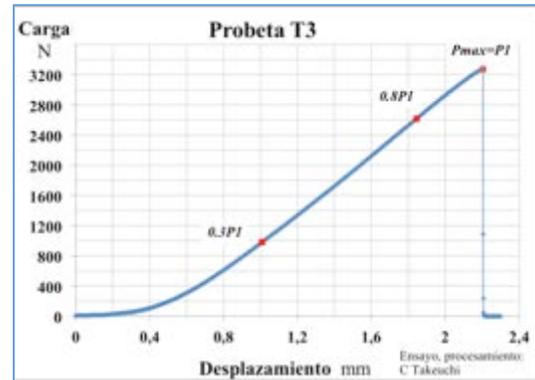


Fuente: Autor

Figura 4.4. Curvas carga desplazamiento (a) T1 y (b) T3.



(a)

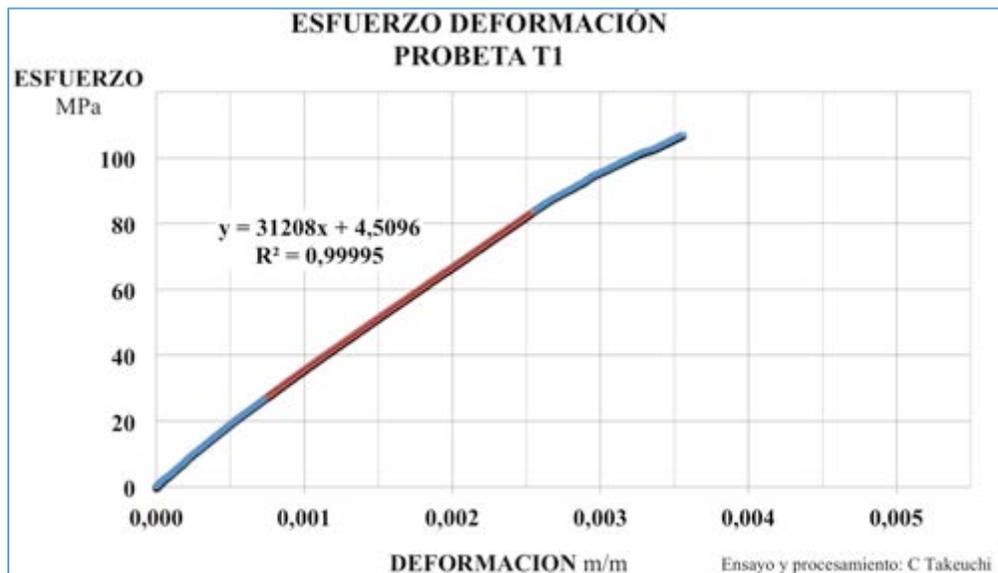


(b)

Fuente: Autor

Posteriormente, con las lecturas de deformación y los datos de carga y área, se obtuvo la relación esfuerzo deformación. Se determinó el módulo de elasticidad longitudinal a tensión como la pendiente de la regresión lineal de los puntos de la curva esfuerzo deformación entre los esfuerzos que corresponden al 30% y el 80% de la carga  $P_t$ , considerando que en esta zona, no alcanza a estar incluida la zona de acomodación y además que se observa un comportamiento aproximadamente lineal como se aprecia en las Figura 4.5 que corresponde a las probeta T1. En la sección G.1.1 del anexo G se encuentran las curvas esfuerzo deformación con la determinación del módulo de elasticidad para las demás probetas.

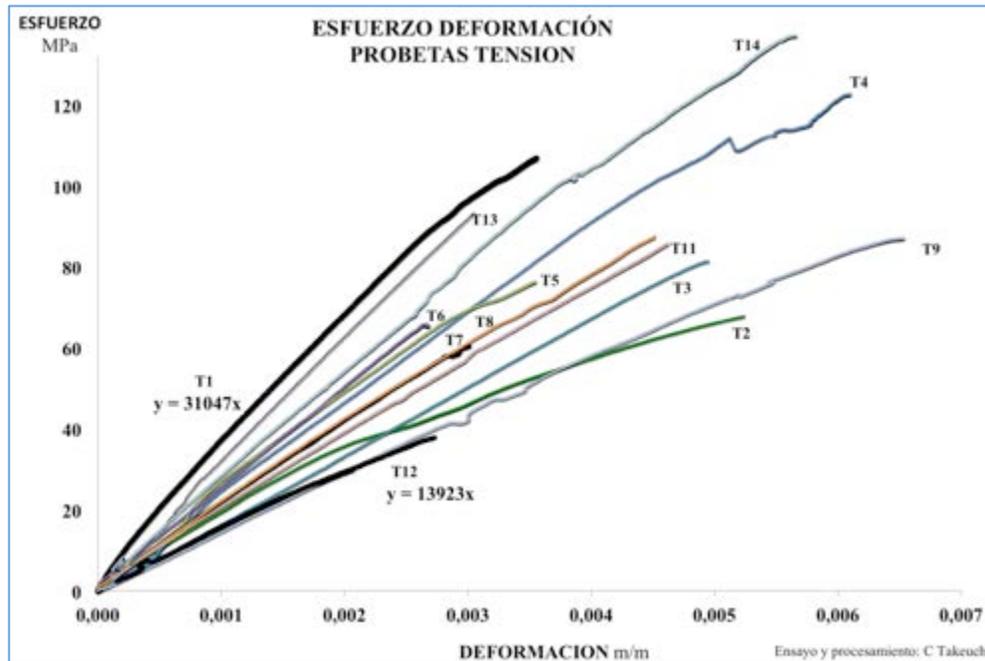
Figura 4.5. Relación Esfuerzo deformación T1



Fuente: Autor

En la Figura 4.6 se observan las curvas esfuerzo deformación para las probetas de tensión y se indican los valores de módulo de elasticidad para las probetas T1 y T12, las de mayor y menor módulo de elasticidad respectivamente.

Figura 4.6. Relación Esfuerzo deformación (a) T1 y (b) T2.



Fuente: Autor

En la Tabla 4.1 se encuentran los valores de módulo de elasticidad determinados. El valor promedio del módulo de elasticidad es de 21150MPa con una desviación estándar de 5364MPa y un coeficiente de variación de 0.25. No se encontró ningún valor atípico de módulo de elasticidad según el criterio de exclusión de Chauvenet (Taylor, 1997).

Tabla 4.1. Módulo de elasticidad, densidad y porcentaje de fibra

Probeta	Densidad g/cm <sup>3</sup>	%Fibra	$E_r$ MPa	Tipo Falla
T1	0,70	46,6	31947	Corte
T2	0,75	45,0	17655	Corte
T3	0,95	35,5	17073	Tensión
T4	0,57	46,6	22352	Corte
T5	0,59	40,9	22032	Corte
T6	0,81	39,4	24691	Corte
T7	0,78	53,7	20005	Corte
T8	0,65	42,5	18808	Corte
T9	0,66	27,6	14059	Corte
T11	0,71	31,0	18346	Corte
T12	0,68	25,7	13923	Corte
T13	0,91	59,4	29260	Corte
T14	0,82	51,0	25711	Corte

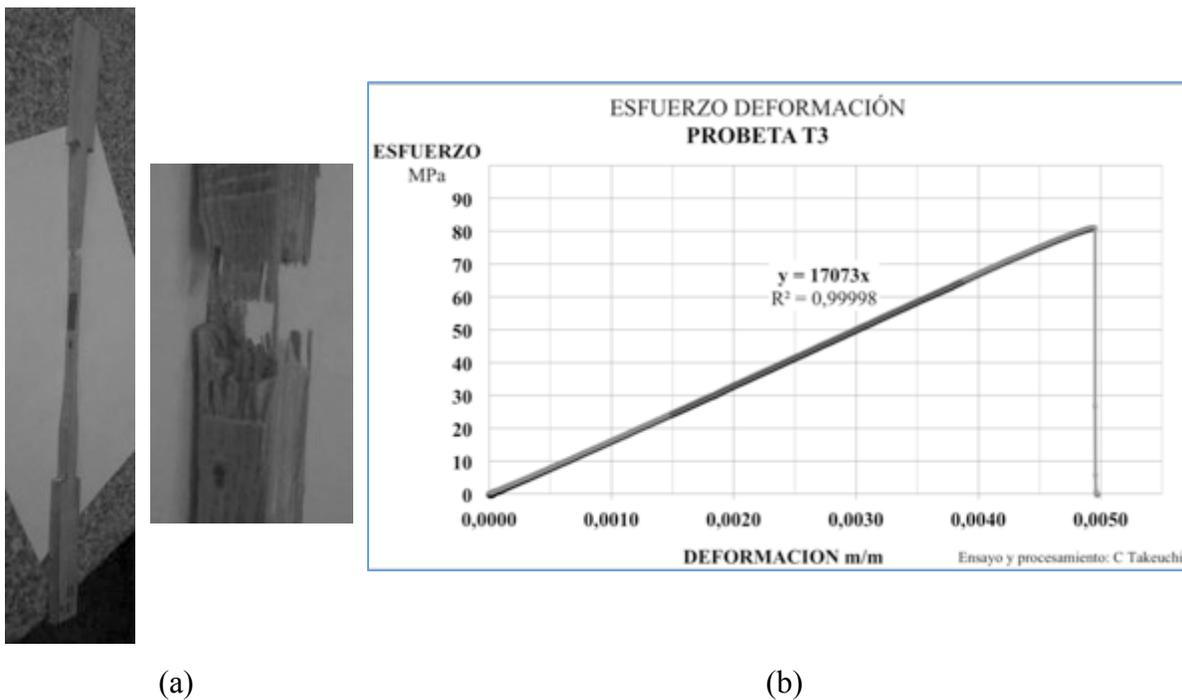
Fuente: Autor

Si se consideran únicamente las probetas Tipo 1, el valor promedio del módulo de elasticidad es de 20858MPa con una desviación estándar de 4973MPa y un coeficiente de variación de 0.24. Para las probetas Tipo 2 el valor promedio del módulo de elasticidad es de 21810MPa con una desviación estándar de 6950MPa y un coeficiente de variación de 0.32.

#### 4.1.1.3 Formas de falla

La probeta T3 mostró fractura normal al eje longitudinal en la porción de ensayo, que identifica una falla por tensión, donde las fibras y la matriz se rompen súbitamente. En la Figura 4.7 se muestra un acercamiento de la falla y la relación esfuerzo deformación de la probeta.

Figura 4.7. Ensayo probeta T3, (a) forma de falla y (c) relación esfuerzo deformación

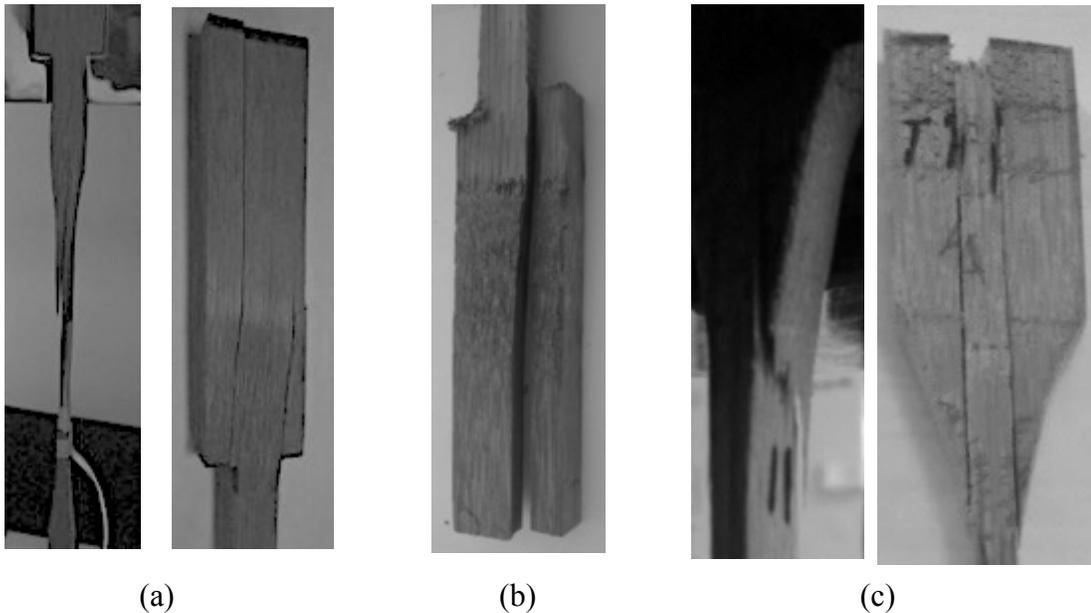


Fuente: Autor

Las probetas T1, T2 y T4 mostraron una fisura paralela a la fibra en la zona de transición de la probeta, que representa una falla por cortante. En las probetas T5, T6, T7, T8 y T9 inicialmente se presentó una fisura paralela a la fibra en uno de los apoyos. En algunas probetas, al presentarse las primeras fisuras hubo reducción de su capacidad y posteriormente un reacomodo hasta que la probeta finalmente falló con fisuras adicionales en el apoyo mientras que otras probetas fallaron con la aparición de la primera fisura. En la Figura 4.8(a) se observan las fisuras que se presentaron en la probeta T4 y en la Figura 4.8(b) la falla en el apoyo en la probeta T8.

Todas las probetas Tipo 2 presentaron fisuras paralelas a la fibra en la zona de transición de la probeta, que representan fallo por cortante. En la Figura 4.8(c) se ilustran las fisuras presentadas en la probeta T11.

Figura 4.8. (a) Probeta T4: Primera fisura y fisuras en apoyo, (b) probeta T8: fisura en el apoyo, (c) probeta T11: fisura en la zona de transición y estado final de la probeta



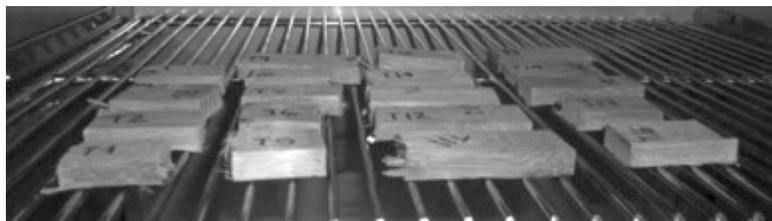
Fuente: Autor

En la sección G.1.1 del Anexo G se encuentran las fotografías de los ensayos realizados.

#### 4.1.2 Determinación del contenido de humedad

De cada probeta del ensayo de tensión se obtuvo una muestra para determinar su contenido de humedad como se observa en la Figura 4.9.

Figura 4.9. Muestras para la determinación del contenido de humedad dentro de horno

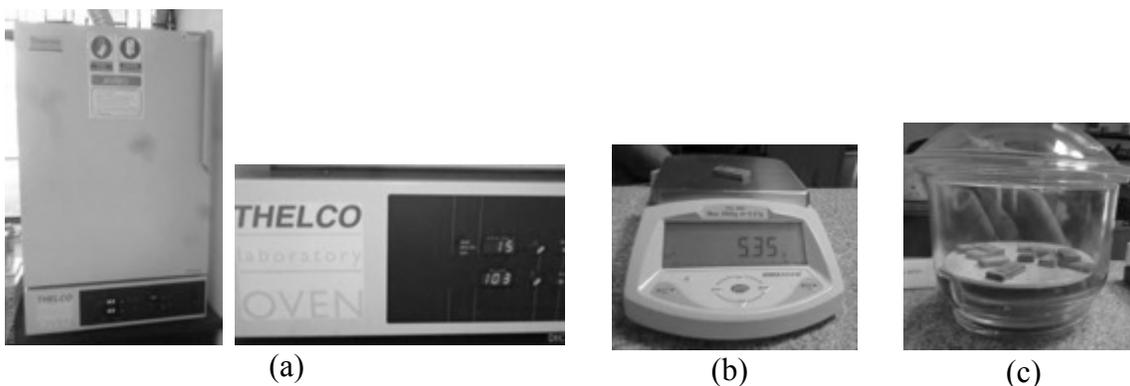


Fuente: Autor

#### 4.1.2.1 Descripción de los ensayos

Los ensayos para determinar el contenido de humedad, se realizaron de acuerdo con la NTC5525 (ICONTEC, 2007) con excepción del tamaño y forma de la probeta ya que en la norma se recomienda que sea prismática de 25mm x 25mm y espesor igual al de la pared de la guadua. Para su realización se utilizó un horno eléctrico (Figura 4.10(a)), una balanza con precisión de 0.01g (Figura 4.10(b)), y un vaso para mantener la humedad de las probetas mientras se miden y pesan (Figura 4.10(c)).

Figura 4.10. Equipo utilizado para la determinación del contenido de humedad de las muestras (a) horno, (b) balanza de precisión y (c) vaso



Fuente: Autor

Las probetas para determinar el contenido de humedad se pesaron en la balanza y se introdujeron en el horno durante 24 horas a una temperatura de 103°C. Trascurrido este tiempo se registró su masa y se repitió esta operación cada 2 horas hasta que la diferencia entre una y otra lectura fuera inferior a 0.01g. La última lectura es la masa después del secado.

#### 4.1.2.2 Cálculos y resultados

El contenido de humedad,  $CH$ , fue calculado con base en la Ecuación 4.3 donde  $m$  corresponde a la masa de la probeta antes del secado y  $m_o$  la masa después del secado.

$$CH = \frac{m - m_o}{m_o} \times 100 \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Los contenidos de humedad para las probetas Tipo 1, variaron entre 10% y 11.1%, con un promedio de 10.7%, una desviación estándar de 0.35% y un coeficiente de variación de 0.03. Para las probetas Tipo 2, los contenidos de humedad variaron entre 7.4% y 8.8%, con un promedio de 8.3%, una desviación estándar de 0.2% y un coeficiente de variación de 0.03. En el anexo G, se encuentra la Tabla G.2 correspondiente a la determinación del contenido de humedad.

### 4.1.3 Determinación de la densidad seca al aire

En una muestra es posible determinar la densidad verde (relación entre la masa verde y volumen verde), la densidad seca al aire (relación entre la masa seca al aire y volumen seco al aire), la densidad anhidra (relación entre la masa seca al horno y el volumen seco al horno) y la densidad básica (relación entre la masa seca al horno y el volumen verde). Para las probetas ensayadas, se determinó la densidad seca al aire (que en adelante será nombrada como densidad), debido a que por su proceso de elaboración y el tiempo que transcurre no fue posible determinar el volumen verde de las láminas ensayadas.

#### 4.1.3.1 Descripción de los ensayos

Para conocer la densidad seca al aire de las probetas de tensión con el contenido de humedad que tenían estas en el momento en el momento del ensayo, se determinó el volumen de las muestras tomadas de las probetas de tensión y mencionadas en el punto anterior. Para esto, antes de ser introducidas en el horno, se tomaron tres medidas de su ancho, largo y espesor con un calibrador de lectura digital y 0.01mm de precisión.

#### 4.1.3.2 Cálculos y resultados

El volumen,  $V$ , fue calculado con base en la Ecuación 4.4 donde  $l$ ,  $b$  y  $t$  corresponden a los promedios de las lecturas de longitud, ancho y espesor de cada muestra.

$$V = l \times b \times t \quad \text{Ecuación 4.4}$$

La densidad,  $\rho$ , fue calculada con base en la Ecuación 4.5 donde  $m$  corresponde a la masa y  $V$  al volumen de la probeta. Ambos valores antes del secado al horno.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

En la Tabla 4.1 se encuentran los valores de densidad de cada una de las probetas. La densidad promedio de las láminas fue de  $0.74\text{g/cm}^3$ , con una desviación estándar de  $0.11\text{g/cm}^3$  y un coeficiente de variación del 0.16. En la Tabla G.2 del anexo G, se encuentran los datos para la determinación de la densidad.

### 4.1.4 Determinación del porcentaje de fibras

Se obtuvo de las probetas Tipo 1 y Tipo 2 una muestra para determinar su porcentaje de fibras. La superficie observada en el microscopio correspondió al centro de la probeta en contacto con el extremo de las muestras de contenido de humedad y densidad.

#### 4.1.4.1 Descripción de los ensayos

Se determinó el porcentaje de fibras de la porción de ensayo con el siguiente procedimiento: captura de imágenes de la superficie pulida de la sección transversal de la porción de ensayo, reconstrucción digital de esta sección transversal, conversión de la imagen a escala de grises, trazado y selección de un área rectangular modificada, segmentación entre haces de fibras y parénquima y vacíos y medición de áreas.

La preparación de la superficie, se realizó manualmente con papeles abrasivos de diferente grano de finura. En la Figura 4.12, se observa la imagen de parte de la sección transversal de una lámina donde se observa la parénquima, los haces vasculares y dentro de estos, el sistema conductivo y los haces de fibras. Para la determinación del porcentaje de fibras de las probetas de tensión paralela a la fibra, la preparación de la superficie se hizo hasta que se tuviera buena definición de los haces de fibras contrastados con la parénquima y el sistema conductivo.

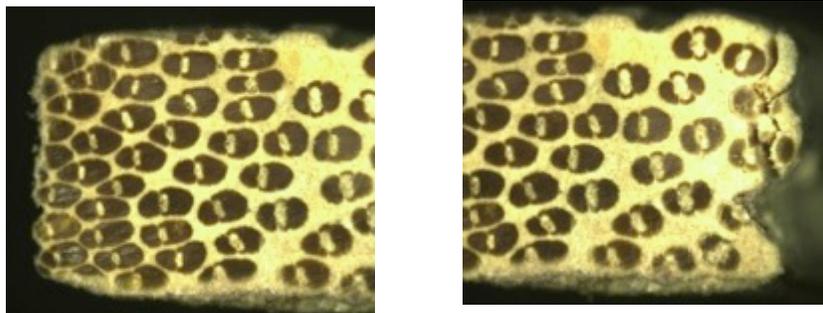
Figura 4.11. Imagen de lámina.



Fuente: Edgar Torres y Autor

La captura de imágenes se realizó con una cámara instalada a un microscopio de reflexión. Para estas probetas se utilizó un aumento de 20. Dependiendo del tamaño de la sección transversal de la porción de ensayo se tomaron de 2 a 6 imágenes. En la Figura 4.12 se observan las imágenes obtenidas para la probeta T7

Figura 4.12. Imágenes de partes la sección transversal de la porción de ensayos de la probeta T7



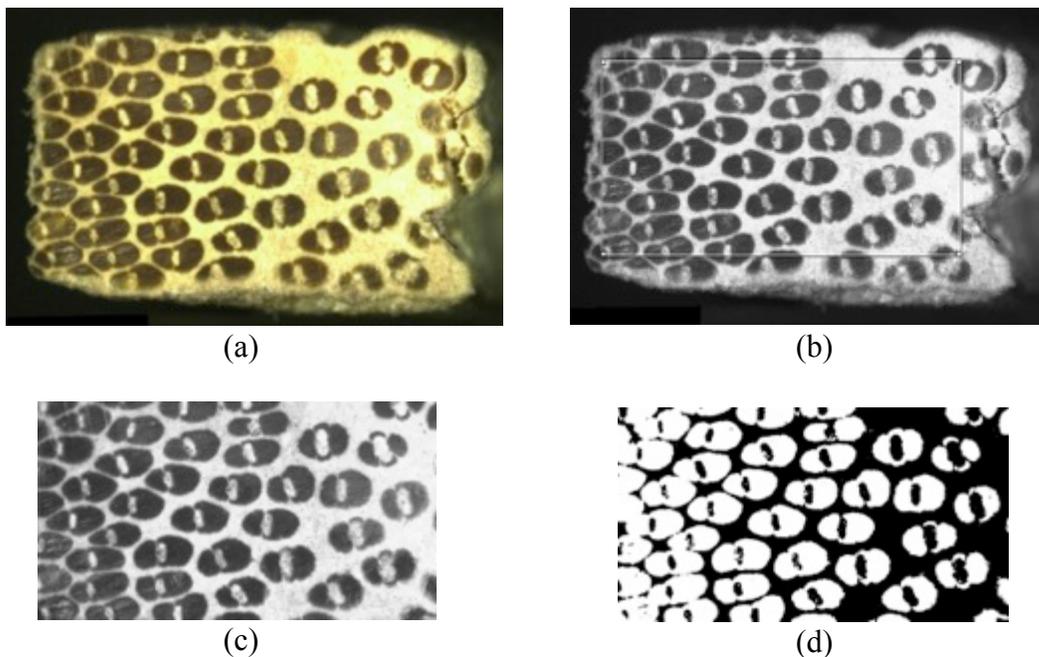
Fuente: Autor

La reconstrucción digital de las secciones transversales, se realizó con el software Kolor autopano que identifica las áreas comunes de diferentes imágenes para crear una sola imagen. En la Figura 4.13(a) se observa la sección completa de la probeta T7.

El procesamiento de imágenes se realizó con el software Image Pro. Con este programa fue posible, convertir las imágenes a escala de grises, definir el área rectangular modificada para eliminar los bordes irregulares y realizar la binarización (conocida también como segmentación) con la cual se dió el contraste entre los haces de fibra y el resto del área de estudio. En la Figura 4.13 se observan las imágenes correspondientes a cada uno de estos pasos para la probeta T7.

Una vez realizada la segmentación, se determinó el área de la sección rectangular con la medición manual del largo, ancho y área. Se hicieron conteos de los haces de fibras (que el programa define como áreas brillantes) y se calculó su área para finalmente determinar la suma de áreas de los haces de fibras que se encuentran en el área modificada. También se calculó el área de la sección rectangular modificada (que el programa define como área oscura) y se verificó con el área calculada anteriormente de manera manual. Posteriormente se calculó el porcentaje de fibra.

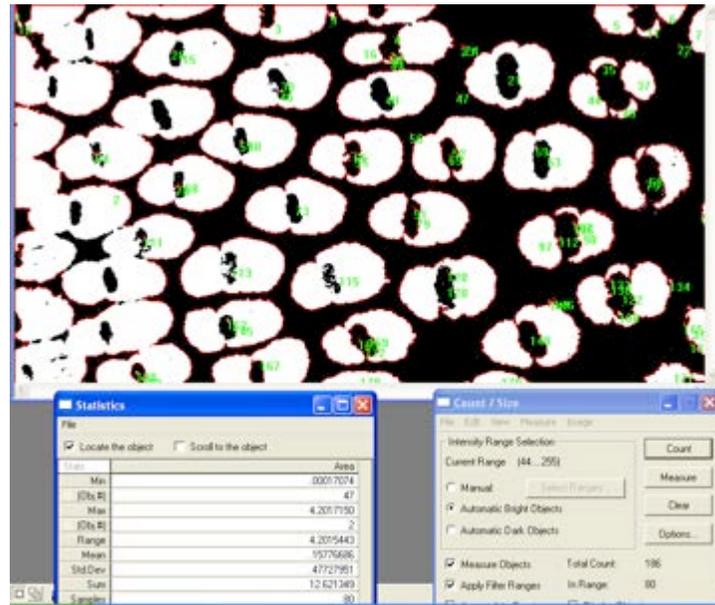
Figura 4.13. Imágenes de la sección transversal de la porción de ensayos de la probeta T7: (a) imagen reconstruida, (b) imagen convertida a escala de grises y trazado del área rectangular, (c) área rectangular modificada y (d) segmentación del área modificada



Fuente: Autor

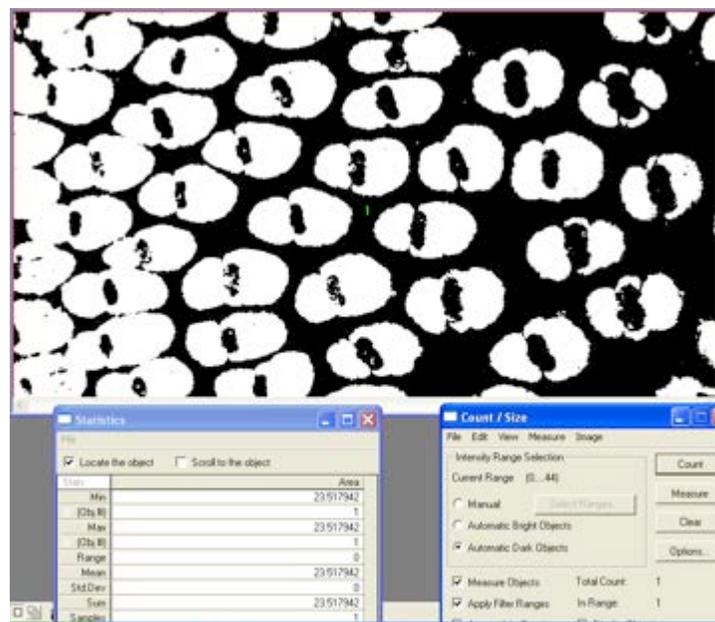
En la Figura 4.14 y en la Figura 4.15 se encuentran las imágenes correspondientes al cálculo de áreas de haces de fibras y del área total de la probeta T7. En el Anexo G, se encuentran las áreas modificadas segmentadas para cada una de las probetas de tensión paralela a la fibra de láminas.

Figura 4.14. Cálculo de área de haces de fibras



Fuente: Autor

Figura 4.15. Cálculo de área total de la sección rectangular



Fuente: Autor

#### 4.1.4.2 Cálculos y resultados

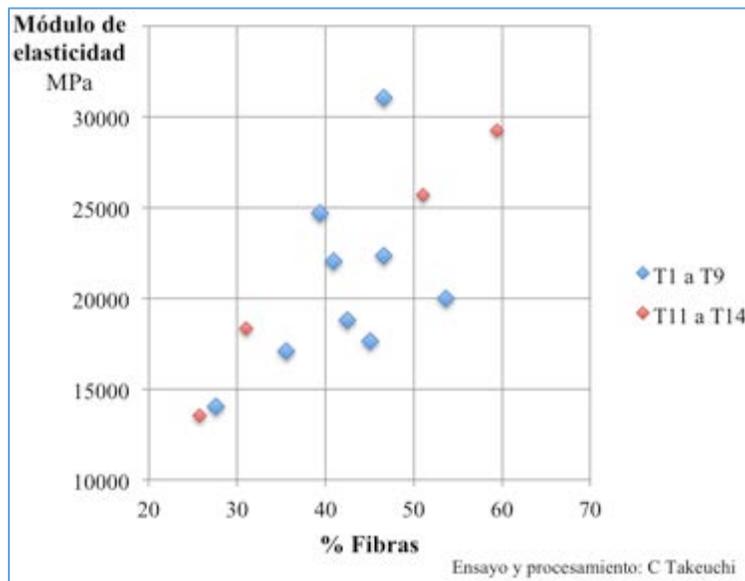
El porcentaje de fibras,  $\% \text{fibras}$ , fue calculado con base en la Ecuación 4.6 donde  $A_f$  corresponde al área de fibras y  $A_m$  al área de la sección rectangular modificada.

$$\% \text{fibras} = \frac{A_f}{A_m} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

En la Tabla 4.1 se encuentran los porcentajes de fibra de la porción de ensayo de las probetas de tensión, calculados con base en las áreas de haces vasculares y las áreas de la sección rectangular modificada que se encuentran en la Tabla G.3 del Anexo G. El valor promedio de porcentaje de fibras fue de 41.9%, con una desviación estándar de 10.1% y un coeficiente de variación de 0.24.

En la Figura 4.16 se observa la gráfica de Módulo de Elasticidad longitudinal a tensión en función del porcentaje de fibra.

Figura 4.16. Módulo de elasticidad vs Porcentaje de fibra



Fuente: Autor

#### 4.1.4.3 Análisis de resultados

Los dos tipos de ensayos a tensión paralela a la fibra mostraron fisuras longitudinales en casi todas las probetas, que representan una falla por cortante. Lo anterior ocurre posiblemente por los cambios de la sección transversal de la probeta, el mecanismo de sujeción con la máquina de aplicación de la carga y la alta resistencia de las fibras con respecto a la matriz. Se concluye que el esfuerzo normal máximo obtenido en la mayoría de estos ensayos está asociado a la resistencia de la probeta a los esfuerzos cortantes. El

comportamiento observado con las probetas a tensión es similar al encontrado en la investigación de González y otros (H. A. González, Montoya, & Bedoya, 2006) donde las probetas ensayadas fallaron por cortante.

El módulo de elasticidad obtenido de los ensayos es representativo del comportamiento a tracción, porque fue medido para un nivel de esfuerzo normal aparentemente dentro del rango elástico del material. El valor promedio de módulo de elasticidad a tensión fue de 21123MPa y su dispersión fue moderada.

El valor promedio del módulo de elasticidad longitudinal a tensión de todas las láminas ensayadas de 21150MPa, es alto en comparación con los resultados encontrados en otros estudios; Luna y colaboradores (Luna, Lozano, & Takeuchi, 2014) encontraron en 211 ensayos de tensión de tiras de guadua con nudo un valor promedio de módulo de elasticidad de 6540MPa con un coeficiente de variación de 0.44; el contenido de humedad de estas probetas, previamente sumergidas, varió entre 43.5% y 117% y la determinación de la deformación unitaria se hizo con base en lecturas de extensómetros mecánicos localizados en la porción de ensayo.

Ardila (Ardila, 2012) ensayó a tensión 32 tiras de guadua con nudo y encontró un módulo de elasticidad longitudinal de 15726MPa con un coeficiente de variación de 0.20; el contenido de humedad de estas probetas varió entre 12.2% y 16.7% y utilizó deformímetros eléctricos.

Gutiérrez y Olarte (Gutiérrez & Olarte, 2013) encontraron para 12 probetas de tensión con nudo instrumentadas con deformímetros eléctricos, un módulo de elasticidad promedio de 14913MPa. El coeficiente de variación fue de 0.31.

En ensayos de láminas a tensión sin nudo, tomadas de la parte media del espesor, Díaz (Díaz, 2011) encontró los siguientes valores promedio de módulo de elasticidad: 8027MPa para probetas obtenidas de la parte inferior, 8049MPa para probetas obtenidas de la parte media y 9794MPa para probetas obtenidas de la parte superior del culmo. En cada caso se ensayaron cinco probetas y la deformación unitaria se calculó con base en el cambio de longitud y la longitud inicial de la porción de ensayo.

González y colaboradores (H. A. González et al., 2006) reportan valores promedio de módulo de elasticidad de 17139MPa para muestras obtenidas de la parte inferior, 21066MPa para muestras obtenidas de la parte media y 20281MPa para muestras obtenidas de la parte superior. Estas muestras se mantuvieron en ambiente normal (65%/20°C) de climatización lo que dio como resultados contenidos de humedad alrededor del 10%. Los mismos autores reportan valores promedio de módulo de elasticidad de 13695MPa para muestras obtenidas de la parte inferior, 18082MPa para muestras obtenidas de la parte

media y 15857MPa para muestras obtenidas de la parte superior mantenidas en ambiente húmedo (85%/20°C) con contenidos de humedad alrededor del 15%.

El porcentaje de fibras varió entre el 25.7% y el 59.4%. Las láminas utilizadas para la elaboración de las probetas tienen diferentes distribuciones de fibras dependiendo del lugar donde son obtenidas.

El módulo de elasticidad longitudinal a tensión aumenta con el porcentaje de fibra. Se observa una mejor relación en las probetas Tipo 2, las cuales tienen un contenido de humedad bajo. En el trabajo de Díaz (Díaz, 2011), se encontró que el módulo de elasticidad puede estar relacionado con el porcentaje de fibras. Al analizar la relación entre estas dos variables diferenciando la parte del culmo de donde son obtenidas las láminas, encontró coeficientes de correlación de 0.76 y 0.95 para probetas extraídas de la parte baja y media respectivamente. En general las láminas que se utilizan para elaborar el material compuesto BGLPP son obtenidos de la parte baja, debido a que en esta parte el espesor es mayor y se puede obtener una lámina de espesor adecuado luego de los procesos de maquinado.

## **4.2 PROBETAS DE COMPRESIÓN EN LÁMINAS DE GUADUA**

### **4.2.1 Ensayo de compresión paralela a la fibra**

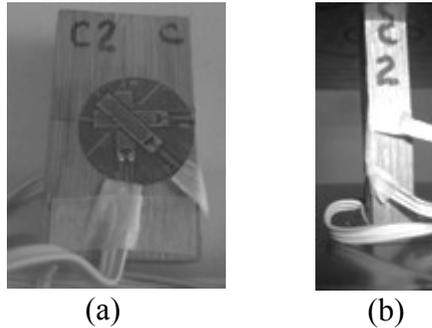
#### **4.2.1.1 Descripción de los ensayos**

Los ensayos de compresión paralela a la fibra en láminas, se realizaron en especímenes sin nudo (Figura 3.15) con una relación alto/ancho cercana a 2. En total se realizaron 10 ensayos. Cada una de las probetas fue marcada con una letra C mayúscula seguida por un número que corresponde al número de la lámina de donde se elaboraron de acuerdo con el esquema de corte del Anexo C.

Se tomaron tres medidas del alto, ancho y espesor de cada probeta. Con base en el promedio de estas medidas, se calculó el volumen de cada probeta y el área resistente a compresión. (Tabla G.4 del Anexo G).

Los ensayos fueron realizados en una máquina universal de ensayos a una velocidad de 0.01mm/s (0.6mm/min). Las probetas se colocaron directamente en los platos de carga. Para determinar la relación de Poisson, a las probetas C2, C5 y C9 se les colocó un deformímetro eléctrico tridireccional. En la Figura 4.17 se observa la probeta C2.

Figura 4.17. Probeta de compresión C2 (a) localización del deformímetro triaxial y (b) montaje del ensayo



Fuente: Autor

#### 4.2.1.2 Cálculos y resultados

El esfuerzo de compresión  $\sigma_c$  aplicado fue calculado con base en la Ecuación 4.7, donde  $P$  es la fuerza aplicada y  $A$  el área de la sección transversal de la probeta.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

La resistencia a compresión paralela a la fibra  $F_c$  se calculó con base en la Ecuación 4.8 donde  $P_{max}$  es la fuerza máxima aplicada y  $A$  el área de la sección transversal de la probeta.

$$F_c = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

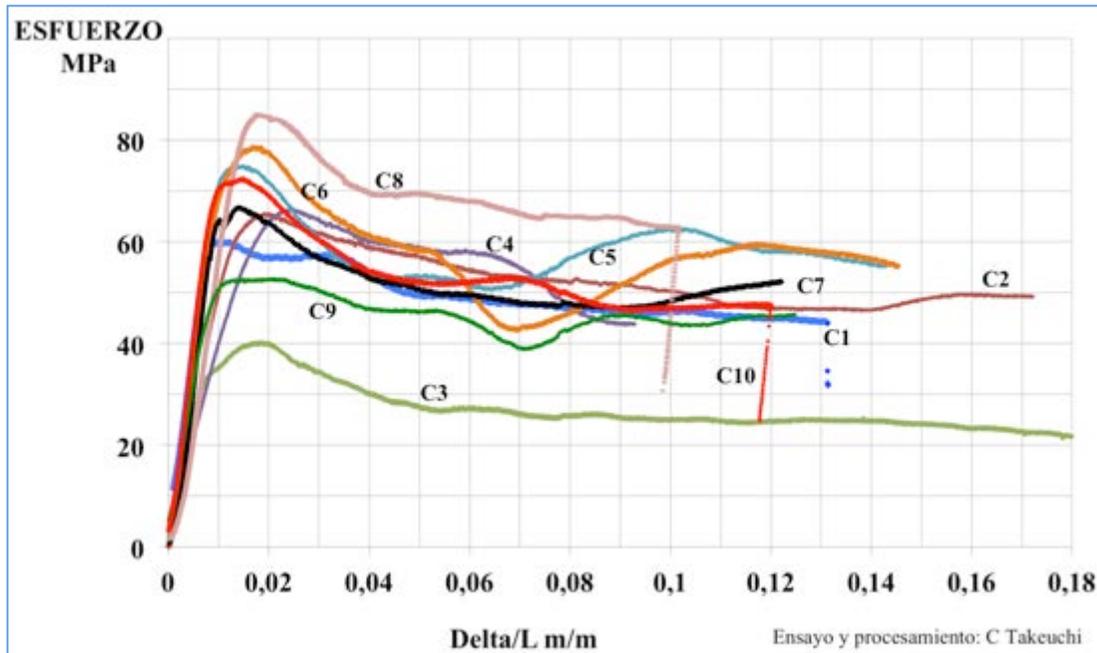
Con base en el esfuerzo normal y la relación entre el desplazamiento del plato de carga y la longitud inicial de la probeta ( $\delta/L$ ) para diferentes niveles de carga, se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 4.18. Como se puede observar el comportamiento de las probetas fue similar, en el cual se presenta un tramo inicial linealmente elástico hasta alcanzar el límite de proporcionalidad, posteriormente se observa una disminución gradual de la pendiente hasta alcanzar el esfuerzo máximo luego del cual se presenta una disminución del esfuerzo, inicialmente de forma rápida y posteriormente en forma lenta. En el tramo de carga antes de alcanzar el esfuerzo máximo, no se observan pérdidas de resistencia notorias. La dispersión entre las curvas en este tramo es baja.

Se calculó el esfuerzo en el límite proporcional  $\sigma_{CLP}$  como el 75% de la resistencia a compresión.

En la Tabla 4.2 se encuentran los valores de resistencia a compresión paralela a la fibra y esfuerzo en el límite proporcional. La probeta C3 no se tuvo en cuenta para el cálculo del valor promedio de resistencia, por considerarse un dato atípico según el criterio de

Chauvenet. El valor promedio de resistencia a compresión paralela a la fibra fue de 69.2MPa con una desviación estándar de 9,8MPa y un coeficiente de variación de 0.14. El valor promedio de esfuerzo en el límite de proporcionalidad fue de 51,9MPa.

Figura 4.18. Gráficas Esfuerzo vs  $\delta/L$  de probetas a compresión paralela a la fibra



Fuente: Autor

Tabla 4.2. Valores de densidad y resistencia a compresión paralela a la fibra

Probeta	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
$F_c$ MPa	60,0	65,6	*40,3	66,5	74,9	78,7	66,8	85,1	52,8	72,5
$\sigma_{LP}$ MPa	45,0	49,2	*30,2	49,9	56,2	59,0	50,1	63,9	39,6	54,4
$\gamma$ g/cm <sup>3</sup>	0,81	0,72	0,64	0,74	0,78	0,80	0,75	0,84	0,61	0,76

El asterisco\* indica los resultados excluidos del promedio

Fuente: Autor

Para las probetas C2, C5 y C9, a los cuales se les había colocado previamente una roseta de deformaciones, se obtuvieron las relaciones entre el esfuerzo normal y las deformaciones longitudinal y transversal, como se indica en la Figura 4.19. Se observa una dispersión baja entre las curvas y moderada entre los valores de esfuerzo máximo.

El módulo de elasticidad se obtuvo como la pendiente de la regresión lineal de los puntos de la curva esfuerzo vs deformación longitudinal, entre el 20% y 75% del esfuerzo máximo.

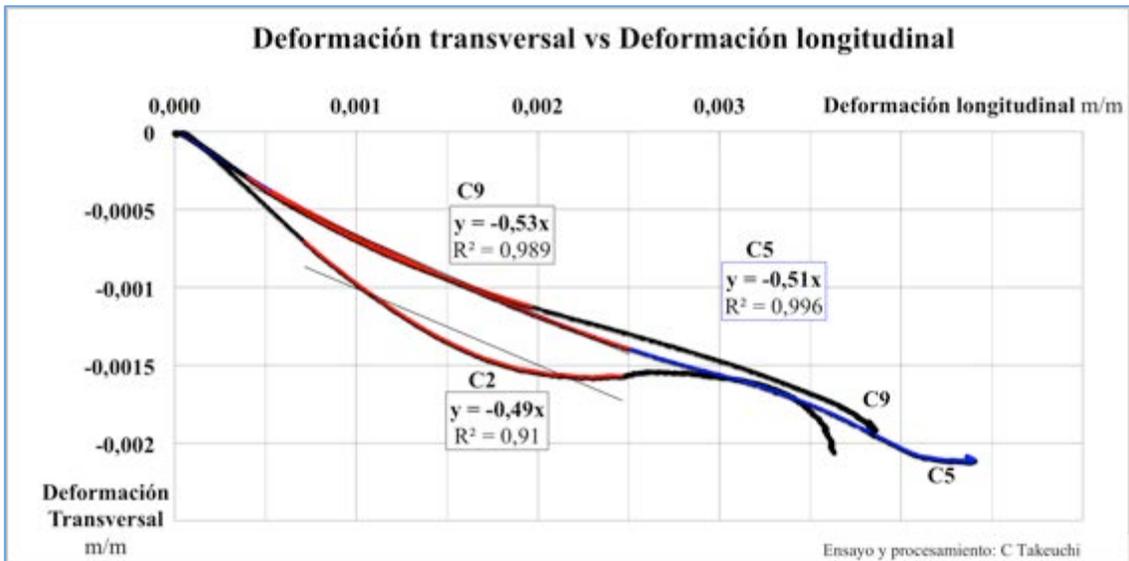
Figura 4.19. Gráficas esfuerzo deformación probetas C2, C5 y C9



Fuente: Autor

La relación de Poisson se calculó como el valor negativo de la pendiente de la regresión lineal entre los puntos de la curva deformación transversal *versus* deformación longitudinal, entre el 20% y el 75% del esfuerzo máximo (Figura 4.20).

Figura 4.20. Relación Deformación transversal vs deformación longitudinal probetas C2, C5, C9.



Fuente: Autor

En el archivo magnético correspondiente a la sección G.2.1 del Anexo G, se encuentran las lecturas de carga vs tiempo y deformación vs tiempo y los cálculos para elaborar las curvas de las probetas C2, C5 y C9.

En la Tabla 4.3 se encuentran los valores de módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson para las probetas C2, C5 y C9 con los coeficientes de correlación correspondientes a cada caso (calculado como la raíz cuadrada del coeficiente de determinación que se muestra para la gráfica correspondiente). El valor promedio del Módulo de elasticidad fue de 19559MPa con una desviación estándar de 1302MPa y un coeficiente de variación de 0.07. El valor promedio del coeficiente de Poisson fue de 0.52 considerando únicamente los resultados encontrados en las probetas C5 y C9 que presentan un comportamiento similar y descartando el resultado de la probeta C2, por su comportamiento atípico que se aprecia en la Figura 4.20.

Tabla 4.3. Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson

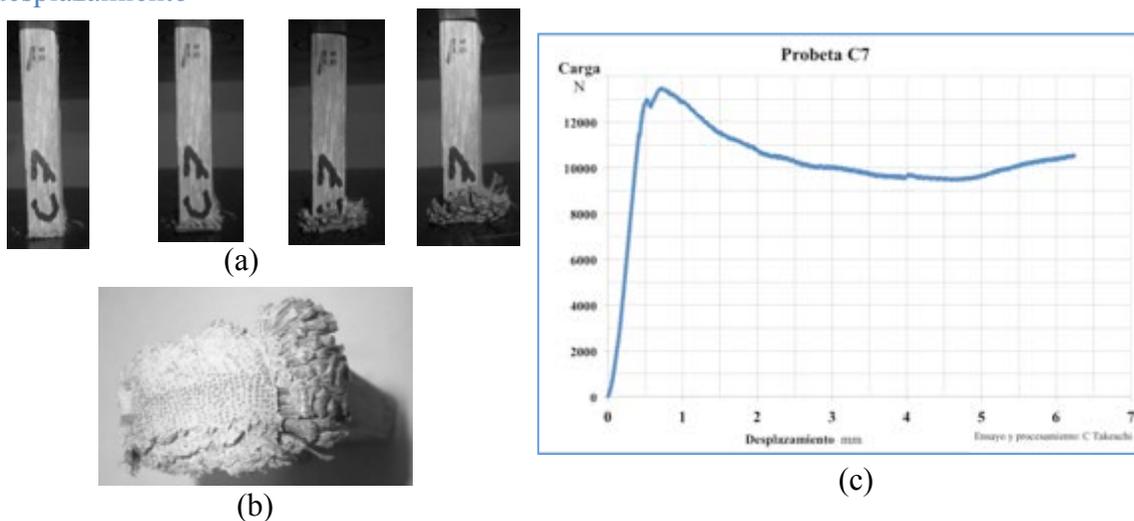
Probeta	Módulo de elasticidad		Relación de Poisson	
	$E$ (MPa)	Coef correlación	$\nu_{13}$	Coef correlación
C2	18856	0,999	*0,49	0,954
C5	21062	0,999	0,51	0,998
C9	18760	0,999	0,53	0,994

Fuente: Autor

#### 4.2.1.3 Observaciones durante los ensayos

En el momento en que las probetas alcanzan su carga máxima las fibras de alguno de los dos extremos empiezan a separarse, dejando un núcleo resistente en el centro. Después la carga se estabiliza a un 60 a 70% de la carga máxima mientras el proceso de aplastamiento continúa. En la Figura 4.21 se observan fotografías del ensayo de la probeta C7 y la curva carga desplazamiento.

Figura 4.21. Ensayo probeta C7, (a) vista de perfil, (b) vista inferior y (c) curva carga desplazamiento



Fuente: Autor

A pesar que la elaboración de las probetas aseguraba que sus caras fueran planas y ortogonales, se observó que en un lado de la probeta se abren más las fibras que en el otro. Lo anterior ocurre posiblemente porque la cantidad de las fibras cerca de las caras de la probeta no es la misma. Aún cuando la probeta sigue resistiendo carga, se detuvieron las pruebas ya que el ensayo deja de ser de compresión axial. En la Figura 4.22 se observan imágenes de los ensayos de las probetas de compresión en lámina.

Figura 4.22. Ensayo probeta de compresión en láminas, probetas C1 a C10



Fuente: Autor

Las gráficas carga desplazamiento de los ensayos de las probetas C1 a C10, son similares a la gráfica de la probeta C7. Una vez que se alcanza la carga máxima, se observa una reducción de su capacidad, sin embargo la probeta no falla ya que sigue manteniendo carga. En la sección G.2.1 del Anexo G se encuentran las gráficas carga desplazamiento para los ensayos de compresión realizados a estas probetas.

## 4.2.2 Determinación del contenido de humedad

### 4.2.2.1 Descripción de los ensayos

Una vez terminado el ensayo de compresión, se determinó el contenido de humedad de cada probeta siguiendo el procedimiento anteriormente descrito. En la Figura 4.23 se muestra el secado de las probetas de compresión en el horno.

Figura 4.23. Muestras para la determinación del contenido de humedad



#### 4.2.2.2 Resultados

Los contenidos de humedad para las probetas de compresión, variaron entre 8.8% y 9.8%, con un promedio de 9.4%, una desviación estándar de 0.28% y un coeficiente de variación de 0.03 (Tabla G.5 del anexo G).

#### 4.2.3 Determinación de la densidad

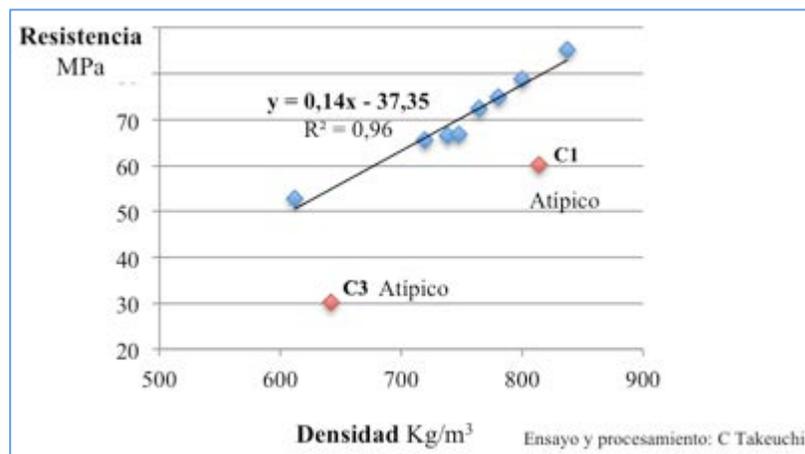
##### 4.2.3.1 Descripción de los ensayos

Para conocer la densidad de las probetas de compresión se determinó su volumen con base en los promedios de las medidas de ancho  $b$ , largo  $l$ , y espesor  $t$ . En la Tabla 4.2 se encuentran los valores de densidad de cada una de las probetas.

##### 4.2.3.2 Resultados

La densidad promedio de las láminas fue de  $0.75\text{g/cm}^3$ , con una desviación estándar de  $0.07\text{g/cm}^3$  y un coeficiente de variación del 0.097. En la Figura 4.24 se observa la gráfica de resistencia a compresión en función de la densidad. No se tuvieron en cuenta los resultados de la probeta C3 (considerado como valor atípico de resistencia) y de la probeta C1 (por ser valor atípico de la relación resistencia vs densidad).

Figura 4.24. Resistencia a compresión paralela a la fibra en función de la densidad



Fuente: Autor

### 4.2.3.3 Análisis de resultados

Las probetas ensayadas a compresión fallaron por aplastamiento en el apoyo. La más baja resistencia a compresión obtenida (40.3MPa) y que fue descartada por considerarse un dato atípico, se presentó en la probeta C3. La probeta T3, obtenida de la misma lámina, fue la única que presentó falla por tensión.

Se observa en la curva esfuerzo deformación un primer tramo lineal elástico y un segundo tramo inelástico. Se elaboraron las curvas esfuerzo deformación hasta donde la probeta alcanza su resistencia máxima, teniendo en cuenta que la instrumentación se hace en la superficie de la probeta y que al empezar a fallar por aplastamiento en los apoyos se levantan sus fibras externas, por lo cual, la superficie externa se descarga.

El valor promedio de la resistencia a compresión paralela a la fibra para las láminas ensayadas fue de 69.2MPa. Este valor es alto en comparación con los resultados encontrados en ensayos de compresión paralela a la fibra en muestras de bambú guadua rolliza. En el estudio desarrollado por Luna y colaboradores (Universidad Nacional de Colombia, 2010) se encontró un valor promedio de 32.9MPa con un coeficiente de variación de 0.26 de 220 ensayos de probetas previamente sumergidas cuyo contenido de humedad varió entre 13.6% y 151.8%.

Ardila (Ardila, 2012) ensayó 35 probetas previamente sumergidas con un contenido de humedad promedio de 95.27% y encontró una resistencia a compresión promedio de 24.5MPa con un coeficiente de variación de 0.3. También ensayó 28 probetas instrumentadas previamente sumergidas y retiradas del agua con anterioridad para la postura del deformímetro eléctrico, con un contenido de humedad promedio de 12.65% encontrando un valor de resistencia de 46MPa. Para 808 probetas Capera y Erazo (Capera & Erazo, 2012) encontraron una resistencia promedio de 37.8MPa en 146 probetas de las cuales 132 estaban sumergidas momentos antes de los ensayos; el contenido de humedad promedio de 125 muestras fue de 86.2% .

Díaz (Díaz, 2011) encontró los siguientes valores promedio de resistencia a compresión: 32.9MPa para probetas obtenidas de la parte inferior, 36.3MPa para probetas obtenidas de la parte media y 40.1MPa para probetas obtenidas de la parte superior del culmo; en cada caso se ensayaron cinco probetas. Lamus (Lamus, 2008) encontró un valor promedio de resistencia de 54.80MPa para 40 probetas y González (González & Takeuchi, 2007) un valor promedio de 56,2MPa. González y Leguizamón (González & Leguizamón, 2012) encontraron que la resistencia a compresión paralela a la fibra disminuye al aumentar el contenido de humedad, con valores entre 60.2MPa a 44.5MPa al pasar de contenidos de humedad de 13.5% a 24.2% en probetas de guadua rolliza obtenidas de la parte inferior del culmo.

El valor promedio del módulo de elasticidad longitudinal a compresión para las láminas instrumentadas y ensayadas fue de 19559MPa. En ensayos realizados con guadua rolliza se encuentran los siguientes resultados: Luna y colaboradores (Luna et al., 2014) reportan un valor promedio, de 136 ensayos de probetas instrumentadas con comparadores de carátula mecánicos, de 9080MPa con un coeficiente de variación de 0.64; el contenido de humedad de estas probetas varió entre 13.6% y 151.8%. En ese mismo estudio (Universidad Nacional de Colombia, 2010) en 22 ensayos de probetas instrumentados con deformímetros eléctricos se encontró un valor promedio de 14979MPa con un coeficiente de variación de 0.33; el contenido de humedad de estas probetas varió entre 13.8% y 80.9%.

Ardila (Ardila, 2012) ensayó 28 probetas instrumentadas con deformímetros eléctricos y contenido de humedad promedio de 12.65% y encontró un valor promedio de módulo de elasticidad longitudinal a compresión de 17519MPa con un coeficiente de variación de 0.23. Capera y Erazo (Capera & Erazo, 2012) encontraron un valor de 11978MPa en 28 probetas, 14 de ellas instrumentadas con deformímetros mecánicos las cuales estuvieron sumergidas momentos antes del ensayo y 14 instrumentadas con deformímetros eléctricos.

Díaz (Díaz, 2011) encontró los siguientes valores promedio de módulo de elasticidad: 3093MPa para probetas obtenidas de la parte inferior, 3582MPa para probetas obtenidas de la parte media y 4423MPa para probetas obtenidas de la parte superior; en cada caso se ensayaron cinco probetas instrumentadas por medio mecánicos. Lamus (Lamus, 2008) encontró un valor promedio de módulo elástico de 14164MPa para 17 probetas instrumentadas con comparadores de carátula. González encontró un valor promedio de módulo de elasticidad de 17859MPa para 479 probetas instrumentadas con comparadores de carátula mecánicos y 20022MPa para 20 probetas instrumentados con deformímetro eléctrico (González & Takeuchi, 2007).

El valor promedio de coeficiente de Poisson encontrado fue de 0.51. Ardila (Ardila, 2012) determinó a partir del ensayo de 6 probetas de guadua rolliza y contenido de humedad promedio de 12.65% un valor promedio de coeficiente de Poisson de 0.43 con un coeficiente de variación de 0.56. Ghavami y Marinho (Ghavami & Marinho, 2005) encontraron un valor promedio de 0.34 en 18 ensayos de probetas de guadua rolliza (de la parte inferior, media y superior con o sin nudo). En probetas con nudo de guadua, tomadas de la parte inferior, Ghavami y Marinho encontraron un valor de relación de Poisson de 0.56.

La densidad de las probetas varió entre 0.61g/cm<sup>3</sup> y 0.84g/cm<sup>3</sup>. Para las probetas ensayadas a compresión se encontró una relación lineal entre la resistencia a compresión y su densidad con un coeficiente de correlación de 0.98.

## 4.3 PROBETAS DE FLEXIÓN EN LÁMINAS DE GUADUA

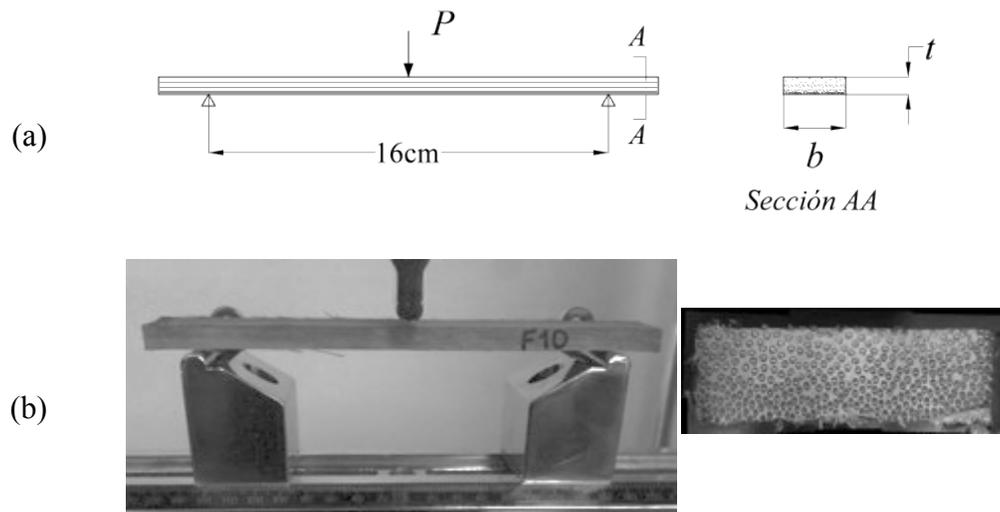
### 4.3.1 Ensayo de flexión longitudinal

#### 4.3.1.1 Descripción de los ensayos

Los ensayos de flexión longitudinal de láminas, se realizaron en especímenes sin nudo (Figura 3.16) de 200mm de longitud. En total se realizaron 10 ensayos de flexión longitudinal. Cada una de las probetas fue marcada con una letra F mayúscula seguida por un número. Las probetas F1 a F10, se elaboraron con las mismas láminas utilizadas para las probetas de tensión T1 a T10 y compresión C1 a C10 de acuerdo con el esquema de corte mostrado en el anexo C. Estas probetas se ensayaron de forma que la mayor densidad de fibras se encontraba en la parte inferior como se observa en la sección transversal de la Figura 4.25.

Se tomaron tres medidas del ancho,  $b$ , y el espesor,  $t$ , de cada lámina. Con base en el promedio de estas medidas, se calculó el momento de inercia de la sección transversal y el módulo de sección. (Tabla G.6 del Anexo G). Se realizó un ensayo de 3 puntos, con carga concentrada aplicada en el centro de la luz y una distancia entre apoyos de 16cm. En la Figura 4.25 se observa el esquema de los ensayos y el montaje del ensayo de la probeta F10. La velocidad de aplicación de la carga fue de 0.04mm/s (1.3mm/min).

Figura 4.25. Ensayo de flexión (a) esquema de carga y (b) montaje de la probeta F10



Fuente: Autor

### 4.3.1.2 Cálculos y resultados

El esfuerzo en el límite de proporcionalidad de cada probeta se calculó con el 75% de la carga máxima alcanzada como se indica en la Ecuación 4.9 donde  $S$  es el módulo elástico de la sección,  $L$  la luz entre apoyos,  $M_{max}$  el momento máximo en el centro de la luz, y  $P_{max}$  la fuerza máxima aplicada.

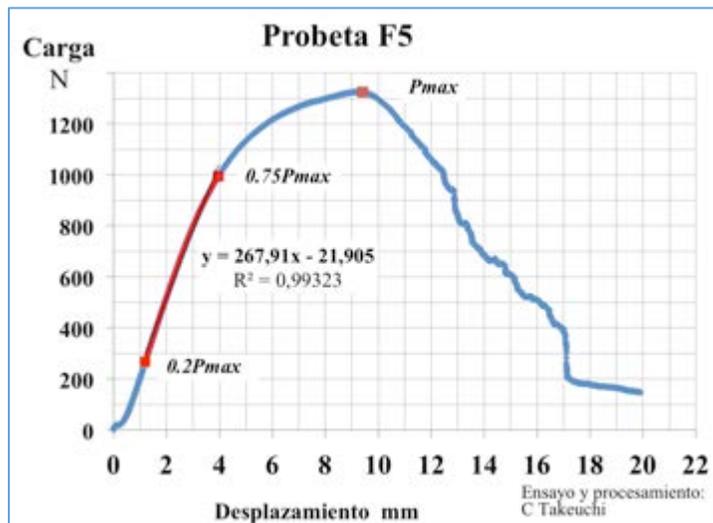
$$\sigma_{LP} = \frac{0.75M_{max}}{S} = \frac{0.75P_{max} L/4}{S} \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Con base en la pendiente de la regresión lineal de los puntos dentro del rango entre el 20% y el 75% de la carga máxima  $P_{max}$  de la curva carga desplazamiento, se calculó el módulo de elasticidad  $E$  utilizando la ecuación 4.10 siendo  $\Delta$  el desplazamiento en el centro de la luz e  $I$  el momento de inercia de la sección transversal.

$$E = \frac{P}{\Delta} \frac{L^3}{48EI} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

En la Figura 4.26 se observa la curva carga desplazamiento para la probeta F5 con el cálculo de la pendiente de la curva carga desplazamiento. En la sección G.3.2 del anexo G se encuentran, para el resto de las probetas de flexión, las curvas carga desplazamiento con la definición del rango y pendiente de la regresión lineal de los puntos dentro del rango.

Figura 4.26. Gráfica carga desplazamiento probeta F5



Fuente: Autor

Se calculó el esfuerzo de rotura, con base en la Ecuación 4.11 donde  $S_{inel}$  es el módulo inelástico de sección el cual se trabajó como  $bt^2/6.3$  (Sección G.3.1 del Anexo G).

$$f_r = \frac{M_{max}}{S_{inel}} = \frac{P_{max} L/4}{S_{inel}}$$

Ecuación 4.11

En la Tabla 4.4 se encuentran los valores de esfuerzo en el límite de proporcionalidad, esfuerzo de rotura y módulo de elasticidad. El valor promedio de esfuerzo en el límite de proporcionalidad fue de 91.64MPa, la desviación estándar de 11.1MPa y el coeficiente de variación de 0.12, el valor promedio de esfuerzo de rotura fue de 128.2MPa, la desviación estándar fue de 15.6MPa y el coeficiente de variación de 0.12. El valor promedio de módulo de elasticidad longitudinal a flexión fue de 12519MPa, con una desviación estándar de 1379MPa y un coeficiente de variación de 0.11. Para el cálculo de los valores promedios de los esfuerzos y del módulo de elasticidad, no se tuvieron en cuenta los resultados de la probeta F7 por ser valores atípicos, según el criterio de Chauvenet.

Tabla 4.4. Valores de esfuerzo en el límite de proporcionalidad, esfuerzo de rotura y módulo de elasticidad

Probeta	$\sigma_{LP}$ MPa	$f_r$ Mpa	$E$ MPa	Densidad g/cm3
F1	78,2	109,5	14000	0,76
F2	77,2	108,1	9636	0,68
F3	90,9	127,2	12989	0,75
F4	84,6	118,5	13022	0,70
F5	102,2	143,1	12669	0,72
F6	94,3	132,1	11986	0,82
F7	*122,7	*171,7	*16551	0,86
F8	100,7	141,0	12780	0,80
F9	109,7	153,5	14159	0,79
F10	86,6	121,2	11434	0,67

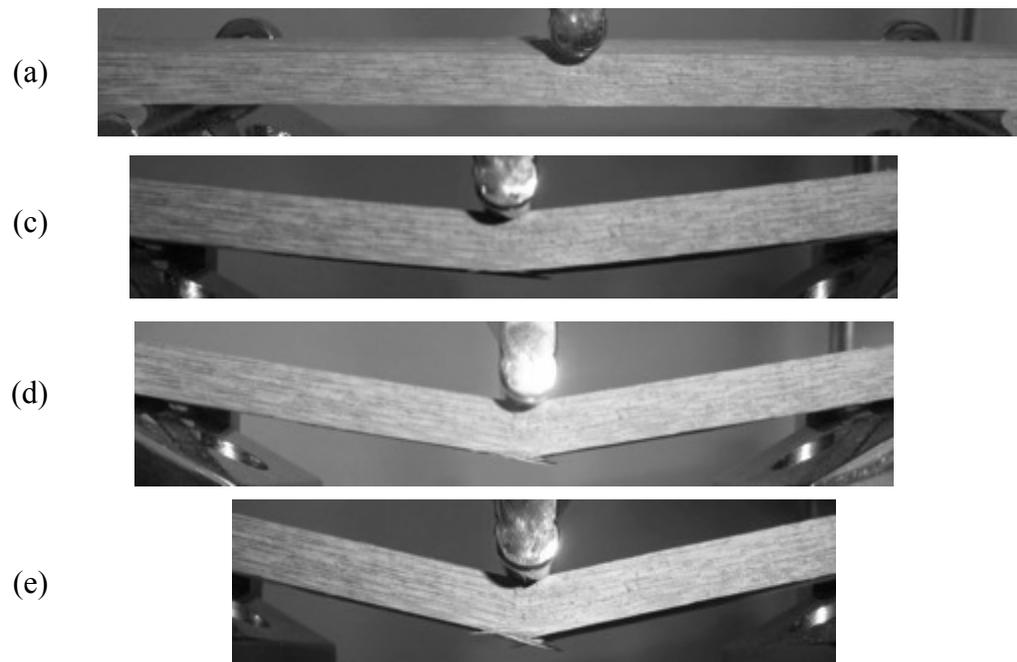
El asterisco\* indica los resultados excluidos del promedio

Fuente: Autor

#### 4.3.1.3 Observaciones durante los ensayos

En todas las probetas ensayadas el comportamiento fue similar. Al aplicar la carga, la lámina empieza a deformarse sin que se identifiquen aplastamientos o fisuras. Una vez superado el límite de proporcionalidad se empieza a presentar aplastamiento en el punto de aplicación de la carga. Cuando la probeta alcanza la carga máxima se presenta rotura de las fibras localizadas en la parte inferior. Posteriormente, tanto el aplastamiento como la rotura de fibras se van incrementando al aplicar más carga. En la Figura 4.26 y en la Figura 4.27 se observan la curva carga desplazamiento y las fotografías del ensayo de la probeta F5.

Figura 4.27. Ensayo de la probeta F5: (a) inicio del ensayo, (c) carga máxima, (d) posterior a carga máxima y (e) finalización



Fuente: Autor

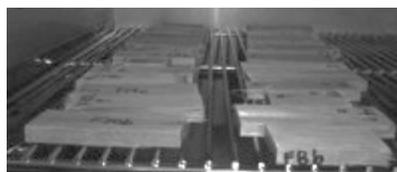
En la Figura G.12 del Anexo G se encuentran las fotografías con las curvas carga desplazamiento para las probetas ensayadas con excepción de la que corresponde a la probeta F5.

### 4.3.2 Determinación del contenido de humedad

#### 4.3.2.1 Descripción de los ensayos

Una vez terminado el ensayo de flexión, se determinó el contenido de humedad de cada probeta tomando muestras de la parte cercana al punto de aplicación de la carga. El procedimiento utilizado para el cálculo del contenido de humedad fue el anteriormente descrito en la sección 4.1.2. En la Figura 4.28 se muestra el secado de las muestras para la determinación del contenido de humedad tomadas de las probetas de flexión.

Figura 4.28. Muestras para la determinación del contenido de humedad



Fuente: Autor

#### 4.3.2.2 Resultados

Los contenidos de humedad para las muestras de las probetas de flexión, variaron entre 9.2% y 10.2%, con un promedio de 9.4%, una desviación estándar de 0.32% y un coeficiente de variación de 0.03. En el anexo G, se encuentra la Tabla G.8 correspondiente a la determinación del contenido de humedad para estas probetas.

#### 4.3.3 Determinación de la densidad

##### 4.3.3.1 Descripción de los ensayos

Para conocer la densidad de las probetas de flexión se determinó el volumen de las muestras para control de humedad a partir del promedio de las tres medidas de su ancho,  $b$ , largo,  $l$ , y espesor,  $t$ .

##### 4.3.3.2 Resultados

En la Tabla 4.4 se encuentran los valores de densidad de cada una de las probetas. La densidad promedio de las láminas fue de  $0.75\text{g/cm}^3$ , con una desviación estándar de  $0.06\text{g/cm}^3$  y un coeficiente de variación del 0.085. En la Tabla G.8 del anexo G, se encuentra la determinación de la densidad.

##### 4.3.3.3 Análisis de resultados

Todas las probetas de láminas ensayadas a flexión fallaron por rotura en la parte inferior en la mitad de la luz. Se presentó aplastamiento en el punto de aplicación de la carga.

Las curvas carga desplazamiento, describen un comportamiento inelástico antes de alcanzar la carga máxima. En el rango elástico no se observa aplastamiento en el punto de aplicación de la carga. El tipo de falla es dúctil, porque una vez alcanzada la resistencia máxima, la rotura de las fibras longitudinales en la parte inferior se presenta de manera progresiva gradual.

El valor promedio de esfuerzo de rotura para todas las láminas ensayadas fue de 128.2MPa. Díaz (Díaz, 2011) encontró para láminas de *Guadua angustifolia* Kunth sin nudo ensayadas a flexión en 3 puntos, obtenidas de la parte inferior del culmo valores promedio de 65.0MPa, valores de 95.8MPa para láminas obtenidas de la parte media del culmo y 102.3MPa para láminas obtenidas de la parte superior del culmo, en cada caso ensayó 5 probetas. González y colaboradores (González et al., 2007) reportan para esfuerzos de rotura a flexión en ensayos de láminas de 3 puntos del mismo material con contenido de humedad cercanos al 10%, un valor medio de 114.8MPa para muestras obtenidas de la

parte inferior, 128.8MPa para muestras obtenidas de la parte media y 125.1MPa para muestras obtenidas de la parte superior; ensayaron para cada caso 3 probetas.

El valor promedio del módulo de elasticidad longitudinal a flexión fue de 12519MPa. Díaz (Díaz, 2011) encontró para sus ensayos de láminas valores promedio de 8989MPa para láminas de la parte inferior, 10918 para láminas de la parte media y 11476MPa para láminas de la parte superior del culmo. González y colaboradores (González et al., 2007) reportan valores promedio de 13267MPa para muestras obtenidas de la parte inferior, 14129MPa para muestras obtenidas de la parte media y 12455MPa para muestras obtenidas de la parte superior.

El valor promedio del módulo de elasticidad longitudinal a tensión fue de 20858MPa, a compresión fue de 19559MPa y a flexión fue de 12519MPa. Los valores promedio mencionados para las sollicitaciones de tensión y compresión fueron determinados con ensayos de probetas instrumentadas con deformímetros eléctricos.

La densidad de las probetas varió entre  $0.65\text{g/cm}^3$  y  $0.82\text{g/cm}^3$ , el coeficiente de variación fue de 0.085.

#### **4.4 ENSAYOS FÍSICOS EN LÁMINAS UTILIZADAS PARA LA FABRICACIÓN DEL MATERIAL BGLPP**

Los recortes obtenidos del extremo final de las láminas utilizadas para fabricar los tableros, entre el segundo y tercer corte, descritos en el capítulo 3, fueron guardados entre una bolsa plástica sellable para conservar su contenido de humedad. Finalmente, se guardaron láminas en 10 bolsas, una bolsa por cada día de prensado. De cada bolsa, se escogieron aleatoriamente 12 recortes para determinar su contenido de humedad y densidad, con excepción del grupo 2 de donde se tomaron 9 muestras. La numeración de cada muestra consiste en dos números. El primer número corresponde al grupo de donde provino y el segundo, corresponde al consecutivo del ensayo.

##### **4.4.1 Determinación del contenido de humedad**

###### **4.4.1.1 Descripción de los ensayos**

Se determinó el contenido de humedad de cada muestra siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.1.2. En la Tabla G.9 del Anexo G, se encuentran las masas de cada muestra antes y después del secado utilizados para la determinación de su contenido de humedad.

#### 4.4.1.2 Resultados

En la Tabla G.9 del Anexo G se encuentran los valores de contenido de humedad que corresponde a cada una de las muestras. El menor valor obtenido, fue de 10.15% para la lámina 7-7 y el mayor valor obtenido fue de 13.31% para la lámina 6-3.

Los promedios de contenidos de humedad por grupo variaron entre 10.47% y 12.60%. Las desviaciones estándar por grupo variaron entre 0.28% y 0.45%. Los coeficientes de variación por grupo, variaron entre 0.022 y 0.041.

El promedio de los promedios de los grupos fue de 11.94% con una desviación estándar de 0.72 y un coeficiente de variación de 0.060. En la Tabla 4.5 se encuentran los valores promedio de contenido de humedad de cada grupo de muestras.

Tabla 4.5. Espesor, contenido de humedad y densidad de láminas de fabricación

Grupo	t			Densidad			Contenido humedad		
	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente Variación	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente Variación	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente Variación
	mm	mm		g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>		%	%	%
1	5,75	0,28	0,048	0,81	0,08	0,095	11,89	0,39	0,033
2	7,26	0,69	0,095	0,76	0,04	0,056	12,46	0,44	0,035
3	7,08	0,55	0,078	0,78	0,08	0,100	12,40	0,34	0,027
4	5,89	1,12	0,191	0,75	0,08	0,100	11,15	0,45	0,041
5	7,31	0,46	0,062	0,75	0,04	0,060	12,52	0,31	0,025
6	7,22	0,50	0,069	0,73	0,05	0,067	12,60	0,31	0,024
7	5,95	0,27	0,045	0,78	0,06	0,072	10,47	0,38	0,037
8	7,49	0,45	0,060	0,73	0,08	0,116	11,48	0,33	0,029
9	7,34	0,53	0,072	0,77	0,05	0,066	12,56	0,28	0,022
10	7,28	0,51	0,070	0,78	0,10	0,130	11,82	0,31	0,026

Fuente: Autor

#### 4.4.2 Determinación de la densidad

##### 4.4.2.1 Descripción de los ensayos

Para conocer la densidad de las probetas de compresión se determinó su volumen antes de ser ensayadas. Se tomaron tres medidas de su ancho, *b*, largo, *l*, y espesor, *t*, con un calibrador de lectura digital y 0.01mm de precisión. En la Tabla G.9 del Anexo G además de las masas se encuentran las dimensiones tomadas y sus valores promedio para cada una de las láminas. Con estos valores, se calculó la densidad de cada lámina.

##### 4.4.2.2 Resultados

Los espesores de las láminas variaron desde 4.66mm (lámina 4-10) hasta 8.35mm (lámina 3-2). La menor densidad obtenida fue de 0.59g/cm<sup>3</sup> para la lámina 8-6 y la mayor fue de 0.96g/cm<sup>3</sup> para la lámina 10-5. El promedio de densidad de todas las láminas fue de

0.76g/cm<sup>3</sup> con una desviación estándar de 0.07 g/cm<sup>3</sup> y un coeficiente de variación de 0.09. En el Anexo G, se encuentra la Tabla G.9 correspondiente a la determinación de la densidad para cada lámina.

En la Tabla 4.5 se encuentran los valores promedio de espesor y densidad de cada grupo de láminas. La densidad promedio de cada grupo de láminas varió entre 0,73g/cm<sup>3</sup> y 0,81g/cm<sup>3</sup>. Las desviaciones estándar por grupo variaron entre 0,10g/cm<sup>3</sup> y 0.04g/cm<sup>3</sup>. Los coeficientes de variación por grupo estuvieron entre 0.056 y 0.10.

El promedio de densidad de los promedios de los grupos fue de 0,76g/cm<sup>3</sup> con una desviación estándar de 0.03 y un coeficiente de variación de 0.034.

#### **4.4.2.3 Análisis de resultados**

Los coeficientes de variación del contenido de humedad por grupo fueron menores a 0.04. Esto es importante, para el proceso de fabricación de elementos laminados. Si el contenido de humedad varía, se pueden presentar esfuerzos residuales que pueden afectar el comportamiento del laminado. Según Cortés (Cortés, 2009) es recomendable que la diferencia entre las láminas componentes de un elemento sea menor de 4%.

El menor valor obtenido de contenido de humedad fue de 10.15% y el mayor valor obtenido fue de 13.31%.

Los espesores de las láminas muestreadas de las utilizadas para fabricación variaron desde 4.66mm hasta 8.35mm (lámina 3-2).

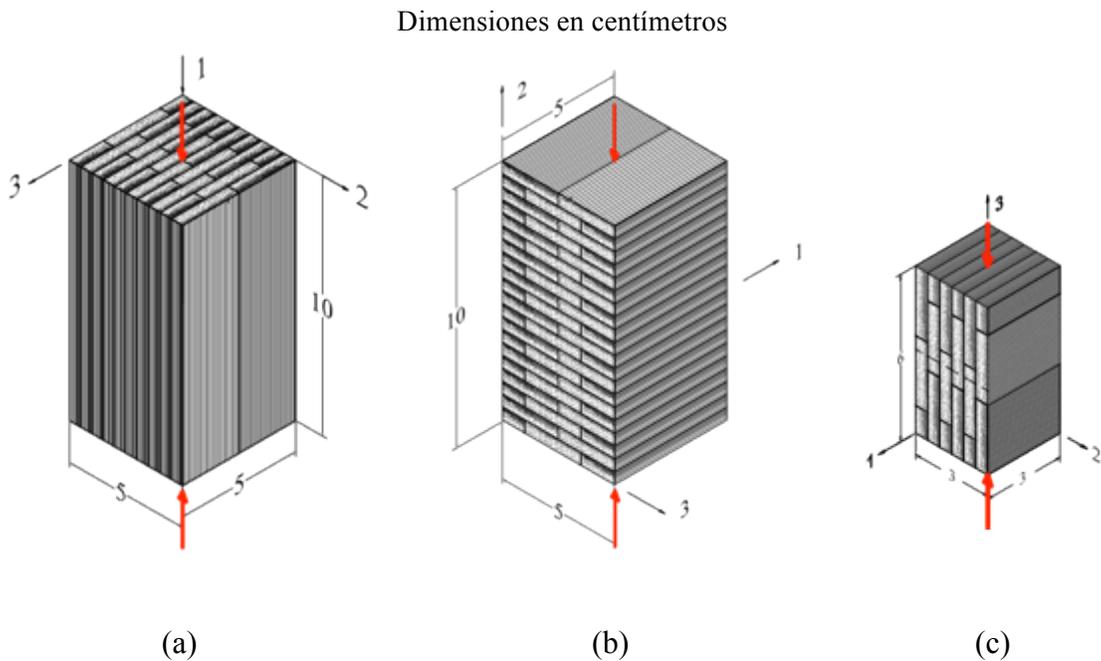
A pesar de que durante el proceso de fabricación se retira la corteza y la parte interna de las latas, la densidad de las láminas varió entre 0,59g/cm<sup>3</sup> y 0,93g/cm<sup>3</sup> con un coeficiente de variación de 0.09. La densidad promedio de cada grupo de láminas varió entre 0,73g/cm<sup>3</sup> y 0,81g/cm<sup>3</sup> y los coeficientes de variación por grupo estuvieron entre 0.056 y 0.10.

## 5. COMPRESIÓN EN BGLPP

Como material compuesto multicapa, la falla en BGLPP se puede presentar en la lámina o en la unión entre láminas. La falla en la lámina puede ser ocasionada por rotura de las fibras solicitadas a tracción, pandeo de las fibras solicitadas a compresión, fractura de la matriz, falla de la matriz por compresión y falla de la unión fibra matriz. Un tipo de falla del material compuesto se produce por el despegue y separación de las láminas.

El presente capítulo trata sobre el estudio de probetas de BGLPP ensayadas ante sollicitaciones de compresión paralela y perpendicular a la fibra. Se ensayaron tres tipos diferentes de probetas, Figura 5.1, las probetas C11 solicitadas a compresión axial paralela a la fibra, las probetas C22 solicitadas a esfuerzo axial perpendicular a la fibra y perpendicular al plano de unión entre tableros y las probetas C33 con esfuerzo axial perpendicular a la fibra y paralelo al plano de unión entre tableros.

Figura 5.1 Tipos de probetas a compresión: (a) C11, (b) C22 y (c) C33



Fuente: Autor

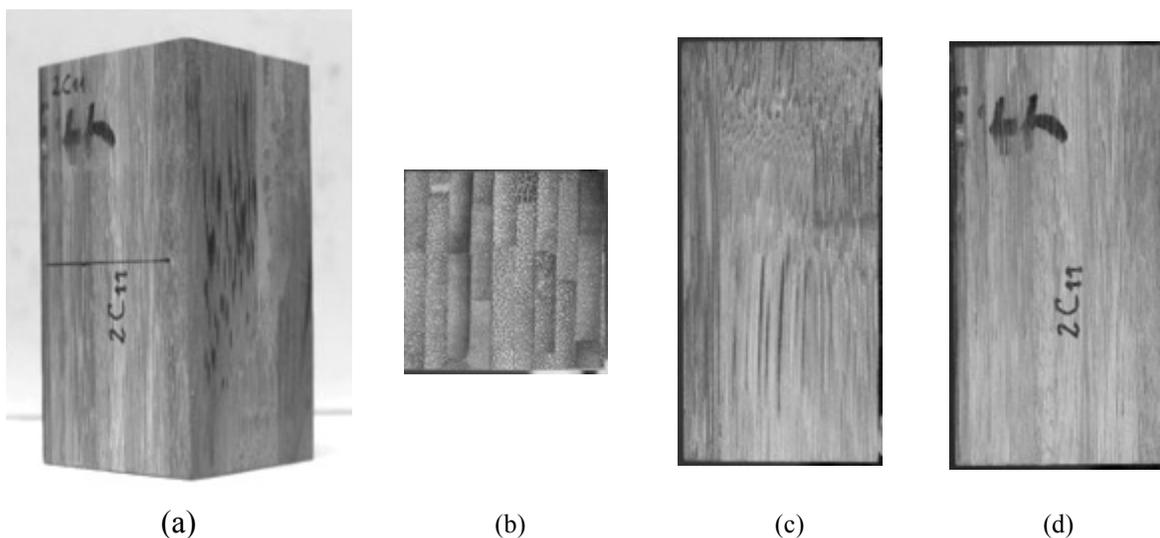
## 5.1 COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA EN PROBETAS DE BGLPP

### 5.1.1 Ensayo de compresión paralela a la fibra

#### 5.1.1.1 Descripción de los ensayos

Se realizaron 10 ensayos de compresión paralela a la fibra en probetas de BGLPP, como las que se aprecia en la Figura 5.2. Para identificar cada una de las probetas, fueron marcadas con un número que corresponde al bloque de material de bambú guadua laminado de donde fueron obtenidos, seguido del tipo de probeta, que en este caso corresponde a C11.

Figura 5.2 Vistas de la Probeta 2C11: (a) general, (b) superior, (c) lateral izquierda, (d) frontal

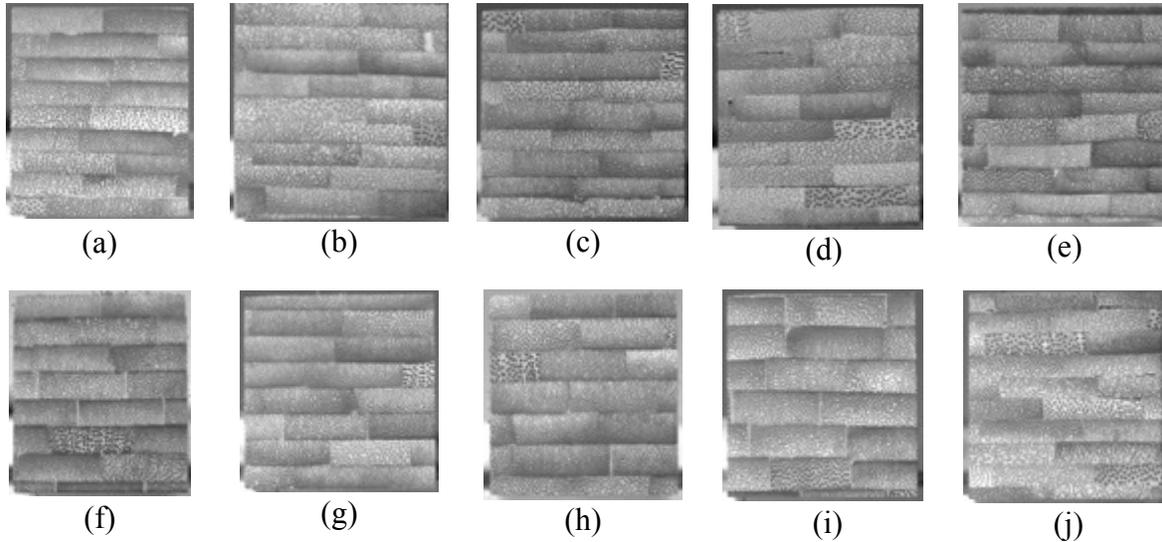


Fuente: Autor

En el Anexo H se encuentran para cada probeta las vistas de sus caras; las vistas superior e inferior corresponden al plano 1 (perpendicular al eje 1), las vistas frontal y posterior corresponden al plano 3 y las vistas laterales al plano 2.

Como se aprecia en la Figura 5.3, la sección transversal de cada probeta fue diferente, dependiendo de las características y disposición de los tableros con los que fueron fabricados los bloques y así mismo de las características y disposición de las láminas con los que fueron fabricados los tableros. Por ejemplo los bloques de menor numeración fueron fabricados con tableros de menor espesor y las probetas fabricadas con estos tienen mayor número de tableros, los de mayor numeración tienen tableros de mayor espesor y por tanto menor cantidad de tableros.

Figura 5.3 Vistas transversales de las probetas: (a) 1C11, (b) 2C11, (c) 3C11, (d) 4C11, (e) 5C11, (f) 7C11, (g) 8C11, (h) 9C11, (i) 10C11 y (j) 0C11

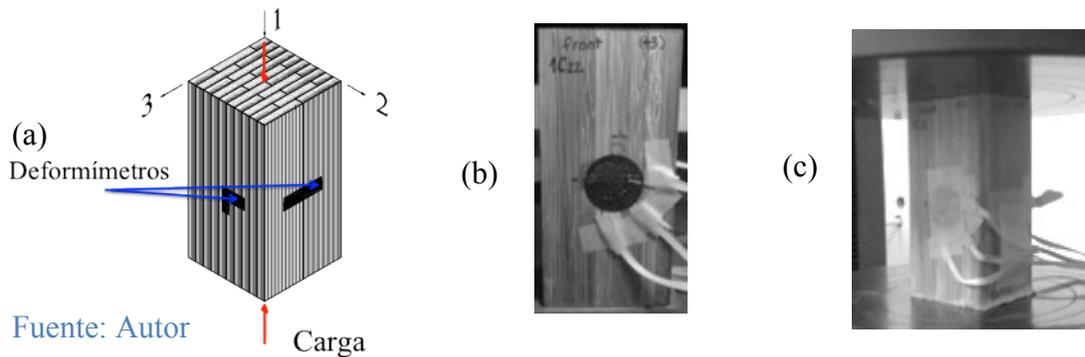


Fuente: Autor

Para cada probeta, se tomaron dos medidas del alto y tres medidas de ancho o espesor por cada cara vertical y dos medidas de ancho y espesor en las caras horizontales. Con base en el promedio de estas medidas, se calculó el volumen de cada probeta y el área resistente a compresión. (Tabla H1 del Anexo H). Los ensayos fueron realizados en una máquina universal de ensayos a una velocidad de 0.01mm/s (0.6mm/min). Las probetas se colocaron directamente en los platos de carga.

Para determinar el módulo de elasticidad longitudinal y las relaciones de Poisson, además de la resistencia, a las probetas 1C11, 5C11 y 0C11 se les colocó un deformímetro tridireccional en la cara frontal para medir la deformación vertical, horizontal y a 45° y un deformímetro unidireccional en una de sus caras laterales para medir la deformación horizontal. En la Figura 5.4 se observa el ensayo de las probetas 1C11

Figura 5.4. Ensayo de la probeta 1C1, (a) vista frontal probeta y (b) montaje



Fuente: Autor

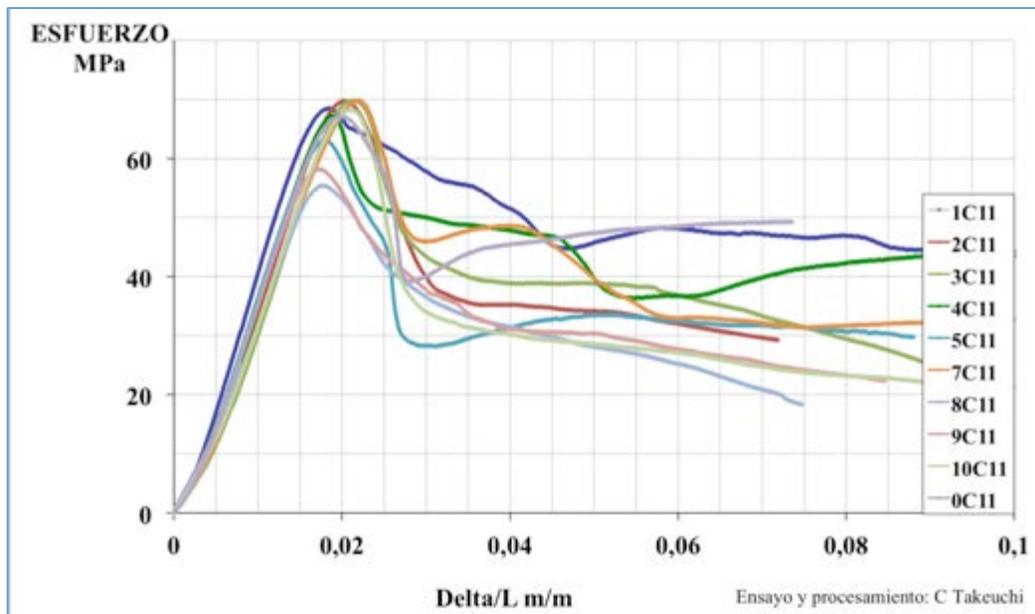
### 5.1.1.2 Cálculos y resultados

El esfuerzo de compresión aplicado fue calculado con base en la Ecuación 5.1 donde  $P$  es la fuerza aplicada y  $A$  el área de la sección transversal de la probeta.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Con base en el esfuerzo normal y la relación entre el desplazamiento del plato de carga y la longitud inicial de la probeta ( $\delta/L$ ) para diferentes niveles de carga se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 5.5. Como se puede observar el comportamiento de las probetas fue similar. En las curvas, se presenta un tramo inicial linealmente elástico después se observa una disminución gradual de la pendiente hasta alcanzar el esfuerzo máximo luego del cual se presenta una disminución del esfuerzo, inicialmente de forma rápida y posteriormente en forma lenta. En el tramo de carga antes de alcanzar el esfuerzo máximo, no se observan pérdidas de resistencia notorias. La dispersión entre las curvas en el tramo de carga es baja.

Figura 5.5. Esfuerzo normal vs  $\delta/L$  probetas a compresión C1



Fuente: Autor

La resistencia a compresión se calculó con base en la Ecuación 5.2 donde  $P_{max}$  es la fuerza máxima aplicada y  $A$  el área de la sección transversal de la probeta. Se calculó el esfuerzo en el límite de proporcionalidad  $\sigma_{CLP}$ , como el 75% de la resistencia a compresión.

$$F_c = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Se determinó el módulo de elasticidad longitudinal,  $E_1$ , de las probetas 1C11, 5C11 y 0C11 con base en la lectura de la deformación longitudinal de la roseta de deformaciones,  $\epsilon_1$ ; se

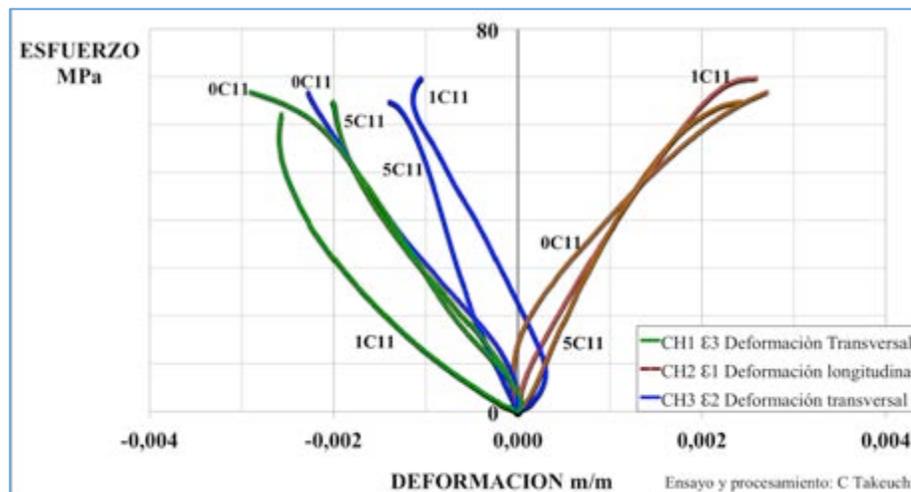
calculó como la pendiente de la regresión lineal de los puntos de la curva esfuerzo deformación comprendidos entre el 20% y el 75% del esfuerzo máximo (Figura 5.6). También se elaboraron los diagramas de esfuerzo en función de las deformaciones, longitudinal en la dirección 1, transversal en la dirección 2 y transversal en la dirección 3 para estas tres probetas (Figura 5.7)

Figura 5.6. Relación esfuerzo vs deformación longitudinal en probetas 1C11, 5C11 y 0C11



Fuente: Autor

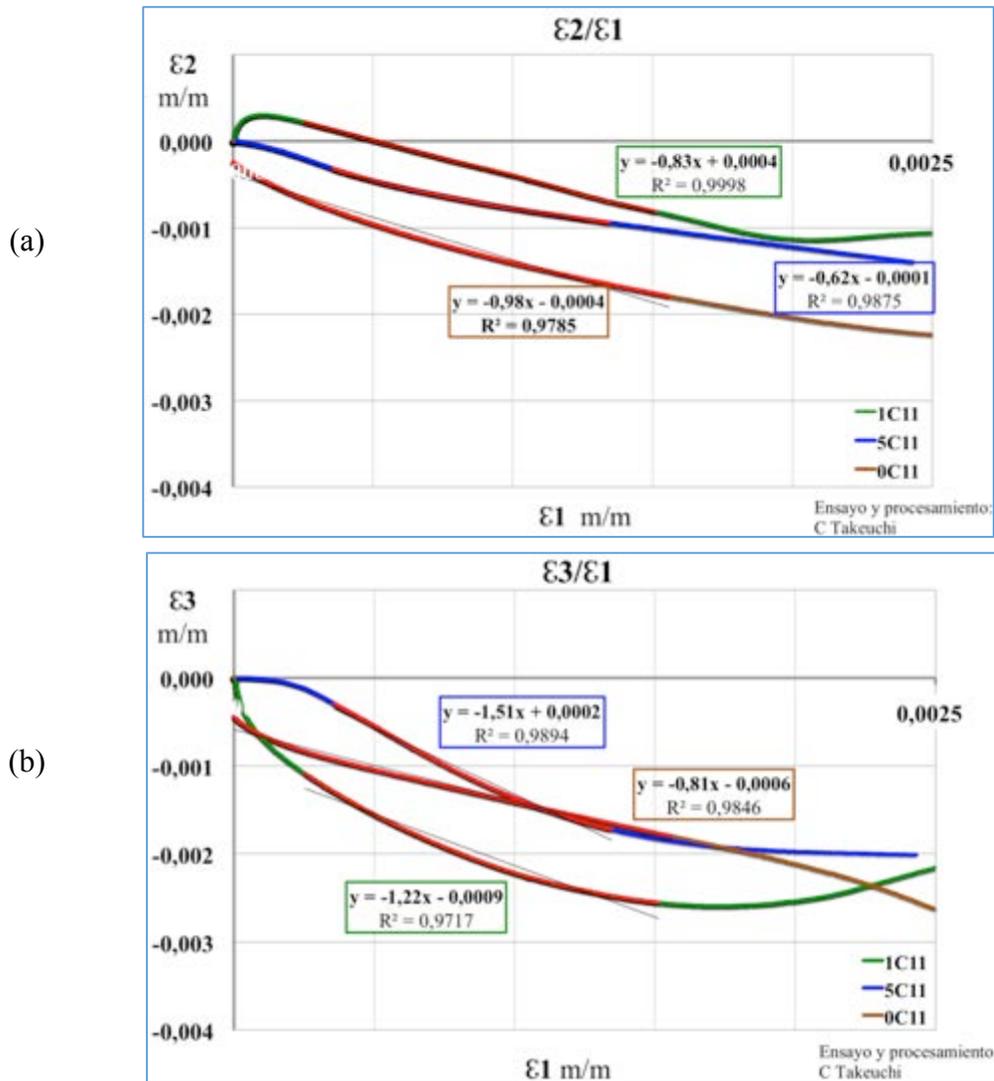
Figura 5.7. Curvas Esfuerzo vs deformación longitudinal en dirección 1 y transversal en las direcciones 2 y 3 en probetas 1C11, 5C11 y 0C11



Fuente: Autor

En la Figura 5.8 se muestran las curvas de deformación transversal en función de la deformación longitudinal que corresponden a las probetas 1C11, 5C11 y 0C11. Los coeficientes de Poisson,  $\nu_{21}$  y  $\nu_{31}$ , se definieron como el valor negativo de la pendiente de la regresión lineal de los puntos de las curvas de deformación transversal vs deformación longitudinal que se encuentran en el rango entre el 20% al 75% del esfuerzo máximo.

Figura 5.8. Curvas deformación transversal en las direcciones 2 y 3 en función de deformación longitudinal en dirección 1 en probetas 1C11, 5C11 y 0C11



Fuente: Autor

En la Tabla 5.1 se encuentran los valores de resistencia, módulo de elasticidad longitudinal,  $E_1$ , y los coeficientes de Poisson,  $\nu_{21}$  y  $\nu_{31}$ , obtenidos, con los coeficientes de correlación correspondientes a cada caso. El valor promedio de resistencia a compresión longitudinal es de 65.7MPa con una desviación estándar de 5.4MPa y un coeficiente de variación de 0.08,

el valor promedio del Módulo de elasticidad longitudinal fue de 30044MPa con una desviación estándar de 6559MPa y un coeficiente de variación de 0.22. Los valores promedio de los coeficientes de Poisson  $\nu_{21}$  y  $\nu_{31}$ , obtenidos fueron de 0.81 y 1.18 con desviaciones estándar de 0.18 y 0.35 y coeficientes de variación de 0.22 y 0.29. Para todas las regresiones lineales el coeficiente de correlación fue mayor de 0.9.

Tabla 5.1. Resistencia, Módulo de elasticidad y relaciones de Poisson

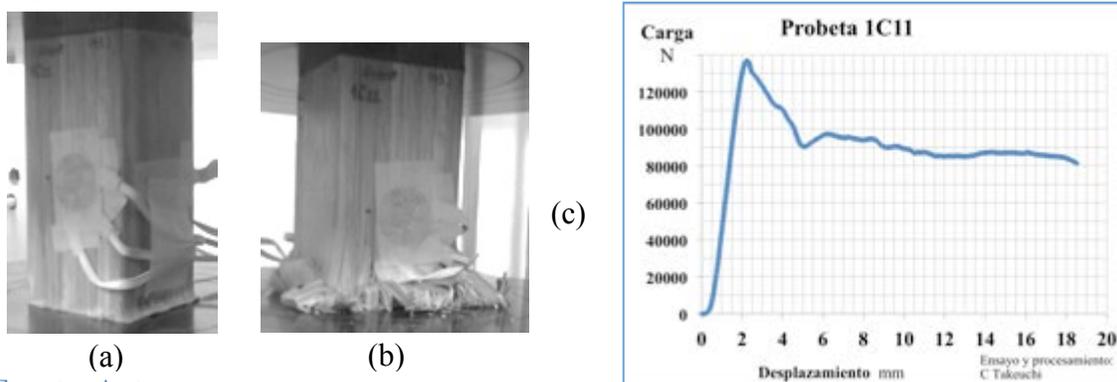
Probeta	$F_c$ MPa	$\sigma_{LP}$ MPa	Módulo de elasticidad		Relación Poisson		Relación Poisson		Densidad g/cm <sup>3</sup>	% Fibras
			$E_1$ MPa	Coef Correlación	$\nu_{21}$	Coef Correlación	$\nu_{31}$	Coef Correlación		
0C11	67,1	50,3	23296	0,9951	0,981	0,9892	0,814	0,9923	0,77	
1C11	68,0	51,0	30441	0,9994	0,832	0,9999	1,221	0,9857	0,85	42,8
2C11	71,2	53,4							0,78	39,6
3C11	69,8	52,4							0,83	42,1
4C11	67,2	50,4							0,80	39,3
5C11	63,1	47,3	36395	0,9990	0,621	0,9938	1,506	0,9947	0,82	44,8
7C11	69,8	52,4							0,87	47,5
8C11	54,8	41,1							0,80	44,2
9C11	58,2	43,6							0,74	45,3
10C11	67,5	50,7							0,83	43,3

Fuente: Autor

### 5.1.1.3 Observaciones durante los ensayos

En el momento en que las probetas alcanzan su carga máxima los haces de fibras externas empiezan a separarse. Después, el comportamiento de las probetas varía según la forma en que lo hacen. En el caso de algunas probetas, se aplasta la sección transversal en un extremo, dejando una sección reducida a medida que aumenta el desplazamiento del plato, la probeta sigue resistiendo carga con el área resistente que queda mientras el proceso de aplastamiento continúa. En la Figura 5.9 se observa el ensayo de la probeta 1C11 y su curva carga desplazamiento.

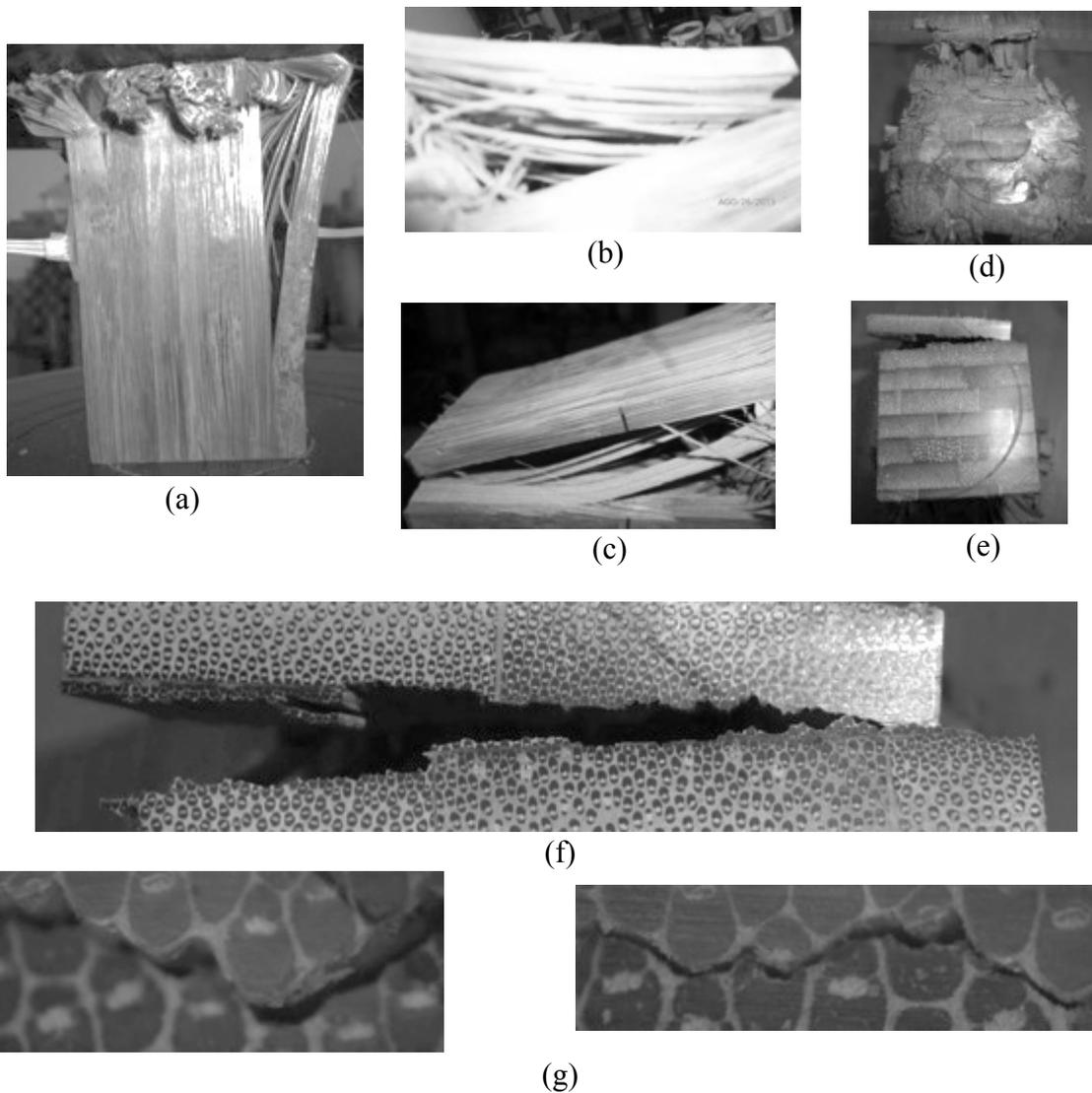
Figura 5.9. Ensayo probeta 1C11, (a) carga máxima, (b) estado final y (c) gráfico carga desplazamiento.



Fuente: Autor

El comportamiento de las probetas 4C11 y 7C11 es similar al de la probeta 1C11, hasta que se empieza a formar una fisura relativamente paralela al plano de unión entre dos tableros, empezándose a abrir la probeta. La falla corresponde al despegue entre láminas por la separación de las fibras, ya sea por la parte externa o interna de los haces vasculares, acompañada de la rotura de la parénquima. En pocas ocasiones, la fisura atraviesa haces de fibras. En la Figura 5.10 se observan fotos del estado final de la probeta 7C11 y acercamientos de la zona de falla en la cara inferior.

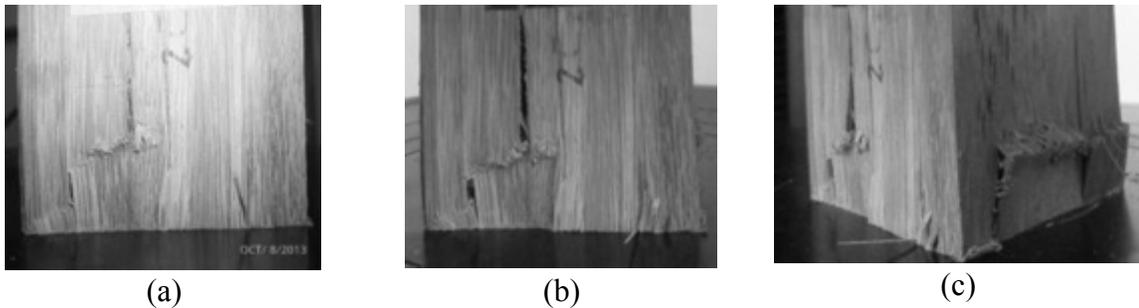
Figura 5.10. Estado final de la probeta 7C11, (a) vista frontal, (b) acercamiento de la superficie de falla hacia el lado exterior, (c) superficie de falla hacia el lado interior, (d) vista superior, (e) vista inferior, (f) acercamiento de la falla en la vista inferior, (g) y (h) acercamiento de haces vasculares y parénquima en la zona de falla.



Fuente: Autor

En las otras probetas, con excepción de la probeta 10C11, se alcanza la carga máxima cuando empieza a presentarse el pandeo de las fibras, pandeo que se incrementa, hasta que se separan algunos tramos de tableros, de manera similar a la descrita para las probetas 4C11 y 7C11. En la Figura 5.11 se observa el ensayo de la probeta 2C11.

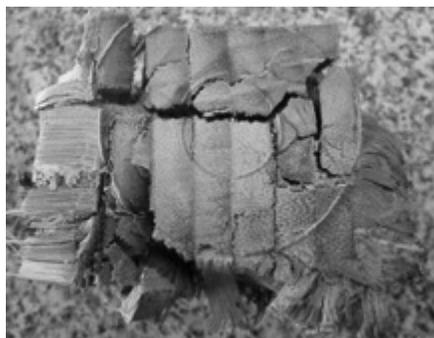
Figura 5.11. Ensayo probeta 2C11: (a) pandeo de fibras en cara frontal, (b) separación de tableros y (c) pandeo de fibras en cara lateral



Fuente: Autor

En la probeta 10C11, la carga máxima se presenta al pandear las fibras hacia la cara posterior, posteriormente se presenta también pandeo de las fibras hacia los lados hasta que también se presenta separación de los tableros. De todas las probetas C11 ensayadas es la única donde se presenta una fisura en sentido perpendicular al plano de unión de los tableros, Figura 5.12.

Figura 5.12. Falla de la probeta 10C11



Fuente: Autor

Las gráficas carga desplazamiento de los ensayos de las probetas 2C11 a 10C11, son similares a la gráfica de la probeta 1C11. En la sección H.1.1 del Anexo H se encuentran las gráficas carga desplazamiento para los ensayos de compresión paralelo a la fibra realizados a estas probetas.

## **5.1.2 Determinación de la densidad**

### **5.1.2.1 Descripción de los ensayos**

Para determinar la densidad de las probetas C11, antes de ser ensayadas, se pesaron las probetas C11 en una balanza digital con aproximación de 0.01g, para conocer su masa. El volumen se determinó con base en el promedio de las medidas de ancho, espesor y alto. Estos datos se encuentran en la Tabla H.1 del Anexo H.

### **5.1.2.2 Resultados**

En la Tabla 5.1 se encuentran los valores de densidad de cada una de las probetas C11. La densidad promedio de las láminas fue de  $0.81\text{g/cm}^3$ , con una desviación estándar de  $0.039\text{g/cm}^3$  y un coeficiente de variación del 0.045.

## **5.1.3 Determinación del porcentaje de fibras.**

Se determinó el porcentaje de fibras de cada una de las láminas que conforman el elemento 1C11 así como el porcentaje de fibras del área total de cada probeta C11.

### **5.1.3.1 Descripción de los ensayos**

El procedimiento general realizado para determinar el porcentaje de fibras en las láminas de la probeta 1C11 y de las probetas C11, fue similar al utilizado para determinar el porcentaje de fibras en las probetas de tensión en lámina. Consistió en: preparación de la superficie, captura de imágenes de la superficie pulida de la sección transversal de la probeta de ensayo, trazado y selección de un área rectangular modificada, conversión de la imagen del área modificada a escala de grises, segmentación entre haces de fibras y parénquima, vacíos y área de adhesivo, y medición de áreas.

La preparación de la superficie, se realizó mecánicamente, con una lijadora de banda con papeles abrasivos de diferente grano de finura.

La captura de imágenes se realizó con una cámara fotográfica de alta definición, de tal manera que con una sola toma, fuera posible tomar toda la sección. Se realizó de esta manera porque se observó que la reconstrucción con varias imágenes de la sección tomadas con la cámara instalada al microscopio, presentaba varios problemas, entre estos, el número de imágenes necesario y el difícil manejo de la luz para cada toma, aspectos que dificultaron la reconstrucción de las imágenes en una sola. Se mantuvo una misma distancia focal para las vistas superior o inferior de todas las probetas.

El procesamiento de imágenes se realizó con el software Image Pro. Con este programa se definió la sección rectangular modificada, donde no se tuvieron en cuenta los bordes de la sección transversal de la probeta. Se convirtió la imagen de la sección modificada a escala de grises y se realizó la segmentación con la cual se dio el contraste entre los haces de fibra y el resto del área de estudio. Se hicieron conteos de los haces de fibras y se calculó su área. Se determinó el área de la sección rectangular modificada. Se encontró el porcentaje de fibra como la relación entre el área de haces de fibras y área de la sección rectangular. En este caso, se trabajó con áreas en píxeles.

En la Figura 5.13 se observan las imágenes de la probeta 1C11. En la Figura 5.13(a) se encuentra la sección transversal de la probeta con la numeración de cada una de las láminas que la componen, en la Figura 5.13(b) el área modificada convertida a escala de grises, en la Figura 5.13(c) el área modificada segmentada y en la Figura 5.13(d) el área modificada segmentada para las primeras cinco láminas.

En la Figura 5.13(c) se observan los haces de fibras en color blanco que en las zonas de alta densidad de fibra, cercanas a la línea de adhesivo, parecen áreas continuas. En la Figura 5.13(d) es posible diferenciar las fibras en la zona densa de las láminas 2 y 4. La forma y distribución de los haces vasculares varía entre láminas y en una misma lámina como se observa en la Figura 5.13(d).

Las áreas oscuras pueden ser áreas de parénquima, de vasos conductores o de adhesivo. Aun cuando, en esta probeta, no es fácil detectar el adhesivo de las líneas de pega sí es posible observar el adhesivo que rellena los vacíos presentes por irregularidades en algunas láminas.

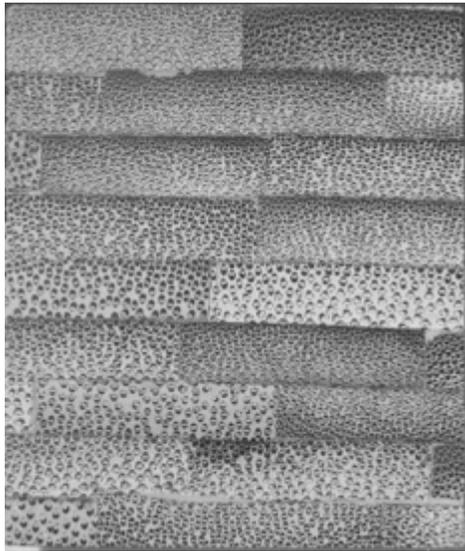
En el Anexo H, se encuentran las imágenes de la sección transversal y de áreas modificadas segmentadas para las probetas de compresión C11.

En algunas probetas, el espesor de la línea de pega entre láminas de algunos tableros se puede apreciar a diferencia del espesor de la línea de pega entre tableros, indicando menor presión al elaborar los tableros. En la Figura 5.14 se observa una parte de la sección transversal de la probeta 10C11.

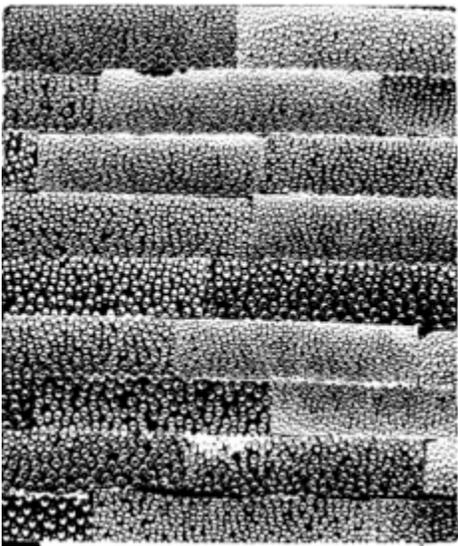
Figura 5.13. Imágenes de la probeta 1C11: (a) sección transversal, (b) imagen convertida a escala de grises y trazado del área rectangular, (c) segmentación del área rectangular y (d) segmentación de las cinco primeras láminas



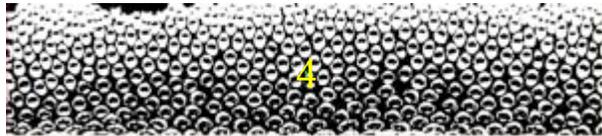
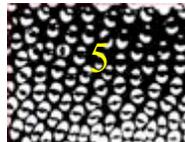
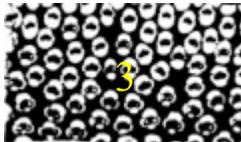
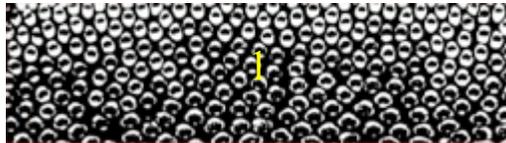
(a)



(b)



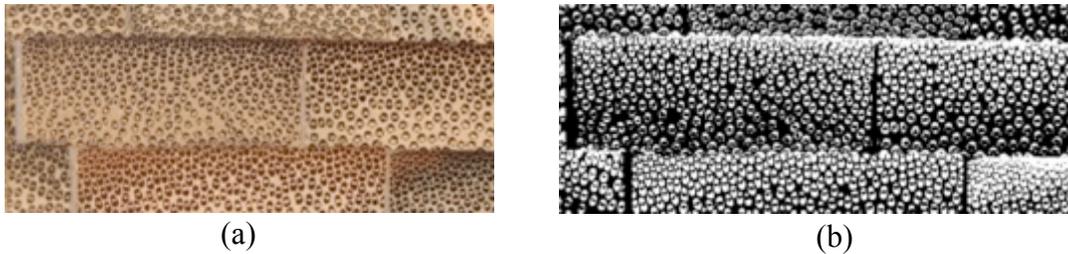
(c)



(d)

Fuente: Autor

Figura 5.14. Parte de la sección transversal de la probeta 10C11, (a) imagen capturada y (b) imagen segmentada



Fuente: Autor

### 5.1.3.2 Cálculos y resultados

El porcentaje de fibras,  $\% \text{fibras}$ , fue calculado con base en la Ecuación 5.3 donde  $A_f$  corresponde al área de fibras y  $A_m$  al área de la sección rectangular modificada.

$$\% \text{fibras} = \frac{A_f}{A_m} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

En la Tabla H.2 del Anexo H se encuentran los porcentajes de fibras de las láminas de la probeta C11. El valor promedio absoluto (sin tener en cuenta el área de cada lámina y el área total de la probeta) fue de 42.3%, con una desviación estándar de 12.2% y un coeficiente de variación del 0.29.

En la Tabla 5.1 se encuentran los porcentajes de fibras de las probetas C11. El promedio absoluto fue de 43.2%, con una desviación estándar de 2.7% y un coeficiente de variación del 0.06.

### 5.1.4 Análisis de resultados

La falla inicial de las probetas C11 ensayadas a compresión paralela a la fibra fue por aplastamiento en el apoyo. La dispersión en el tramo de carga de las curvas de esfuerzos vs  $\delta/L$  (relación entre el desplazamiento del plato de carga y la longitud inicial de la probeta) de las probetas C11 es baja.

Los diagramas de esfuerzo deformación, de las probetas 1C11, 5C11 y 0C11 son bastante similares. Se observa un primer tramo lineal elástico seguido de un comportamiento inelástico hasta alcanzar el esfuerzo máximo. Una vez se alcanza la carga máxima, se presenta una pérdida inicial de resistencia, después de esto la probeta mantiene la carga mientras aumenta el acortamiento. La pérdida de resistencia es gradual. Estos diagramas fueron elaborados con base en la lectura de deformímetros eléctricos localizados en la parte media de las tres probetas mencionadas.

El valor promedio de resistencia a compresión paralela a la fibra para las probetas de BGLPP fue de 65.7MPa, valor similar al encontrado para las láminas ensayadas a compresión el cual fue de 69.2MPa. El coeficiente de variación de la resistencia a compresión en las probetas del material compuesto BGLPP fue de 0.08 mientras que en los ensayos de láminas fue de 0.14.

Los resultados de resistencia a compresión paralela a la fibra son comparables con otros encontrados en ensayos de probetas de diferente altura y sección transversal similar.

Correal y colaboradores (Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014) reportan un valor promedio de resistencia a compresión paralela a la fibra de 62MPa de 20 ensayos de probetas elaborados con un 50% de úrea formaldehído y 50% de melanina formaldehído.

En ensayos de probetas de sección cuadrada de 50mm de lado y altura de 200mm de bambú guadua laminado se encontraron los siguientes resultados: Cortés y colaboradores (Cortés, Lozano, Rusinque, & Takeuchi, 2010) encontraron valores de resistencia de 41.9MPa, 42.4MPa, 50.5MPa y 37.5MPa en probetas elaboradas con úrea melanina formaldehído, fenol resorcinol, Polivinil Acetato (PVA) y cola de origen animal respectivamente.

López (López, 2008) en su investigación ensayó 33 probetas elaboradas con Polivinil Acetato (PVA) y encontró un valor promedio de 47.6MPa con un coeficiente de variación de 0.054. Barreto (Barreto, 2003) ensayó 11 probetas elaboradas con úrea formaldehído (Pol 216) y encontró un valor de promedio del 47.1MPa, con un valor máximo de 70.4MPa y un valor mínimo de 17.9MPa y un coeficiente de variación de 0.36. También ensayó 20 probetas elaborados con Policloropreno vulcanizado con polisicianato (PC3000), y encontró un valor promedio de 46.5MPa, con un valor máximo de 52.2MPa y un valor mínimo de 40.0MPa con un coeficiente de variación de 0.36. Se observó pandeo de láminas y delaminación.

En los ensayos preliminares realizados en probetas de sección cuadrada de 50mm de lado y altura de 150mm de bambú guadua laminado se encontró un valor promedio de 43.2MPa con un coeficiente de variación de 0.07. En todos estos preensayos, la falla fue por aplastamiento.

Li y colaboradores (Li, Zhang, Huang, & Deeks, 2013), en ensayos realizados en probetas de Bambú Mosso (*Phyllostachys pubescens*) de 100mm x 100mm x 300mm y elaborados con fenol, encontraron valores promedio de 57.9MPa, 61.2MPa y 62.7 MPa de probetas elaboradas con bambú de la parte baja, media y alta respectivamente. De cada grupo se ensayaron 8 probetas. Los coeficientes de variación fueron 0.03, 0.08 y 0.11 por cada grupo.

Yeh & Lin (Yeh & Lin, 2011), mencionan los ensayos de compresión en probetas de bambú laminado pegada de sección cuadrada de 30mm de lado elaboradas con fenol formaldehído y dos tipos de bambú, *Dendrocalamus latiflorus* y *Phyllostachys pubescens* de la parte baja, media y alta. De cada grupo se ensayaron 12 probetas para un total de 360 probetas. En esta investigación se encontraron valores promedio de 54.2MPa, 66.1MPa y 69.6 MPa de probetas elaboradas con material de la parte baja, media y alta del bambú *Phyllostachys* respectivamente y 42.5MPa, 56.4MPa y 58.4 MPa de probetas elaboradas con material proveniente de la parte baja, media y alta del bambú *Dendrocalamus*.

El valor promedio del módulo de elasticidad longitudinal a compresión fue de 30044MPa con un coeficiente de variación de 0.22. Valor mayor al promedio obtenido en el ensayo de láminas el cual fue de 19559MPa. Correal y colaboradores (Correal et al., 2014) reportan un valor promedio de 32271MPa de los 20 ensayos de probetas mencionados. López (López, 2008) del ensayo de 31 probetas elaboradas con Polivinil Acetato (PVA) encontró un valor promedio de 19137MPa con un coeficiente de variación de 0.085. La deformación unitaria utilizada en ambos estudios se basó en la lectura de extensómetros colocados a la probeta en el momento del ensayo.

Los valores promedio de los coeficientes de Poisson  $\nu_{21}$  y  $\nu_{31}$ , obtenidos fueron de 0.81 y 1.18 con coeficientes de variación de 0.22 y 0.29. Para todas las regresiones lineales el coeficiente de correlación fue mayor de 0.9. En láminas se había encontrado una relación de Poisson  $\nu_{21}$  de 0.51. En materiales ortotrópicos como éste se pueden obtener relaciones de Poisson superiores a 0.5, debido a la diferencia sustancial entre el módulo de elasticidad longitudinal y transversal (Sección 2.4.2 del presente trabajo).

La densidad promedio de las probetas de BGLPP aumentó con respecto a la del muestreo de láminas utilizadas para la fabricación y el coeficiente de variación disminuyó. La densidad promedio de las probetas de BGLPP fue de 0,84g/cm<sup>3</sup>, con un coeficiente de variación del 0.045. Del muestreo de láminas utilizadas para la fabricación de bloques de bambú guadua laminada se encontró una densidad promedio de 0.76/cm<sup>3</sup> y un coeficiente de variación de 0.09.

Se observa en las imágenes de las secciones transversales un mayor espesor de la capa de adhesivo en la unión entre láminas que en la unión entre tableros. Esto ocurre especialmente en las probetas con láminas de mayor espesor. La unión entre láminas se hizo con la prensa manual y la unión entre tableros con la prensa hidráulica. Cuando se realizó el prensado de las láminas, no se aplicó presión adicional después de transcurrido un tiempo, debido a que no fue posible verificar la pérdida de presión en la prensa de mesa.

El promedio absoluto de porcentaje de área de fibras encontrado en las láminas de la probeta 1C11 fue de 42.3%, con un coeficiente de variación del 0.29. El valor promedio de porcentaje de área de fibras encontrado en las probetas C11 de BGLPP fue de 43.2%, con un coeficiente de variación del 0.06. En las probetas de láminas a tensión se había

encontrado un valor promedio de porcentaje de área de fibras de 43.0%, con un coeficiente de variación del 0.23. Se observa un valor bajo de coeficiente de variación en el material compuesto BGLPP en comparación con el encontrado para las láminas.

## 5.2 COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PERPENDICULAR AL PLANO DE LOS TABLEROS

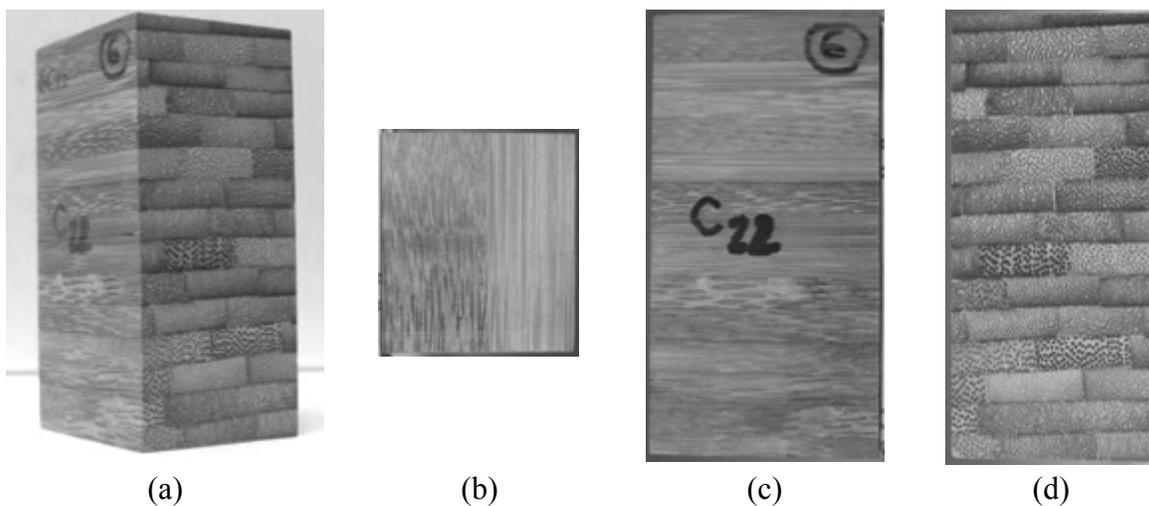
Para poder estudiar el comportamiento a compresión perpendicular a la fibra y encontrar las constantes elásticas se realizaron ensayos donde la sollicitación de compresión fuera uniforme con probetas de relación alto/ancho de dos de manera similar a la norma UNE (AEN/CTN 56 Madera y corcho, 2004) sólo que de sección cuadrada. En la presente sección se describe el ensayo de compresión perpendicular a la fibra con la carga aplicada perpendicularmente al plano de los tableros y en la Sección 5.3 se describe el ensayo de compresión perpendicular a la fibra con esfuerzo paralelo al plano de los tableros.

### 5.2.1 Ensayo de compresión perpendicular a la fibra perpendicular al plano de tableros

#### 5.2.1.1 Descripción de los ensayos

Se realizaron 10 ensayos en probetas de BGLPP de compresión perpendicular a la fibra perpendicular al plano de unión entre tableros, como las que se aprecia en la Figura 5.15. Cada una de las probetas fue marcada con un número que corresponde al bloque de donde fueron obtenidos, seguido del tipo de probeta, que en este caso corresponde a C22.

Figura 5.15 Vistas de la Probeta 6C22: (a) general, (b) superior, (c) lateral derecho y (d) posterior

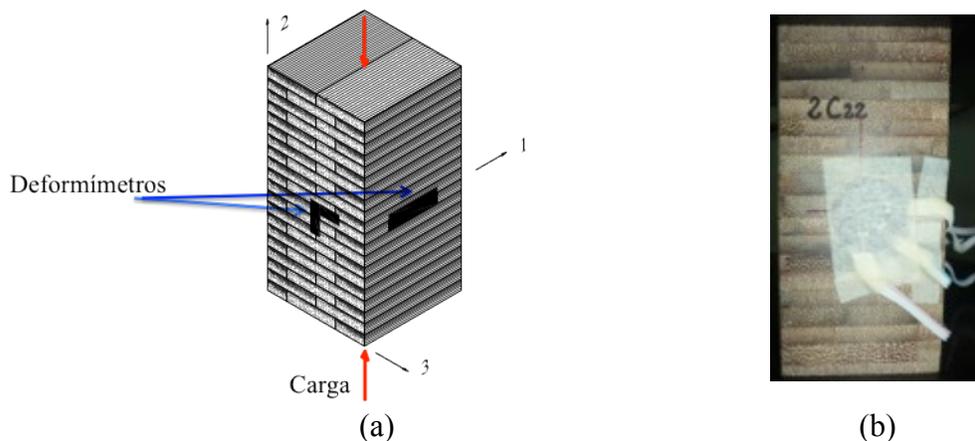


Fuente: Autor

En el Anexo H se encuentran para cada probeta las vistas de sus caras. Las vistas superior e inferior corresponden al plano 2 (perpendicular al eje 2), las vistas frontal y posterior corresponden al plano 1 y las vistas laterales al plano 3 (Figura 5.16.a). Para cada probeta, en cada cara vertical, se tomaron dos medidas del alto y tres medidas de ancho o espesor y en cada cara horizontal se tomaron dos medidas de ancho y espesor. Con base en el promedio de estas medidas, se calculó el volumen de cada probeta y el área resistente a compresión. En la Tabla H.3 del Anexo H se encuentran estas medidas.

Los ensayos fueron realizados en una máquina universal de ensayos a una velocidad de 0.05mm/s (0.3mm/min). Las probetas se colocaron directamente en los platos de carga. Para determinar el módulo de elasticidad transversal y las relaciones de Poisson además de la resistencia a compresión perpendicular a la fibra, se colocó un deformímetro tridireccional en la cara frontal a las probetas 2C22, 4C22 y 9C22 para medir la deformación vertical en dirección 2 y horizontal en dirección 3 y un deformímetro unidireccional en una de sus caras laterales para medir la deformación horizontal en dirección 1. En la Figura 5.16 se observa el ensayo de las probetas 2C22 y 5C22.

Figura 5.16. Ensayo de las probetas C22 (a) Esquema (b) probeta 2C22



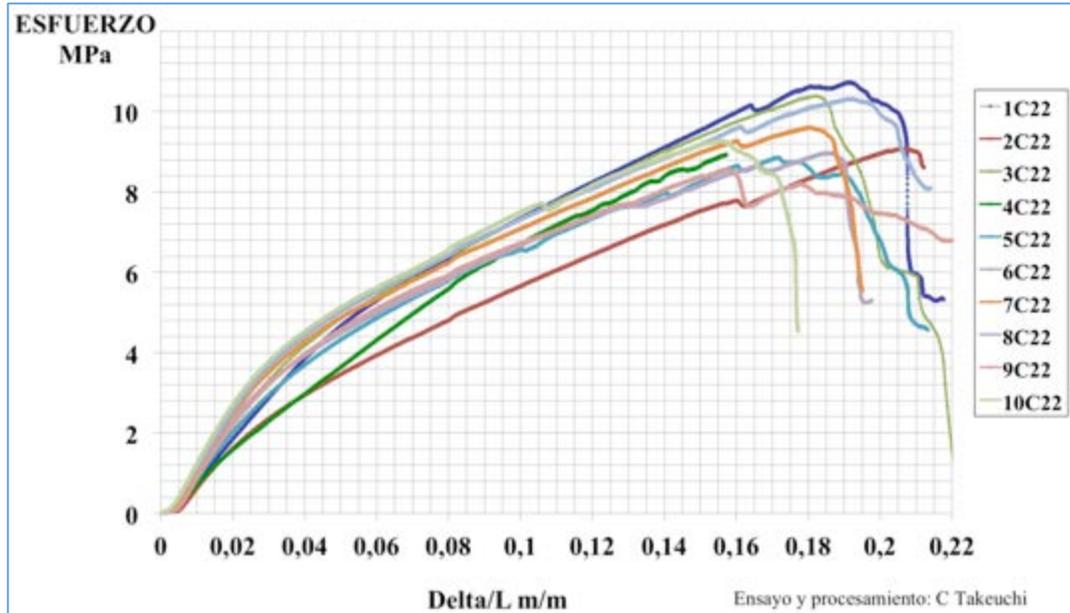
Fuente: Autor

### 5.2.1.2 Cálculos y resultados

Se calculó el esfuerzo de compresión aplicado como la relación entre la fuerza aplicada,  $P$ , y el área transversal,  $A$ , de la probeta de acuerdo con la Ecuación 5.1. El esfuerzo último a compresión se calculó como la relación entre la carga máxima,  $P_{max}$ , y el área transversal de la probeta,  $A$ , con base en la Ecuación 5.2.

Con base en los esfuerzos y las relaciones entre el desplazamiento del plato de carga y la longitud inicial de la probeta ( $\delta/L$ ) se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 5.17. Como se puede observar la dispersión entre las curvas es baja.

Figura 5.17. Esfuerzo normal vs  $\delta/L$  probetas a compresión C22



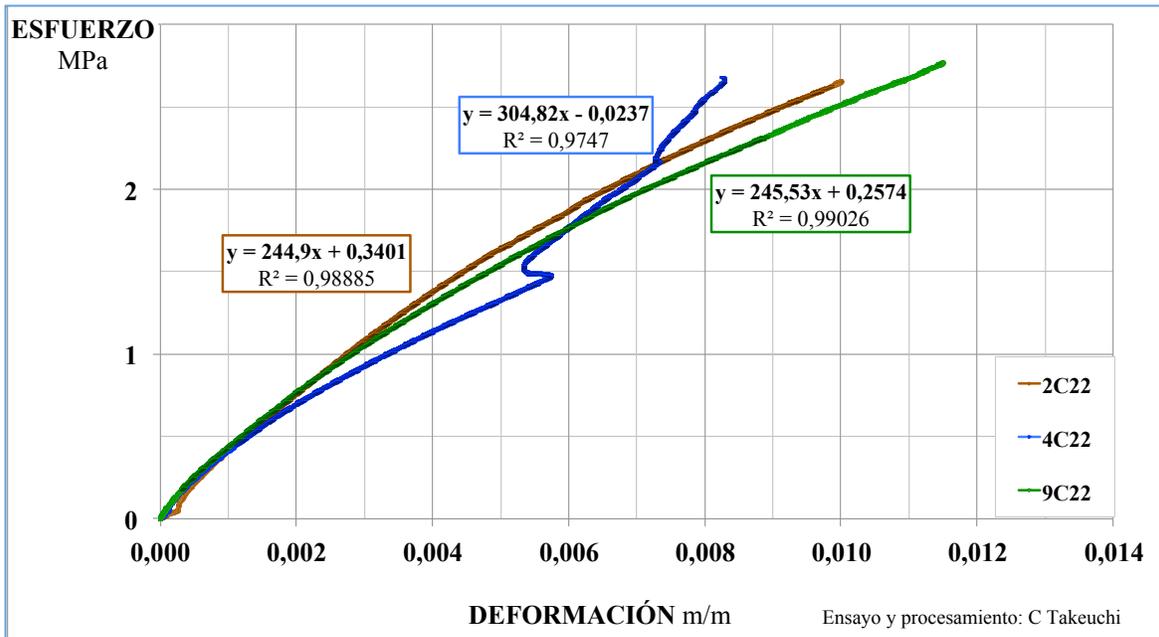
Fuente: Autor

En la Figura H.7 del Anexo H se encuentran los diagramas esfuerzo deformación de las probetas 2C22, 4C22 y 9C22. Se observan en las curvas un primer tramo relativamente lineal seguido de un segundo tramo irregular, hasta alcanzar el esfuerzo máximo.

Se determinó el módulo de elasticidad transversal,  $E_2$ , de las probetas 2C22, 4C22 y 9C22 con base en la lectura de la deformación en la dirección 2,  $\epsilon_2$ , de la roseta de deformaciones. Se calculó, como la pendiente de la regresión lineal de los puntos comprendidos en el rango de esfuerzos entre el 5% y el 30% del esfuerzo máximo de la curva esfuerzo deformación.

En la Figura 5.18 se observa el tramo elástico y la ecuación de regresión lineal y el coeficiente de determinación que corresponde a cada curva.

Figura 5.18. Rango elástico curvas esfuerzo vs deformación probetas 2C22, 4C22 y 9C22



Fuente: Autor

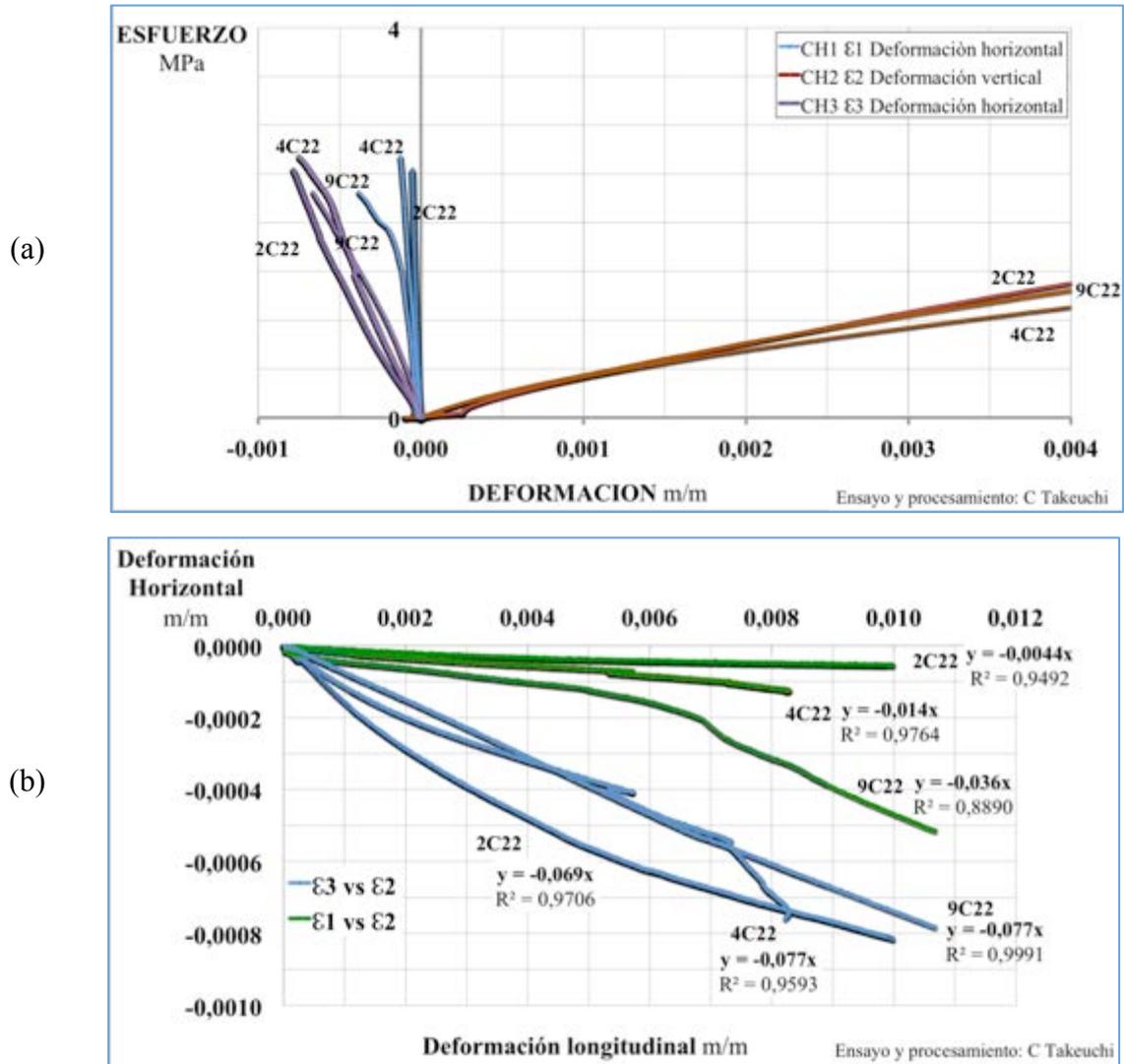
Adicionalmente se elaboraron los diagramas de esfuerzo deformación para las direcciones vertical (dirección 2) y horizontal (dirección 1 y 3).

También se obtuvieron las curvas de deformación horizontal en función de la deformación vertical, para las probetas 2C22, 4C22 y 9C22 y se calcularon los coeficientes de Poisson,  $\nu_{32}$  y  $\nu_{12}$ , como el valor negativo de la pendiente de los puntos en el rango de valores entre el 5% al 30% del esfuerzo máximo. En la Figura 5.19 se observan estos gráficos para las probetas 2C22, 4C22 y 9C22 y en el anexo H las lecturas y cálculos correspondientes a cada ensayo.

En la Tabla 5.2 se encuentran los valores de resistencia y de esfuerzo en el límite de proporcionalidad sin incluir los valores que corresponden a la probeta 4C22, porque el ensayo fue interrumpido antes de alcanzar la carga máxima.

Para las probetas 2C22, 4C22 y 9C22, instrumentadas con deformímetros eléctricos, se incluyen en la Tabla 5.2 los valores del módulo de elasticidad transversal en dirección 2,  $E_2$ , y los coeficientes de Poisson,  $\nu_{32}$  y  $\nu_{12}$ , con los coeficientes de correlación correspondientes para cada caso.

Figura 5.19. Probetas C22 (a) Esfuerzo deformación vertical y horizontal y (b) deformación horizontal en función de deformación vertical.



Fuente: Autor

El valor promedio de la resistencia a compresión perpendicular a la fibra en dirección 2 es de 9.3MPa con una desviación estándar de 0.8MPa y un coeficiente de variación de 0.08, el valor promedio del módulo de elasticidad transversal en dirección 2 fue de 265MPa con una desviación estándar de 34MPa y un coeficiente de variación de 0.13.

Los valores promedio de los coeficientes de Poisson,  $\nu_{32}$  y  $\nu_{12}$ , obtenidos fueron de 0.074 y 0.018 con desviaciones estándar de 0.005 y 0.016 y coeficientes de variación de 0.06 y 0.89. Para todas las regresiones lineales el coeficiente de correlación fue mayor de 0.9.

Se calculó el esfuerzo en el límite de proporcionalidad como el valor que corresponde al 30% del esfuerzo máximo. El valor promedio de esfuerzo en el límite de proporcionalidad fue de 3.2MPa.

Tabla 5.2. Resistencia, esfuerzo en el límite de proporcionalidad, Módulo de elasticidad  $E_2$  y relaciones de Poisson.

Probeta	$F_c$ MPa	$\sigma_{LP}$ MPa	Módulo de elasticidad		Relación Poisson		Relación Poisson		Densidad g/cm <sup>3</sup>
			$E_2$ MPa	Coef Correlación	$\nu_{32}$	Coef Correlación	$\nu_{12}$	Coef Correlación	
1C22	10,73	3,22							0,84
2C22	9,09	2,73	245	0,9944	0,069	0,9852	0,004	0,9743	0,77
3C22	8,51	2,55							0,68
4C22	8,93*	2,68*	305	0,9873	0,077	0,9794	0,014	0,9881	0,84
5C22	8,85	2,65							0,84
6C22	8,97	2,69							0,78
7C22	9,60	2,88							0,81
8C22	10,31	3,09							0,84
9C22	8,56	2,57	246	0,9951	0,077	0,9995	0,036	0,9429	0,78
10C22	9,27	2,78							0,78

El asterisco\* indica los resultados excluidos del promedio

Fuente: Autor

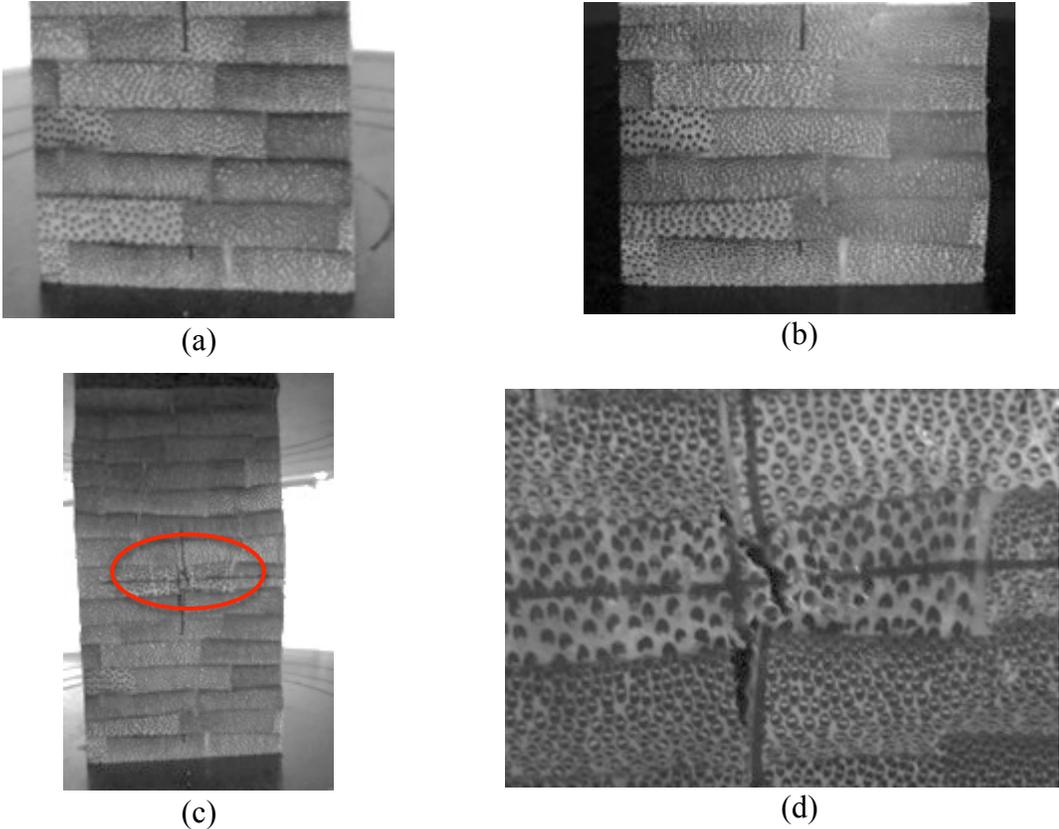
### 5.2.1.3 Observaciones durante los ensayos

En general el comportamiento de todas las probetas C22 fue similar. En la Figura 5.20 se observa el ensayo de la probeta 7C22. Inicialmente tiene un comportamiento elástico, en este momento no se observan deformaciones ni fisuras en las probetas, Figura 5.20(a).

Posteriormente, la curva de carga desplazamiento cambia de pendiente mostrando un comportamiento ligeramente inelástico, se observa acomodación de las fibras, que en este caso están dispuestas horizontalmente, de tal modo que en algunos sectores se densifican más y el espesor varía en los tableros, por lo que sus caras dejan de ser paralelas como se observa en la Figura 5.20(b). Debido a esto, las probetas se empiezan a deformar lateralmente de forma que los caras laterales dejan de ser planas aún cuando las caras frontales permanecen planas; en algunas probetas, parte de ellas fallan localmente por estas deformaciones laterales como se observa en el ensayo de la probeta 2C22 (Figura 5.21). Cuando ocurre esto, se observa una ligera disminución de carga y después se sigue cargando la probeta.

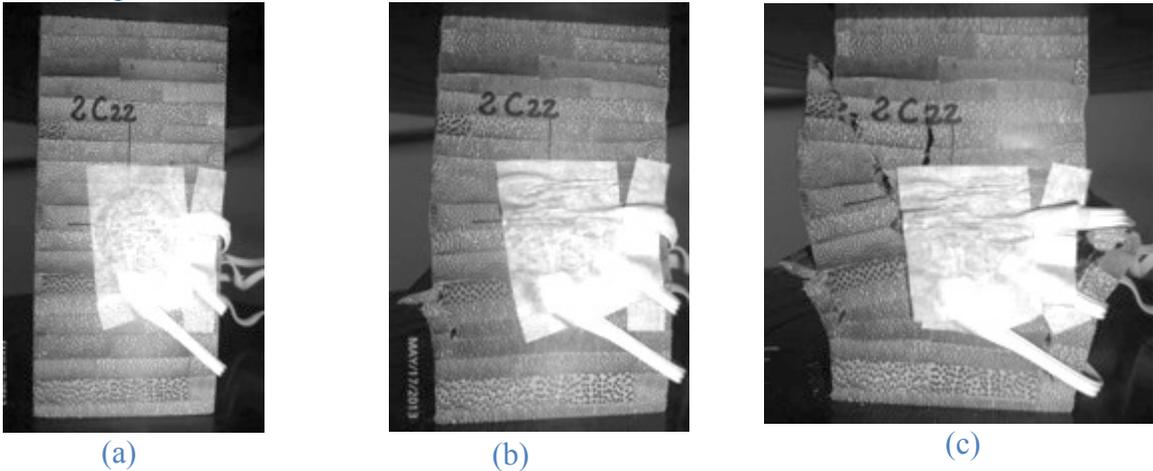
Cuando se alcanza la carga máxima, la probeta falla por la presencia de fisuras diagonales (Figura 5.21(c)). Se observa una pérdida rápida de la carga. En la Figura H.5 del Anexo H se observa el estado final de las probetas C22.

Figura 5.20. Ensayo probeta 7C22, (a) primera etapa, (b) segunda etapa, (c) primera fisura y (d) acercamiento de la primera fisura



Fuente: Autor

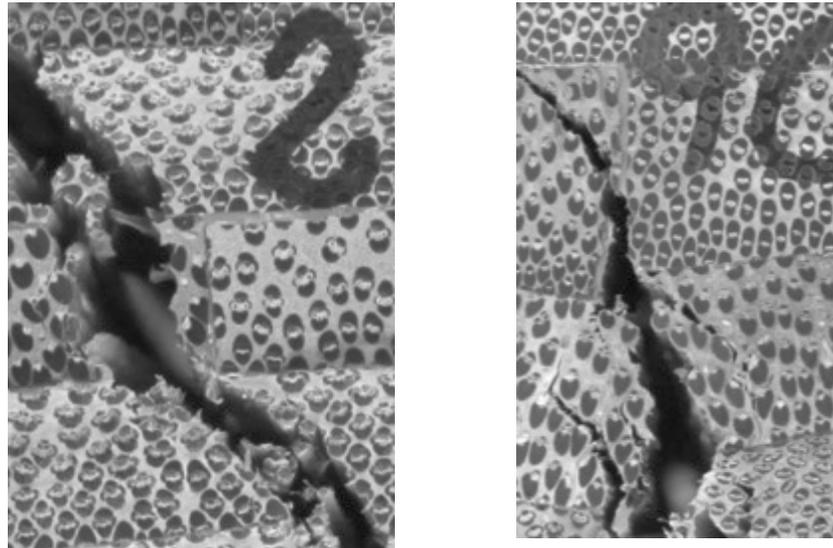
Figura 5.21. Ensayo probeta 2C22, (a) primera etapa, (b) segunda etapa con falla local (c) falla de la probeta



Fuente: Autor

En los ensayos, no falló la unión adhesivo lámina. En general, las fisuras no atraviesan los haces de fibra sino se presentan en la unión entre las fibras y la parénquima acompañado de rotura de la parénquima. En la Figura 5.22 se observan acercamientos de las fisuras en las probetas 2C22 y 9C22.

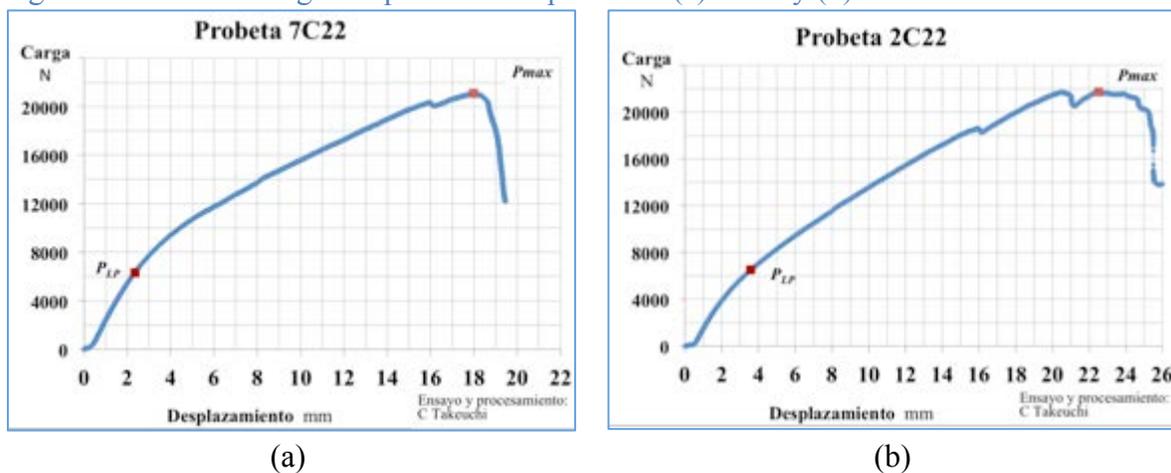
Figura 5.22. Acercamiento de fisuras probetas 2C22 y 9C22



Fuente: Autor

En la Figura 5.23 se observan las gráficas carga desplazamiento para las probetas 7C22 y 2C22. Los cambios de pendiente en el tramo de carga se presentan en su mayoría para valores cercanos al 30% de la carga máxima. En las gráficas se indica el valor de la carga máxima,  $P_{max}$ , y el valor de la carga en el límite de proporcionalidad,  $P_{LP}$ , el cual se adoptó como el 30% del valor de carga máxima.

Figura 5.23. Curva Carga Desplazamiento probetas: (a) 7C22 y (b) 2C22



Fuente: Autor

Las gráficas carga desplazamiento de los ensayos de las probetas C22 restantes son similares, con excepción de la que corresponde al ensayo de la probeta 4C22, por haber sido interrumpido antes de alcanzar la carga máxima. En la sección H.2.1 del Anexo H se encuentran las lecturas de carga desplazamiento y las gráficas carga desplazamiento para los ensayos de compresión realizados a estas probetas.

## **5.2.2 Determinación de la densidad**

### **5.2.2.1 Descripción de los ensayos**

Para determinar la densidad de las probetas C22 antes de ser ensayadas, se determinó su masa con una balanza digital con aproximación de 0.01g. El volumen se calculó con base en el promedio de las medidas de ancho, espesor y alto. Estos datos se encuentran en la Tabla H.3 del Anexo H que se encuentra en la sección H.2.1.

### **5.2.2.2 Resultados**

Los valores de densidad de las probetas C22 se encuentran en la Tabla 5.2. La densidad promedio fue de  $0.80\text{g/cm}^3$ , con una desviación estándar de  $0.051\text{g/cm}^3$  y un coeficiente de variación del 0.064.

## **5.2.3 Análisis de resultados**

Antes de la falla se presentan deformaciones laterales locales por acomodación de las fibras horizontales en la matriz de parénquima. Se observa una falla frágil por la aparición de fisuras diagonales en la parénquima.

Se observa un primer tramo lineal elástico en la curva esfuerzo deformación hasta alcanzar un valor del 30% del esfuerzo máximo donde se presenta un cambio de pendiente. Cuando se alcanza la carga máxima la probeta falla de forma frágil.

Los diagramas de esfuerzo deformación, de las probetas 2C22 y 9C22 son bastante similares. Al comienzo tiene un comportamiento elástico. Después se observa un cambio de pendiente con cambios de deformación hasta alcanzar el esfuerzo máximo. Estos diagramas fueron elaborados con base en la lectura de deformímetros eléctricos localizados en la superficie de la parte media de las probetas.

El valor promedio de la resistencia a compresión perpendicular a las fibras perpendicular al plano de los tableros es de 9.3MPa, apenas un 14% del valor de la resistencia a compresión paralela a las fibras.

El valor promedio del módulo de elasticidad perpendicular a las fibras perpendicular al plano de los tableros a compresión fue de 265MPa lo cual es aproximadamente 1/100 del valor promedio de módulo de elasticidad paralelo a las fibras, encontrado en el presente estudio.

Los valores promedio de los coeficientes de Poisson,  $\nu_{32}$  y  $\nu_{12}$ , fueron de 0.074 y 0.018. El valor promedio de coeficiente de Poisson,  $\nu_{21}$  fue de 0.81. Considerando la relación que existe entre los módulos de elasticidad  $E_2$  y  $E_1$ , no es de extrañar el valor del coeficiente de Poisson  $\nu_{21}$  (Sección 2.4.2).

La densidad promedio de las probetas C22 de BGLPP fue de 0.80g/cm<sup>3</sup>, con una desviación estándar de 0,051g/cm<sup>3</sup> y un coeficiente de variación del 0.064. Valor muy similar al encontrado para las probetas C11, el cual fue de 0,83g/cm<sup>3</sup>.

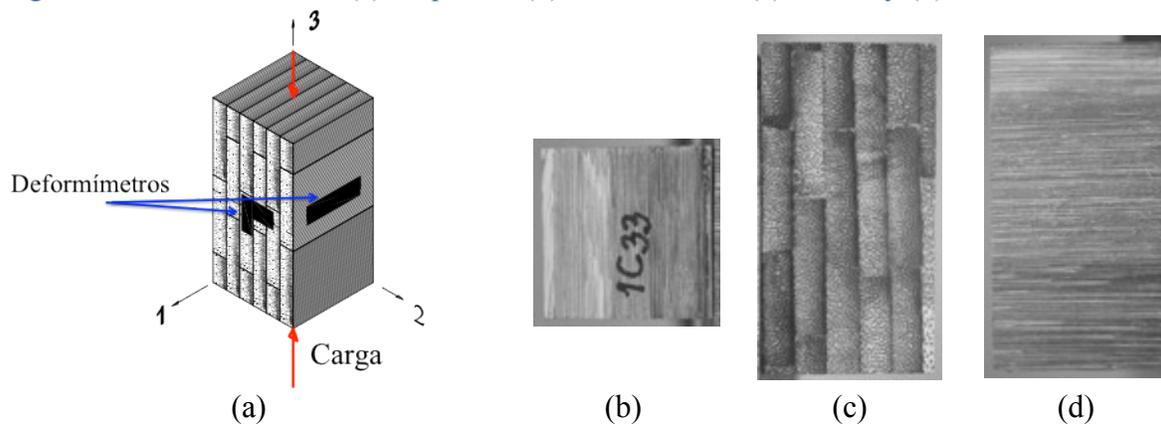
### 5.3 COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PARALELO AL PLANO DE LOS TABLEROS

#### 5.3.1 Ensayo de compresión perpendicular a la fibra paralelo al plano de tableros

##### 5.3.1.1 Descripción de los ensayos

Se realizaron 10 ensayos de compresión perpendicular a la fibra paralelo al plano de unión entre tableros. Las probetas fueron marcadas con un número que corresponde al bloque de donde fueron obtenidos seguido del tipo de probeta, que en este caso corresponde a C33. Los ensayos fueron realizados en una máquina universal de ensayos a una velocidad de 0.05mm/s (0.3mm/min). Las probetas se colocaron directamente en los platos de carga.

Figura 5.24 Probeta 1C33: (a) Esquema, (b) vista inferior, (c) frontal y (d) lateral derecho



Fuente: Autor

Para determinar el módulo de elasticidad transversal y las relaciones de Poisson además de la resistencia a compresión perpendicular a la fibra, se colocó un deformímetro tridireccional en la cara frontal a las probetas 1C33, 5C33 y 9C33 para medir la deformación vertical en dirección 3 y horizontal en dirección 2 y un deformímetro unidireccional en una de sus caras laterales para medir la deformación horizontal en dirección 1. En la Figura 5.24 se observa un esquema y las vistas inferior, frontal y lateral derecha de la probeta 1C33. En el Anexo H se encuentran para cada probeta las vistas de sus caras. Las vistas superior e inferior corresponden al plano 3 (perpendicular al eje 3), las vistas frontal y posterior corresponden al plano 1 y las vistas laterales al plano 2.

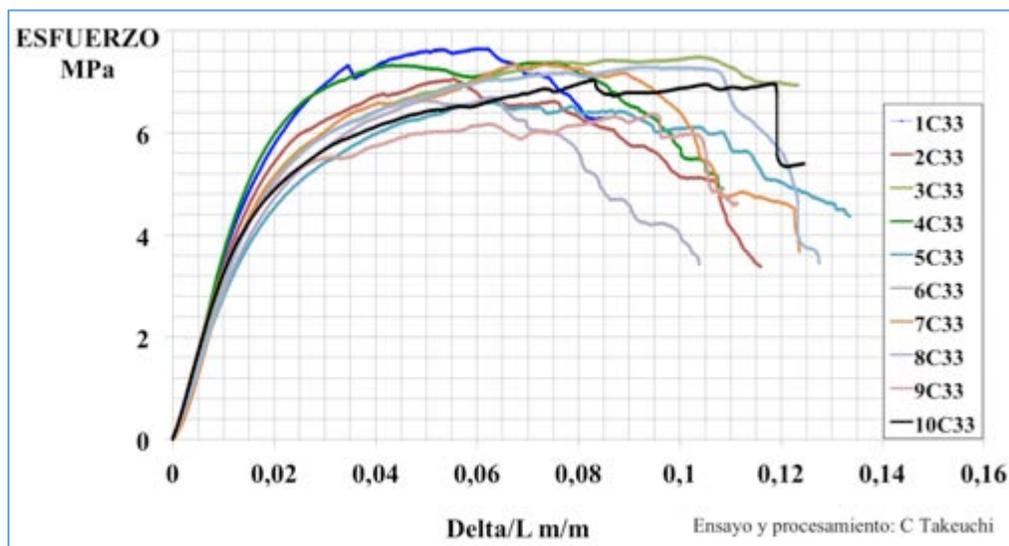
En este tipo de probetas, por sus dimensiones, se tomaron únicamente dos medidas de alto (en la parte frontal y en la parte posterior) y tres medidas de ancho o espesor (en la parte inferior, media y superior). Con base en el promedio de estas medidas, se calculó el volumen de cada probeta y el área resistente a compresión. En la Tabla H.4 del Anexo H se encuentran estas medidas.

### 5.3.1.2 Cálculos y resultados

Se calculó el esfuerzo de compresión aplicado como la relación entre la fuerza aplicada,  $P$ , y el área transversal de la probeta,  $A$ , de acuerdo con la Ecuación 5.1. Para el cálculo de la resistencia a compresión se utilizó el valor de la carga máxima,  $P_{max}$ , Ecuación 5.2.

Con base en los esfuerzos normales y las relaciones entre el desplazamiento del plato de carga y la longitud inicial de la probeta ( $\delta/L$ ) se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 5.25. Como se puede observar la dispersión entre las curvas es baja.

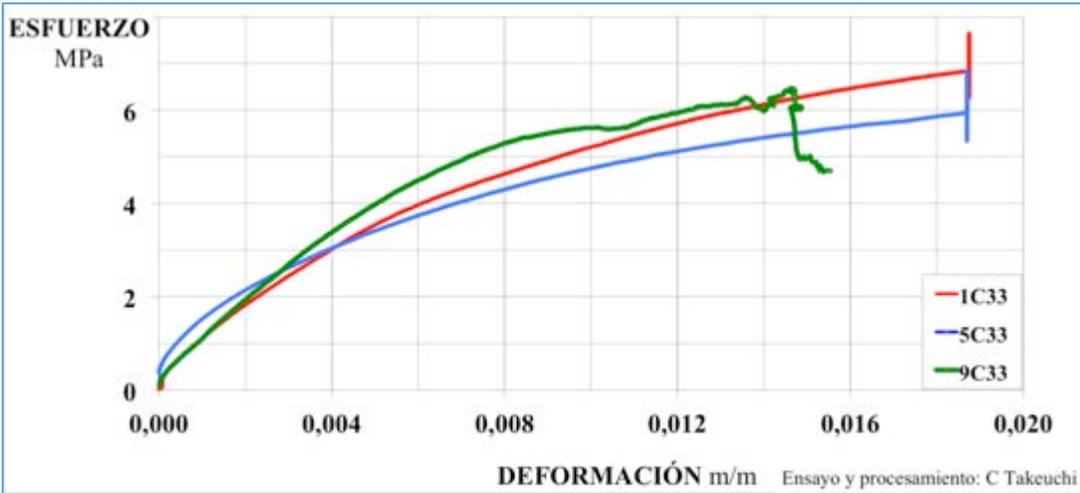
Figura 5.25. Esfuerzo normal vs  $\delta/L$  probetas a compresión C33



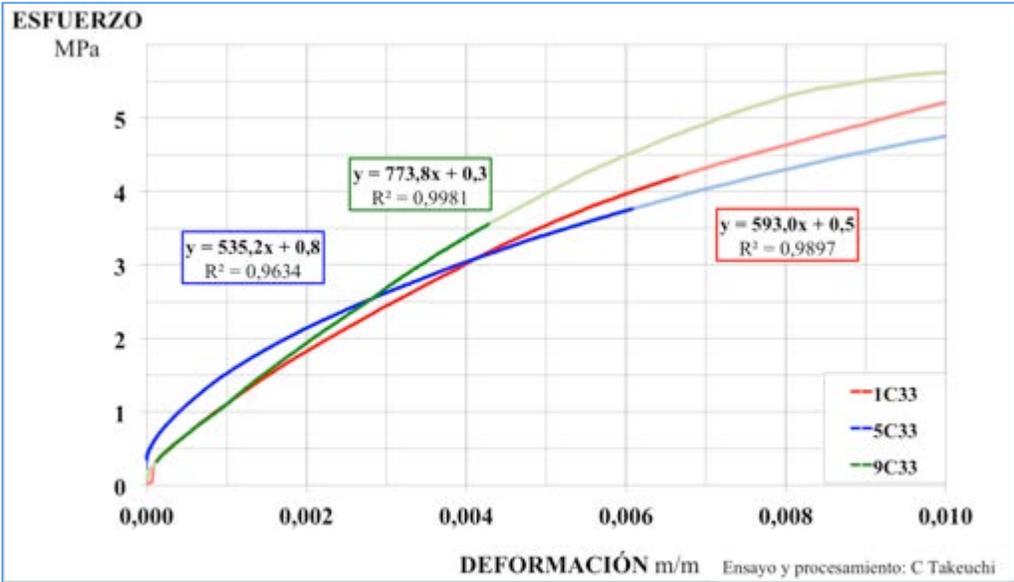
Fuente: Autor

En la Figura 5.26(a) se observa el diagrama de esfuerzo vertical en función de la deformación vertical en la dirección 3,  $\epsilon_3$ , de las probetas 1C33, 5C33 y 9C33 desde el inicio de la prueba hasta alcanzar el esfuerzo máximo. Sin embargo, en las probetas 1C33 y 5C33, antes de alcanzar el esfuerzo máximo, se llegó a la deformación máxima programada, por lo cual la deformación se mantuvo constante a partir de ese punto. En la probeta 9C33, se llegó a la deformación correspondiente al esfuerzo máximo y su posterior descarga.

Figura 5.26. Gráficas esfuerzo vs deformación  $\epsilon_3$  probetas 1C33, 5C33 y 9C33: (a) hasta la falla y (b) en el rango elástico



(a)



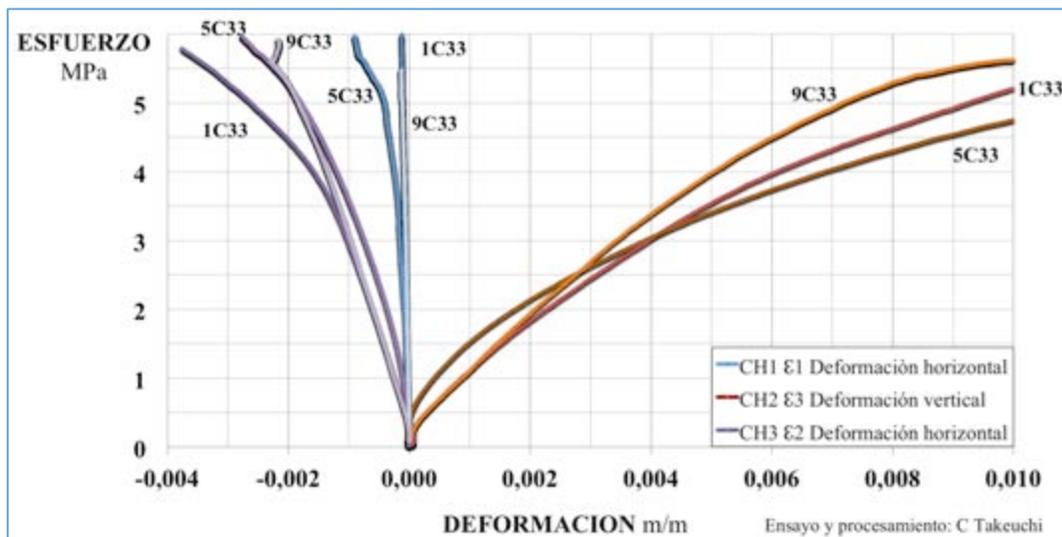
(b)

Fuente: Autor

Se calculó el módulo de elasticidad transversal,  $E_3$ , de las probetas 1C33, 5C33 y 9C33 como la pendiente de la regresión lineal de los puntos de la curva esfuerzo deformación entre un rango de esfuerzos entre el 5% y el 55% del esfuerzo máximo. En la Figura 5.26(b) se observa el tramo elástico considerado para la determinación del módulo de elasticidad el cual se encuentra resaltado en cada curva. Se encuentra también la ecuación de regresión lineal y su correspondiente coeficiente de determinación enmarcados con el color que corresponde a cada curva.

Adicionalmente se elaboraron los diagramas de esfuerzo deformación para las direcciones vertical en la dirección 3 y horizontales en las direcciones 1 y 2 y las curvas de deformación horizontal en función de la deformación vertical, para las tres probetas anteriormente mencionadas como se observa en la Figura 5.27.

Figura 5.27. Gráfica Esfuerzo vs deformación vertical, horizontal probetas C33

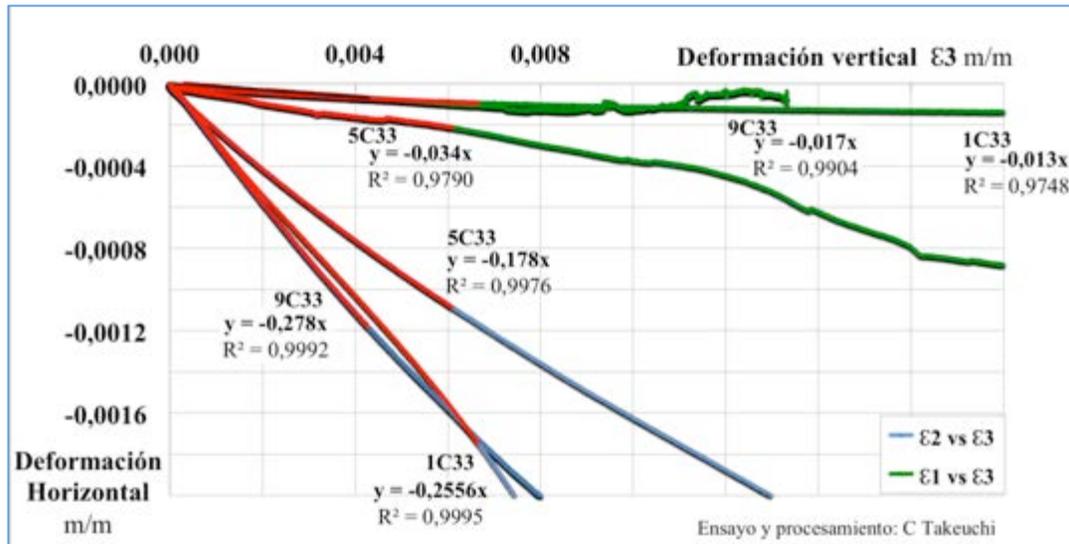


Fuente: Autor

Los coeficientes de Poisson,  $\nu_{23}$  y  $\nu_{13}$ , se calcularon con el valor negativo de la pendiente de la regresión lineal de los puntos que se encuentran en el rango del 5% al 55% del esfuerzo máximo. En la Figura 5.28 se observa el gráfico para determinar las relaciones de Poisson para las probetas 1C33, 4C33 y 9C33.

En la Tabla 5.3 se encuentran los valores de esfuerzo máximo de todas las probetas C33 ya que no se encontraron datos atípicos. Para las probetas 1C33, 5C33 y 9C33 se incluyen en la misma tabla los valores del módulo de elasticidad transversal en dirección 3,  $E_3$ , y los coeficientes de Poisson,  $\nu_{23}$  y  $\nu_{13}$ , con los coeficientes de correlación correspondientes a cada caso.

Figura 5.28. Gráfica deformaciones horizontales  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$  en función de la deformación vertical  $\epsilon_3$  de la probetas C33



Fuente: Autor

Tabla 5.3. Esfuerzo máximo, Módulo de elasticidad y relación de Poisson probetas C33.

Probeta	$\sigma_{MAX}$ MPa	$\sigma_{LP}$ MPa	Módulo de elasticidad		Relación Poisson		Relación Poisson		Densidad g/cm <sup>3</sup>	% Fibra
			$E_2$ MPa	Coef Correlación	$\nu_{23}$	Coef Correlación	$\nu_{13}$	Coef Correlación		
1C33	7,59	4,17	593	0,9949	0,256	0,9997	0,013	0,9997	0,87	52,2
2C33	7,05	3,88							0,77	42,6
3C33	7,48	4,11							0,77	43,1
4C33	7,36	4,05							0,78	41,1
5C33	6,59	3,62							0,80	46,8
6C33	6,69	3,68	774	0,9991	0,278	0,9996	0,017	0,9952	0,80	43,5
7C33	7,33	4,03							0,77	46,2
8C33	7,28	4,00							0,80	47,6
9C33	6,36	3,50							0,78	42,4
10C33	7,03	3,87							0,76	45,3

Fuente: Autor

El valor promedio de esfuerzo máximo alcanzado a compresión transversal en dirección 3 es de 7.1MPa con una desviación estándar de 0.4MPa y un coeficiente de variación de 0.06, el valor promedio del módulo de elasticidad transversal en dirección 3 fue de 634MPa con una desviación estándar de 124MPa y un coeficiente de variación de 0.20.

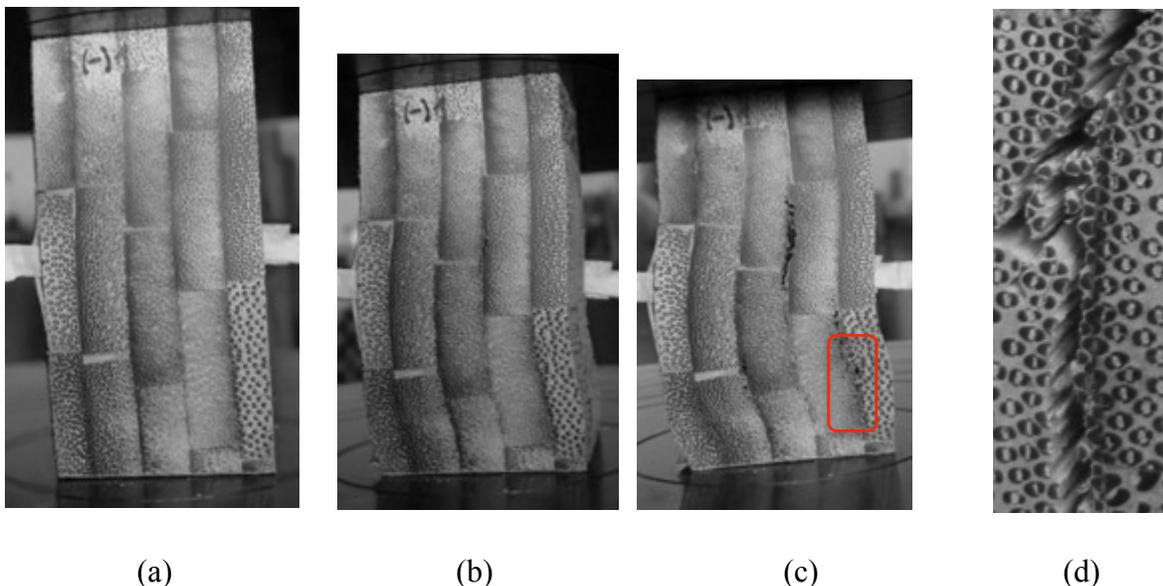
Los valores promedio de los coeficientes de Poisson,  $\nu_{23}$  y  $\nu_{13}$ , obtenidos fueron de 0,237 y 0.021 con desviaciones estándar de 0.053 y 0.011 y coeficientes de variación de 0.22 y 0.51. Para todas las regresiones lineales el coeficiente de correlación fue mayor de 0.9.

Se calculó el esfuerzo en el límite de proporcionalidad como el valor que corresponde al 55% del esfuerzo máximo. El valor promedio de este esfuerzo fue de 4,0MPa.

### 5.3.1.3 Observaciones durante los ensayos

El comportamiento de las probetas C33 fue diferente al de las probetas C22 y C11. Después de la etapa de acomodación, se observa un comportamiento lineal elástico donde no se observa deformación ni fisura en las probetas. Al seguir aplicando carga, mientras las caras frontal y posterior permanecen planas, la probeta se empieza a pandear lateralmente, sin embargo, el espesor de los tableros se mantiene relativamente uniforme. Al alcanzar la carga máxima, empiezan a presentarse fisuras verticales cercanas a la unión entre tableros. La probeta sigue soportando carga, mientras las fisuras se van propagando, por lo cual la falla de la probeta es dúctil. Las fisuras se deben a la separación de las fibras y atraviesan el espesor de la probeta. En las Figura 5.29(a) hasta la Figura 5.29(c) se presentan imágenes del ensayo de la probeta 8C33 y en la Figura 5.29(d) un acercamiento frontal de la fisura inferior. En la Figura H.8 de la sección H.3.1 del anexo H se encuentran las imágenes de las fallas de las probetas C33.

Figura 5.29. Ensayo probeta 8C33 visto desde la cara posterior, (a) inicio, (b) pandeo antes de alcanzar la carga máxima, (c) aparición de fisuras verticales y (d) acercamiento de fisura del extremo inferior visto desde la cara frontal

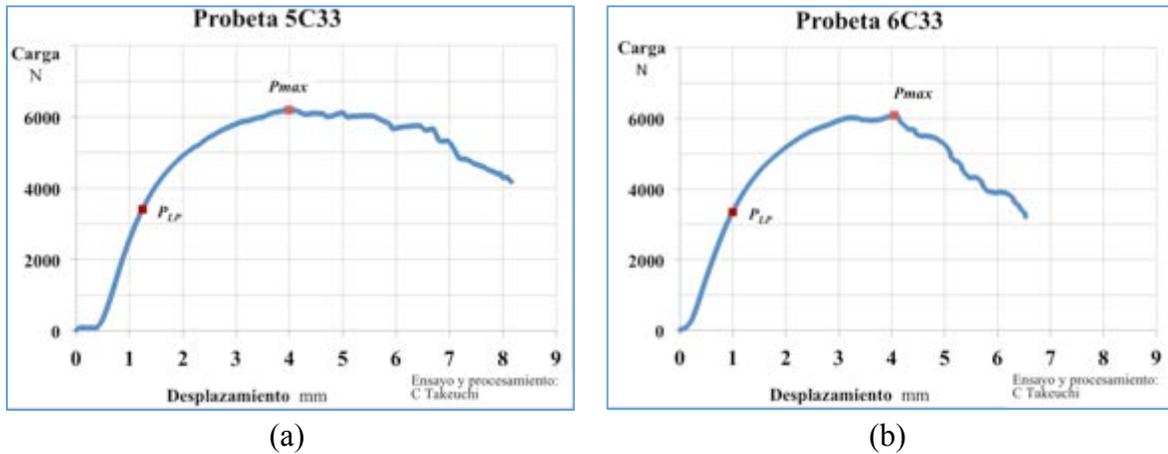


Fuente: Autor

En los diagramas carga desplazamiento se observa que el tramo lineal elástico es mayor en porcentaje con respecto a la carga máxima que el que presentan las probetas C22. En el presente estudio, se estableció la carga en el límite de proporcionalidad como el 55% de la

carga máxima. En la Figura 5.30 se muestran los diagramas carga desplazamiento para las probetas 5C33 y 8C33, donde se resaltan la carga máxima y la carga en el límite de proporcionalidad. En la Figura H.9 del anexo H se encuentran las curvas carga desplazamiento de los ensayos de las probetas C33.

Figura 5.30. Gráficos Carga Desplazamiento probetas: (a) 5C33 y (b) 8C33



Fuente: Autor

## 5.3.2 Determinación de la densidad

### 5.3.2.1 Descripción de los ensayos

Para el cálculo de la densidad de las probetas C33, se determinó su masa con una balanza digital con aproximación de 0.01g antes de ser ensayadas a compresión. El volumen se calculó con base en el promedio de las medidas de ancho, espesor y alto. Estos datos se encuentran en la Tabla H.4 de la sección H.3.1 del Anexo H.

### 5.3.2.2 Resultados

Los valores de densidad de las probetas C33 se encuentran en la Tabla 5.3. La densidad promedio fue de  $0.79\text{g/cm}^3$ , con una desviación estándar de  $0.031\text{g/cm}^3$  y un coeficiente de variación del 0.039.

## 5.3.3 Determinación del porcentaje de fibras.

Se determinó el porcentaje de fibras de cada una de las láminas que conforman el elemento 7C33 así como el porcentaje de fibras de las probetas C33.

### 5.3.3.1 Descripción de los ensayos

El procedimiento general realizado para determinar el porcentaje de fibras en las láminas de la probeta 7C33 y de las probetas C33, fue igual al utilizado para determinar el porcentaje de fibras en las probetas C11 descrito en la sección 5.1.3.

En la Figura H10 del Anexo H se observa la sección rectangular modificada de la probeta 7C33 a color, convertida en grises y segmentada y también el área modificada segmentada para la lámina 10 de esta probeta.

También se encuentra en la sección H.3.3. del Anexo H las imágenes segmentadas de cada una de las láminas de la probeta 7C33 (Figura H.11 del Anexo H) y de cada una de las probetas de compresión C33 (Figura H.12 del Anexo H).

### 5.3.3.2 Cálculos y resultados

El porcentaje de fibras,  $\% \text{ fibras}$ , fue calculado con base en la Ecuación 5.3 mencionada en la sección 5.1.3.

En la Tabla H5 del Anexo H se encuentran los porcentajes de fibras de las láminas de la probeta 7C33. El valor promedio fue de 48.1%, con una desviación estándar de 14.0% y un coeficiente de variación de 0.29.

En la Tabla 5.3 se encuentran los porcentajes de fibras de las probetas C33. El valor promedio fue de 45.1%, con una desviación estándar de 3.3% y un coeficiente de variación del 0.06.

### 5.3.4 Análisis de resultados

A pesar de que las probetas C33 y C22, tienen la presión aplicada en dirección perpendicular a la fibra, su forma de falla es muy diferente. En las probetas C33, con esfuerzo de compresión paralelo al plano de los tableros la falla es la combinación entre pandeo lateral y pérdida dúctil de resistencia con la presencia de fisuras verticales mientras que en las probetas C22 la falla es frágil luego de presentarse fisuras diagonales. Adicionalmente, se observa en las probetas C33 pandeo lateral general mientras que en las probetas C22, se observan pandeos locales laterales.

En las gráficas carga desplazamiento de los ensayos de las probetas C33, se observa un primer tramo lineal elástico en la curva esfuerzo deformación. Una vez alcanzada la carga máxima, la probeta no falla. La pérdida de resistencia es gradual acompañada de crecimiento de fisuras verticales.

La dispersión de las curvas de esfuerzos vs  $\delta/L$  es baja así como el valor del esfuerzo máximo. El valor promedio del esfuerzo máximo a compresión perpendicular a las fibras, paralelo al plano de los tableros obtenido al ensayar probetas C33 fue de 7.2MPa con un coeficiente de variación de 0.06. Los diagramas de esfuerzo deformación de las probetas 1C33, 5C33 y 9C33 son bastante similares en el rango de deformación medido.

Los esfuerzos máximos alcanzados en las probetas C11 y C22 corresponden a las resistencias del material en dirección paralela a la fibra y perpendicular a la fibra perpendicular al plano de los tableros respectivamente. En el caso de las probetas C33 el esfuerzo máximo alcanzado es una combinación de pandeo lateral y resistencia del material.

El valor promedio del módulo de elasticidad a compresión transversal paralelo al plano de los tableros (probetas C33) fue de 634MPa y perpendicular al plano de los tableros fue de 265MPa (probetas C22). El valor promedio del módulo de elasticidad longitudinal a compresión obtenido al ensayar probetas C11 fue de 33418MPa.

Los valores promedio de los coeficientes de Poisson,  $\nu_{23}$  y  $\nu_{13}$ , fueron de 0.237 y 0.021. los valores promedio de coeficientes de Poisson,  $\nu_{32}$  y  $\nu_{31}$  fueron de 0.074 y 1.18. Al ser el material BGLPP mucho más rígido en dirección paralela a la fibra que en dirección perpendicular el coeficiente de Poisson  $\nu_{31}$  tiene valores altos.

La densidad promedio de las probetas C33 de bambú guadua laminado fue de 0.79g/cm<sup>3</sup> con un coeficiente de variación del 0.039. Valor muy similar al 0,83g/cm<sup>3</sup> encontrado para las probetas C11 y al 0.80g/cm<sup>3</sup> encontrado para las probetas C22.

El valor promedio de porcentaje de área de fibras encontrado en las láminas de la probeta 7C33 fue de 48.1%, con un coeficiente de variación del 0.29. El valor promedio de porcentaje de área de fibras encontrado en las probetas de bambú guadua laminado C33 fue de 45.1%, con un coeficiente de variación del 0.06. El coeficiente de variación de porcentaje de área de fibras encontrado en las láminas de la probeta 1C11 había sido de 0.29 y de las probetas C11 de 0.07.

## 6. TENSIÓN EN BGLPP

En el anterior capítulo, se habló sobre el comportamiento de probetas de BGLPP, solicitadas a esfuerzos de compresión paralela y perpendicular a la fibra. En el presente capítulo se describe el comportamiento de probetas del mismo material en ensayos de tensión paralela y perpendicular a la fibra.

Para identificar cada una de las probetas, estas fueron marcadas con un número que corresponde al bloque de material de BGLPP de donde fueron obtenidos, seguido del tipo de probeta.

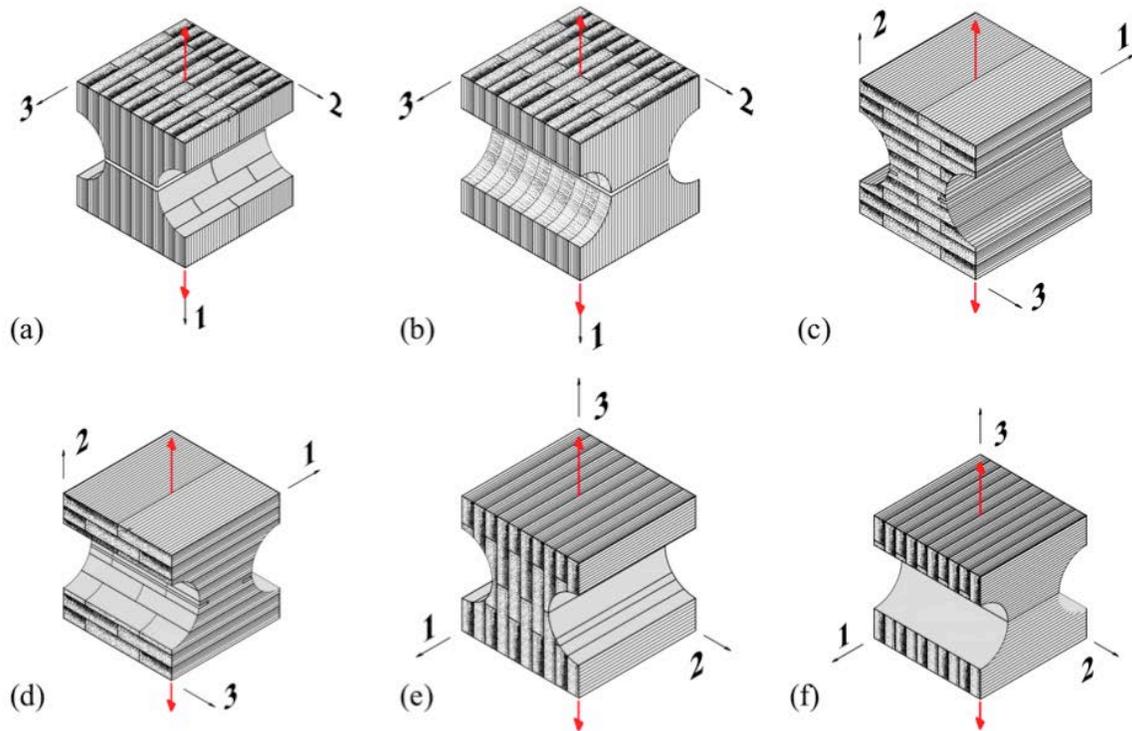
El tipo de probeta se identificó con la letra T, que corresponde a tensión, los números 11, 22 ó 33 indican la dirección y plano de aplicación de la carga de acuerdo al sistema coordinado asignado al bloque de material y mostrado en la Figura 3.28, las letras a o b, se utilizan para diferenciar si se disminuyó el área crítica al restar al cubo original dos semicilindros con eje en la dirección 2 o 3 ( Figura 6.1) y, para algunas probetas, las letras f o p indican si el plano de área crítica se encuentra en la fibra o en la pega.

El ensayo de las probetas T11 fue un ensayo de pull out donde se redujo el área con entallas para determinar el esfuerzo cortante con el cual se presenta el deslizamiento entre los haces vasculares y el tejido parénquima. Como se observa en la Figura 6.1(a) y la Figura 6.1(b), que corresponden a las probeta T11a y T11b respectivamente, la carga se aplica de forma paralela a la dirección de las fibras.

En el ensayo de las probetas T22, se determinó la resistencia a tensión perpendicular a las fibras cuando la aplicación de la carga es perpendicular al plano de los tableros. Se consideraron cuatro tipos diferentes de probetas T22, para contemplar las diferentes posibilidades que se pueden presentar al realizar este ensayo y que se explicarán más adelante. En la Figura 6.1(c) y la Figura 6.1(d) se muestran las probetas T22fa y T22fb.

En el ensayo de las probetas T33, se determinó la resistencia a tensión perpendicular a las fibras, pero en este caso, con los tableros dispuestos en forma paralela a la dirección de la carga, como se ilustra en la Figura 6.1(e) y Figura 6.1(f) que corresponden a las probetas T33a y T33b.

Figura 6.1 Probetas a tensión: (a) T11a, (b) T11b, (c) T22fa, (d) T22fb, (e) T33a y (f) T33b



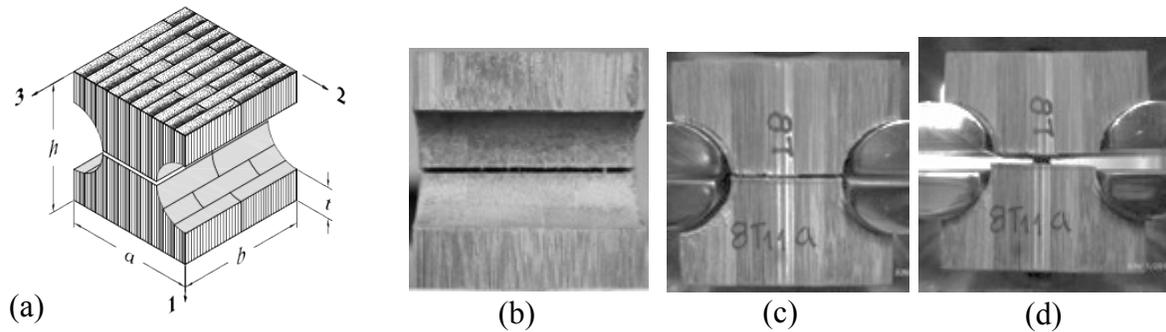
Fuente: Autor

## 6.1 TENSION PARALELA A LA FIBRA EN PROBETAS DE BGLPP

Se realizaron 14 ensayos de tensión paralela a la fibra en probetas T11, 6 en probetas T11a y 8 en probetas T11b. En las probetas T11a el eje de los semicilindros es paralelo al eje 3 como se observa en la Figura 6.1(a) y en las probetas T11b el eje de los semicilindros es perpendicular al eje 3 ( Figura 6.1(b)).

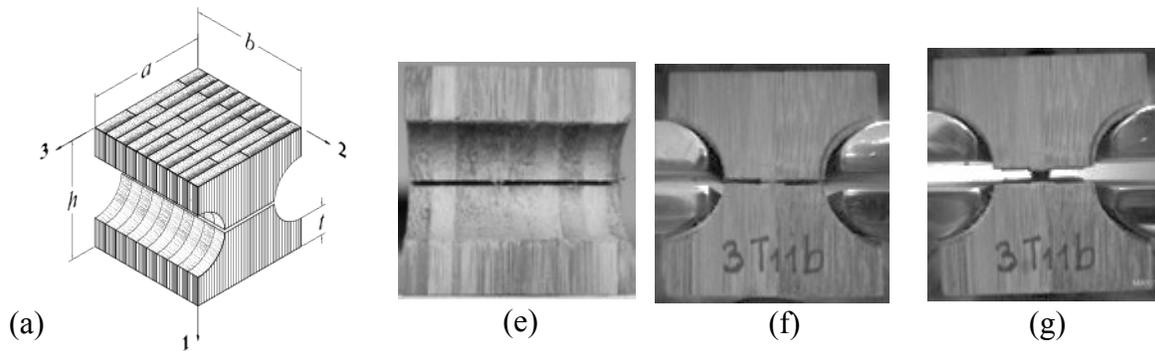
Para determinar el esfuerzo cortante en el cual se presenta el deslizamiento entre los haces vasculares y el tejido parénquima se hicieron unas entallas con segueta en ambas direcciones (disminuyendo el ancho y el espesor) como se observa en la Figura 6.2 y en la Figura 6.3 que corresponden a las probetas 8T11a y 3T11b. En estas figuras, se muestra un esquema de la probeta, las vistas lateral y frontal de las probetas y para que se aprecie más la sección reducida, una vista frontal durante el ensayo.

Figura 6.2 Probeta 8T11a: (a) esquema, (b) vista lateral derecha, (c) vista frontal y (d) ensayo



Fuente: Autor

Figura 6.3 Probeta 3T11b: (a) esquema, (b) vista lateral derecha, (c) vista frontal y (d) ensayo



Fuente: Autor

En el Anexo I se encuentran las vistas de las caras de las probetas T11; donde las vistas superior e inferior corresponden al plano 1 el cual es perpendicular al eje 1. Para las probetas T11a, las vistas frontal y posterior corresponden al plano 3 y las laterales al plano 2 y para las probetas T11b las vistas frontal y posterior corresponden al plano 2 y las laterales al plano 3.

### 6.1.1 Descripción de los ensayos

Los ensayos de tensión fueron realizados en una máquina universal de ensayos a una velocidad de 0.017mm/s (1mm/min). Las probetas se colocan en unas mordazas, que se van separando durante el ensayo como se observa en la Figura 6.2(d) y en la Figura 6.3(d).

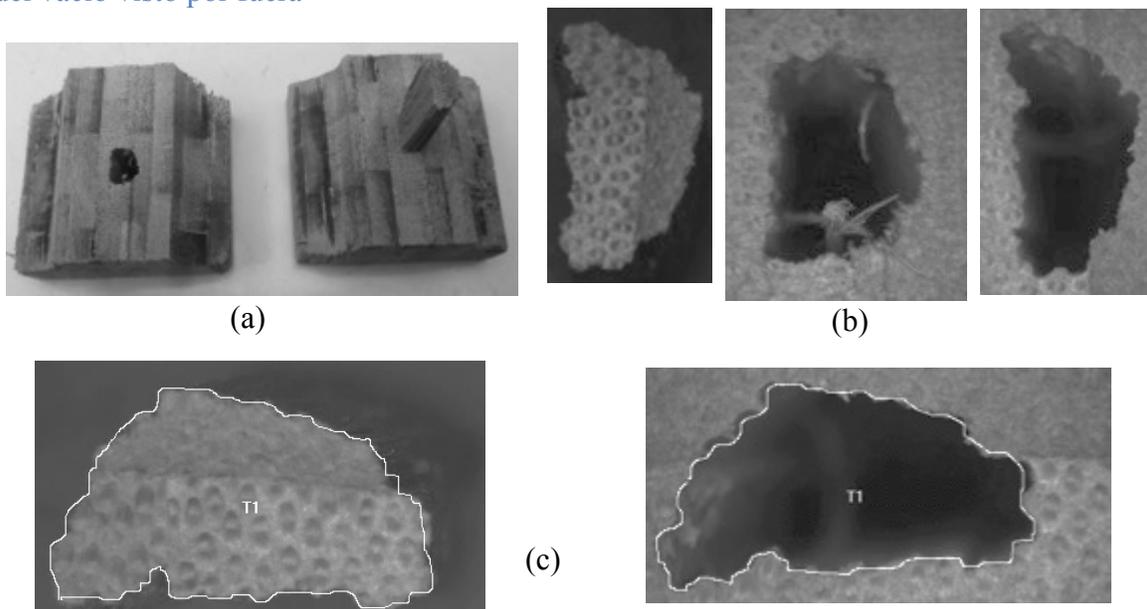
Para cada probeta, se tomaron cuatro medidas de ancho,  $a$ , espesor,  $b$ , y altura,  $h$  (Figura 6.2(a) y Figura 6.3(a)). El ancho de la sección transversal reducida una vez realizados los

entalles y la altura de cada aleta,  $t$ , se midió en la parte frontal y en la parte posterior. Para determinar el espesor de la sección reducida se tomaron medidas de profundidad hasta el alma por delante y por detrás por ambos lados. Con el ancho y el espesor de la sección reducida, se calculó su área transversal. En la Tabla I.1 y la Tabla I.2 de la sección I.1.1 del anexo I se encuentran los valores mencionados, para cada una de las probetas.

Una vez concluido el ensayo de tensión en las probetas T11a y T11b, se siguió aplicando carga, hasta que se separaran las dos mitades. En una mitad se encontraba el volumen que se deslizó de la otra mitad (que en adelante se llamará vástago) y en la otra el vacío dejado por este volumen (Figura 6.4(a)). El área transversal del vástago es diferente al área rectangular de la sección reducida de la probeta (definida por los entalles) ya que la distribución de fibras incide en el área de fractura de la matriz.

Para determinar el esfuerzo cortante que se desarrolla entre el área perimetral del vástago y el área del vacío en el momento del deslizamiento, se tomaron cuatro medidas de la longitud de deslizamiento (que corresponde a la longitud del vástago), por el frente y por detrás a ambos lados. También, se capturaron tres imágenes del área de falla, la primera del extremo del vástago, la segunda del vacío visto desde la parte interior de la probeta y la tercera del mismo vacío vista de la parte exterior (Figura 6.4(b)).

Figura 6.4. Probeta 5T11a: (a) probeta después de ensayo, (b) imágenes de área del vacío por dentro y por fuera y de la punta del vástago y (c) medición del perímetro del vástago y del vacío visto por fuera



Fuente: Autor

Se midió el perímetro de las áreas de falla en las tres imágenes obtenidas con el software Image Pro. En la Figura 6.4(c) se observan dos de las mediciones del perímetro del área de deslizamiento. En la Tabla I.3 de la sección I.1.3 del Anexo I se encuentran las medidas de longitud de deslizamiento, perímetro y área de contacto entre el vástago y la sección adyacente a este. También se encuentra el perímetro teórico, calculado con base en el ancho y el espesor de la sección reducida de la probeta después de realizados los entalles.

### 6.1.2 Cálculos y resultados

El esfuerzo cortante,  $\tau$ , fue calculado con base en la Ecuación 6.1 donde  $P_{max}$  es la fuerza máxima aplicada y  $A_v$  el área cortante entre el vástago y la zona circundante a este. El área mencionada es el producto de la longitud de deslizamiento y el perímetro de área de falla.

$$\tau = \frac{P_{max}}{A_v} \quad \text{Ecuación 6.1}$$

El esfuerzo cortante teórico,  $\tau_t$ , fue calculado con base en la Ecuación 6.2 donde  $P_{max}$  es la fuerza máxima aplicada y  $A_{fricción\ teórica}$  el área teórica donde se desarrolla la fricción entre la sección reducida y la zona alrededor de esta. El área teórica mencionada se calculó como el producto de la longitud de deslizamiento y el perímetro de la sección reducida. En la Tabla 6.1 se encuentran los esfuerzos de fricción reales y teóricos.

$$\tau_{teórico} = \frac{P_{max}}{A_{v\ teórica}} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

Tabla 6.1. Esfuerzo cortante de probetas T11 con doble entalla

Probeta	$P_{max}$			$P_{max}$		
	N	mm <sup>2</sup>	MPa	mm <sup>2</sup>	N	MPa
5T11a	2903,47	927,49	3,13	665,44	2903,47	4,36
6T11a	1732,53	904,26	1,92	558,61	1732,53	3,10
7T11a	2095,07	751,13	2,79	576,66	2095,07	3,63
8T11a	2045,47	539,24	3,79	460,14	2045,47	4,45
9T11a	1938,13	778,43	2,49	496,39	1938,13	3,90
10T11a	1784,87	1047,16	1,70	810,49	1784,87	2,20
2T11b	1960,15	829,15	2,36	544,79	1960,15	3,60
3T11b	1829,43	664,17	2,75	540,65	1829,43	3,38
5T11b	2559,83	656,05	3,90	645,68	2559,83	3,96
6T11b	1555,04	480,09	3,24	430,45	1555,04	3,61
7T11b	1801,38	756,67	2,38	632,63	1801,38	2,85
8T11b	2118,82	618,64	3,42	637,22	2118,82	3,33
9T11b	1803,25	650,74	2,77	571,99	1803,25	3,15
10T11b	1493,06	541,57	2,76	522,30	1493,06	2,86

Fuente: Autor

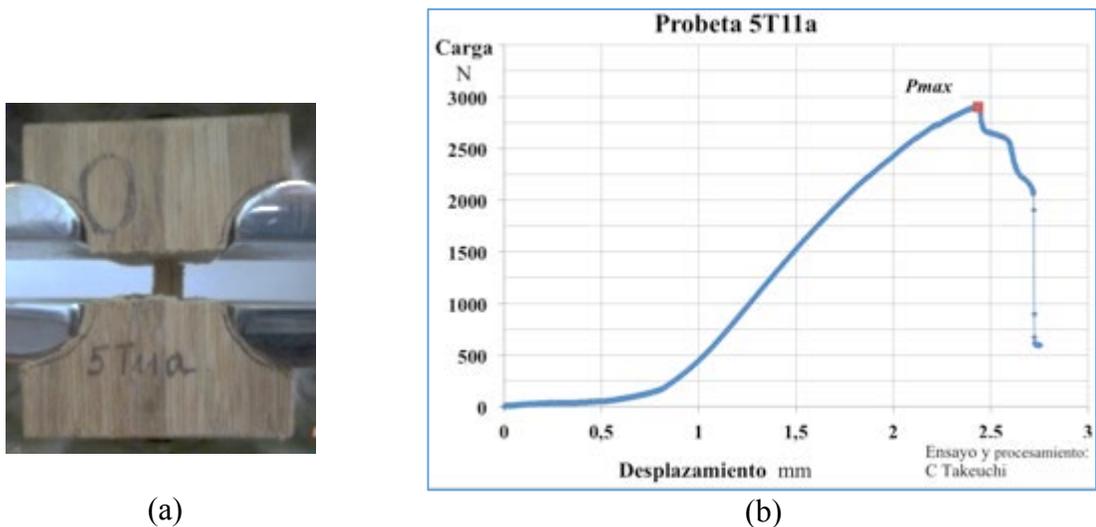
El valor promedio de esfuerzo cortante fue de 2.8MPa con una desviación de 0.6MPa y un coeficiente de variación de 0.26. El valor promedio de esfuerzo cortante teórico fue de 3.4MPa con una desviación de 0.6MPa y un coeficiente de variación de 0.18.

Si se consideran únicamente las probetas T11a los valores promedio de esfuerzos cortantes reales y teóricos fueron de 2.6MPa y 3.6MPa respectivamente con coeficientes de variación de 0.29 y 0.18. Para las probetas T11b los valores promedio de esfuerzos cortantes reales y teóricos fueron de 2.9MPa y 3.3MPa respectivamente con coeficientes de variación de 0.18 y 0.13.

### 6.1.3 Observaciones durante los ensayos

En las probetas 5T11a, 6T11a, 7T11a, 8T11a, 9T11a y 10T11a, con entallas en las dos direcciones, se presentó deslizamiento de un vástago central en dirección paralela a la carga como se observa en la Figura 6.5. En las probetas 5T11a y 8T11a la carga aumenta de manera continua hasta que falla como se observa en la curva carga desplazamiento de la Figura 6.5.

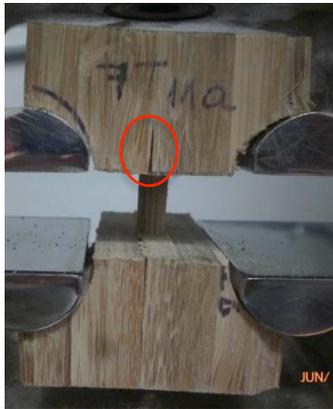
Figura 6.5. Probeta 5T11a: (a) imagen de la falla y (b) diagrama carga desplazamiento



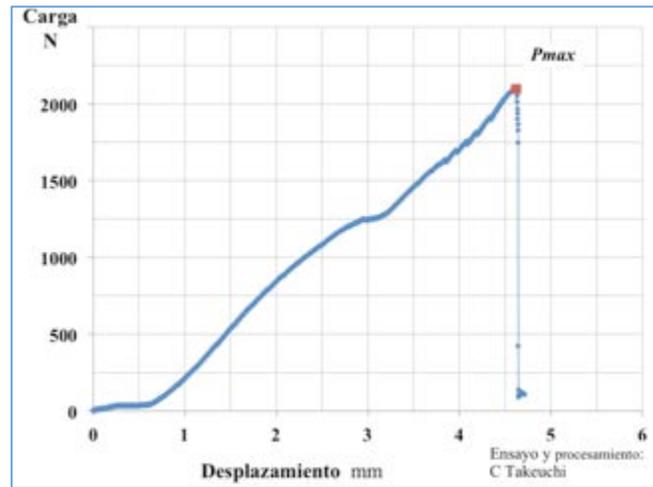
Fuente: Autor

En las probetas 7T11a y 9T11a antes de alcanzar la falla, se presentaron fisuras perpendiculares a las fibras y paralelas a los planos de los tableros, en la parte central cercana a la sección reducida (Figura 6.6(a)), en este momento, la pendiente de la curva carga desplazamiento disminuye (sin perder carga) y posteriormente vuelve a aumentar hasta que se presenta el deslizamiento (Figura 6.6(b)).

Figura 6.6. Probeta 7T11a: (a) imagen de la falla y (b) diagrama carga desplazamiento



(a)



(b)

Fuente: Autor

En las probetas 6T11a y 10T11a las fisuras perpendiculares a las fibras son grandes y cuando se presentan hay pérdida de resistencia, sin embargo después de un tiempo, la carga vuelve a aumentar y finalmente, la falla se presenta por deslizamiento.

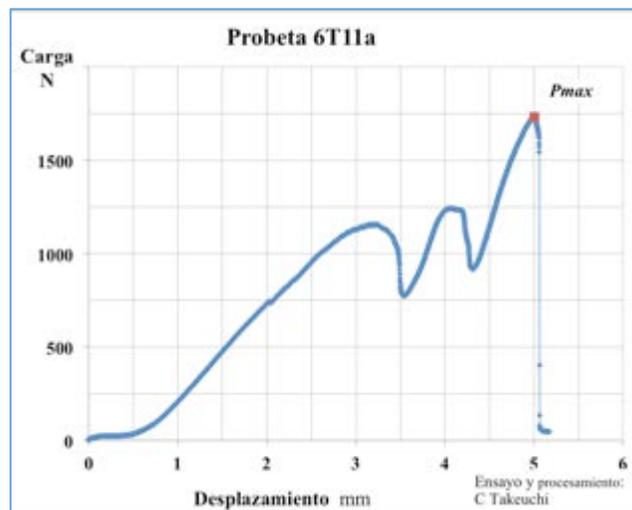
Figura 6.7. Probeta 6T11a: (a) imagen de la falla y (b) diagrama carga desplazamiento



(a)



(b)



(c)

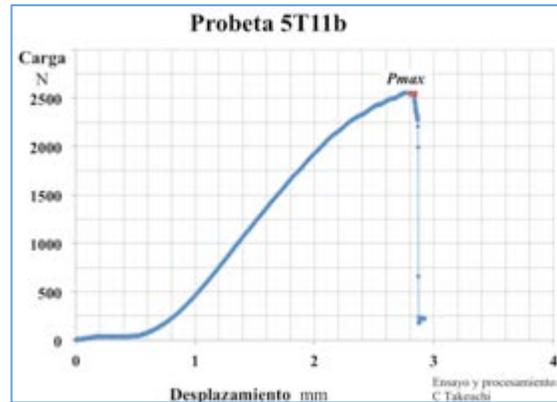
Fuente: Autor

En las probetas T11b con entallas en dos direcciones se presentó deslizamiento de un vástago central sin que se hayan observado fisuras perpendiculares a las fibras. En la Figura 6.8 se observa la fotografía de falla y el diagrama carga desplazamiento de la probeta 5T11b.

Figura 6.8. Probeta 5T11b: (a) imagen de la falla y (b) diagrama carga desplazamiento



(a)



(b)

Fuente: Autor

En la sección I.1.2 e I.1.4 del Anexo I se encuentran las fotografías de las fallas de los ensayos T11a y T11b que no aparecen en el cuerpo del trabajo, así como sus gráficas carga desplazamiento

#### 6.1.4 Análisis de resultados

Las probetas ensayadas con entallas en el ancho y en el espesor fallaron por deslizamiento de un vástago en dirección paralela a la fibra. La falla es frágil.

La orientación de los tableros, influye en la forma como fallan las probetas con doble entalla. En la mayoría de las probetas T11a, con el eje de los semicilindros paralelo al plano de los tableros, se presentó una fisura perpendicular a la fibra, paralela al plano de los tableros, cercana a la unión entre ellos en la parte de menor densidad de fibras. En las probetas T11b con doble entalla, no se presentaron fisuras perpendiculares a la fibra antes de presentarse el deslizamiento.

El área del vástago deslizado es mayor al área de la sección reducida de la probeta después de realizados las entallas por lo cual el área de contacto fue mayor al esperado. El valor promedio de esfuerzo cortante para las probetas T11a con doble entalla fue de 2.6MPa. Si se hubiera calculado con el área de contacto esperado el esfuerzo cortante hubiera sido de 3.6MPa. En el caso de las probetas T11b, el valor promedio de esfuerzo cortante fue de 2.9MPa y si se hubiera calculado con el área de contacto esperado el esfuerzo cortante hubiera sido de 3.3MPa.

El valor promedio de esfuerzo cortante entre el vástago y la zona circundante a este de las probetas T11b con doble entalla, fue mayor que el valor promedio de esfuerzo cortante de las probetas T11a con doble entalla. Todas las probetas T11b, de este tipo, fallaron por deslizamiento, a diferencia de las probetas T11a, donde se presentaron fisuras perpendiculares a la fibra paralelas al plano de los tableros antes de presentarse el deslizamiento.

La geometría de las probetas T11b con entallas en el ancho y el espesor, sirve para estudiar el esfuerzo de fricción que se desarrolla en el momento del deslizamiento en dirección de la carga de un vástago con sección transversal reducida con respecto a la zona circundante a este.

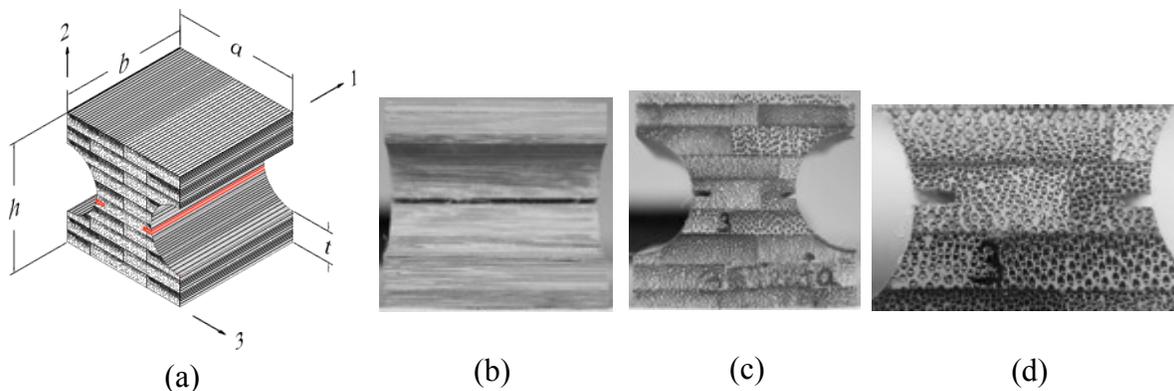
## 6.2 TENSIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PERPENDICULAR AL PLANO DE LOS TABLEROS EN PROBETAS DE BGLPP

Las probetas T22 se encuentran solicitadas a esfuerzo axial perpendicular a la fibra y perpendicular al plano de los tableros, por esto, el esfuerzo de tensión en cada lámina es perpendicular a zonas de densidad de fibras relativamente uniforme.

Se realizaron 49 ensayos de tensión perpendicular a la fibra perpendicular al plano de los tableros en probetas T22, 20 en probetas T22a y 19 en probetas T22b. En las probetas T22a el eje de los semicilindros es paralelo al eje 1 ( Figura 6.1(c)) y en las probetas T22b el eje de los semicilindros es perpendicular al eje 3 ( Figura 6.1 (d)).

Las probetas T22fa, son probetas T22a, con entallas en el ancho en el medio de las láminas. En la Figura 6.9 se observa un esquema de las probetas T22fa y las vistas lateral y frontal de la probeta 3T22fa así como un acercamiento de las entallas.

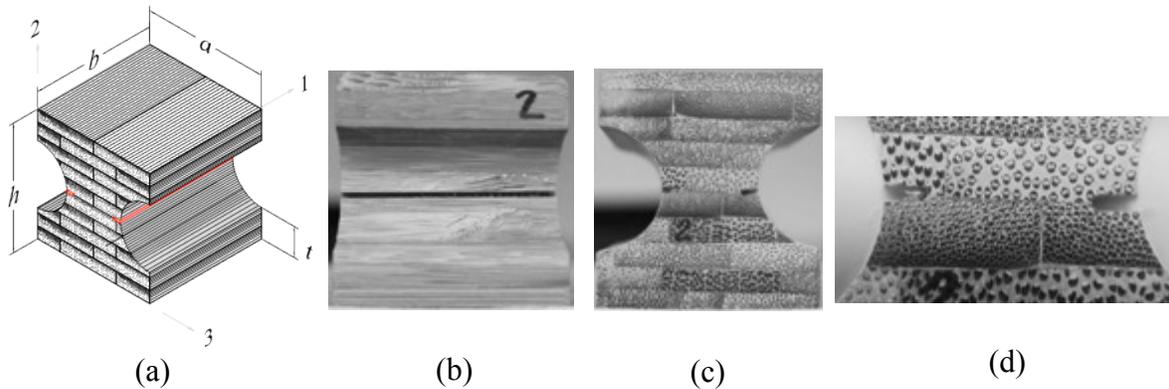
Figura 6.9. Probeta 3T22fa: (a) esquema, (b) lateral izquierda, (c) frontal y (d) acercamiento entallas



Fuente: Autor

Las probetas T22pa, son probetas T22a, pero a diferencia de las probetas T22fa, las entallas en el ancho se encuentran en la unión entre tableros. En la Figura 6.10 se observa un esquema de las probetas T22pa y las vistas frontal y lateral de la probeta 2T22pa y un acercamiento de la entalladura.

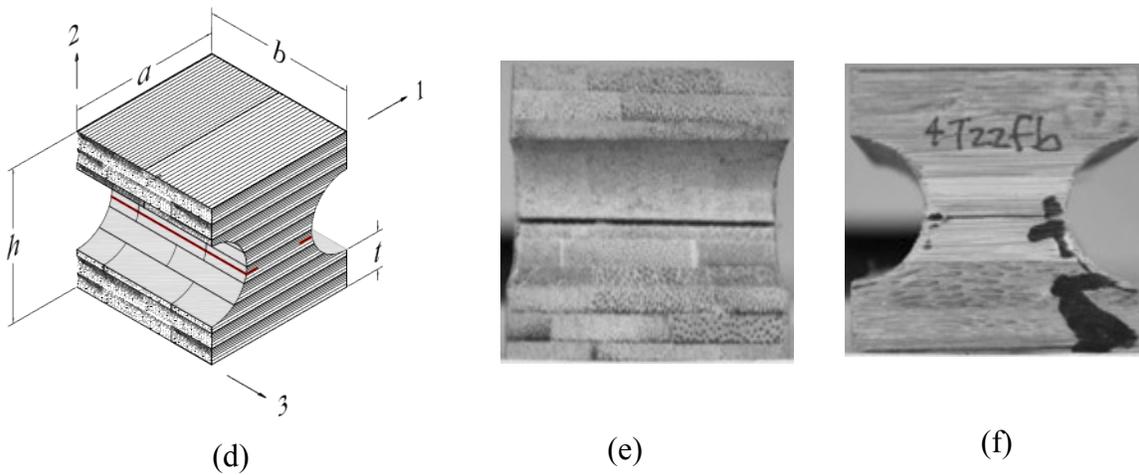
Figura 6.10 Probeta 2T22pa: (a) esquema, (b) lateral izquierda, (c) frontal y (d) acercamiento entallas



Fuente: Autor

Las probetas T22fb, son probetas T22b, con entalladuras en el ancho en el medio de las láminas. En la Figura 6.11 se observan las vistas lateral y frontal de la probeta 4T22fb y el esquema de las probetas T22fb.

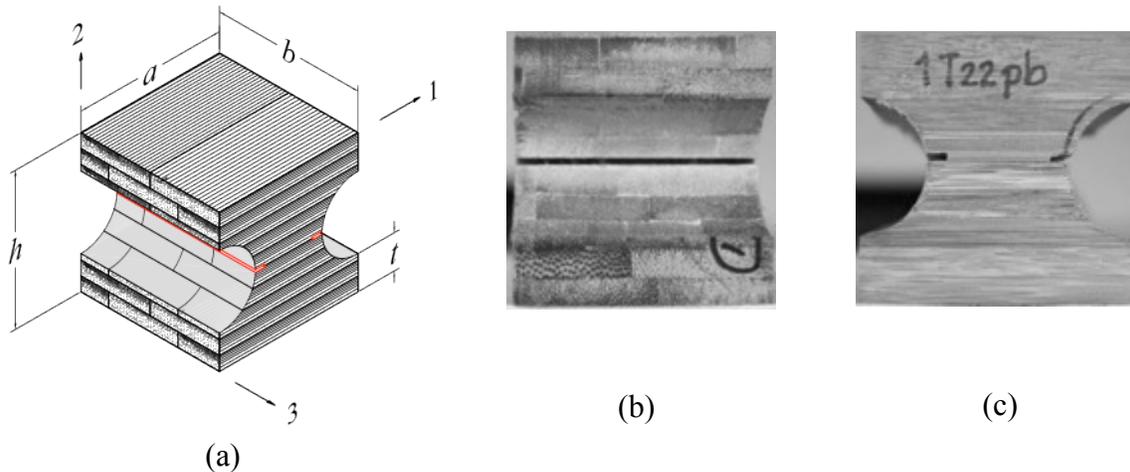
Figura 6.11 Probeta 4T22fb: (a) esquema, (b) lateral izquierda y (c) frontal



Fuente: Autor

Las probetas T22pb, son probetas T22b con entalladuras en la unión entre tableros. En la Figura 6.12 se observan las vistas lateral y frontal de la probeta 1T22pb y el esquema de las probetas T22pb.

Figura 6.12 Probeta 1T22pb: (a) esquema, (b) lateral izquierda y (c) frontal



Fuente: Autor

En el Anexo I se encuentran para cada probeta las vistas de sus caras; donde las vistas superior e inferior corresponden al plano 2 (perpendicular al eje 2). Para las probetas T22a las vistas frontal y posterior corresponden al plano 1 y las vistas laterales al plano 3 y para las probetas T22b las vistas frontal y posterior corresponden al plano 3 y las vistas laterales al plano 1.

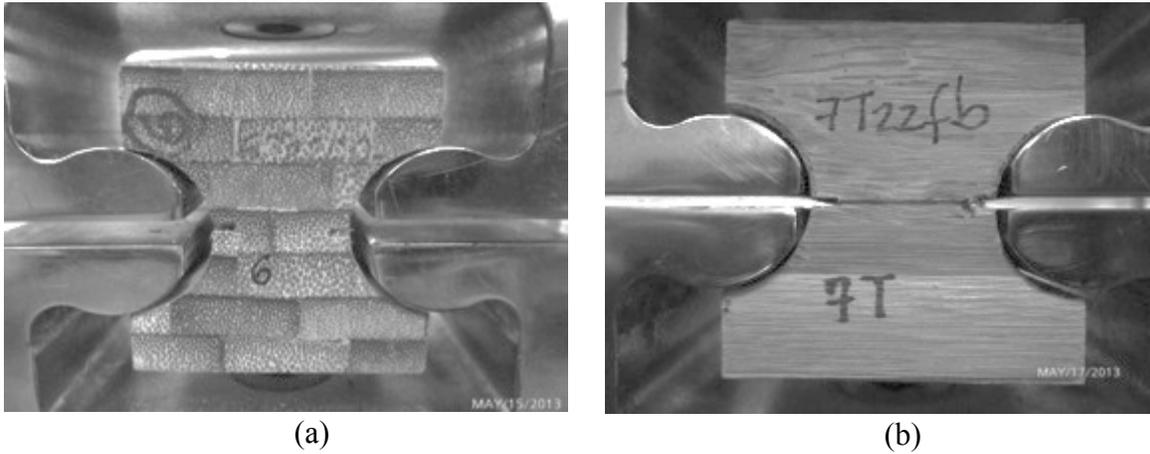
### 6.2.1 Descripción de los ensayos

Los ensayos fueron realizados en una máquina universal de ensayos a una velocidad de 0.04mm/s (2.5mm/min). En la Figura 6.13 se observa el montaje de la probeta 6T22fa y de la probeta 7T22fb.

Para cada probeta, se tomaron cuatro medidas de ancho,  $a$ , espesor,  $b$ , y altura,  $h$ . El ancho de la sección reducida una vez realizados los entalles y la altura de cada aleta,  $t$ , se midieron tanto en la parte frontal y posterior.

En la Tabla I.4, la Tabla I.6, la Tabla I.8 y la Tabla I.10 de la sección I.2 del anexo I se encuentran los valores anteriormente mencionados, para las probetas T22fa, T22pa, T22fb y T22pb respectivamente.

Figura 6.13. Montaje de probetas: (a) 6T22fa y (b) 2T22fb



Fuente: Autor

### 6.2.2 Cálculos y resultados

El esfuerzo de tensión aplicado en un momento dado fue calculado como la relación entre la fuerza aplicada,  $P$ , y el área transversal de la sección reducida en la zona de las entallas,  $A_t$ , como se indica en la Ecuación 6.3.

$$\sigma_t = \frac{P}{A_t} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

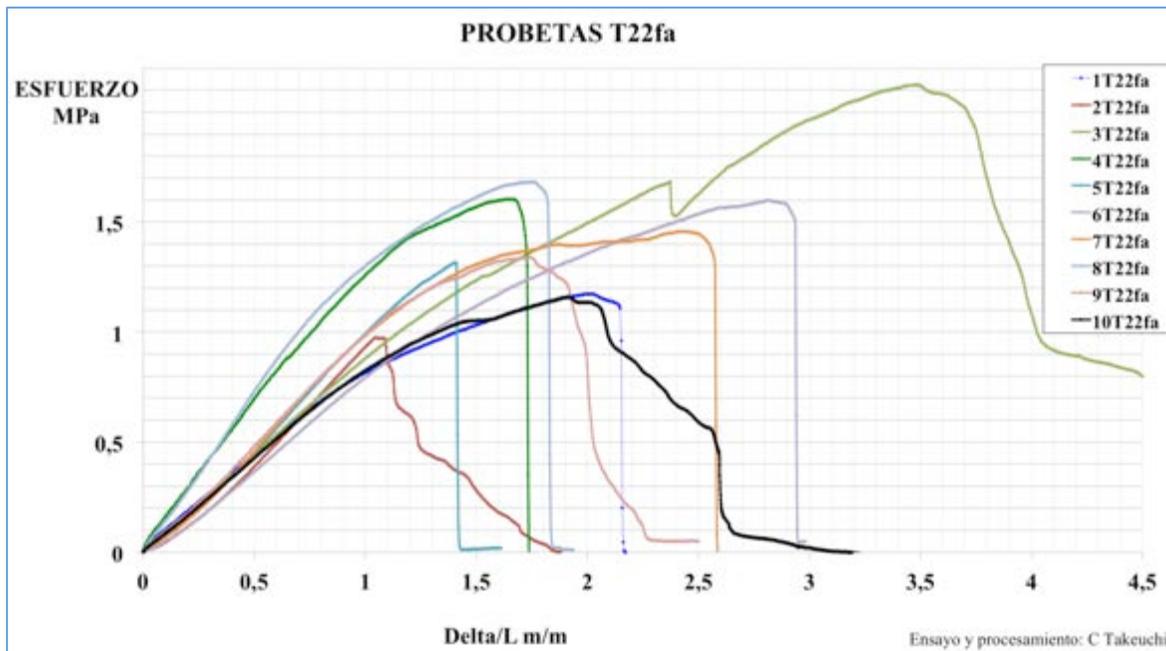
Con base en los esfuerzos y las relaciones entre el desplazamiento del plato de carga y una longitud unitaria ( $L=1\text{mm}$ ), se obtuvieron las gráficas mostradas en la Figura 6.14, Figura 6.15, Figura 6.16 y Figura 6.17 que corresponden a las probetas T22fa, T22pa, T22fb y T22pb.

En la mayoría de las probetas T22fa (siete de las diez probetas) el comportamiento fue similar. En las curvas, se presenta un tramo inicial linealmente elástico, después, se observa una disminución gradual de la pendiente hasta alcanzar el esfuerzo máximo luego del cual se presenta una pérdida de capacidad mostrando un comportamiento frágil. La dispersión entre las curvas en el tramo lineal elástico es baja. Las probetas 2T22fa, 3T22fa y 10T22fa presentan un comportamiento post-pico cuasi frágil o cohesivo. Se observa que la probeta 3T22fa alcanza un esfuerzo máximo superior al de las otras probetas esto se debe, a que presentó una fisura que empieza horizontalmente y se desvía en forma diagonal hacia una aleta.

En las curvas de las probetas T22pa con excepción de la probeta 5T22pa se presenta un tramo inicial linealmente elástico y un tramo inelástico; una vez se alcanza el esfuerzo máximo se pierde la capacidad mostrando un comportamiento frágil. La probeta 5T22pa,

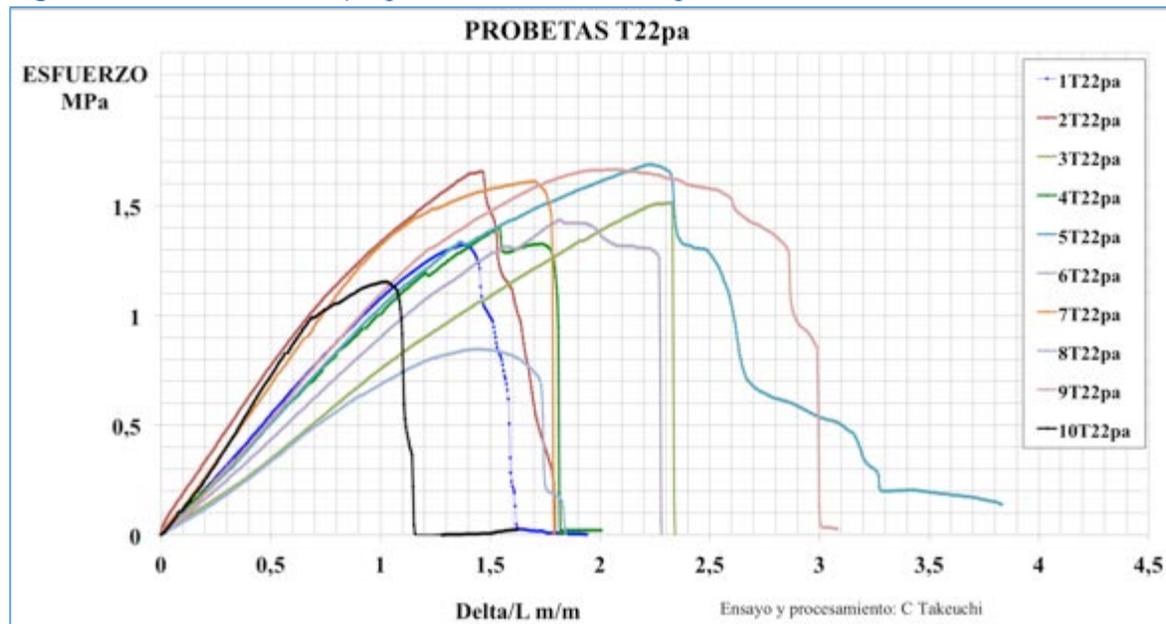
presenta un comportamiento cuasi frágil o cohesivo después de alcanzar el esfuerzo máximo. La dispersión entre las curvas en el tramo lineal elástico es moderada.

Figura 6.14. Esfuerzo vs  $\delta/L$  probetas a tensión T22fa



Fuente: Autor

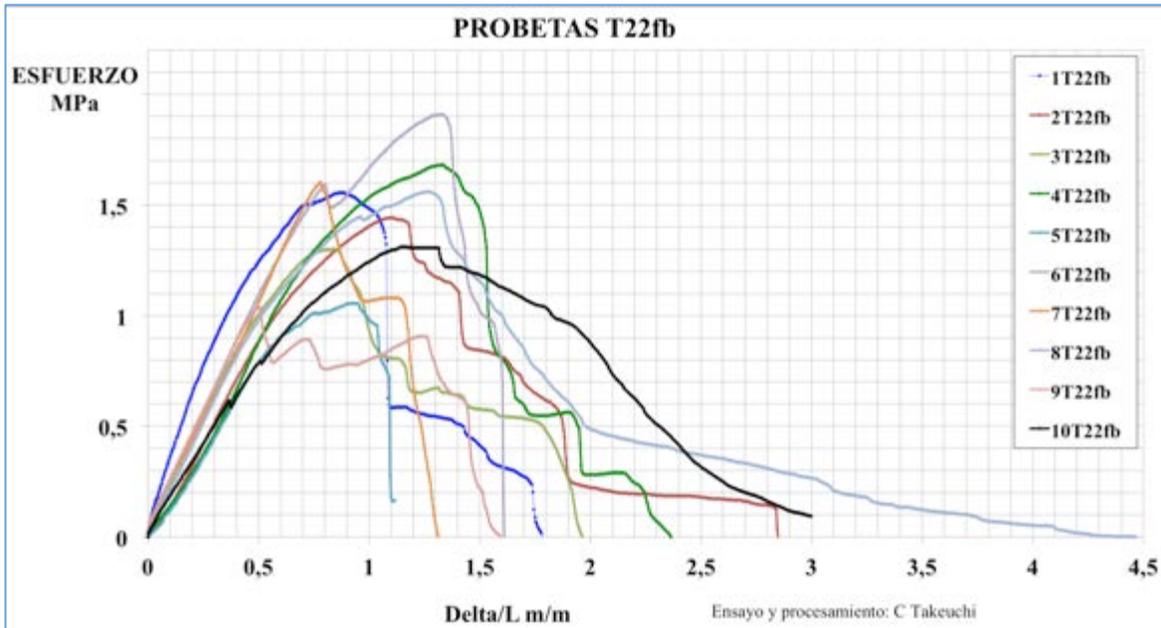
Figura 6.15. Esfuerzo vs  $\delta/L$  probetas a tensión T22pa



Fuente: Autor

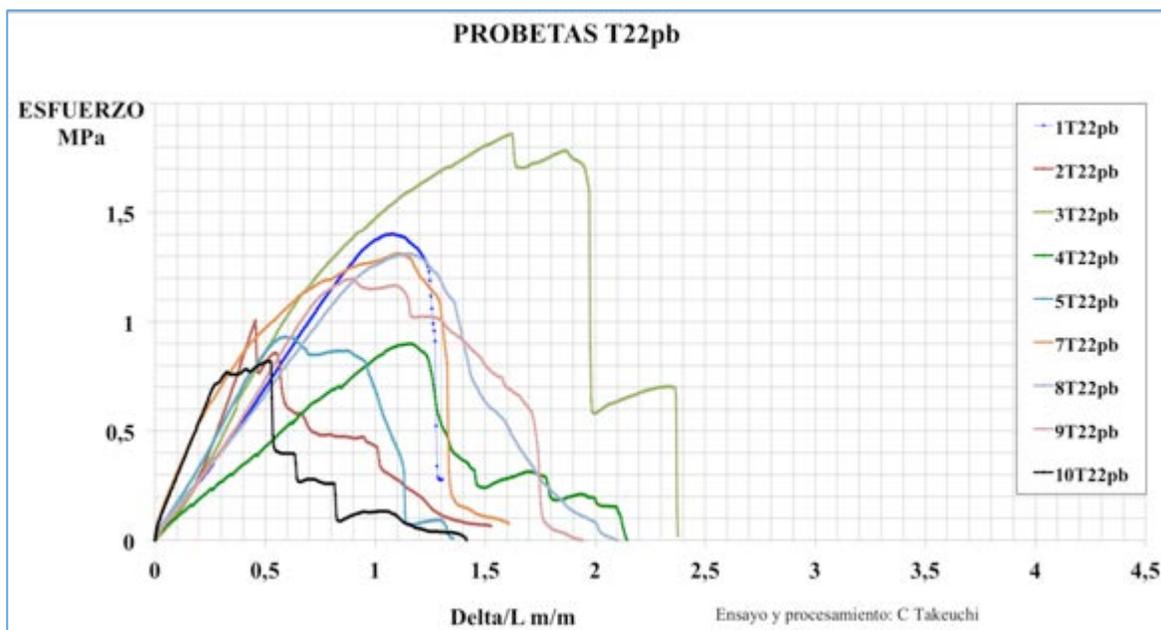
En la mayoría (alrededor del 70%) de las probetas T22fb y T22pb se presenta un comportamiento post-pico cuasi frágil o cohesivo. La dispersión entre las curvas T22fb en el tramo de carga es baja y en las probetas T22pb es moderada.

Figura 6.16. Esfuerzo vs  $\delta/L$  probetas a tensión T22fb



Fuente: Autor

Figura 6.17. Esfuerzo vs  $\delta/L$  probetas a tensión T22pb



Fuente: Autor

La resistencia a tensión perpendicular a la fibra en probetas T22,  $F_t$ , se calculó con base en la Ecuación 6.4 donde  $P_{max}$  es la carga máxima y  $A_t$  el área transversal de la sección reducida en la zona de la entalla solicitada a tensión.

$$F_t = \frac{P_{max}}{A_t} \quad \text{Ecuación 6.4}$$

El esfuerzo de falla a tensión perpendicular a la fibra en probetas T22,  $\sigma_{t\text{falla}}$ , se calculó con base en la Ecuación 6.5 donde  $P_{max}$  es la carga máxima y  $A_{falla}$  es el área de la superficie de fisura de la probeta la cual fue determinada una vez se terminó el ensayo de la probeta.

$$\sigma_{t\text{falla}} = \frac{P_{max}}{A_{falla}} \quad \text{Ecuación 6.5}$$

En la Tabla 6.2 se encuentran los valores de áreas reducidas en la zona de la entalla y áreas de la superficie de fisura determinados en la sección I.2 del anexo I. También se encuentran los valores de resistencia a tensión perpendicular a la fibra,  $F_t$ , y esfuerzos de falla,  $\sigma_{t\text{falla}}$ , para las probetas T22 .

Tabla 6.2. Resistencia a tensión perpendicular a la fibra,  $F_t$ , y esfuerzos de falla ,  $\sigma_{t\text{falla}}$

Probeta	$P_{max}$ N	Área reducida zona entalla mm <sup>2</sup>	$F_t$ MPa	Área superficie de fisura mm <sup>2</sup>	$\sigma_{t\text{falla}}$ MPa
1T22fa	848,8	687,19	<b>1,24</b>	775,88	<b>1,09</b>
2T22fa	731,8	716,07	<b>1,02</b>	1003,30	<b>0,73</b>
3T22fa	1629,6	742,40			
4T22fa	1351,7	842,89	<b>1,60</b>	1243,06	<b>1,09</b>
5T22fa	961,1	730,12	<b>1,32</b>	1064,20	<b>0,90</b>
6T22fa	1105,5	691,07	<b>1,60</b>	691,07	<b>1,60</b>
7T22fa	1127,0	756,73	<b>1,49</b>	756,73	<b>1,49</b>
8T22fa	1297,2	748,74	<b>1,73</b>	748,74	<b>1,73</b>
9T22fa	1185,7	854,50	<b>1,39</b>	854,50	<b>1,39</b>
10T22fa	783,6	676,60	<b>1,16</b>	676,60	<b>1,16</b>

Probeta	$P_{max}$ N	Área reducida zona entalla mm <sup>2</sup>	$F_t$ MPa	Área superficie de fisura mm <sup>2</sup>	$\sigma_{t\text{falla}}$ MPa
1T22fb	1349,9	867,51	<b>1,56</b>	1211,62	<b>1,11</b>
2T22fb	1152,8	773,47	<b>1,49</b>	1106,52	<b>1,04</b>
3T22fb	1194,9	918,58	<b>1,30</b>	1264,96	<b>0,94</b>
4T22fb	1472,8	828,22	<b>1,78</b>	1267,58	<b>1,16</b>
5T22fb	941,8	852,44	<b>1,10</b>	1137,53	<b>0,83</b>
6T22fb	1319,2	691,43	<b>1,91</b>	995,36	<b>1,33</b>
7T22fb	1451,7	905,70	<b>1,60</b>	1274,15	<b>1,14</b>
8T22fb	1389,3	890,75	<b>1,56</b>	1301,47	<b>1,07</b>
9T22fb	971,1	937,06	<b>1,04</b>	1334,71	<b>0,73</b>
10T22fb	1283,9	979,09	<b>1,31</b>	1161,51	<b>1,11</b>

Probeta	$P_{max}$ N	Área reducida zona entalla mm <sup>2</sup>	$F_t$ MPa	Área superficie de fisura mm <sup>2</sup>	$\sigma_{t\text{falla}}$ MPa
1T22pa	1108,7	839,72	<b>1,32</b>	839,72	<b>1,32</b>
2T22pa	1046,3	631,64	<b>1,66</b>	631,64	<b>1,66</b>
3T22pa	1176,6	754,18	<b>1,56</b>	754,18	<b>1,56</b>
4T22pa	1046,0	745,10	<b>1,40</b>	1197,21	<b>0,87</b>
5T22pa	1218,8	721,66	<b>1,69</b>	1499,55	<b>0,81</b>
6T22pa	1003,3	698,23	<b>1,44</b>	698,23	<b>1,44</b>
7T22pa	1165,5	723,47	<b>1,61</b>	723,47	<b>1,61</b>
8T22pa	698,8	827,10	<b>*0,84</b>	827,10	<b>0,84</b>
9T22pa	1431,5	859,62	<b>1,67</b>	859,62	<b>1,67</b>
10T22pa	781,3	677,91	<b>1,15</b>	677,91	<b>1,15</b>

Probeta	$P_{max}$ N	Área reducida zona entalla mm <sup>2</sup>	$F_t$ MPa	Área superficie de fisura mm <sup>2</sup>	$\sigma_{t\text{falla}}$ MPa
1T22pb	1216,0	867,25	<b>1,40</b>	1280,44	<b>0,95</b>
2T22pb	887,3	881,20	<b>1,01</b>	1055,85	<b>0,84</b>
3T22pb	1614,9	868,51	<b>1,86</b>	1220,05	<b>1,32</b>
4T22pb	896,9	998,05	<b>0,90</b>	1351,70	<b>0,66</b>
5T22pb	975,3	898,79	<b>1,09</b>	1227,48	<b>0,79</b>
7T22pb	1119,2	852,94	<b>1,31</b>	1485,25	<b>0,75</b>
8T22pb	1188,0	906,47	<b>1,31</b>	1229,40	<b>0,97</b>
9T22pb	1124,8	939,06	<b>1,20</b>	1354,16	<b>0,83</b>
10T22pb	687,8	839,18	<b>0,82</b>	839,18	<b>0,82</b>

El asterisco\* indica los resultados excluidos del promedio

Fuente: Autor

En probetas T22fa el valor promedio de resistencia a tensión perpendicular a la fibra fue de 1.39MPa con una desviación estándar de 0.23MPa y un coeficiente de variación de 0.17. El valor promedio de esfuerzo de falla a tensión perpendicular a la fibra fue de 1.29MPa con una desviación estándar de 0.33MPa y un coeficiente de variación de 0.27. En el cálculo de los anteriores valores, no se tuvo en cuenta el resultado del ensayo de la probeta 3T22fa debido a que no falló por tensión perpendicular a la fibra.

En las probetas T22pa el valor promedio de resistencia a tensión perpendicular a la fibra fue de 1.50MPa con una desviación estándar de 0.18MPa y un coeficiente de variación de 0.12. No se tuvo en cuenta la resistencia a tensión perpendicular a la fibra de la probeta 8T22pa, por considerarse un dato atípico según el criterio de exclusión de Chauvenet. El valor promedio de esfuerzo de falla a tensión perpendicular a la fibra fue de 1.29MPa con una desviación estándar de 0.34MPa y un coeficiente de variación de 0.26. Para este caso, ninguno de los datos de esfuerzos fue descartado como dato atípico.

En las probetas T22fb el valor promedio de resistencia a tensión perpendicular a la fibra fue de 1.46MPa con una desviación estándar de 0.28MPa y un coeficiente de variación de 0.19. El valor promedio de esfuerzo de falla a tensión perpendicular a la fibra fue de 1.05MPa con una desviación estándar de 0.17MPa y un coeficiente de variación de 0.17.

En las probetas T22pb, el valor promedio de resistencia a tensión perpendicular a la fibra fue de 1.21MPa con una desviación estándar de 0.31MPa y un coeficiente de variación de 0.26. El valor promedio de esfuerzo de falla a tensión perpendicular a la fibra fue de 0.88MPa con una desviación estándar de 0.19MPa y un coeficiente de variación de 0.21.

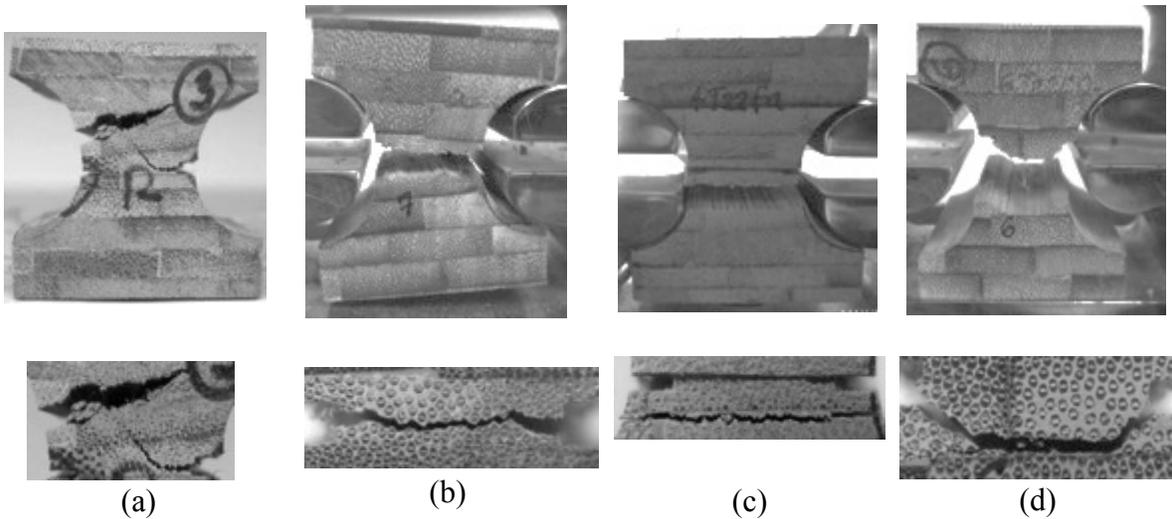
Al considerar las probetas T22 de todos los tipos, el valor promedio de resistencia a tensión perpendicular a la fibra fue de 1.39MPa con una desviación estándar de 0.27MPa y un coeficiente de variación de 0.19 y el valor promedio de esfuerzo de falla fue de 1.12MPa con una desviación estándar de 0.31MPa y un coeficiente de variación de 0.28.

### **6.2.3 Observaciones durante los ensayos**

#### **Probetas T22fa**

Las probetas T22fa presentaron una fisura perpendicular a la fibra en la parte central del alma, con excepción de la probeta 3T22fa, Figura 6.18(a), que muestra una fisura diagonal un poco más arriba. La probeta 7T22fa, Figura 6.18(b), fue la única cuya sección de falla coincide con el área reducida por las entalladuras. Las probetas 4T22fa y 5T22fa, fallaron por la zona de menor densidad de fibras de las láminas vecinas a la zona reducida por las entallas como se observa en la Figura 6.18(c). En el resto de probetas la fisura de falla empieza por las entalladuras, pero se desvía hacia las zonas de menor densidad de fibras de las láminas con entalladuras; en la Figura 6.18(d) se observa la fisura de la probeta 6T22fa.

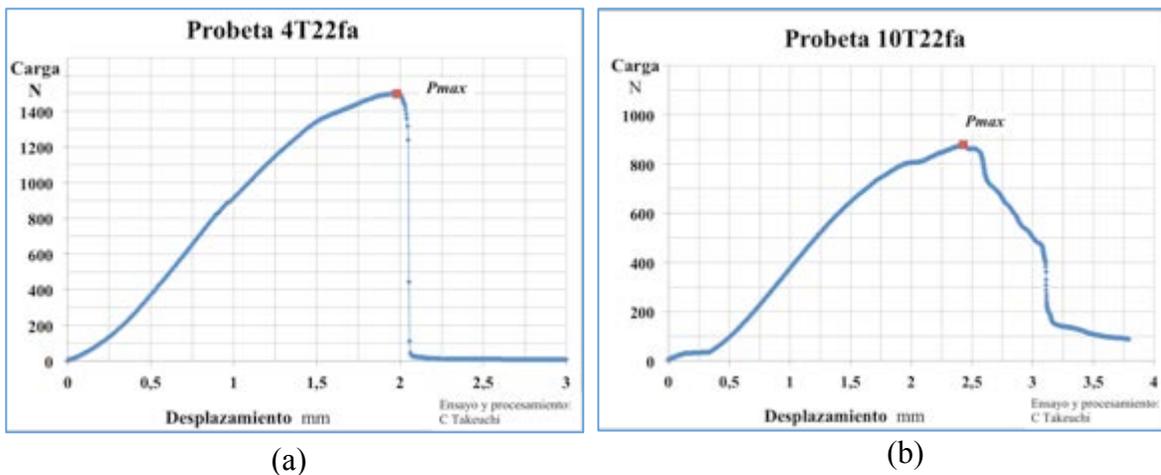
Figura 6.18. Fisuras de falla, vista general y acercamiento de probetas: (a) 3T22fa, (b) 7T22fa, (c) 4T22fa y (d) 6T22fa



Fuente: Autor

En general las probetas T22fa tienen diagramas carga desplazamiento similares. Se observa un tramo de acomodación y después de este un comportamiento linealmente elástico seguido de un tramo inelástico. Una vez que se alcanza la carga máxima, se pierde toda la capacidad mostrando un comportamiento frágil. En la Figura 6.19(a) se observa la gráfica carga desplazamiento de la probeta 4T22fa. El comportamiento de la curva carga desplazamiento de las probetas 2T22fa, 10T22fa y 3T22fa se diferencian del resto de probetas ya que después de alcanzar la carga máxima tienen un comportamiento post pico quasi frágil o cohesivo, como se observa en la Figura 6.19(b).

Figura 6.19. Gráficas carga desplazamiento probetas: (a) 4T22fa y (b) 2T22pa



Fuente: Autor

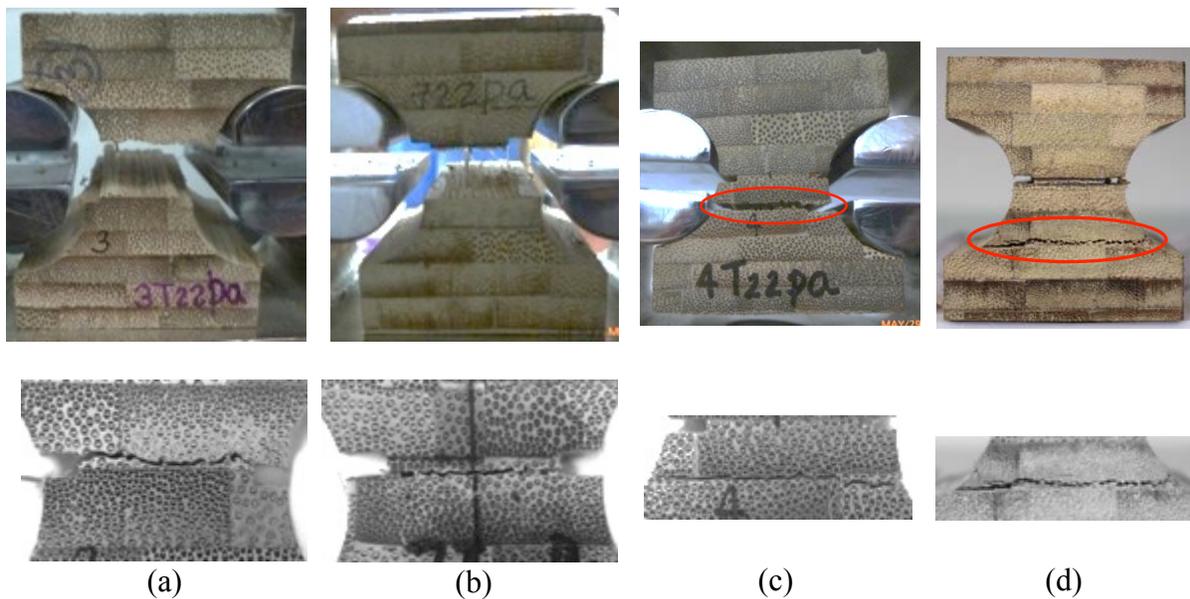
En la sección I.2 del Anexo I se encuentran las fotografías de las fallas de los ensayos T22fa y las curvas carga desplazamiento que no aparecen en el cuerpo del trabajo.

### Probetas T22pa

Todas las probetas T22pa con excepción de las probetas 4T22pa y 5T22pa presentaron una fisura en la zona reducida, perpendicular a la dirección de la carga que indica una falla por tensión perpendicular a la fibra. La fisura se presenta por desprendimiento de las fibras de la matriz de parénquima, en los tableros con menor densidad de fibras en la zona reducida. En las probetas 4T22pa y 5T22pa se presentaron fisuras fuera del área reducida por los entalles.

En la Figura 6.20 se observan las fallas de las probetas 3T22pa y 7T22pa que fallaron en el área reducida por los entalles y 4T22pa y 5T22pa que fallaron fuera del área reducida.

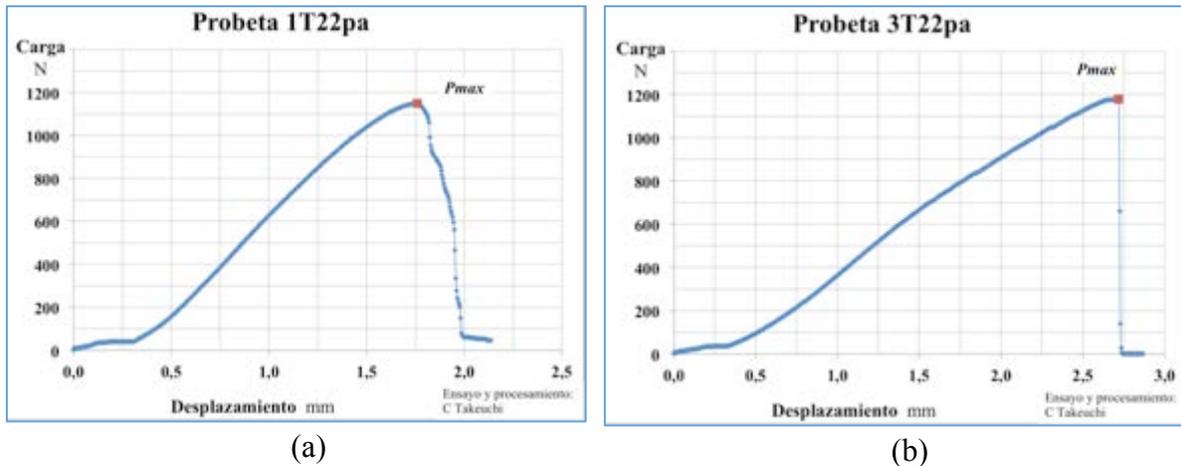
Figura 6.20. Fisuras en probetas, vista general y acercamiento de probetas: (a) 3T22pa, (b) 7T22pa, (c) 4T22pa y (d) 5T22pa



Fuente: Autor

Las probetas T22pa tienen diagramas carga desplazamiento similares. La primera parte de acomodación, después una parte lineal elástica y una inelástica antes de la falla. Una vez que se alcanza la carga máxima, se pierde toda la capacidad mostrando un comportamiento frágil. En la Figura 6.21 se observan las gráficas carga desplazamiento de las probetas 1T22pa y 4T22pa.

Figura 6.21. Gráficas carga desplazamiento probetas: (a) 1T22pa y (b) 4T22pa



Fuente: Autor

En la sección I.2 del Anexo I se encuentran las fotografías de las fallas de los ensayos T22pa y las curvas carga desplazamiento que no aparecen en el cuerpo del trabajo.

### Probetas T22fb

Las probetas presentaron fisuras perpendiculares a la dirección de la carga en la parte central del alma fuera del área reducida por las entallas. En general, el plano de falla fue relativamente horizontal, pasando por la zona de menor densidad de fibras de los tableros, como se observa en la probeta 7T22fb mostrada en la Figura 6.22(a).

En las probetas 3T22fb, 5T22fb y 10T22fb, parte de la superficie de falla pasa por el área reducida por los entalles y parte pasa por la zona de menor densidad de los tableros; en la Figura 6.22(b) se observa la probeta 3T22fb ya ensayada. En la probeta 8T22fb, mostrada en la Figura 6.22(c) la superficie de falla, atraviesa el área reducida, fisurándose por zonas de menor densidad de fibra. En la sección I.2 del Anexo I se encuentran las fotografías de las fallas de los ensayos T22fb y las curvas carga desplazamiento que no aparecen en el cuerpo del trabajo.

En general las probetas T22fb tienen diagramas carga desplazamiento similares. Después del tramo de acomodación, el comportamiento es elástico y posteriormente inelástico hasta la carga máxima como se observa en las gráficas carga desplazamiento que corresponden a las probetas 1T22fb, 3T22fb y 10T22fb mostradas en la Figura 6.23. En algunos casos la falla no se produce al alcanzar la carga máxima. En las probetas 7T22fb (Figura 6.23(c)) y 9T22fb, no hay tramo inelástico antes de alcanzar la carga máxima.

Figura 6.22. Vistas lateral izquierda, frontal, lateral derecha y posterior, posterior a la falla, de las probetas: (a) 7T22fb, (b) 3T22fb y (c) 8T22fb

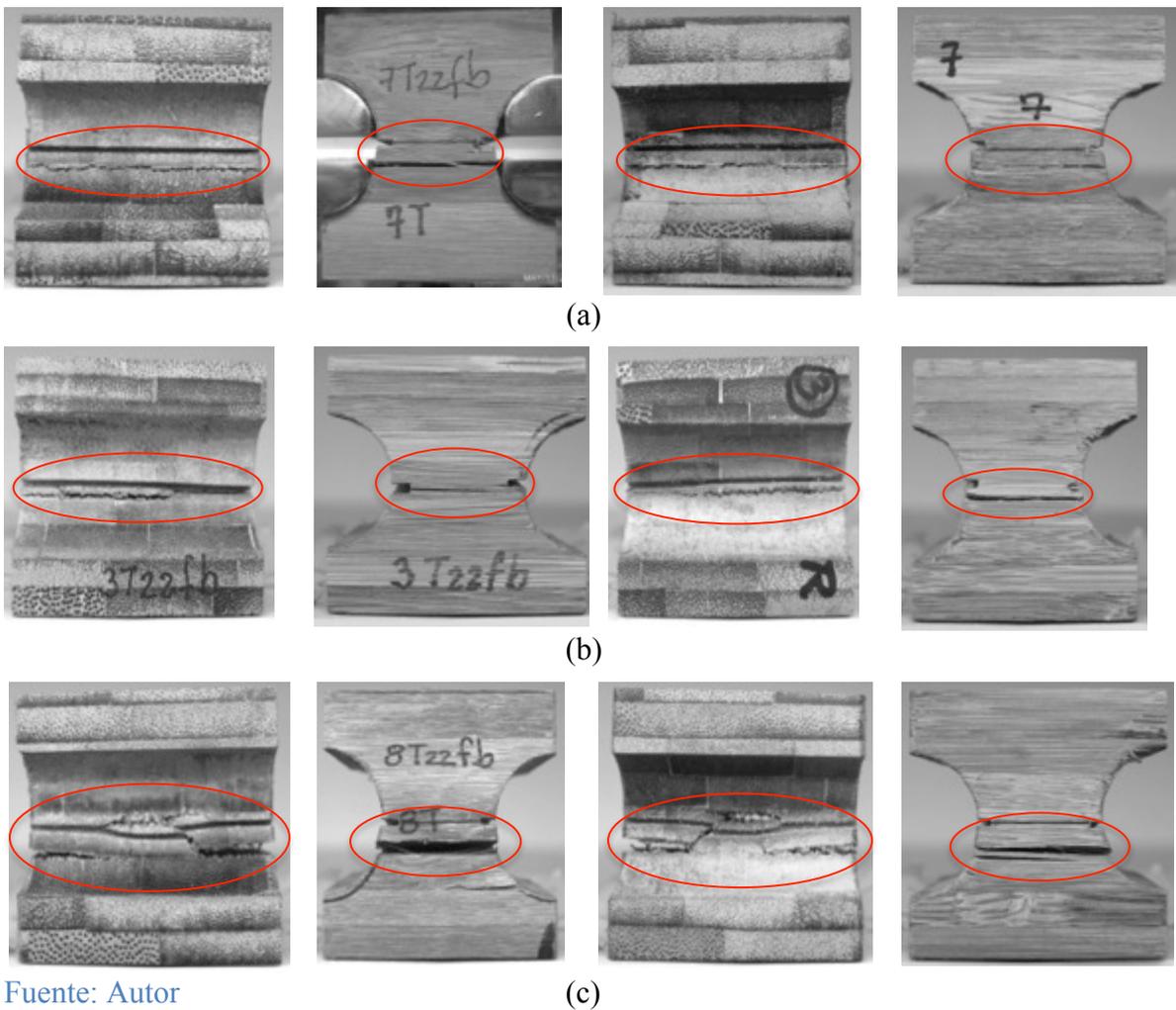


Figura 6.23. Gráficas carga desplazamiento probetas: (a) 1T22fb, (b) 3T22fb, (c) 7T22fb y (d) 10T22fb

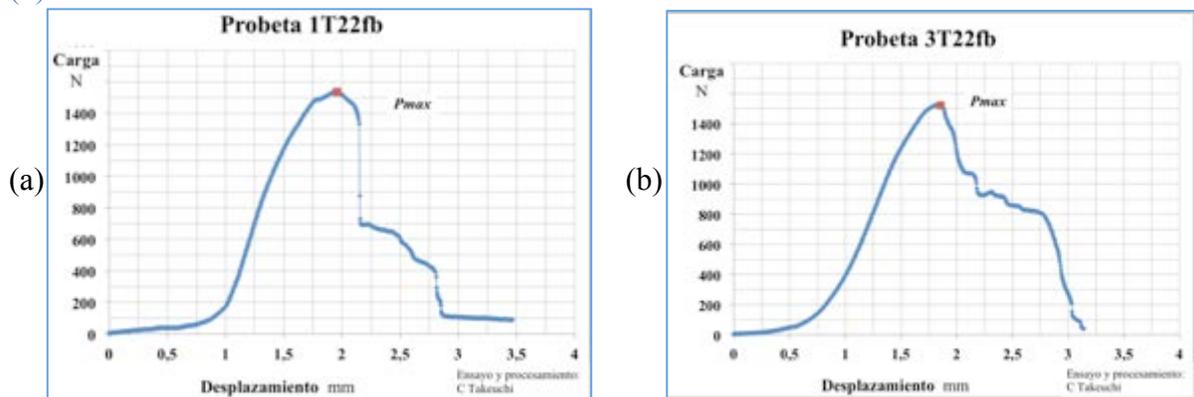
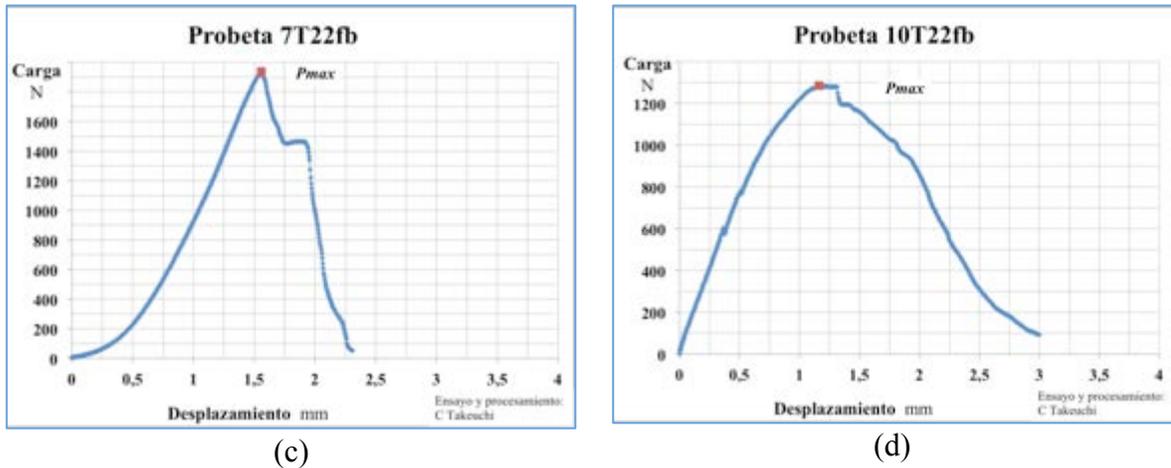


Figura 6.23. Gráficas carga desplazamiento probetas: (a) 1T22fb, (b) 3T22fb, (c) 7T22fb y (d) 10T22fb (Continuación)



Fuente: Autor

### Probetas T22pb

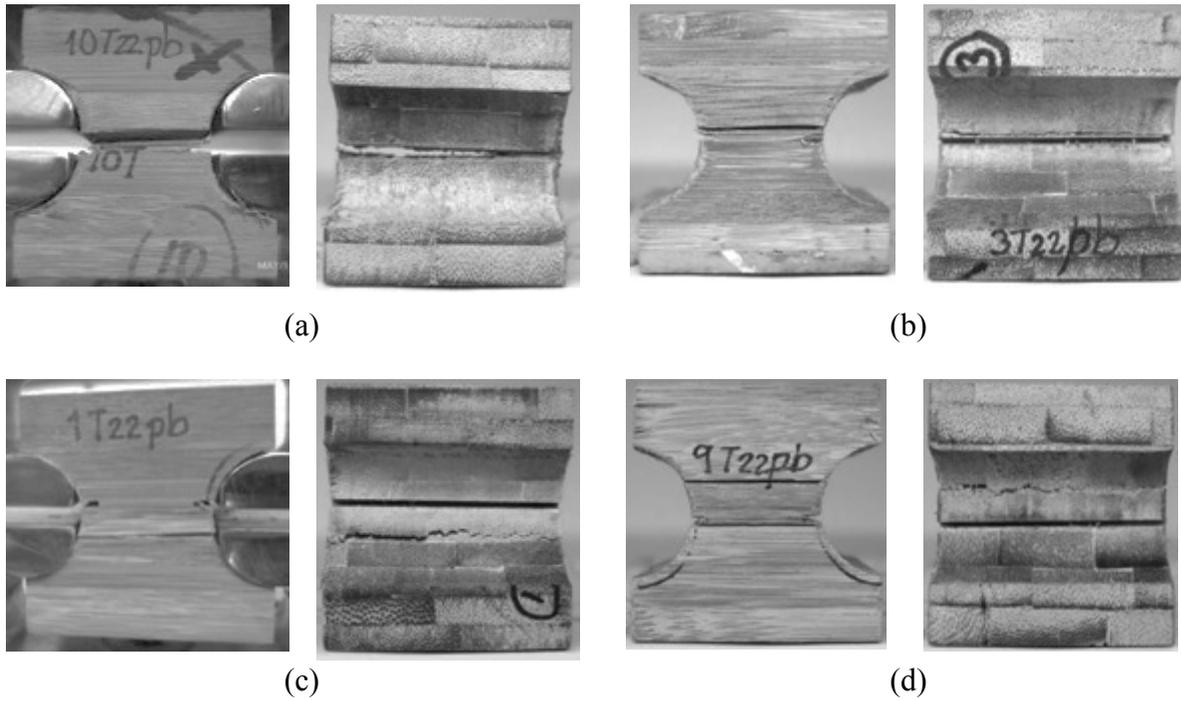
Las probetas presentaron fisuras perpendiculares a la dirección de la carga indicando falla por tensión perpendicular a la fibra; la superficie de falla fue relativamente horizontal, pasando por la zona de menor densidad de fibras de los tableros afectados. De todas las probetas, la única que falló en el área crítica fue la 10T22pb, Figura 6.24(a), no falló por adherencia sino por desprendimiento de fibras de uno de los tableros con área reducida por la entalladura.

Las probetas 2T22pb, 3T22pb y 5T22pb presentaron fisuras perpendiculares a la dirección de la carga, por desprendimiento de fibras en zonas cercanas a la entalladura, pero no exactamente donde el área había sido reducida. En la Figura 6.24(b) se observa la vista posterior y una de las laterales de la probeta 3T22 una vez ha sido ensayada.

El plano de falla de las probetas 1T22pb, 4T22pb, 7T22pb, 8T22pb y 9T22pb se localizó a una distancia de un espesor de tablero del área reducida por las entallas. En algunas veces por la cara alejada de un tablero vecino a la entalladura o en otros, por la cara de un tablero no vecino a la entalla. En la Figura 6.24(c) y la Figura 6.24(d) se observan las vistas frontales y una lateral de las probetas 1T22pb y 9T22pb.

Los diagramas carga desplazamiento de las probetas T22pb son similares a los de las probetas T22fb. Posterior al tramo de acomodación, el comportamiento es elástico y después inelástico hasta alcanzar la carga máxima como se observa en las gráficas carga desplazamiento que corresponden a las probetas 7T22pb, 8T22pb y 10T22pb mostradas en la Figura 6.25(a), (b) y (c). En la probeta 2T22pb, Figura 6.25(d) no hay tramo inelástico antes de alcanzar la carga máxima.

Figura 6.24. Falla de probetas: (a) 10T22pb, (b) 3T22pb, (c) 1T22pb y (d) 9T22pb



Fuente: Autor

En la sección I.2 del Anexo I se encuentran las fotografías de las fallas de los ensayos T22pb y las curvas carga desplazamiento que no aparecen en el cuerpo del trabajo.

Figura 6.25. Gráficas carga desplazamiento probetas: (a) 7T22pb, (b) 8T22pb, (c) 10T22fb y (d) 2T22pb

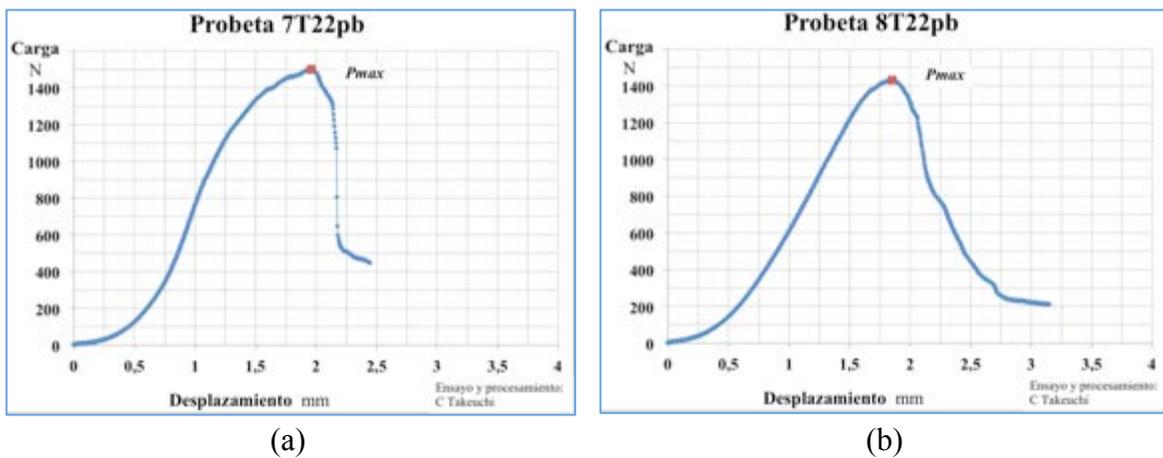
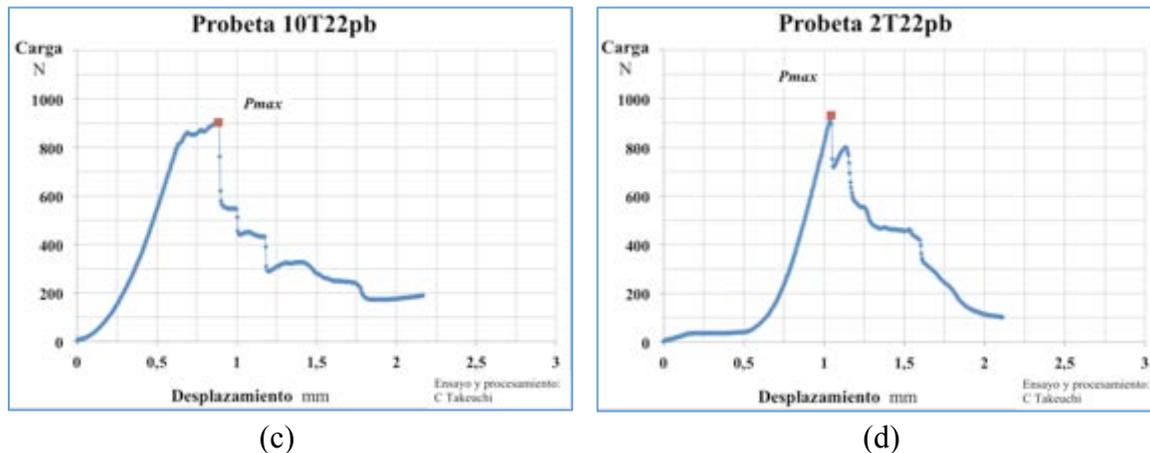


Figura 6.25. Gráficas carga desplazamiento probetas: (a) 7T22pb, (b) 8T22pb, (c) 10T22fb y (d) 2T22pb (continuación)



Fuente: Autor

#### 6.2.4 Análisis de resultados

En la mayoría de las curvas Esfuerzo vs Delta/L de las probetas T22a se presenta un tramo inicial linealmente elástico seguido de un tramo inelástico antes de alcanzar el esfuerzo máximo. Una vez alcanzado el esfuerzo máximo se presenta una pérdida de capacidad mostrando un comportamiento frágil. La dispersión entre las curvas de las probetas T22fa en el tramo lineal elástico es baja y moderada en las probetas T22pa.

En la mayoría (alrededor del 70%) de las probetas T22b se presenta un comportamiento post-pico cuasi frágil o cohesivo. La dispersión entre las curvas T22fb en el tramo de carga es baja y en las probetas T22pb es moderada.

La superficie de fisura en las probetas T22fa no siempre fue perpendicular a la dirección de la carga. En muchas ocasiones las fisuras empiezan por la entalladura pero se desvían a zonas de menor densidad de fibra.

La entalladura en la pega en las probetas T22pa, abarca no sólo la parte del adhesivo, que tiene un espesor muy delgado sino parte de los tableros adyacentes. La mayoría de las probetas T22pa presentaron fisura en la zona reducida por las entallas. En estas probetas, la falla no se presenta por la adherencia entre los tableros y el adhesivo sino por tensión perpendicular a la fibra en los tableros que en la zona de las entallas tienen menor densidad de fibra. En las probetas 4T22pa y 5T22pa la falla fue similar pero fuera del área crítica. En todas las probetas T22pa, la fisura de falla es perpendicular a la dirección de la carga.

Las probetas T22fb presentaron fallo por tensión perpendicular a la fibra en la parte central del alma. El plano de falla se encuentra en su totalidad o en parte, fuera del área reducida

por las entallas siendo relativamente horizontal y pasando por la zona de menor densidad de fibras de los tableros.

Las probetas T22pb fallaron por tensión perpendicular a la fibra; el plano de falla fue relativamente horizontal, pasando por la zona de menor densidad de fibras de los tableros afectados. Sólo una de las probetas falló en el área reducida, algunas, en zonas cercanas a las entallas, otros a una distancia aproximada de un espesor de tablero del área reducida. Ninguna falla se presentó por adherencia.

De los ensayos de los cuatro tipos de probetas T22 se concluye, que el área reducida por las entallas no necesariamente es el área de la superficie de la fisura.

En general la curva carga desplazamiento para las probetas T22 tiene una zona de acomodamiento, una parte elástica y una parte inelástica antes de la carga máxima. Después de alcanzar la carga máxima, la probeta falla.

El valor promedio de resistencia a tensión perpendicular (calculado con el área de la sección reducida) a la fibra en las probetas T22fa fue de 1.39MPa, en probetas T22pa fue 1.50MPa, en probetas T22fb fue de 1.46MPa y en probetas T22pb fue de 1.21MPa. Al considerar las probetas T22 de todos los tipos, el valor promedio fue de 1.39MPa con una desviación estándar de 0.27MPa y un coeficiente de variación de 0.21. López & Correal (López & Correal, 2009) reportan un valor promedio de resistencia radial de tensión perpendicular a la fibra de 1.1MPa con una desviación correal, Correal y colaboradores (Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014) reportan un valor promedio de 2.6MPa con un coeficiente de variación de 0.23 y Cortés y colaboradores (Cortes, Lozano, Rusinque, & Takeuchi, 2010) encontraron un valor promedio de 0.83MPa.

El valor promedio de esfuerzo de falla de tensión perpendicular a la fibra en las probetas T22fa y T22pa fue de 1.29MPa, en probetas T22fb fue de 1.05MPa y en probetas T22pb fue de 0.88MPa. Al considerar las probetas T22 de todos los tipos, el valor promedio de esfuerzo de falla fue de 1.12MPa con una desviación estándar de 0.31MPa y un coeficiente de variación de 0.28.

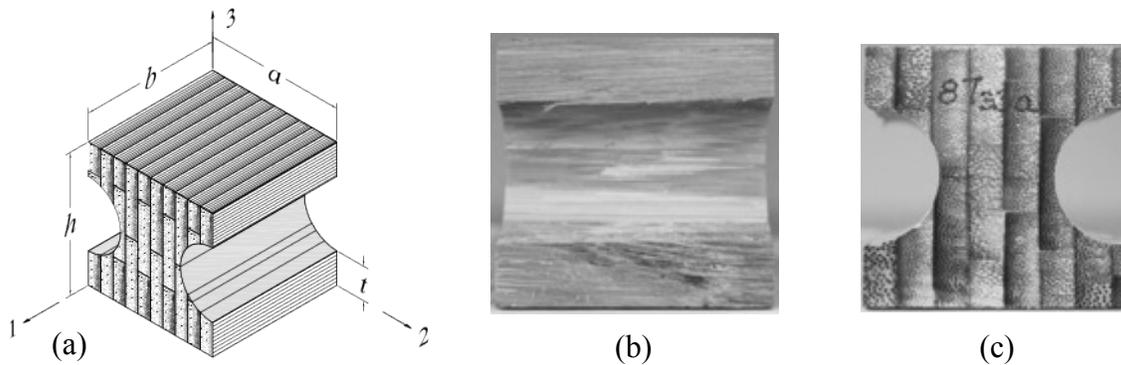
Al hacer ensayos de tensión perpendicular a la fibra, es importante medir el ancho de la fisura, el cual puede ser mayor al ancho esperado de falla. Los valores promedio de esfuerzo de falla son menores a los valores de resistencia debido a que en algunas ocasiones el área de falla fue mayor al área reducida.

### 6.3 TENSION PERPENDICULAR A LA FIBRA PARALELO AL PLANO DE LOS TABLEROS EN PROBETAS DE BGLPP

Las probetas T33 se encuentran solicitadas a esfuerzo axial perpendicular a la fibra paralelo al plano de los tableros, por esto, el esfuerzo de tensión en cada lámina es perpendicular a zonas de densidad de fibras variable. En las probetas T33a, el eje de los semicilindros es paralelo al eje 1 como se observa en la Figura 6.1(e) y en las probetas T33b el eje de los semicilindros es perpendicular al eje 1 como se observa en la Figura 6.1(f). En la Figura 6.26 se observa un esquema de las probetas T33a y las vistas lateral y frontal de la probeta 8T33a y en la Figura 6.27 se observa un esquema de las probetas T33b y las vistas lateral y frontal de la probeta 8T33b.

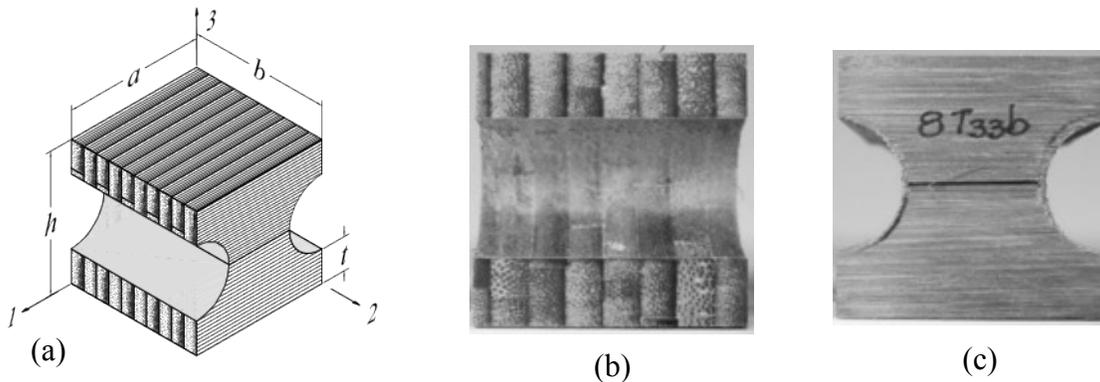
Se realizaron 19 ensayos de tensión perpendicular a la fibra paralelo al plano de los tableros en probetas T33, 10 en probetas T33a y 9 en probetas T33b.

Figura 6.26 Probeta 8T33a: (a) esquema, (b) lateral izquierdo y (c) frontal



Fuente: Autor

Figura 6.27 Probeta 8T33b: (a) esquema, (b) lateral izquierdo y (c) frontal



Fuente: Autor

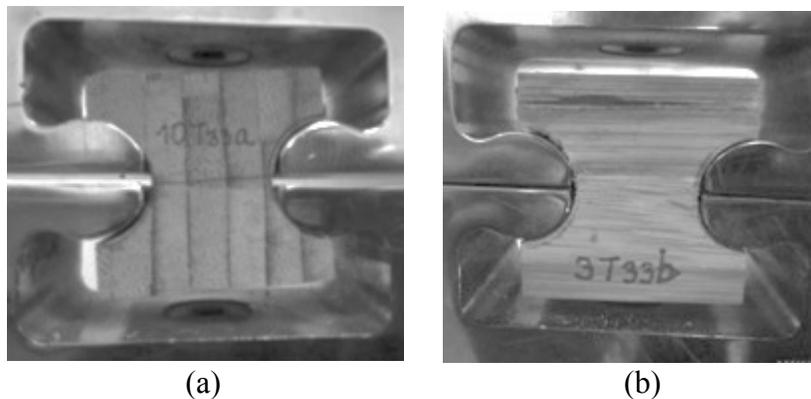
En el Anexo I se encuentran para cada probeta las vistas de sus caras donde la superior e inferior corresponden al plano 3. En el caso de las probetas T33a, las vistas frontal y posterior corresponden al plano 1 y las laterales al plano 2 mientras que para las probetas T33b las vistas frontal y posterior corresponden al plano 2 y las vistas laterales al plano 1.

### 6.3.1 Descripción de los ensayos

Los ensayos fueron realizados a una velocidad de 0.04mm/s (2.5mm/min). En la Figura 6.28 se observa el montaje de la probeta 10T33a y de la probeta 3T33b.

Para cada probeta, se tomaron cuatro medidas de ancho,  $a$ , espesor,  $b$ , y altura,  $h$  y dos medidas del ancho de la sección crítica y la altura de cada aleta,  $t$ . En la Tabla I.12 y la Tabla I.13 de la sección I.3 del anexo I se encuentran los valores anteriormente mencionados, para las probetas T33a Y T33b.

Figura 6.28. Montaje de probetas: (a) 10T33a y (b) 3T33b



Fuente: Autor

### 6.3.2 Cálculos y resultados

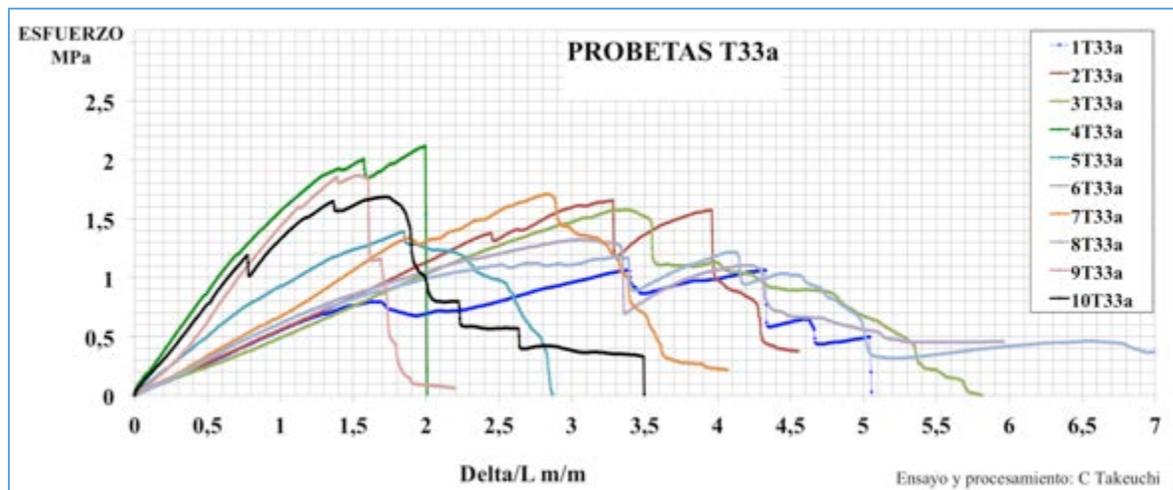
El esfuerzo de tensión aplicado en un momento dado fue calculado como la relación entre la fuerza aplicada,  $P$ , y el área transversal de la sección mínima,  $A_t$ , como se indica en la Ecuación 6.3. de la sección 6.2.2.

Con base en los esfuerzos y las relaciones entre el desplazamiento del plato de carga y una longitud unitaria ( $L=1\text{mm}$ ), se obtuvieron las gráficas mostradas en la Figura 6.29 y la Figura 6.30 que corresponden a las probetas T33a y T33b.

En la mayoría de las probetas T33a se observa un comportamiento post-pico cuasi frágil o cohesivo. En algunos casos, se observan descargas en el tramo de carga, antes de alcanzar

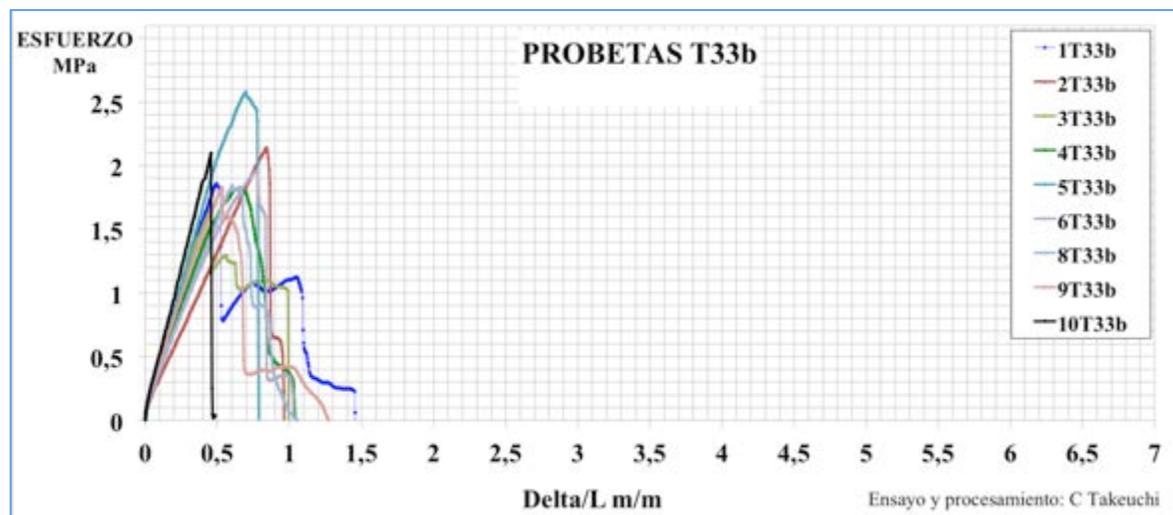
el esfuerzo máximo. El ensayo realizado no logra inducir un mecanismo de falla común y en consecuencia la dispersión de las respuestas mecánicas es alta..

Figura 6.29. Esfuerzo vs  $\delta/L$  probetas a tensión T33a



Fuente: Autor

Figura 6.30. Esfuerzo vs  $\delta/L$  probetas a compresión T33b



Fuente: Autor

El comportamiento de las probetas T33b es frágil. En el tramo de carga se observa un comportamiento elástico hasta alcanzar el esfuerzo máximo y, a diferencia de las probetas T33a, posterior a este se presenta una pérdida de capacidad de resistencia rápida. La dispersión de las curvas en el tramo de carga es baja.

Para aquellas probetas T33 que fallaron por tensión perpendicular a la fibra, se calculó su resistencia,  $F_t$ , como la relación entre la carga máxima,  $P_{max}$ , y el área crítica a tensión de la sección transversal,  $A_t$ , utilizando la Ecuación 6.4 de la sección 6.2.2.

El esfuerzo de falla,  $\sigma_{falla}$ , a tensión perpendicular a la fibra en las probetas T33 que fallaron por tensión perpendicular se calculó como la relación entre la carga máxima,  $P_{max}$ , y el área de falla de la probeta,  $A_{falla}$ , utilizando la Ecuación 6.5 mencionada en la sección 6.2.2.

En la Tabla 6.3 se encuentran los valores de áreas críticas a tensión y áreas de falla mostrados en las Tablas I.13 e I.15 de la sección I.3 del anexo I. También se encuentran los valores de resistencia a tensión perpendicular a la fibra,  $F_t$ , y esfuerzos en la superficie de fisuración,  $\sigma_{falla}$ , para las probetas 1T33a, 4T33a, 7T33a, 9T33a y 10T33a. La probeta 4T33a presentó fallo por tensión perpendicular a la fibra en el alma y las probetas 1T33a, 7T33a, 9T33a y 10T33a, que aunque inicialmente presentaron fisuras diagonales en la unión alma aleta, finalmente presentaron también fisuras de tensión perpendicular en el alma de la probeta.

Las probetas T33a que finalmente fallaron por tensión perpendicular a la fibra, tuvieron un valor promedio de resistencia a tensión perpendicular a la fibra de 1.86MPa con una desviación estándar de 0.19MPa y un coeficiente de variación de 0.10 y un valor promedio de esfuerzo de falla de 1.77MPa con una desviación estándar de 0.20MPa y un coeficiente de variación de 0.11. Para el cálculo de los valores promedios no se tuvieron en cuenta los resultados de la probeta 1C33a, por ser valores atípicos según el criterio de Chauvenet.

Tabla 6.3. Resistencia a tensión perpendicular a la fibra,  $F_t$ , y esfuerzos de falla,  $\sigma_{falla}$

Probeta	$P_{max}$ N	Area mínima mm <sup>2</sup>	$F_t$ MPa	Area superficie de fisura mm <sup>2</sup>	$\sigma_{falla}$ MPa
1T33a	1148,2	1080,16	*1,06	1112,72	*1,03
2T33a	1954,7	1156,13			
3T33a	1645,2	1043,86			
4T33a	2680,5	1265,73	2,12	1296,69	2,07
5T33a	1731,4	1245,71			
6T33a	1518,6	1118,40			
7T33a	2115,6	1213,02	1,74	1312,74	1,61
8T33a	1389,3	1109,12			
9T33a	2394,4	1262,27	1,90	1385,79	1,73
10T33a	2134,0	1266,58	1,68	1266,58	1,68

Probeta	$P_{max}$ N	Area mínima mm <sup>2</sup>	$F_t$ MPa	Area superficie de fisura mm <sup>2</sup>	$\sigma_{falla}$ MPa
1T33b	2279,7	1228,43	1,86	1345,33	1,69
2T33b	2904,4	1358,31	2,14	1437,73	2,02
3T33b	2148,2	1300,45	1,65	1300,45	1,65
4T33b	2242,1	1233,47	1,82	1354,98	1,65
5T33b	3321,5	1288,86	*2,58	1333,22	*2,49
6T33b	2319,7	1182,68	1,96	1191,90	1,95
8T33b	2416,8	1310,94	1,84	1362,28	1,77
9T33b	2232,5	1219,97	1,83	1297,93	1,72
10T33b	2722,2	1298,28	2,10	1312,10	2,07

El asterisco\* indica los resultados excluidos del promedio

Fuente: Autor

En la misma Tabla 6.3 se encuentran los valores de áreas críticas a tensión, áreas de falla, resistencia a tensión perpendicular a la fibra,  $F_t$ , y esfuerzos de falla,  $\sigma_{falla}$ , para las

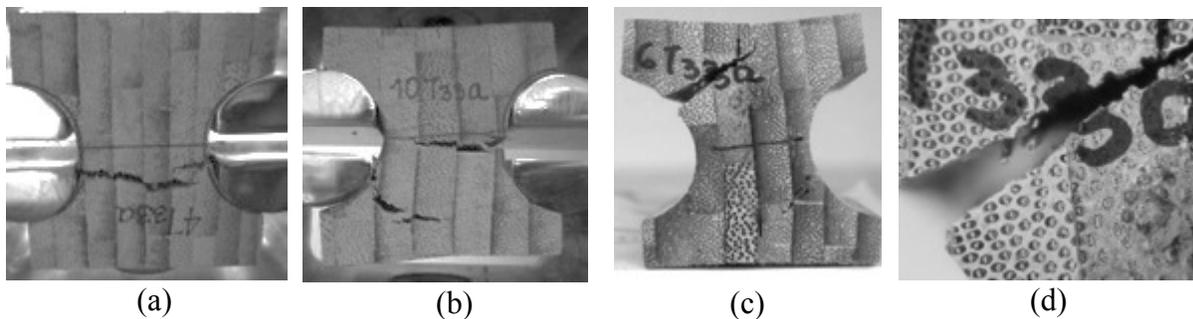
probetas T33b. El valor promedio de resistencia a tensión perpendicular a la fibra fue de 1.90MPa con una desviación estándar de 0.16MPa y un coeficiente de variación de 0.06. El valor promedio de esfuerzo de falla a tensión perpendicular a la fibra fue de 1.82MPa con una desviación estándar de 0.17MPa y un coeficiente de variación de 0.09. Para el cálculo de los valores promedio se descartaron los valores de esfuerzos de la probeta 5T33b utilizando el criterio de exclusión de Chauvenet.

### 6.3.3 Observaciones durante los ensayos

#### Probetas T33a

Las probetas T33a, con excepción de la probeta 4T33a, presentaron fisuras de tensión diagonal en la unión alma aleta. Las probetas 1T33a, 7T33a, 9T33a y 10T33a, que aunque inicialmente presentaron fisuras diagonales, finalmente presentaron también fisuras de tensión perpendicular en el alma de la probeta. La probeta 4T33a falló por tensión perpendicular a la fibra en el alma. En ninguno de los tipos de fallas, las fisuras atraviesan los haces de fibras. En la Figura 6.31 se muestran las probetas 4T33a, 10T33a y 6T33a después de haber sido ensayadas y un acercamiento de las fisuras en la probeta 6T33a.

Figura 6.31. Vista frontal después de ensayo y acercamiento de fisuras de falla de las probetas: (a) 1T33a, (b) 4T33a, (c) 6T33a y (d) acercamiento fisuras 6T33a.

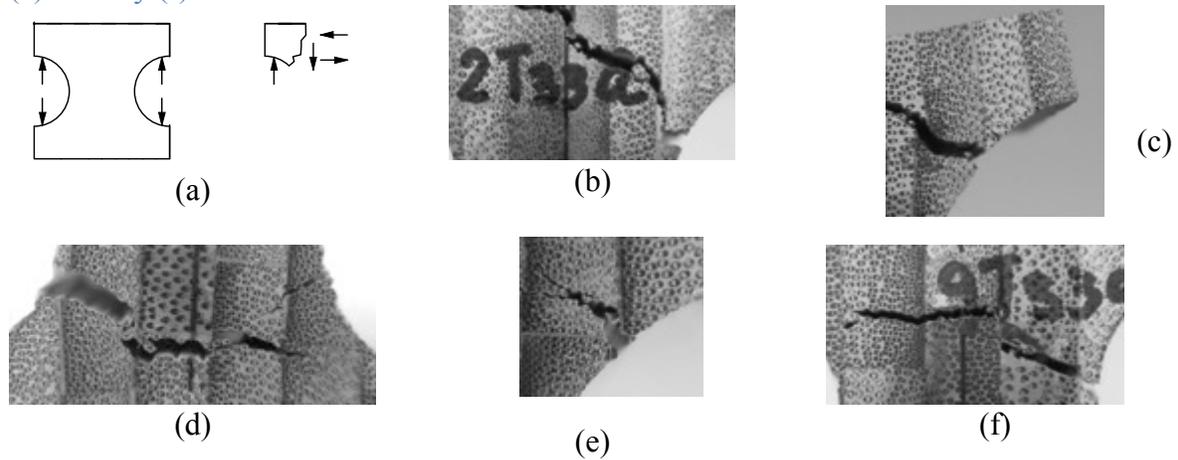


Fuente: Autor

En la Figura 6.32(a) se observa un diagrama de cuerpo libre de una sección de la aleta. En la parte inferior de la sección mostrada, la fuerza resultante entre el cortante y la fuerza normal de tensión por el momento interno es una fuerza de tensión diagonal. Como se observa en diferentes imágenes de las probetas ensayadas, la mayoría de las probetas fallaron por tensión diagonal en algunas de sus cuatro aletas.

Por la misma razón, en el centro de la parte superior antes que se presente la fisura, puede haber compresión. Por esto, durante el ensayo se observó que al separarse las mordazas, las probetas se deformaban de tal manera que los extremos de las aletas superiores se levantaban con respecto al centro y las aletas inferiores bajaban, funcionando como voladizos.

Figura 6.32. Fisuras por tensión diagonal: (a) esquema, (b) 2T33a, (c) 3T33a, (d)7T33a, (e)8T33a y (f) 9T33a



Fuente: Autor

La forma de los diagramas carga desplazamiento de las probetas T33a variaron. En la algunos casos, se observan procesos de carga y descarga antes de alcanzar la carga máxima, lo que indica la aparición o crecimiento de las fisuras durante el ensayo. En algunas probetas, la carga fue aumentando hasta alcanzar la carga máxima. Después de alcanzar la carga máxima hay pérdida de resistencia; en algunos casos gradual y en otros de manera brusca. De todas las probetas, la 4T33a, es la única cuya descarga es tan abrupta, que una vez alcanzada la carga máxima, falla. En la Figura 6.33 se observan las gráficas carga desplazamiento de las probetas 1T33a, 3T33a, 4T33a y 5T33a.

Figura 6.33. Gráficas carga desplazamiento probetas: (a) 1T33a, (b) 3T33a, (c) 4T33a y (d) 5T33a

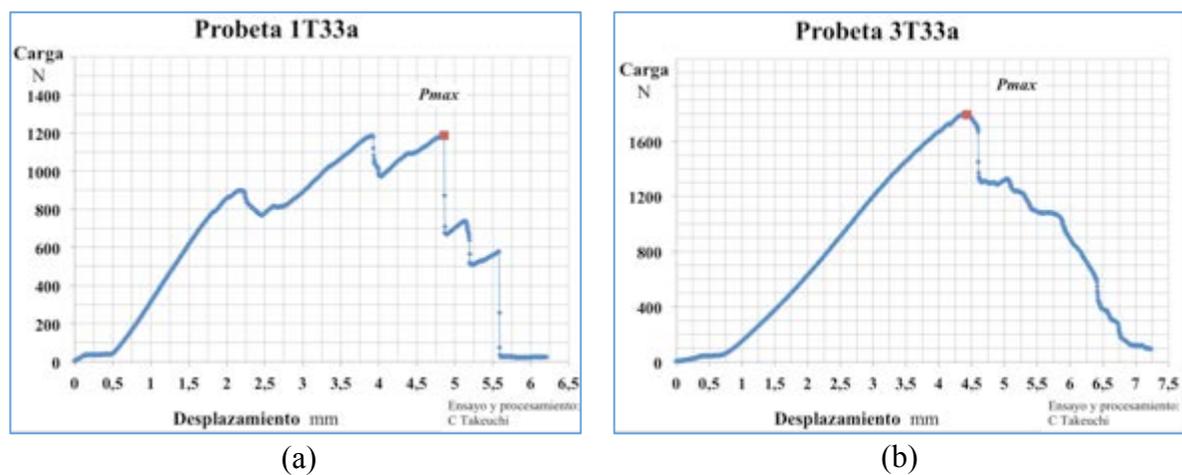
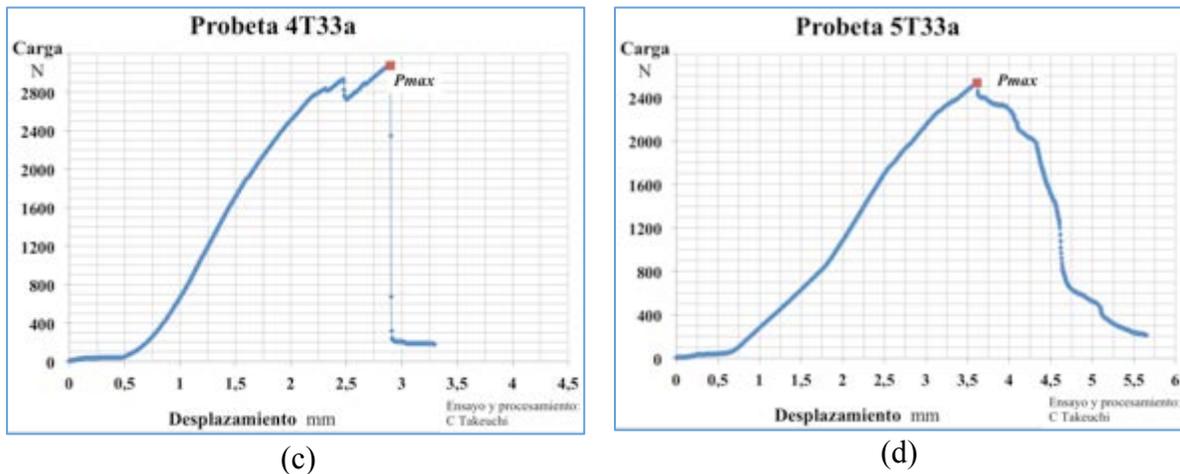


Figura 6.33. Gráficas carga desplazamiento probetas: (a) 1T33a, (b) 3T33a, (c) 4T33a y (d) 5T33a (Continuación)



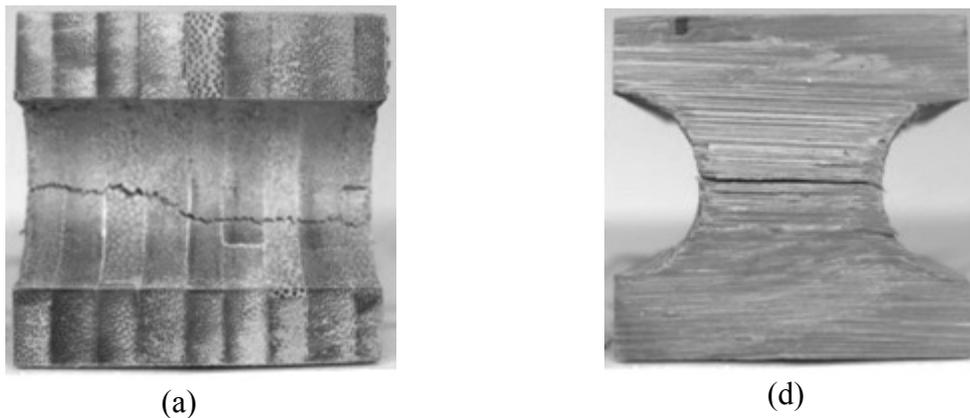
Fuente: Autor

En la sección I.3 del Anexo I se encuentran las fotografías de las fallas de los ensayos T33a y las curvas carga desplazamiento que no aparecen en el cuerpo del trabajo.

### Probetas T33b

Todas las probetas fallaron por tensión perpendicular a la fibra en la parte central del alma. El plano de falla no necesariamente pasa por el área crítica, algunas veces por debajo, otras por encima y otras en parte del área crítica. En la Figura 6.34 se observan la vista lateral izquierda y posterior de la probeta 5T33b después del ensayo.

Figura 6.34. Probeta 5T33b después de ensayo, vistas: (a) lateral izquierda y (b) posterior

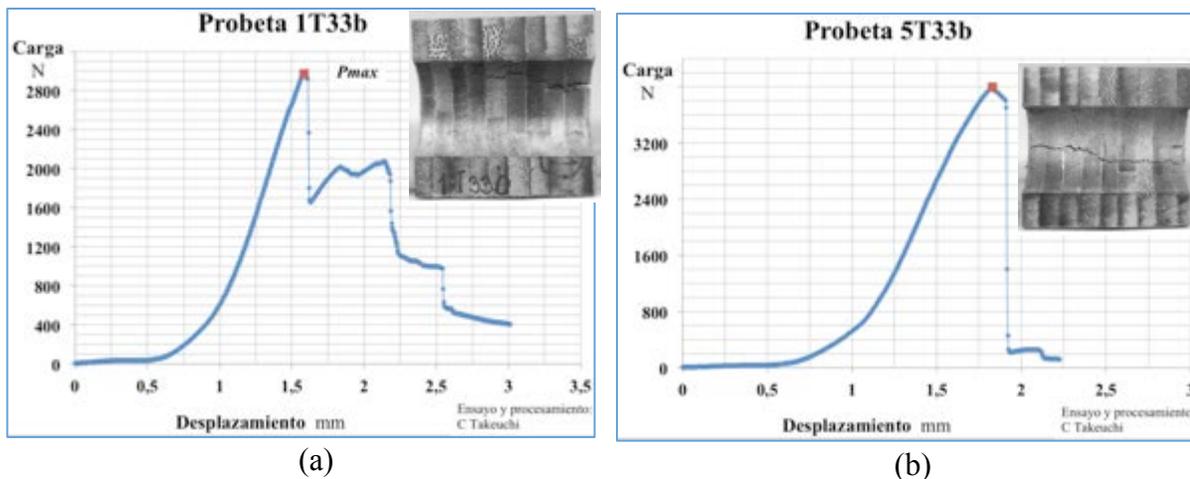


Fuente: Autor

No se observó deformación en las probetas antes de presentarse la falla. Los diagramas carga desplazamiento de todas las probetas fueron similares. No hubo procesos de carga y descarga antes de alcanzar la carga máxima. Prácticamente, después de la zona de acomodamiento y antes de perder resistencia, el comportamiento es elástico. El proceso de descarga varía dependiendo de la formación del plano de falla. En la Figura 6.35.a se observa la curva carga desplazamiento de la probeta 1T33b y una vista lateral de la probeta la cual no falla totalmente, y en la Figura 6.35.b se observa el diagrama carga desplazamiento de la probeta 5T33b.

En la sección I.3 del Anexo I se encuentran las fotografías de las fallas de los ensayos T33b y las curvas carga desplazamiento que no aparecen en el cuerpo del trabajo.

Figura 6.35. Gráficas carga desplazamiento probetas: (a) 1T33b y (b) 5T33b



Fuente: Autor

### 6.3.4 Análisis de resultados

De los ensayos de los dos tipos de probetas T33 se concluye, que para determinar el esfuerzo de falla a tensión perpendicular a la fibra paralelo al plano de los tableros, es recomendable la configuración que corresponde a las probetas T33b. Estas probetas fallaron por tensión perpendicular a la fibra en la parte central del alma siendo el plano de falla relativamente horizontal mientras que la mayoría de las probetas T33a presentaron fisuras de tensión diagonal en la unión alma aleta.

Por la forma en que se presenta la falla de las probetas T33a, es posible que la curva carga desplazamiento para las probetas T33a presenten procesos de carga y descarga antes de alcanzar el esfuerzo máximo.

Los diagramas carga desplazamiento de las probetas T33b no presentan procesos de carga y descarga antes de alcanzar la carga máxima. Prácticamente, después de la zona de acomodamiento y antes de perder resistencia, el comportamiento es elástico

El valor promedio de resistencia a tensión perpendicular a la fibra en las probetas T33 fue de 1.89MPa con una desviación estándar de 0.16MPa y un coeficiente de variación de 0.09. López & Correal (López & Correal, 2009) reportan un valor promedio de resistencia de tensión perpendicular a la fibra tangencial de 1.8MPa con una desviación estándar de 0.4MPa y un coeficiente de variación de 0.21. Correal y colaboradores (Correal, Ramirez, & Yamín, 2009) reportan un valor promedio de resistencia de tensión perpendicular a la fibra tangencial de 3.2MPa con un coeficiente de variación de 0.28.

El valor promedio de resistencia a tensión perpendicular a la fibra en probetas T33a fue de 1.86MPa. El valor de resistencia a tensión perpendicular a la fibra en la única probeta T33a que no presentó fisuras de tensión diagonal (la probeta 4T33a) fue de 2.12MPa. El valor promedio de resistencia a tensión perpendicular a la fibra en probetas T33b fue de 1.90MPa.

El valor promedio de esfuerzo de falla de tensión perpendicular a la fibra en las probetas T33 sin incluir los valores que corresponden a las probetas 1T33a y 5T33b fue de 1.80MPa con una desviación estándar de 0.17MPa y un coeficiente de variación de 0.10.

El valor promedio de esfuerzo de falla a tensión perpendicular a la fibra en probetas T33a fue de 1.77MPa.. El valor de esfuerzo de falla a tensión perpendicular a la fibra en la única probeta T33a que no presentó fisuras de tensión diagonal (la probeta 4T33a) fue de 2.07MPa. El valor promedio de esfuerzo de falla a tensión perpendicular a la fibra en probetas T33b fue de 1.82MPa.

Al hacer ensayos de tensión perpendicular a la fibra, es importante medir el ancho de falla, el cual puede ser mayor al ancho crítico. Los valores promedio de esfuerzo de falla son menores a los valores de resistencia debido a que en algunas ocasiones el área de falla fue mayor al área crítica.

#### **6.4 RELACIÓN ENTRE ESFUERZOS DE FALLAS DE TENSIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PARALELO Y PERPENDICULAR AL PLANO DE LOS TABLEROS**

Teniendo en cuenta que de cada bloque de bambú guadua laminado se ensayaron probetas, se halló la relación entre los esfuerzos de falla,  $\sigma_{falla}$ , de tensión perpendicular en ambas direcciones. No se halló la relación con esfuerzos de tensión paralelo a la fibra, debido a que estas probetas no fallaron por tensión.

### 6.4.1 Relación entre esfuerzos de falla de tensión perpendicular a la fibra paralelo y perpendicular al plano de los tableros

Como un primer paso, se calculó el esfuerzo de falla promedio de tensión perpendicular a la fibra perpendicular al plano de los tableros para probetas T22 de un mismo bloque y se halló la relación entre este esfuerzo y el esfuerzo de tensión perpendicular a la fibra, paralelo al plano de los tableros para probetas T33b, no se tuvieron en cuenta los resultados encontrados de las probetas T33a, debido a que la mayoría de las probetas se fisuraron por tensión diagonal. En la Tabla 6.4 se muestra la relación encontrada para cada bloque.

Tabla 6.4. Relación entre esfuerzos de tensión perpendicular a la fibra entre probetas T33 y T22

Bloque BGLPP	T22fa	T22pa	T22fb	T22pb	T22	T33b	$\sigma_{t\text{ falla T33}}/\sigma_{t\text{ falla T22}}$
	$\sigma_{t\text{ falla}}$ MPa						
1	1,09	1,32	1,27	0,95	<b>1,16</b>	<b>1,69</b>	<b>1,46</b>
2	0,73	1,66	1,04	0,84	<b>1,07</b>	<b>2,02</b>	<b>1,89</b>
3		1,56	1,20	1,32	<b>1,36</b>	<b>1,65</b>	<b>1,21</b>
4	1,09	0,87	1,16	0,66	<b>0,95</b>	<b>1,65</b>	<b>1,75</b>
5	0,90	0,81	0,83	0,79	<b>0,83</b>		
6	1,60	1,44	1,55		<b>1,53</b>	<b>1,95</b>	<b>1,27</b>
7	1,49	1,61	1,52	0,75	<b>1,34</b>		
8	1,73	0,84	1,12	0,97	<b>1,17</b>	<b>1,77</b>	<b>1,52</b>
9	1,39	1,67	0,93	0,83	<b>1,20</b>	<b>1,72</b>	<b>1,43</b>
10	1,16	1,15	1,11	0,82	<b>1,06</b>	<b>2,07</b>	<b>1,96</b>

Fuente: Autor

### 6.4.2 Análisis de resultados

El valor promedio de esfuerzo de falla de tensión perpendicular a la fibra en probetas T22 fue de 1.21MPa. El valor promedio de esfuerzo de falla de tensión perpendicular a la fibra por bloques, varió entre 0,83MPa para el bloque 5 y 1.53MPa para el bloque 6. El valor promedio de los promedios de los grupos T22 del esfuerzo de falla de tensión perpendicular a la fibra fue de 0.94 con una desviación estándar de 0.21MPa y un coeficiente de variación de 0.22.

El valor promedio de esfuerzo de falla de tensión perpendicular a la fibra en probetas T33b fue de 1.69MPa con una desviación estándar de 0.17MPa y un coeficiente de variación de 0.10.

El esfuerzo de falla de tensión perpendicular a la fibra cuando los tableros están colocados verticalmente es mayor a cuando los tableros están colocados horizontalmente. En el primer caso el área de falla, atraviesa zonas variables de densidad de fibras en cada lámina. En el

segundo caso, atraviesa zonas relativamente uniformes de densidad de fibra y generalmente, zonas de baja densidad de fibras

La relación de resistencia de tensión perpendicular a la fibra entre las direcciones 3 y 2 varió entre 1.57 y 1.96. En el primer caso la superficie de fisura atraviesa zonas de alta y baja densidad de fibras en el segundo caso, la superficie de fisura pasa por zonas de baja densidad de fibras.

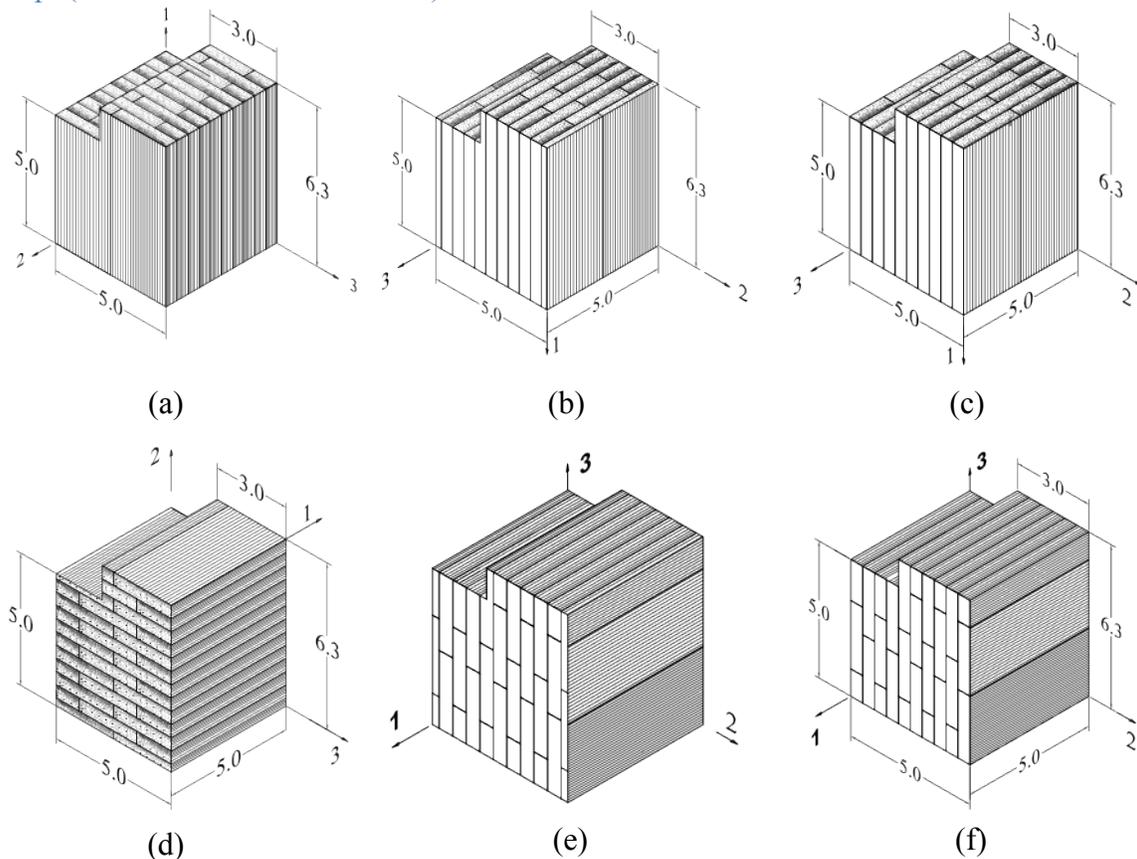
El coeficiente de variación en los valores de tensión perpendicular a la fibra para probetas T22 es mayor al coeficiente de variación obtenido para probetas T33. Para probetas T22 es de 0.22 por grupos o 0.27 individualmente y para probetas T33 es de 0.10. Al estar dispuestos los tableros verticalmente, el área crítica, atraviesa zonas de alta y baja densidad de fibras de varias láminas, siendo más uniforme el porcentaje de fibras de la sección de falla. Al estar dispuestos los tableros horizontalmente, el área crítica atraviesa zonas de baja densidad de fibras de las láminas en el área de falla. En el último caso, hay menos láminas que se encuentran en el área de falla.

## 7. CORTANTE EN BGLPP

En los anteriores capítulos se estudió el comportamiento del BGLPP en elementos solicitados a esfuerzos axiales de compresión y tensión. Se estudia en el presente capítulo el comportamiento de seis tipos diferentes de probetas solicitadas a cortante.

Para identificar cada una de las probetas, estas fueron marcadas con un número que corresponde al bloque de material de BGLPP de donde fueron obtenidos, seguido del tipo de probeta. El tipo de probeta se nombra con la letra **V**, por ser sollicitación a cortante, dos números que indican la dirección y plano de aplicación de la carga de acuerdo al sistema coordinado asignado al bloque de material y mostrado en la Figura 3.28. Algunos tipos de probetas finalizan con las letras **f** o **p** para indicar si el plano de cortante pasa por la mitad de los tableros o por el plano de unión entre dos tableros. En la Figura 7.1 (Figura 3.31 del capítulo 3) se pueden observar los diferentes tipos de probetas de cortante, las tres primeras (Figura 7.1 (a), (b) y (c)) corresponden a probetas de cortante paralelo a las fibras y las tres últimas (Figura 7.1 (d), (e) y (f)) a cortante perpendicular a las fibras.

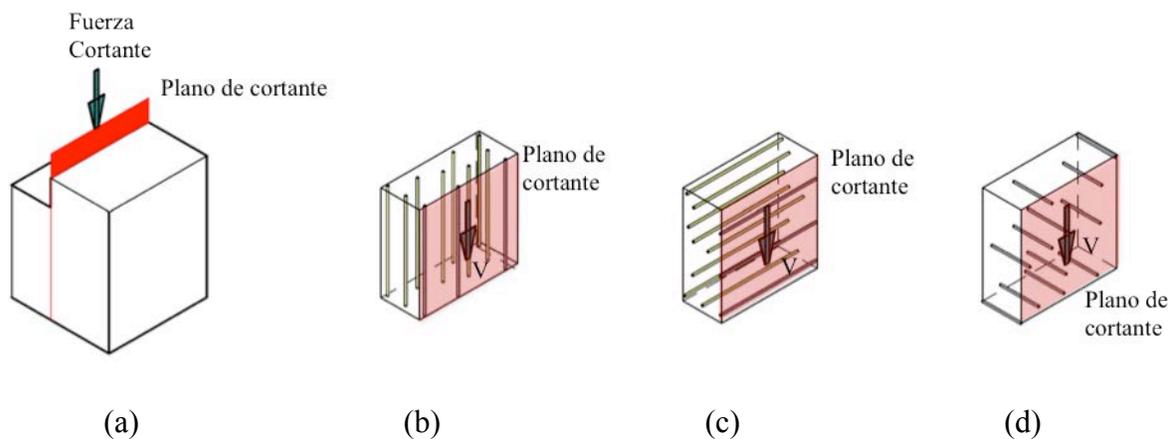
Figura 7.1. Tipos de probetas a corte: (a) V13, (b) V12f, (c) V12p, (d) V23, (e) V32f, (f) V32p (dimensiones en centímetros)



Fuente: Autor

En las probetas de cortante, las fibras pueden estar orientadas en tres direcciones como se observa en la Figura 7.2: paralelas a la dirección de la carga paralelas al plano de cortante (Figura 7.2(b)), perpendiculares a la dirección de la carga paralelas al plano esperado de cortante (Figura 7.2(c)) y perpendiculares a la dirección de la carga perpendiculares al plano esperado de cortante (Figura 7.2(d)). En las configuraciones de probetas de BGLPP ensayadas, se estudia el cortante en la matriz de parénquima cuando las fibras son paralelas al plano de cortante ya sea paralelas a la dirección de la fuerza (probetas V13 y V12) o perpendiculares a la dirección de la fuerza (probetas V23 y V32). En investigaciones anteriores como la reportada por Cortés y colaboradores (Cortes, Lozano, Rusinque, & Takeuchi, 2010) se encontró que por tener las fibras alta resistencia al cortante, las probetas con fibras perpendiculares al plano de cortante fallan por flexión presentando fisuras por tensión perpendicular a la fibra.

Figura 7.2 Orientación de fibras en probetas de cortante



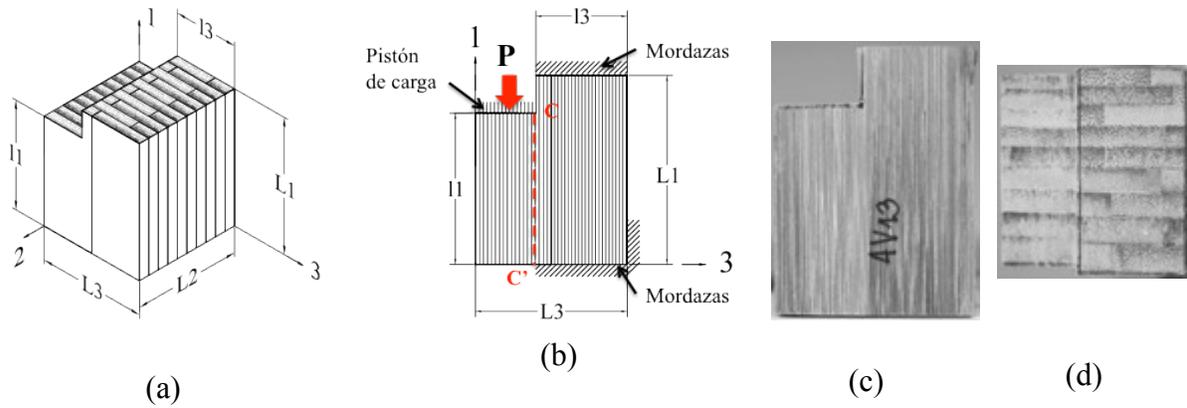
Fuente: Autor

## 7.1 CORTANTE PARALELO A LA FIBRA EN PROBETAS DE BGLPP

Las probetas V13 y V12, son solicitadas a esfuerzo cortante paralelo a la fibra. En el caso de las probetas V13, el esfuerzo cortante actúa sobre el plano normal al eje 3 que contiene zonas de alta y baja densidad de fibras de varias láminas, como se observa en la Figura 7.3.

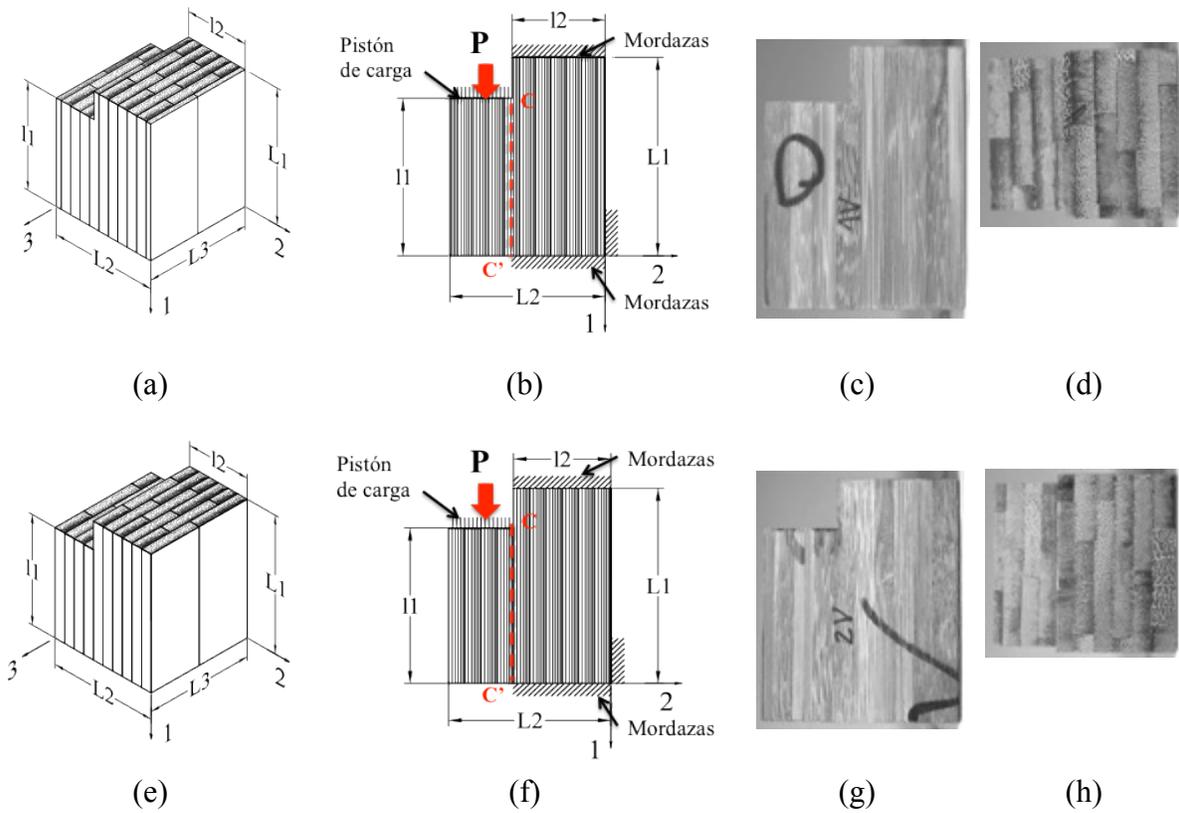
En el caso de las probetas V12 el esfuerzo cortante actúa sobre el plano normal al eje 2 por lo tanto el cortante actúa en sólo dos o tres láminas sobre un plano que contiene zonas relativamente uniformes de fibras en cada lámina. En las probetas V12f, el esfuerzo cortante actúa en un plano que se encuentra en el medio de las láminas como se observa en la Figura 7.4(a) y en las probetas V12p la transición de las dos alturas se encuentra localizada en el plano de unión entre dos tableros como se observa en la Figura 7.4(e).

Figura 7.3 Probeta V13: (a) esquema con nomenclatura de dimensiones, (b) esquema de vista lateral con carga y restricciones y vistas (c) lateral y (d) superior de la probeta 4V13



Fuente: Autor

Figura 7.4 Probeta 1V12f (a) nomenclatura de dimensiones, (b) carga y restricciones y vistas (c) lateral y (d) superior. Probeta 2V12p (e) nomenclatura de dimensiones, (f) vista lateral con carga y restricciones y vistas (g) lateral y (h) superior.



Fuente: Autor

En este tipo de ensayos se espera que la probeta presente una fisura sobre la línea CC' en los esquemas de la vista lateral que cause su falla. En el Anexo J se encuentran para cada probeta las vistas de sus caras donde las vistas superior e inferior corresponden al plano 1 (perpendicular al eje 1). En el caso de las probetas V13 las vistas frontal y posterior corresponden al plano 3 y las vistas laterales al plano 2. Para las probetas V12 las vistas frontal y posterior corresponden al plano 2 y las vistas laterales al plano 3.

### 7.1.1 Descripción de los ensayos

Se realizaron 30 ensayos de cortante paralelo a la fibra, 10 en probetas V13, 10 en probetas V12f y 10 en probetas V12p. Para cada probeta, se tomaron tres medidas de alto (I1 y L1) y de ancho en las vistas frontal y posterior y dos medidas de profundidad en las vistas superior e inferior. Las medidas de ancho corresponden a la dimensión L2 para las probetas V13 (Figura 7.3(a)) y a la dimensión L3 para las probetas V12 (Figura 7.4(a) y Figura 7.4(e)). Las medidas de profundidad corresponden a las dimensiones I3 y L3 para las probetas V13 y I2 y L2 para las probetas V12. Con base en el promedio de las medidas de ancho y de altura corta, se calculó el área resistente a cortante. (Tablas J1, J2 y J3 Anexo J).

Los ensayos fueron realizados en una máquina universal de ensayos a una velocidad de 0.01mm/s (0.6mm/min). Las probetas se colocaron en un dispositivo especial para ensayos de cortante. En el dispositivo, la parte frontal de la probeta se encuentra en voladizo y sobre esta parte se aplica la carga (Figura 7.5(a)). La parte posterior de la probeta tiene restricciones verticales, superior e inferior, y horizontales; la restricción vertical inferior está dada por el apoyo, la restricción superior la dan dos tornillos que sujetan la probeta por encima y en la parte inferior existe una platina que se ajusta a la probeta con dos tornillos y restringe el movimiento horizontal. En la Figura 7.5(b) se observa una vista frontal del montaje de la probeta 10V12f donde se aprecia la parte en voladizo y la aplicación de la carga.

Figura 7.5. Ensayo de corte (a) Esquema, (b) Dispositivo de ensayo y (b) montaje de la probeta 10V12f



Fuente: Autor

### 7.1.2 Cálculos y resultados

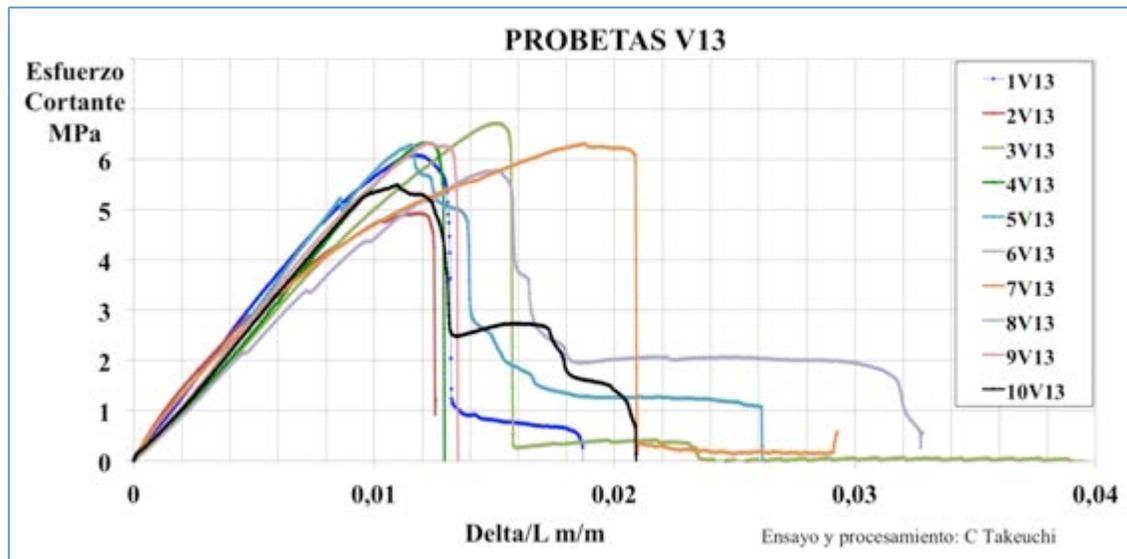
El esfuerzo cortante promedio, que en adelante se denominará esfuerzo cortante, aplicado en un momento dado fue calculado como la relación entre la fuerza aplicada,  $P$ , y el área a cortante,  $A_v$ , como se indica en la Ecuación 7.1.

$$\tau_{prom} = \frac{P}{A_v} \quad \text{Ecuación 7.1}$$

Con base en los esfuerzos cortantes promedio y las relaciones entre el desplazamiento del plato de carga y la altura del área de cortante en dirección de la carga (denominada  $l_1$  para las probetas V13, V12f y V12p), se obtuvieron las gráficas mostradas en la Figura 7.6 y la Figura 7.7.

El tramo de carga de la mayoría de las curvas de las probetas V13 es linealmente elástico hasta un poco antes de alcanzar el esfuerzo máximo, luego del cual se presenta una pérdida de capacidad mostrando un comportamiento frágil. La dispersión entre las curvas en el tramo lineal elástico es baja y moderada en el valor de esfuerzo cortante promedio máximo.

Figura 7.6. Esfuerzo cortante promedio vs  $\delta/L$  probetas a cortante V13

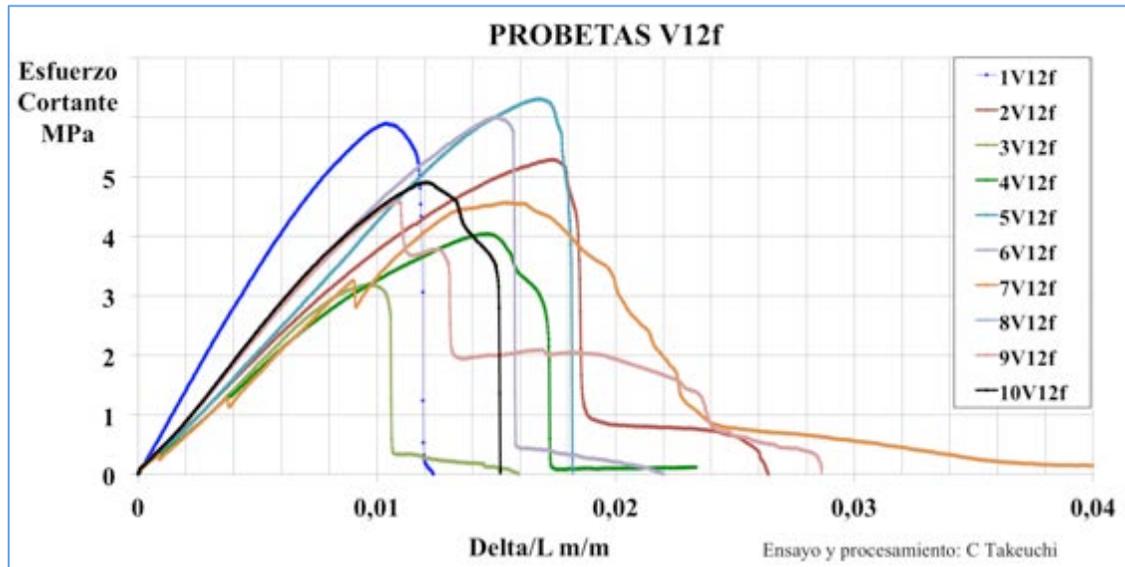


Fuente: Autor

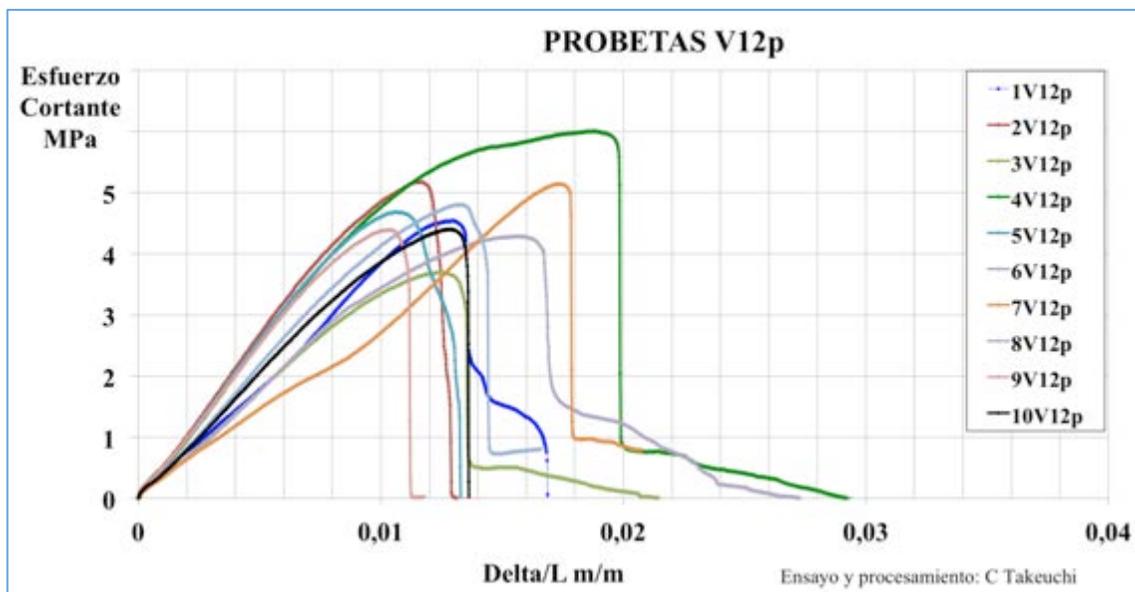
Las curvas de las probetas V12f y V12p tienen un comportamiento similar al mostrado en las que corresponden a las probetas V13. El comportamiento de estas probetas es frágil una vez alcanzado el esfuerzo máximo. La dispersión de las curvas V12f en el rango elástico es baja con excepción de la probeta 1V12f. En valores de resistencia la dispersión es alta, es importante considerar que las probetas 4V12f, 7V12f y 9V12f presentaron una superficie de fisura diferente al plano de falla esperado.

La dispersión de las curvas V12p en el rango elástico es baja así como la dispersión de valores de resistencia, al no tener en cuenta el valor encontrado en la probeta 4V12p que se considera atípico según el criterio de exclusión de Chauvenet.

Figura 7.7. Esfuerzo cortante promedio vs  $\delta/L$  probetas a cortante (a) V12f y (b) V12p



(a)



(b)

Fuente: Autor

Se calcula la resistencia a cortante paralela a la fibra como el esfuerzo cortante promedio  $F_v$ , obtenido de la relación entre la fuerza máxima aplicada  $P_{max}$  y el área a cortante de la probeta  $A_v$ , utilizando la Ecuación 7.2.

$$F_v = \frac{P_{max}}{A_v} \quad \text{Ecuación 7.2}$$

En la Tabla 7.1 se encuentran los valores de resistencia a cortante paralela a la fibra. En las probetas V13 el valor promedio fue de 6.0MPa con una desviación de 0.6MPa y un coeficiente de variación de 0.09. Para el cálculo de estos valores se excluyó el resultado de la probeta 2V13 por ser un valor atípico según el criterio de Chauvenet. En las probetas V12f el valor promedio fue de 5.7MPa con una desviación de 0.5MPa y un coeficiente de variación de 0.09. Para el cálculo de estos valores se excluyeron los resultados de las probetas 4V12f, 7V12f y 9V12f porque presentaron una superficie de fisura diferente al plano de falla esperado y el resultado de la probeta 3V12f por ser un valor atípico según el criterio de Chauvenet. En las probetas V12p el valor promedio fue de 4.7MPa con una desviación de 0.6MPa y un coeficiente de variación de 0.13. Para el cálculo de estos valores se excluyó el resultado de la probeta 4V12p por ser un valor atípico según el criterio de Chauvenet.

El valor promedio de resistencia a cortante paralelo a la fibra fue de 5.5MPa con una desviación estándar de 0.8MPa y un coeficiente de variación de 0.15. Para el cálculo de estos valores se excluyeron los resultados de las probetas anteriormente mencionadas.

Tabla 7.1. Resistencia a cortante promedio probetas V13, V12p y V12f

V13				V12f				V12p			
Probeta	$P_{max}$ N	$A_v$ mm <sup>2</sup>	$F_v$ MPa	Probeta	$P_{max}$ N	$A_v$ mm <sup>2</sup>	$F_v$ MPa	Probeta	$P_{max}$ N	$A_v$ mm <sup>2</sup>	$F_v$ MPa
1V13	14248	2335	6,10	1V12f	11997	2031	5,91	1V12p	9298	2045	4,55
2V13	12475	2532	*4,93	2V12f	12018	2269	5,30	2V12p	12145	2344	5,18
3V13	16594	2468	6,72	3V12f	7474	2359	*3,17	3V12p	9182	2480	3,70
4V13	15917	2514	6,33	4V12f	9112	2251	*4,05	4V12p	13541	2252	6,01
5V13	15717	2500	6,29	5V12f	14871	2354	6,32	5V12p	11117	2372	4,69
6V13	13289	2298	5,78	6V12f	12983	2161	6,01	6V12p	9256	2156	4,29
7V13	16317	2581	6,32	7V12f	9836	2160	*4,55	7V12p	11125	2161	5,15
				8V12f	14357	2422	5,93	8V12p	11742	2441	4,81
9V13	16069	2540	6,33	9V12f	10815	2356	*4,59	9V12p	10604	2413	4,40
10V13	14420	2624	5,49	10V12f	11775	2396	4,91	10V12p	10554	2396	4,41

El asterisco\* indica los resultados excluidos del promedio

Fuente: Autor

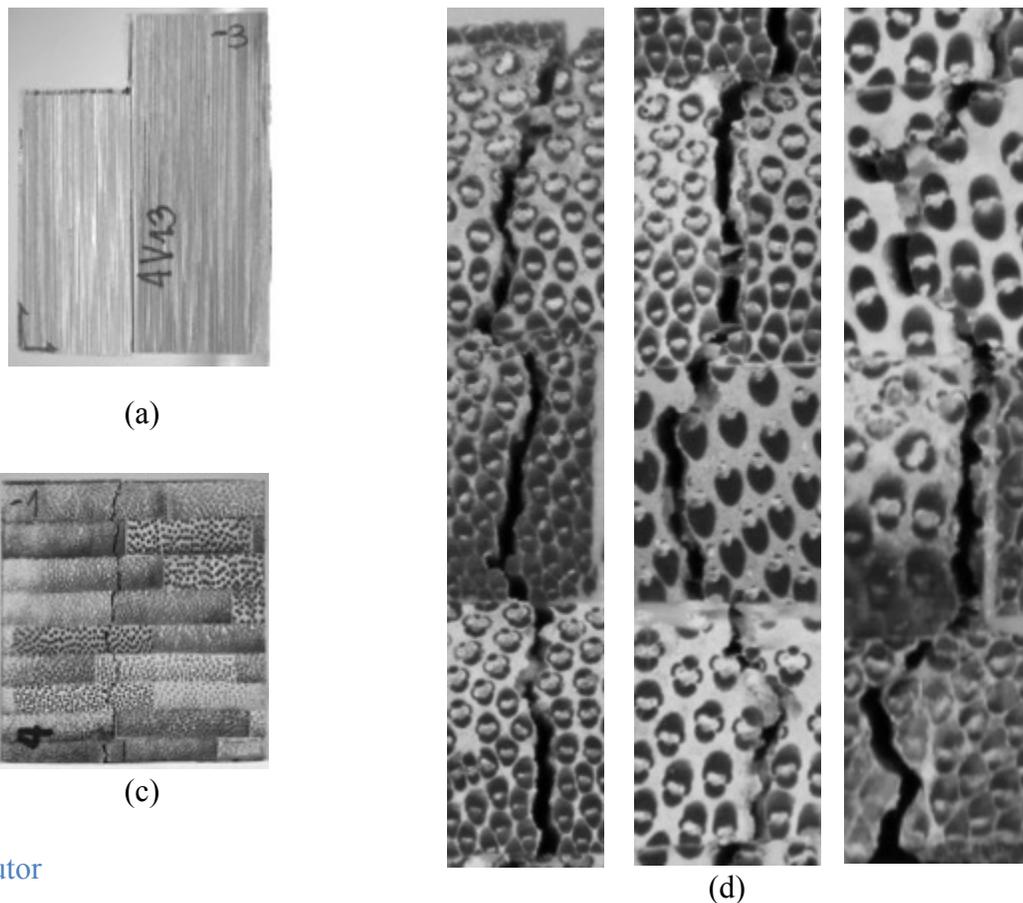
### 7.1.3 Observaciones durante los ensayos

#### Probetas V13

Todas las probetas V13 mostraron una superficie de fisura paralela a las fibras en la unión de estas últimas con la matriz. Esta fisura atraviesa el espécimen desde uno de los extremos de la superficie de aplicación de la carga. No hay falla de la unión adhesivo lámina, lo cual se puede observar por la presencia de fibras en la falla. En la Figura 7.8 se muestran imágenes de la probeta 4V13 ensayada donde se puede observar la fisura de falla.

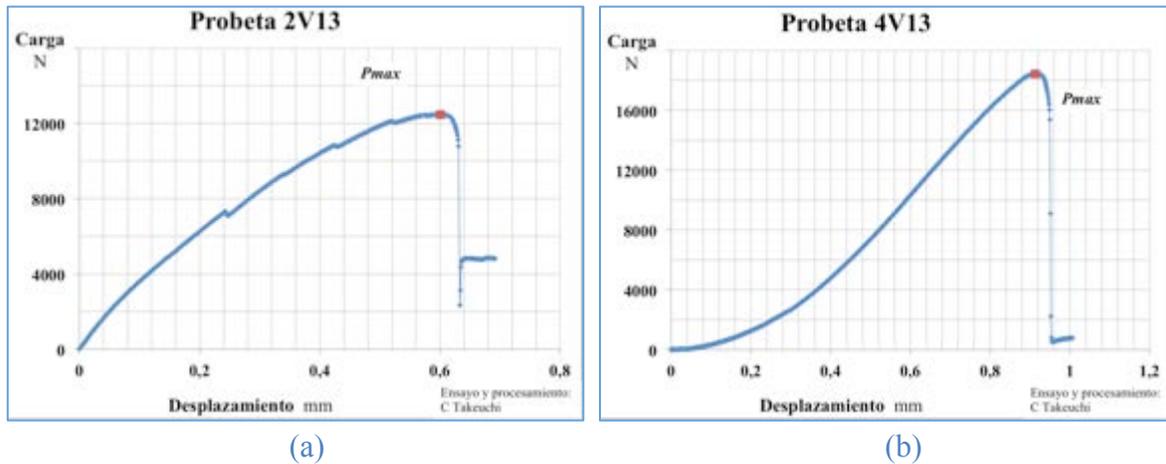
Los diagramas carga desplazamiento son similares. La probeta resiste carga hasta que alcanza la carga máxima; posterior a esto, la probeta falla. En ocasiones se observan ligeros procesos de descarga y carga, antes de alcanzar la carga máxima. En la Figura 7.9 se observan las curvas carga desplazamiento de las probetas 2V13 y 4V13 y en la sección J.1.1 del Anexo J se encuentran las gráficas carga desplazamiento para los ensayos de las otras probetas V13 y fotografías de las probetas ensayadas.

Figura 7.8. Imágenes de la probeta 4V13 después de ensayo (a) lateral derecha, (b) lateral izquierda, (c) inferior y (d) acercamientos de la fisura.



Fuente: Autor

Figura 7.9. Gráficos Carga Desplazamiento probetas: (a) 2V13 y (b) 4V13

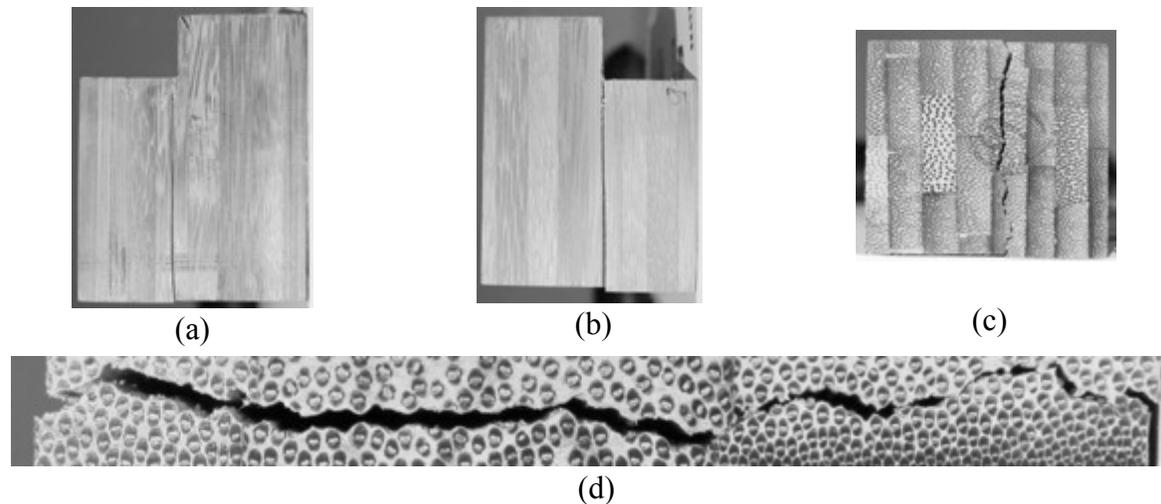


Fuente: Autor

### Probetas V12f

Todas las probetas V12f presentaron una superficie de fisura paralela a la fibra que las atraviesan. Por lo anterior se considera que las probetas fallaron por cortante paralelo a la fibra. La mayoría de las probetas fallaron por el área esperada (la conformada por la menor altura,  $l_1$ , y el ancho,  $L_3$ ). En la Figura 7.10 se observan las vistas laterales e inferior de la probeta 6V12f así como un acercamiento de la fisura.

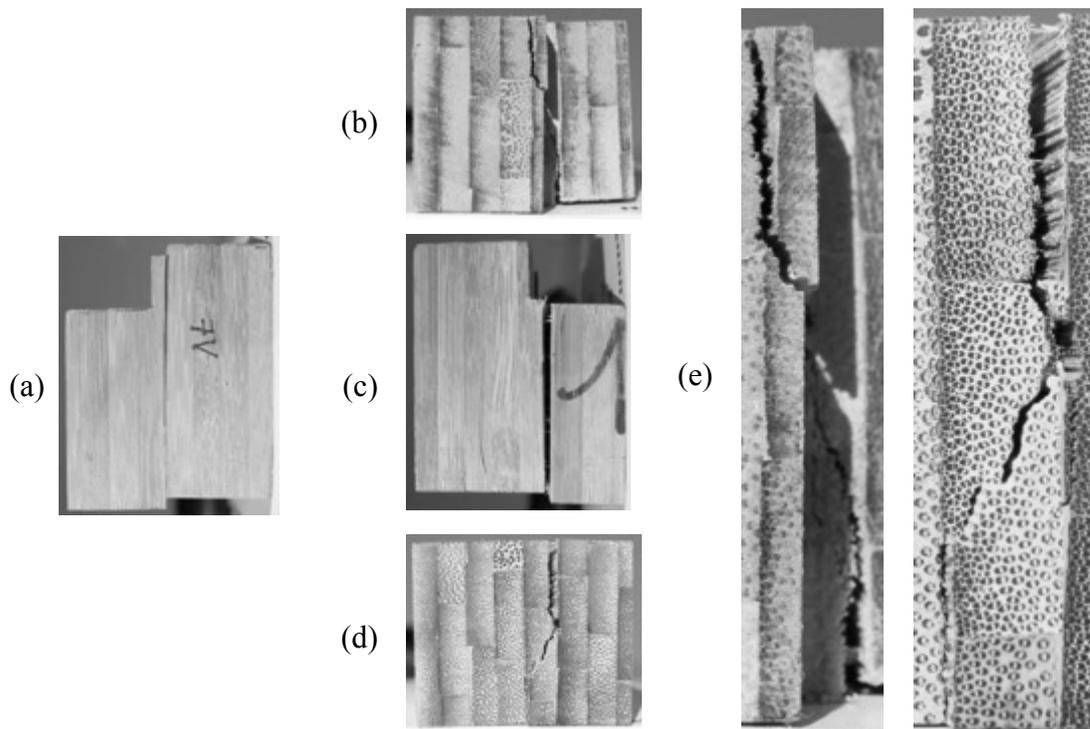
Figura 7.10. Imágenes de la probeta 6V12f después de ensayo (a) lateral derecha, (b) lateral izquierda, (c) inferior y (d) acercamiento de la fisura.



Fuente: Autor

En particular, la trayectoria de la fisura presentada en las probetas 4V12f, 7V12f y 9V12f no es exactamente igual a la esperada como se observa en las fotografías de la probeta 7V12f de la Figura 7.11.

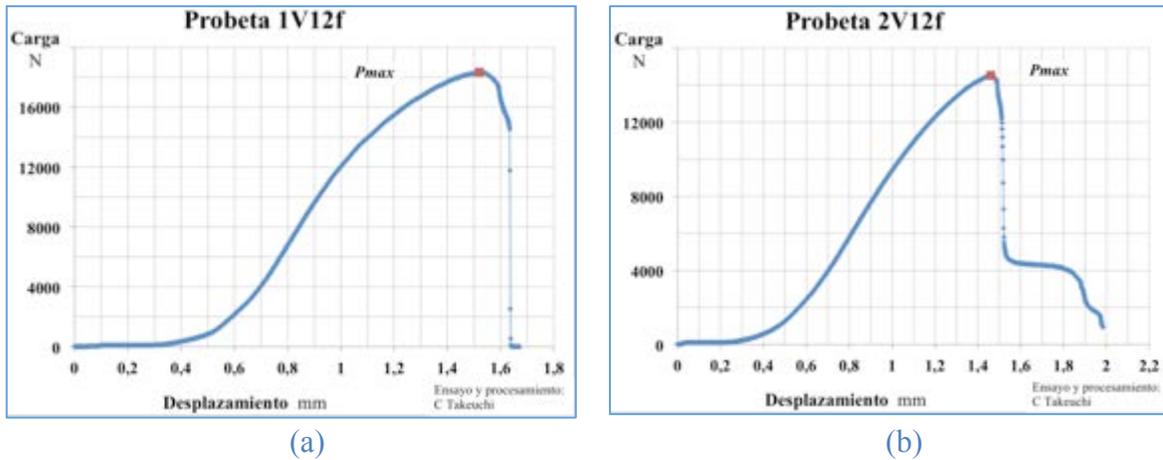
Figura 7.11. Imágenes de la probeta 7V12f después de ensayo (a) lateral derecha, (b) superior, (c) lateral izquierda, (d) inferior y (e) acercamientos superior e inferior de fisuras.



Fuente: Autor

Los diagramas carga desplazamiento de las probetas V12f son similares. La probeta resiste carga de manera continua hasta que alcanza la carga máxima, posterior a esto, la probeta falla. Se encuentra un tramo elástico y un tramo inelástico antes de que la probeta alcance la carga máxima. En la Figura 7.12 se observan las curvas carga desplazamiento de las probetas 1V12f y 2V12f y en la sección J.1.2 del Anexo J se encuentran las gráficas carga desplazamiento para los ensayos de las otras probetas V12f y fotografías de las probetas ensayadas.

Figura 7.12. Gráficos Carga Desplazamiento probetas: (a) 1V12f y (b) 2V12f

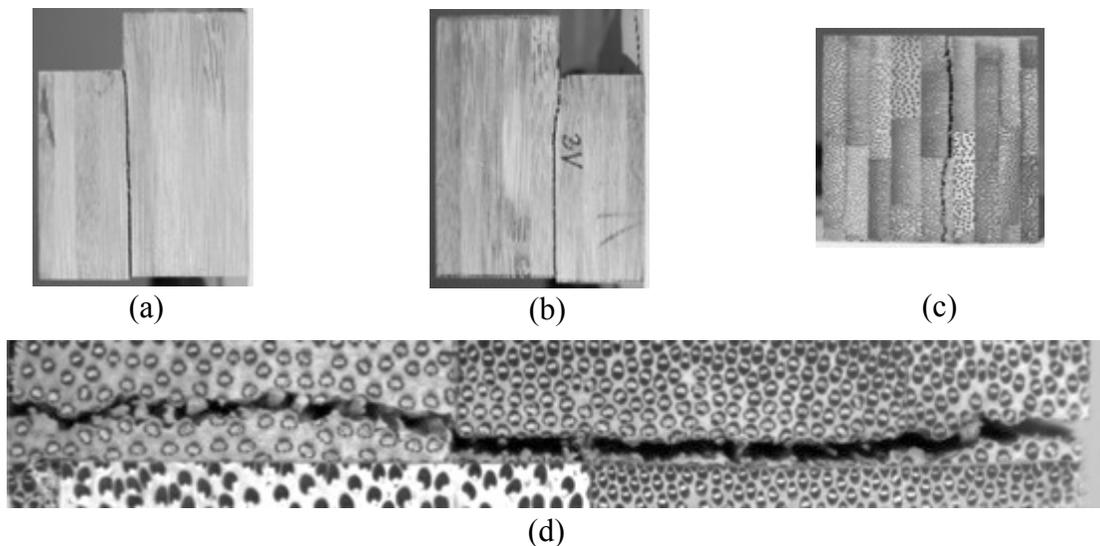


Fuente: Autor

### Probetas V12p

En todas las probetas el esfuerzo cortante produjo una fisura paralela a la fibra hasta la falla, cuya trayectoria es paralela y muy cercana a la superficie de corte esperada (conformada por la menor altura,  $h_1$ , y el ancho,  $L_3$ ). En la probeta 3V12p, ilustrada en la Figura 7.13 se observa que la fisura nace en la zona de cambio de altura y se inclina con respecto a la unión entre tableros, buscando la menor densidad de fibras. Después la fisura se propaga paralela al plano de falla esperado.

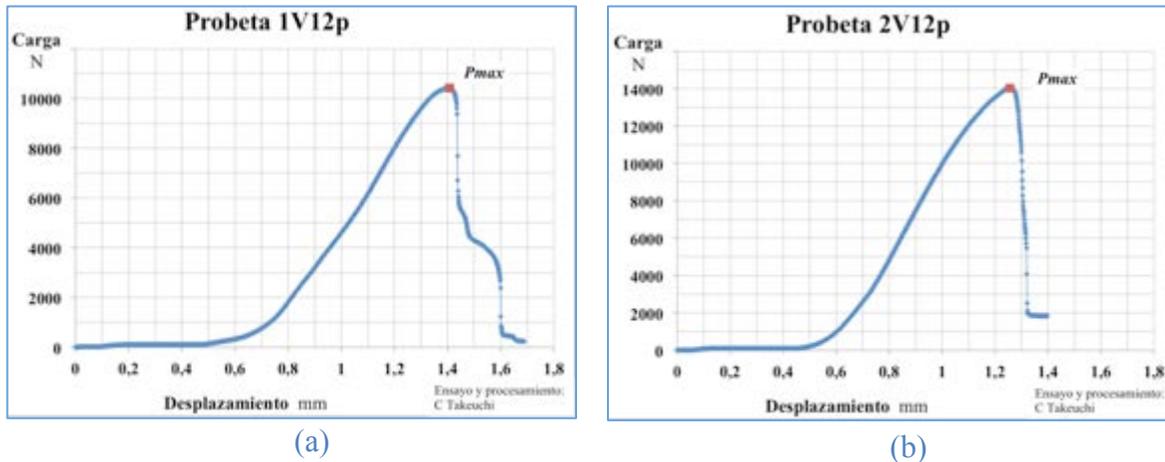
Figura 7.13. Imágenes de la probeta 3V12p después de ensayo (a) lateral derecha, (b) lateral izquierda, (c) inferior y (d) acercamiento de la fisura.



Fuente: Autor

Los diagramas carga desplazamiento de las probetas V12p son similares. Las probetas resisten carga de manera continua hasta que alcanzan la carga máxima, posterior a esto, fallan. En la Figura 7.14 se observan las curvas carga desplazamiento de las probetas 1V12p y 2V12p y en la sección J.1.3 del Anexo J se encuentran las gráficas carga desplazamiento para los ensayos de las otras probetas V12p y fotografías de las probetas ensayadas.

Figura 7.14. Gráficos Carga Desplazamiento probetas: (a) 1V12p y (b) 2V12p



Fuente: Autor

#### 7.1.4 Análisis de resultados

Las probetas V13, V12f y V12p presentaron una fisura paralela a la fibra cuya superficie en su mayoría coincide con el plano esperado. Esta fisura indica que las probetas fallaron por cortante paralelo a la fibra.

Para todos los casos, la falla es frágil. Cuando se alcanza la resistencia máxima hay pérdida de carga.

El valor promedio de resistencia a cortante paralelo a la fibra en probetas V13 fue de 6.0MPa; en probetas V12f fue de 5.7MPa y en probetas V12p fue de 4.7MPa. Si se consideran las probetas V13 y V12, el valor promedio de resistencia a corte paralelo a la fibra, es de 5.5MPa con un coeficiente de variación de 0.15. Los resultados encontrados son comparables con los reportados por otros investigadores. López y Correal ((López & Correal, 2009) en ensayos de corte paralelo a la fibra en 33 probetas elaboradas con PVA, habían reportado un valor promedio de 9.4MPa con un coeficiente de variación de 0.13. Correal y colaboradores (Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014) reportan un valor de 9.5MPa con un coeficiente de variación de 0.14 en 20 ensayos de probetas elaborados con un 50% de úrea formaldehído y 50% de melanina formaldehído. Cortés y colaboradores (Cortes et al., 2010) encontraron un valor promedio de 5.1MPa y un

coeficiente de variación de 0.44 en ensayos de cortante paralelo a la fibra paralelo al plano de los tableros (similar a las probetas V12) en 82 probetas fabricadas con urea melanina formaldehído. Barreto (Barreto, 2003) encontró un promedio de 2.6MPa con un coeficiente de variación de 0.46 en ensayos de 26 probetas de corte paralelo a la fibra paralelo al plano de los tableros elaborados con urea formaldehído.

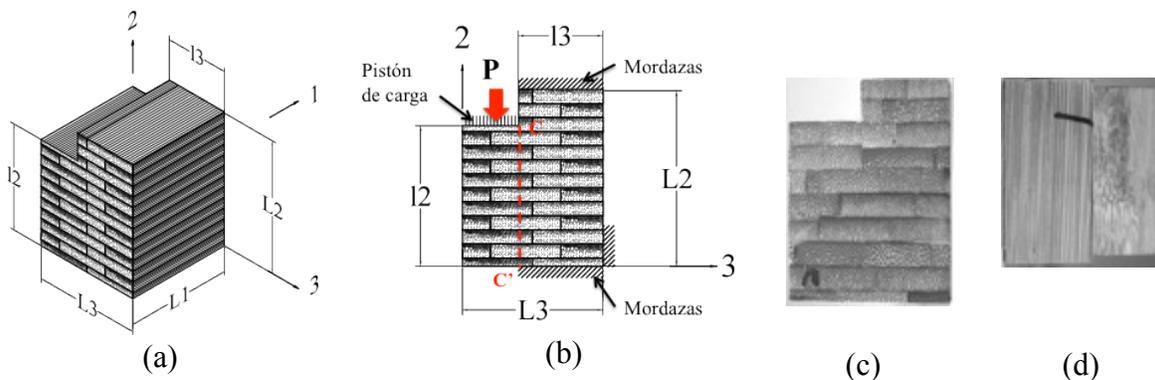
El coeficiente de variación en los resultados encontrados de las probetas ensayadas a cortante paralelo a la fibra, fue similar para los diferentes tipos de probetas. Se encontró un coeficiente de variación de 0.09 para las probetas V13, de 0.09 para las probetas V12f y 0.13 para las probetas V12p.

En las imágenes de las fisuras de las probetas se observa que se presenta separación entre los haces de fibra y la matriz de parénquima.

## 7.2 CORTANTE PERPENDICULAR A LA FIBRA EN PROBETAS DE BGLPP

Las probetas V23 y V32, son probetas solicitadas a esfuerzos cortantes perpendiculares a la fibra. Las probetas V23 se encuentran solicitadas a esfuerzos cortantes en la dirección 2 actuando sobre una superficie normal a la dirección 3, es decir, perpendiculares a las fibras, perpendiculares al plano de los tableros, atravesando zonas de alta y baja densidad de fibras de varias de láminas como se observa en la Figura 7.15.

Figura 7.15 Probeta V23: (a) esquema con nomenclatura de dimensiones, (b) esquema de vista lateral con carga y restricciones y vistas (c) lateral y (d) superior de la probeta 6V23

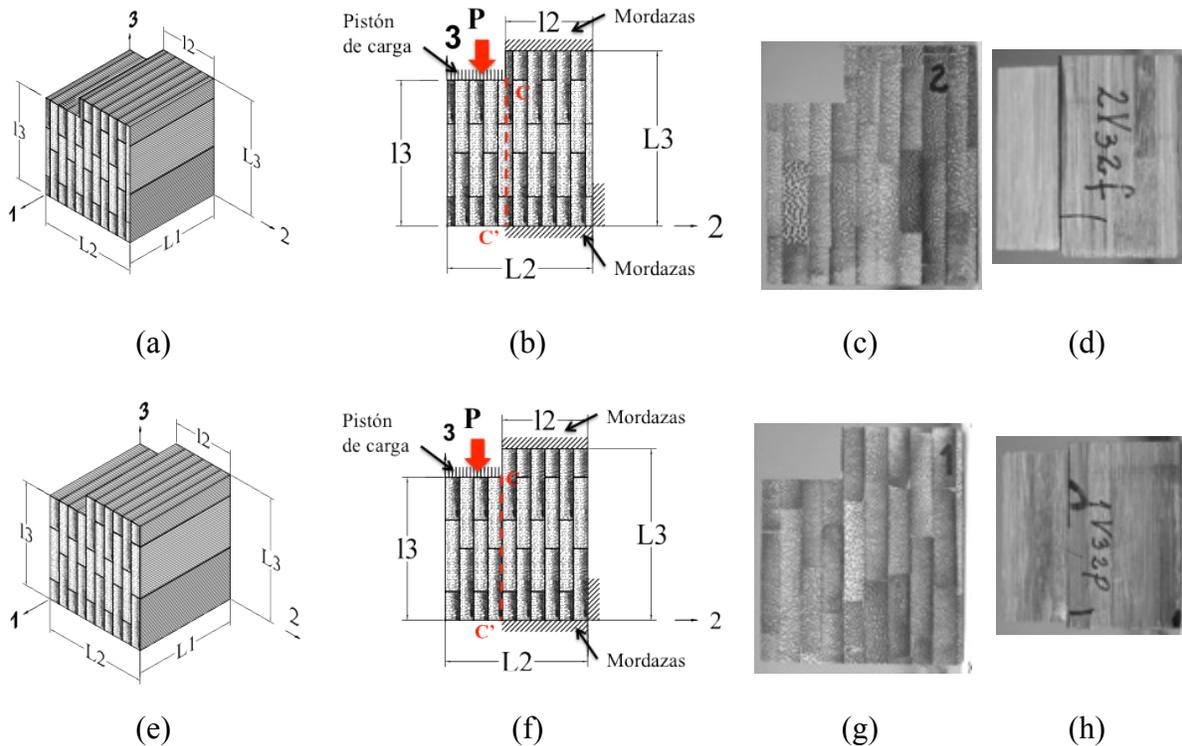


Fuente: Autor

En el Anexo J se encuentra para cada probeta V23 las vistas de sus caras; las vistas superior e inferior corresponden al plano 2 (perpendicular al eje 2), las vistas frontal y posterior corresponden al plano 3 y las vistas laterales al plano 1.

Las probetas V32 se encuentran solicitadas a esfuerzos cortantes en la dirección 3 actuando sobre un plano en la dirección 2, es decir, perpendiculares a las fibras y paralelos al plano de los tableros. En las probetas V32f, la transición de altura se encuentra en las láminas que conforman un tablero y en las probetas V32p en la unión entre dos tableros como se observa en la Figura 7.16.

Figura 7.16 Probeta 2V32f (a) nomenclatura de dimensiones, (b) carga y restricciones y vistas (c) lateral y (d) superior. Probeta 1V32p (e) nomenclatura de dimensiones, (f) vista lateral con carga y restricciones y vistas (g) lateral y (h) superior.



Fuente: Autor

En el Anexo J se encuentran para cada probeta V32 las vistas de sus caras. Las vistas superior e inferior corresponden al plano 3 (perpendicular al eje 3), las vistas frontal y posterior corresponden al plano 2 y las vistas laterales al plano 1.

### 7.2.1 Descripción de los ensayos

Se realizaron 30 ensayos de cortante perpendicular a la fibra, 10 en probetas V23, 10 en probetas V32f y 10 en probetas V32p. Para cada probeta, se tomaron tres medidas de alto, y de ancho (L1) en las vistas frontal y posterior y dos medidas de profundidad en las vistas superior e inferior. Las medidas de alto corresponden a las dimensiones L2, l2 para las probetas V23 (Figura 7.15 (a)) y a las dimensiones L3, l3 para las probetas V32 (Figura

7.16(a) y Figura 7.16(e)). Las medidas de profundidad corresponden a las dimensiones L3 y l3 para las probetas V23 y L2 y l2 para las probetas V32. Con base en el promedio de las medidas de ancho y de altura corta, se calculó el área resistente a corte. (Tablas J4, J5 y J6 del Anexo J).

Los ensayos fueron realizados en una máquina universal de ensayos a una velocidad de 0.01mm/s (0.6mm/min). Las probetas se colocaron en el dispositivo para ensayos de corte mencionado en la sección 7.1.1.

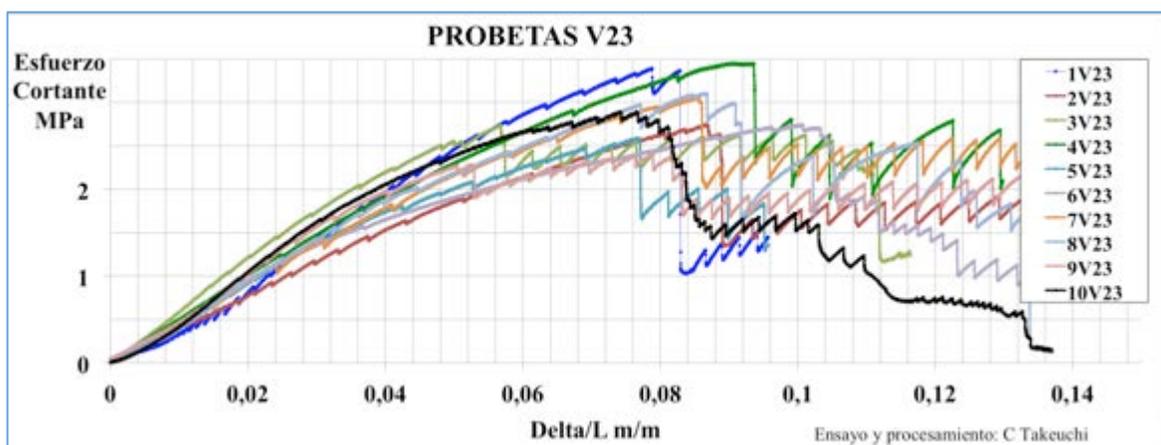
## 7.2.2 Cálculos y resultados

El esfuerzo cortante promedio aplicado, en un momento dado fue calculado como la relación entre la fuerza aplicada,  $P$ , y el área a cortante,  $A_v$ , como se indica en la Ecuación 7.1. de la sección 7.1.2.

Con base en los esfuerzos cortantes promedio y las relaciones entre el desplazamiento del plato de carga y la altura del área de cortante en dirección de la carga, se obtuvieron las gráficas mostradas en la Figura 7.17 y Figura 7.18.

En las probetas V23, se observa un comportamiento inelástico en el tramo de carga, durante el cual el esfuerzo aumenta hasta que se presenta la primera fisura. En este momento hay una pérdida de resistencia, sin embargo la probeta no falla. En el tramo de descenso la curva presenta pequeños saltos ya que la propagación de la fisura depende de la distribución de las fibras. La dispersión entre las curvas en el tramo de carga es baja. En el valor de esfuerzo cortante promedio máximo la dispersión es moderada.

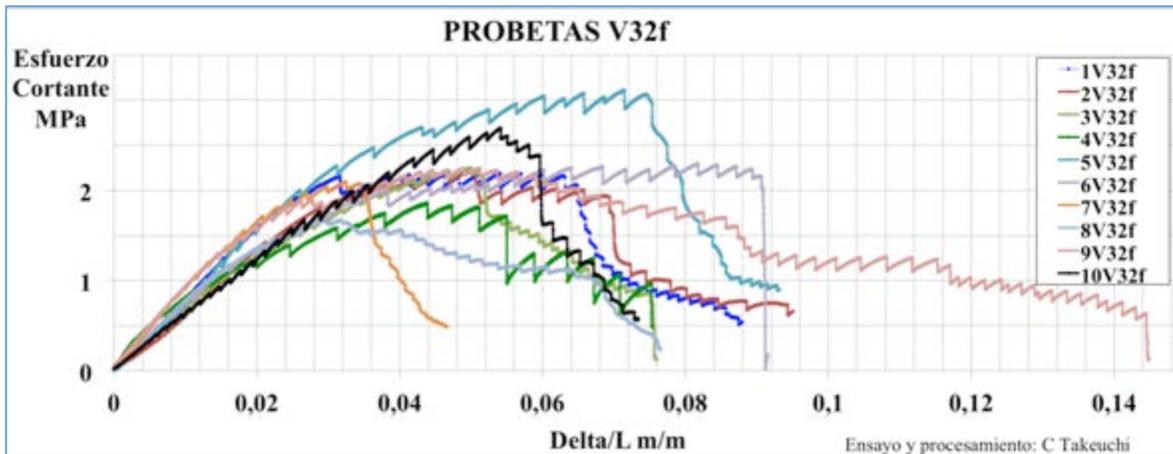
Figura 7.17. Esfuerzo cortante promedio vs  $\delta/L$  probetas a cortante V23



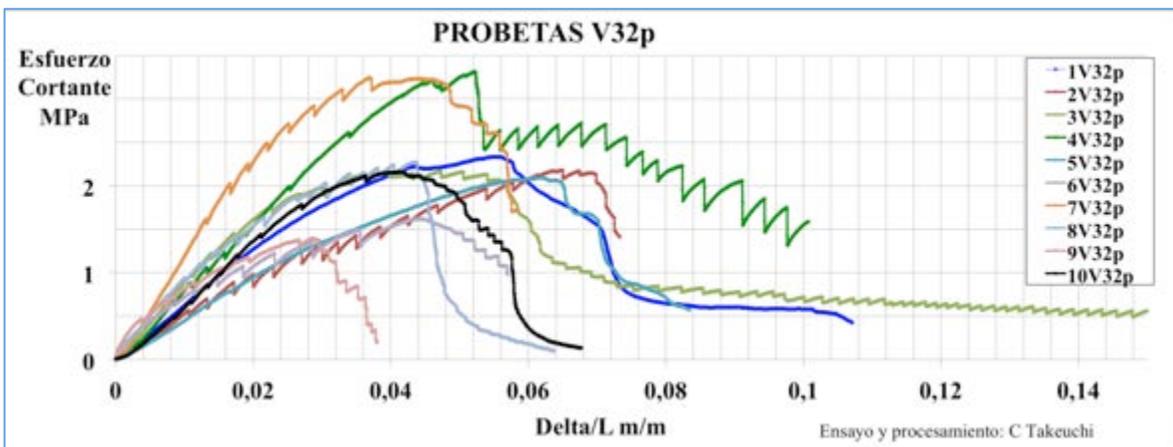
Fuente: Autor

Las curvas de las probetas V32f y V32p tienen un comportamiento similar al descrito para las probetas V23. Sin embargo en el tramo de carga de las probetas V32p hay mayor dispersión. Se observa una dispersión alta en los valores de esfuerzo cortante promedio máxima.

Figura 7.18. Esfuerzo cortante promedio vs  $\delta/L$  probetas a cortante: (a) V32f y (b) V32p



(a)



(b)

Fuente: Autor

Los dientes de sierra en las curvas de la Figura 7.17 y la Figura 7.18, describen pequeñas reducciones de capacidad del material, cuando una fisura se propaga cambia la trayectoria debido a la presencia de fibras.

El esfuerzo cortante máximo alcanzado  $\tau_{max}$ , en probetas V23 y V32 se calculó con base en la Ecuación 7.3 donde  $P_{max}$  es la fuerza máxima aplicada y  $A_v$  el área de corte de la probeta.

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{A_v}$$

Ecuación 7.3

En la Tabla 7.2 se encuentran los valores de esfuerzo cortante máximo perpendicular a la fibra. En las probetas V23 el valor promedio fue de 2.9MPa con una desviación de 0.3MPa y un coeficiente de variación de 0.10. En las probetas V32f el valor promedio fue de 2.2MPa con una desviación de 0.3MPa y un coeficiente de variación de 0.13. Para el cálculo de estos valores se excluyó el resultado de la probeta 5V32f por ser un valor atípico según el criterio de Chauvenet. En las probetas V32p el valor promedio fue de 2.3MPa con una desviación de 0.6MPa y un coeficiente de variación de 0.27.

Para las probetas 2V32p, 6V32p, 7V32p, 8V32p y 10V32p cuya superficie de fisuras indica fallo por cortante, la resistencia a cortante perpendicular a la fibra,  $F_{vpe}$ , corresponde al esfuerzo cortante máximo alcanzado. El valor promedio de resistencia a cortante perpendicular a la fibra fue de 2.3MPa con una desviación estándar de 0.59MPa y un coeficiente de variación de 0.26.

Tabla 7.2. Carga máxima y esfuerzo cortante promedio máximo y resistencia a cortante perpendicular a la fibra

V23				V32f				V32p					
Probeta	$P_{max}$ N	$A_v$ mm <sup>2</sup>	$\tau_{max}$ MPa	Probeta	$P_{max}$ N	$A_v$ mm <sup>2</sup>	$\tau_{max}$ MPa	Probeta	$P_{max}$ N	$A_v$ mm <sup>2</sup>	$\sigma_{max}$ MPa	$\tau_{max}$ MPa	$F_{vpe}$ MPa
1V23	8577	2527	3,39	1V32f	4980	2275	2,19	1V32p	5317	2276	2,34	2,34	*2,34
2V23	7160	2608	2,74	2V32f	5065	2272	2,23	2V32p	5043	2310	2,18	2,18	2,18
3V23	6968	2543	2,74	3V32f	5371	2390	2,25	3V32p	5233	2417	2,17	2,17	*2,17
4V23	8861	2567	3,45	4V32f	4757	2551	1,86	4V32p	7599	2291	3,32	3,32	*3,32
5V23	6576	2542	2,59	5V32f	7145	2294	*3,12	5V32p	4704	2243	2,10	2,10	*2,10
6V23	7105	2587	2,75	6V32f	5359	2333	2,30	6V32p	3817	2358	1,62	1,62	1,62
7V23	7787	2550	3,05	7V32f	5108	2438	2,09	7V32p	7762	2389	3,25	3,25	3,25
8V23	7708	2482	3,11	8V32f	4085	2442	1,67	8V32p	5581	2456	2,27	2,27	2,27
9V23	6673	2527	2,64	9V32f	5417	2412	2,25	9V32p	3476	2495	1,39	1,39	*1,39
10V23	7417	2563	2,89	10V32f	6781	2518	2,69	10V32p	5514	2549	2,16	2,16	2,16

El asterisco\* indica los resultados excluidos del promedio

Fuente: Autor

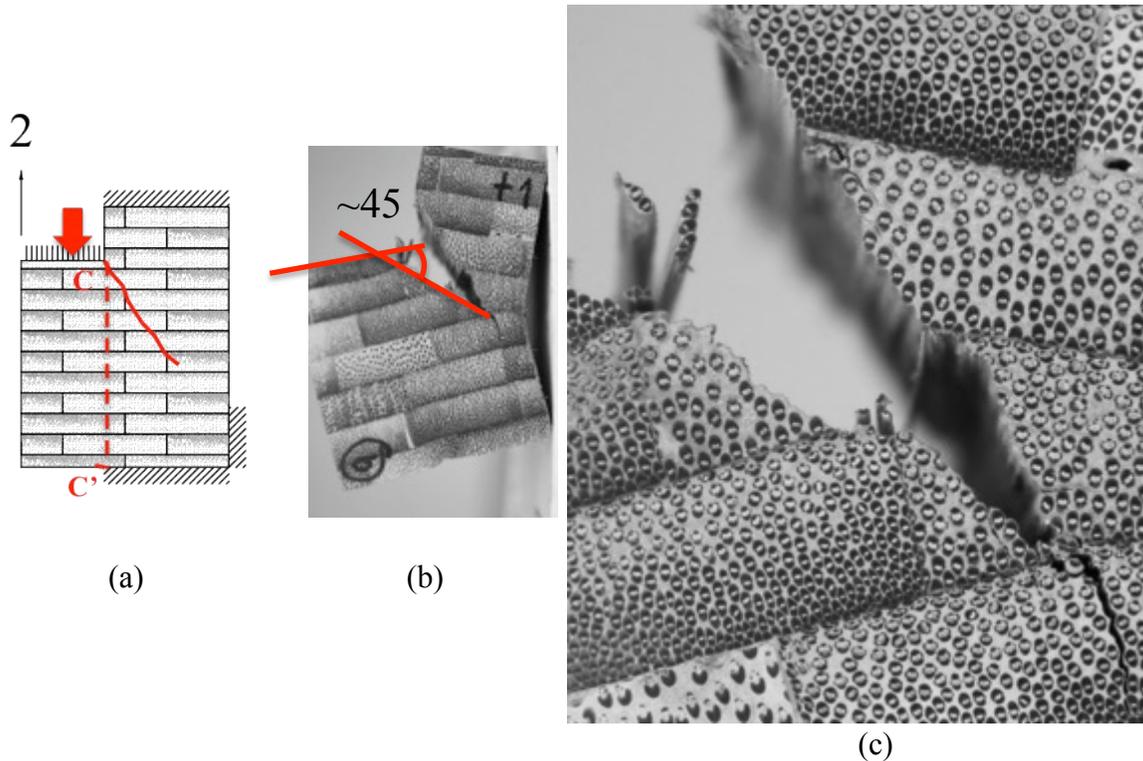
### 7.2.3 Observaciones durante los ensayos

#### Probetas V23

En todas las probetas V23 se presentó una fisura que comienza en la zona de cambio de altura C y se propaga a 45° aproximadamente con respecto a la vertical casi hasta la cara opuesta. Este fenómeno se produce porque los esfuerzos principales en tensión alcanzan la resistencia de la matriz de parénquima. En la Figura 7.19 se observa la falla de la probeta

9V23 y un acercamiento de la fisura. Es interesante observar que la trayectoria de la fisura no se afecta por los planos de unión entre láminas.

Figura 7.19. Probeta 9V23 después de ensayo (a) esquema, (b) vista lateral derecha y (c) acercamiento de la fisura.

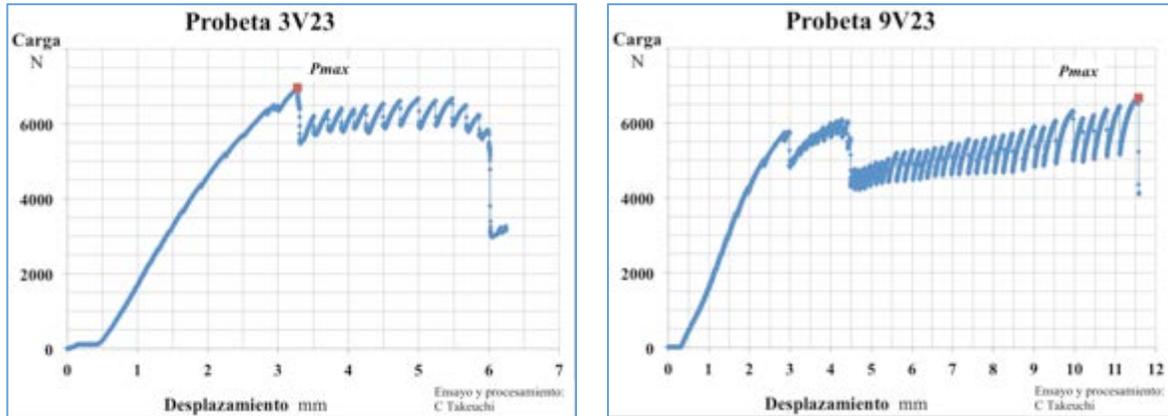


Fuente: Autor

En general, los diagramas carga desplazamiento son similares. La probeta resiste carga de forma continua hasta que se presenta la primera fisura. En este momento hay pérdida de resistencia, sin embargo la probeta no falla. Durante la descarga, el diagrama presenta pequeños saltos debido posiblemente a la diferencia de densidades de fibras que se encuentran en la trayectoria de la fisura. Las condiciones de apoyo impiden la generación de un mecanismo después de desarrollada la primera fisura. Existe una tendencia a formar una segunda fisura donde termina el apoyo de la cara inferior.

En la Figura 7.20 se observan las curvas carga desplazamiento de las probetas 3V23 y 9V23 y en la sección J.2.1 del Anexo J se encuentran las gráficas carga desplazamiento para los ensayos de las otras probetas V23 y fotografías de las probetas ensayadas.

Figura 7.20. Gráficos Carga Desplazamiento probetas: (a) 3V23 y (b) 9V23



Fuente: Autor

(a)

(b)

### Probetas V32f

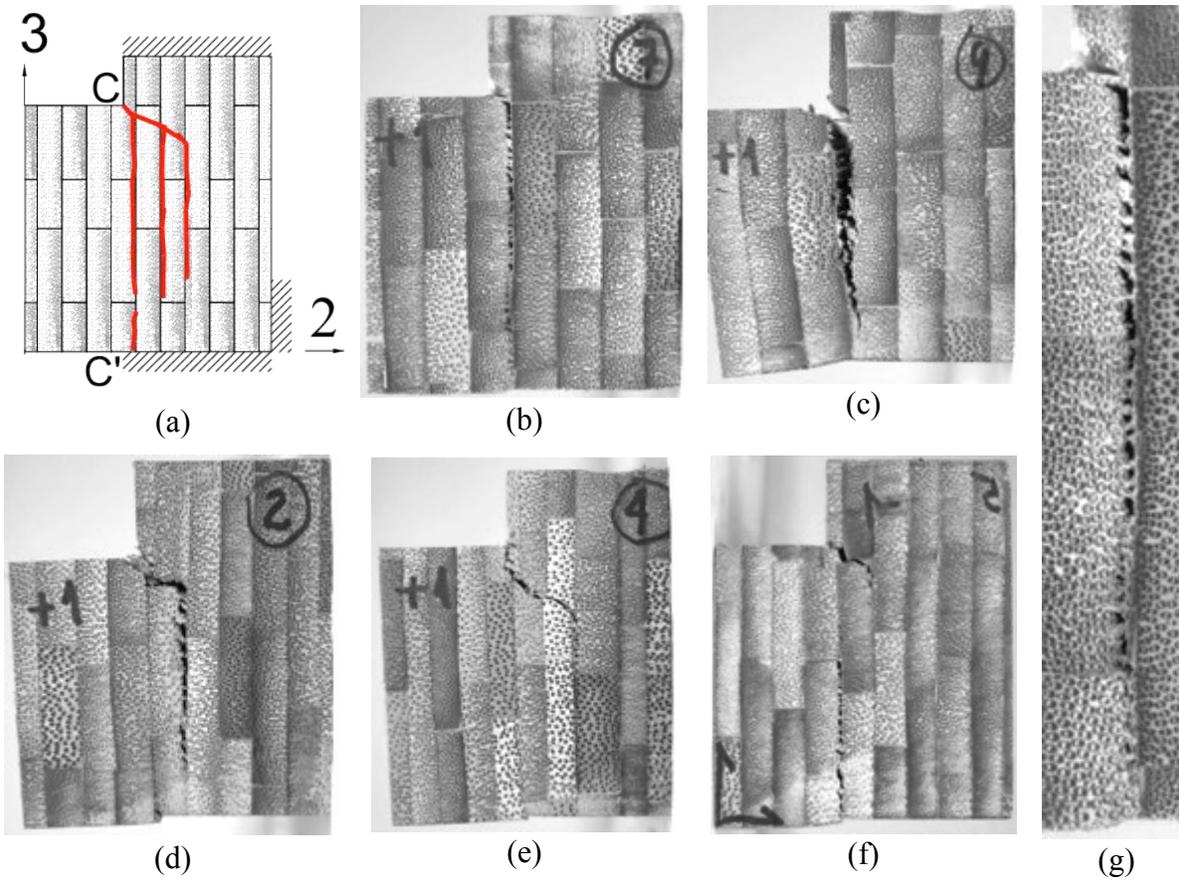
La mayoría de las probetas V32f fallan finalmente por corte paralelo a la fibra, donde la fisura comienza a 45° aproximadamente desde la zona de cambio de altura (punto C) y se propaga paralela a los tableros por la zona de baja densidad de fibras (Figura 7.21(a)). En una escala mayor de la fisura se observa que se rompe la matriz de parénquima y se mantiene pegada la unión entre láminas.

En las probetas 1V32f, 3V32f, 7V32f, 8V32f y 10V32f la trayectoria paralela a la dirección 3 se presenta en el tablero donde hay cambio de sección (Figura 7.21(b)) mientras que en las probetas 6V32f, 9V32f y 2V32f, se presenta en la zona de baja densidad de fibras del tablero inmediatamente posterior al cambio de altura (Figura 7.21(c)) y Figura 7.21(d). En la probeta 4V32f la fisura comienza paralela a la dirección 3, después se inclina y cruza 2 tableros y finalmente se propaga paralela a la dirección 3 como se observa en la Figura 7.21(e).

En particular, la probeta 5V32f mostró 2 fisuras que comienzan simultáneamente desde el punto C con una inclinación de 45° aproximadamente y desde el punto C' paralela a la dirección 3 como se observa en la Figura 7.21(f).

Al principio, las probetas resisten la carga de forma continua. Posteriormente, tanto en el tramo de carga como en el de descarga, la curva presenta pequeños saltos. La probeta 6V32f es la única que presenta una pérdida total de resistencia. En la Figura 7.22 se observan las gráficas carga desplazamiento de las probetas 7V32f, 9V32f, 2V32f, 4V32f, 5V32f y 6V32f. y en la sección J.2.2 del Anexo J se encuentran las gráficas carga desplazamiento y fotografías de fallas de las probetas V32f que no se encuentran en el cuerpo del trabajo.

Figura 7.21. Trayectoria de fisuración de las probetas (a) esquema, (b) 7V32f, (c) 9V32f, (d) 2V32f, (e) 4V32f, (f) 5V32f y (g) ampliación fisura probeta 7V32f



Fuente: Autor

Figura 7.22. Gráficos Carga Desplazamiento probetas: (a) 7V32f, (b) 9V32f, (c) 2V32f, (d) 4V32f, (e) 5V32f y (f) 6V32f

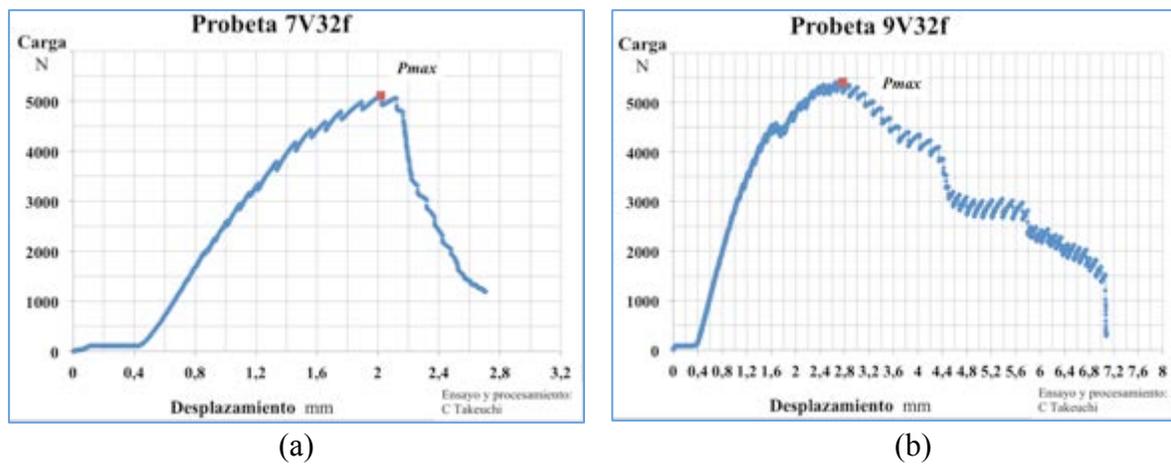
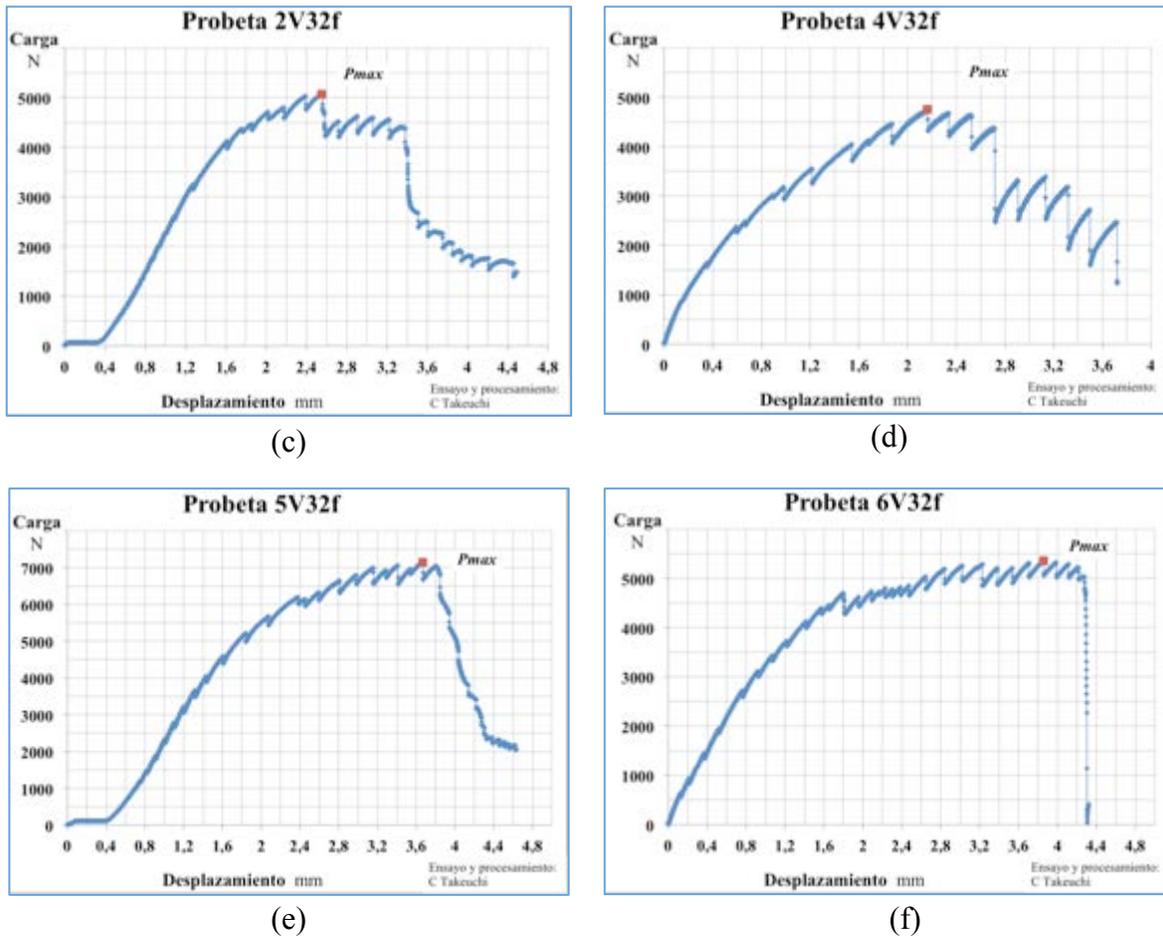


Figura 7.22. Gráficos Carga Desplazamiento probetas: (a) 7V32f, (b) 9V32f, (c) 2V32f, (d) 4V32f, (e) 5V32f y (f) 6V32f



Fuente: Autor

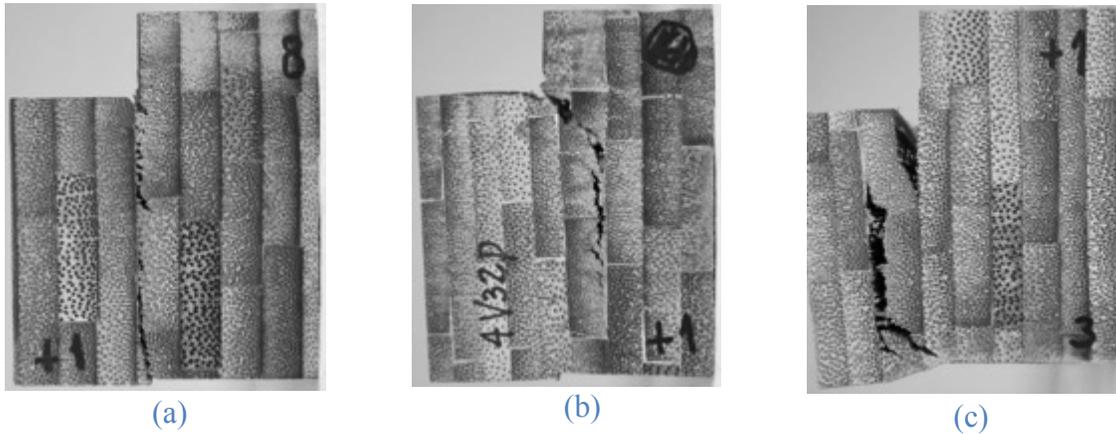
### Probetas V32p

La mayoría de las probetas V32p presentaron una fisura paralela a la dirección 3 en el cambio de sección, lo cual representa una falla por cortante perpendicular a la fibra. En las probetas 2V32p, 6V32p, 7V32p, 8V32p y 10V32p la fisura se presenta en la zona de transición de altura (área esperada), en la lámina que en esta zona tiene baja densidad de fibras, como se observa en la Figura 7.23(a) que corresponde a la falla de la probeta 8V32p.

En las probetas 4V32p, 5V32p y 9V32p varias fisuras empiezan en la zona de cambio de altura, se desvían en diagonal hacia la parte posterior de las probetas y continúan después en forma paralela a los tableros por la zona de baja densidad de fibras. En la Figura 7.23(b) se observa la falla de la probeta 4V32p.

En las probetas 1V32p y 3V32p se observan dos fisuras iniciales, una que se origina en el punto C y se propaga paralela a la dirección 3. La otra fisura comienza en C' y se propaga inclinada hasta cruzar un tablero y después continúa paralela a la dirección 3 (Figura 7.23(c)).

Figura 7.23. Falla de las probetas (a) 8V32p, (b) 4V32p y (c) 3V32p



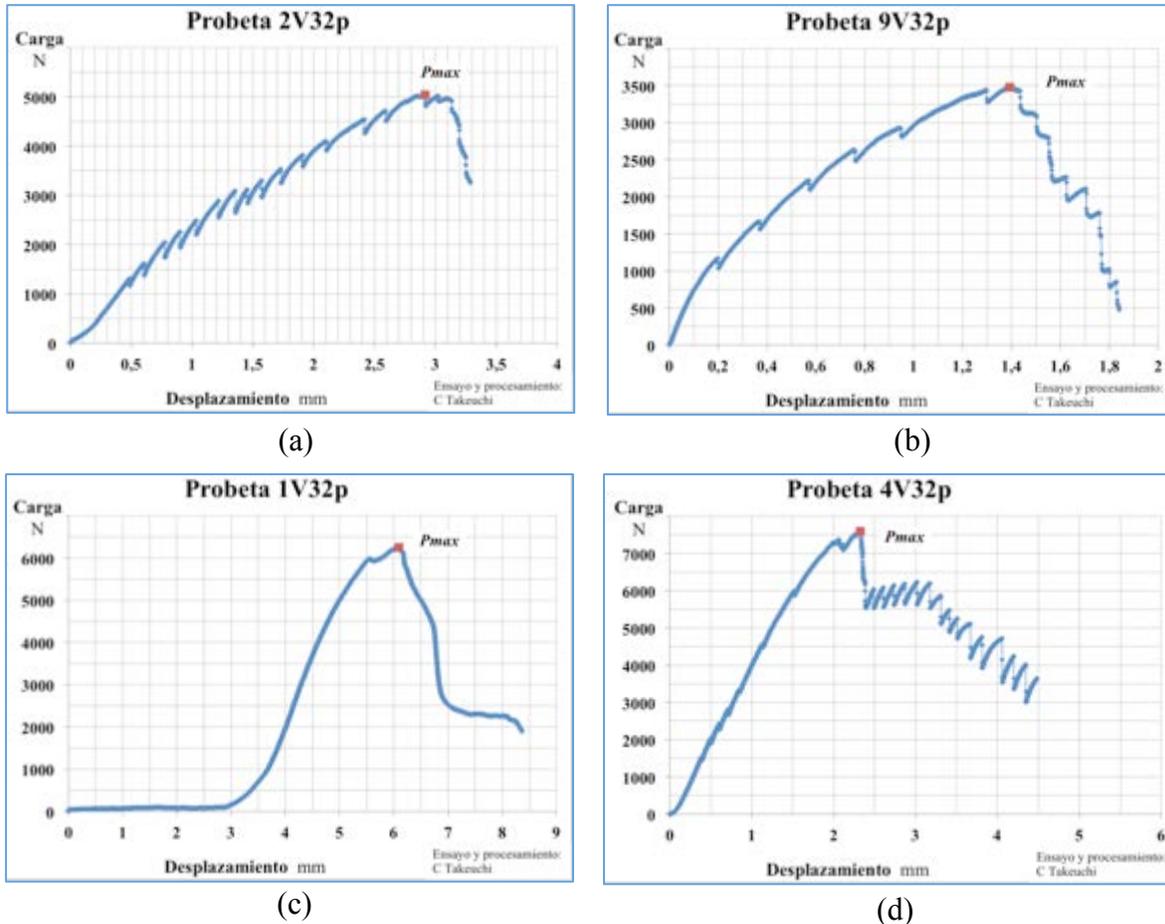
Fuente: Autor

La forma de las curvas carga desplazamiento fue similar para las probetas que fallaron por corte en el área esperada y para la probeta 9V32p. Al principio, las probetas resisten la carga de forma continua. Posteriormente, la curva presenta pequeños saltos. En la Figura 7.24(a) se observa la curva carga desplazamiento de la probeta 2V32p y en la Figura 7.24(b) la que corresponde a la probeta 9V32p.

Para las probetas 1V32p, 3V32p y 5V32p, el tramo continuo es mayor y una vez se alcanza la carga máxima se pierde resistencia de una manera relativamente continua como se observa en la Figura 7.24(c) que corresponde a la curva de la probeta 1V32p. Cuando la probeta 4V32p pierde resistencia, después de alcanzar el esfuerzo máximo, presenta pequeños saltos como se observa en la Figura 7.24(d).

En la sección J.2.3 del Anexo J se encuentran las gráficas carga desplazamiento y fotografías de las probetas V32p una vez ensayadas que no están en el cuerpo del trabajo.

Figura 7.24. Gráficos Carga Desplazamiento probetas: (a) 2V32p, (b) 9V32p, (c) 1V32p y (d) 4V32p



Fuente: Autor

### 7.2.4 Análisis de resultados

Las probetas V23 presentaron fisuras que comienzan en la zona de cambio de altura C y se propagan a 45° aproximadamente cuando los esfuerzos principales en tensión alcanzan la resistencia de la matriz de parénquima. Las primeras fisuras de las probetas V32f son diagonales y terminan siendo paralelas a la dirección de la carga. Algunas probetas V32p tienen una forma de falla similar a las probetas V32f. Otras si presentan fisuras paralelas a la dirección de la carga que indican falla por cortante.

La falla de las probetas V23 y V32 no es tan frágil como la que se presenta en las probetas V13 y V12.

El valor promedio de esfuerzo máximo alcanzado en probetas V23 fue de 2.9MPa; en probetas V32f fue de 2.2MPa y en probetas V32p fue de 2.3MPa. Si se consideran las probetas V23 y V32, el valor promedio de esfuerzo máximo a corte paralelo a la fibra, es de 2.50MPa con un coeficiente de variación de 0.21.

El valor promedio de resistencia perpendicular a la fibra de las cinco probetas V32p que presentaron fallo por cortante, fue de 2.3MPa con un coeficiente de variación de 0.26. El valor promedio de resistencia paralela a la fibra había sido de 6.1MPa.

Los resultados obtenidos no son comparables con los de Cortés y colaboradores (Cortes et al., 2010) dado que los valores reportados de resistencia perpendicular a la fibra corresponden a sollicitación de cortante en fibras con fallo por flexión que correspondería a probetas V21 no ensayadas en el presente estudio.

La forma de falla es función de la disposición de las láminas. En las probetas V23, donde la sollicitación es perpendicular a los tableros atravesando varias láminas en zonas alternas de alta y baja concentración de fibras la superficie de fisura es diagonal. En las probetas V32, la falla final es por cortante.

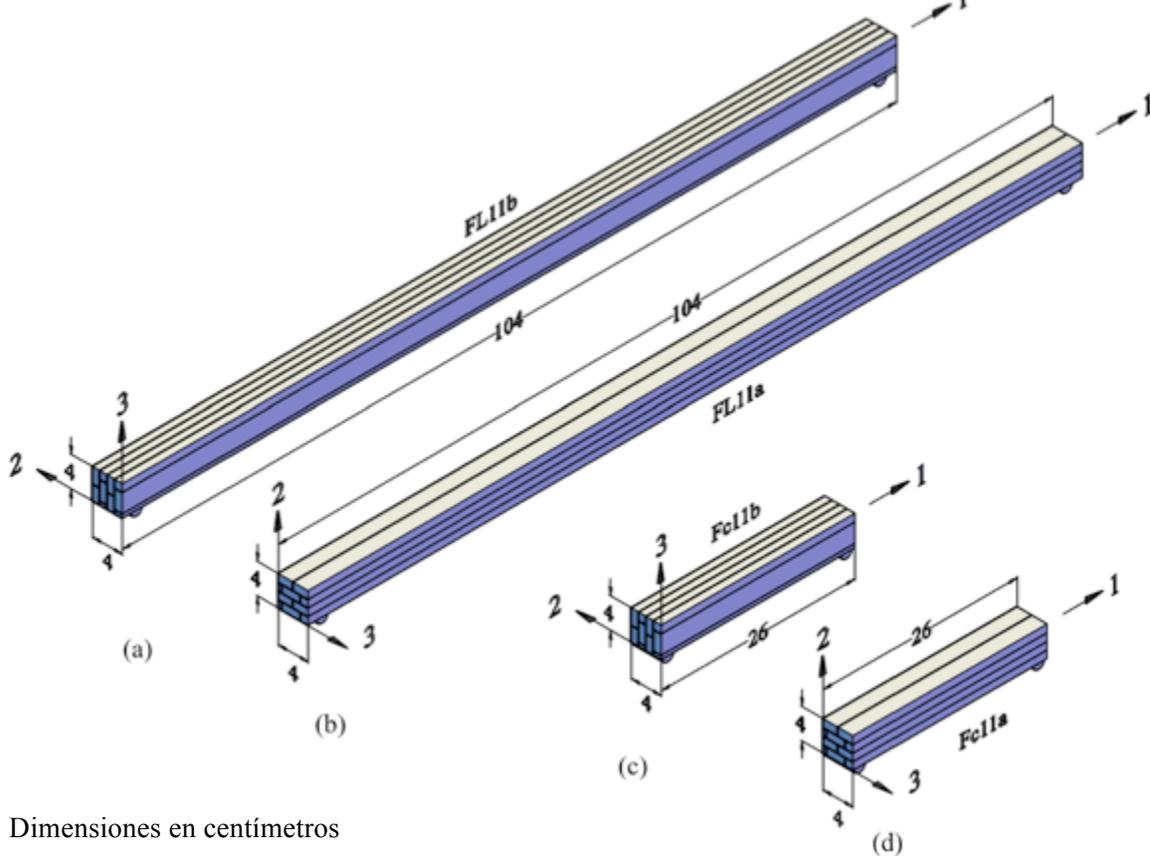
Si se desea determinar la resistencia a cortante perpendicular a las fibras, es recomendable utilizar la geometría de las probetas V32p, ya que algunas de estas fueron las únicas que fallaron únicamente por cortante.

## 8. FLEXIÓN EN BGLPP

En el presente capítulo se describe el comportamiento de probetas de BGLPP en ensayos de flexión. Se ensayaron probetas de sección cuadrada con dos longitudes diferentes, esperando obtener falla por flexión en el caso de las probetas largas y falla por corte en el caso de las probetas cortas. Por cada longitud hay dos tipos de probetas donde cambia la orientación de las láminas en el momento del ensayo.

Para identificar cada una de las probetas, estas fueron marcadas con un número que corresponde al bloque de material de BGLPP de donde fueron obtenidos, con la letra F y los números 11, para indicar que las probetas están solicitadas a flexión longitudinal con esfuerzos normales paralelos a la dirección 1 y actuando en el plano normal a 1, con la letra “c” o “L”, para probetas de flexión cortas o largas, y por último con las letras “a” o “b”, para indicar la orientación de las láminas. En la Figura 8.1 que corresponde a la Figura 3.32 se observan los diferentes tipos de probetas a flexión y sus dimensiones.

Figura 8.1 Tipos de probetas a Flexión: (a) FL11b, (b) FL11a, (c) Fc11b y (d) Fc11a



Dimensiones en centímetros

Fuente: Autor

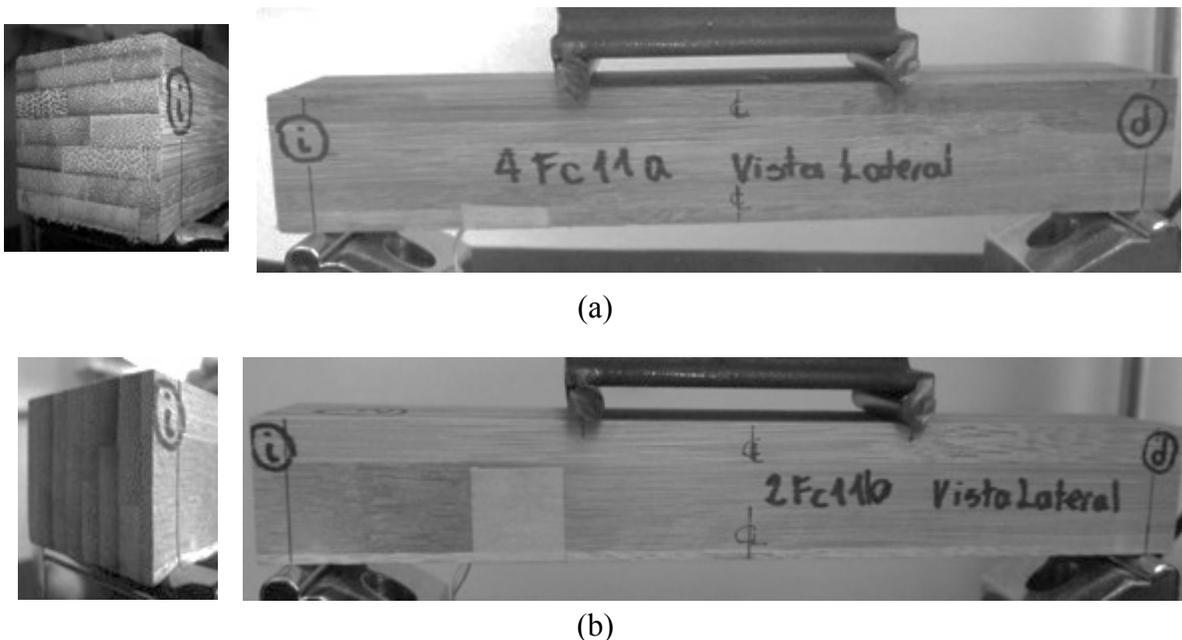
## 8.1 FLEXIÓN LONGITUDINAL EN PROBETAS CORTAS DE BGLPP

Las probetas cortas tienen 26cm de longitud y se ensayaron con una luz libre de 24cm. La relación entre la luz libre y la altura fue de 6. Se ensayaron dos tipos de probetas de flexión cortas denominadas Fc11a y Fc11b.

Las probetas Fc11a son probetas ensayadas con las láminas en posición horizontal. Por tanto, la aplicación de la carga fue perpendicular al plano de unión entre tableros y los esfuerzos normales por flexión a una distancia determinada del eje neutro, se encuentran con una distribución de fibras por lámina relativamente uniforme. En todos los ensayos, la mayor concentración de fibras por lámina se dispuso en la parte inferior como se observa en la Figura 8.2(a) que corresponde al ensayo de la probeta 4Fc11a.

Las probetas Fc11b son probetas ensayadas con las láminas en posición vertical. Por tanto, la aplicación de la carga fue paralela al plano de unión entre tableros y los esfuerzos normales por flexión a una distancia determinada del eje neutro, se encuentran con una distribución alterna entre zonas de baja y alta densidad de fibras por lámina como se observa en la Figura 8.2(b) que corresponde al ensayo de la probeta 2Fc11b.

Figura 8.2 Sección transversal y vista lateral probetas (a) 4Fc11a y (b) 2Fc11b

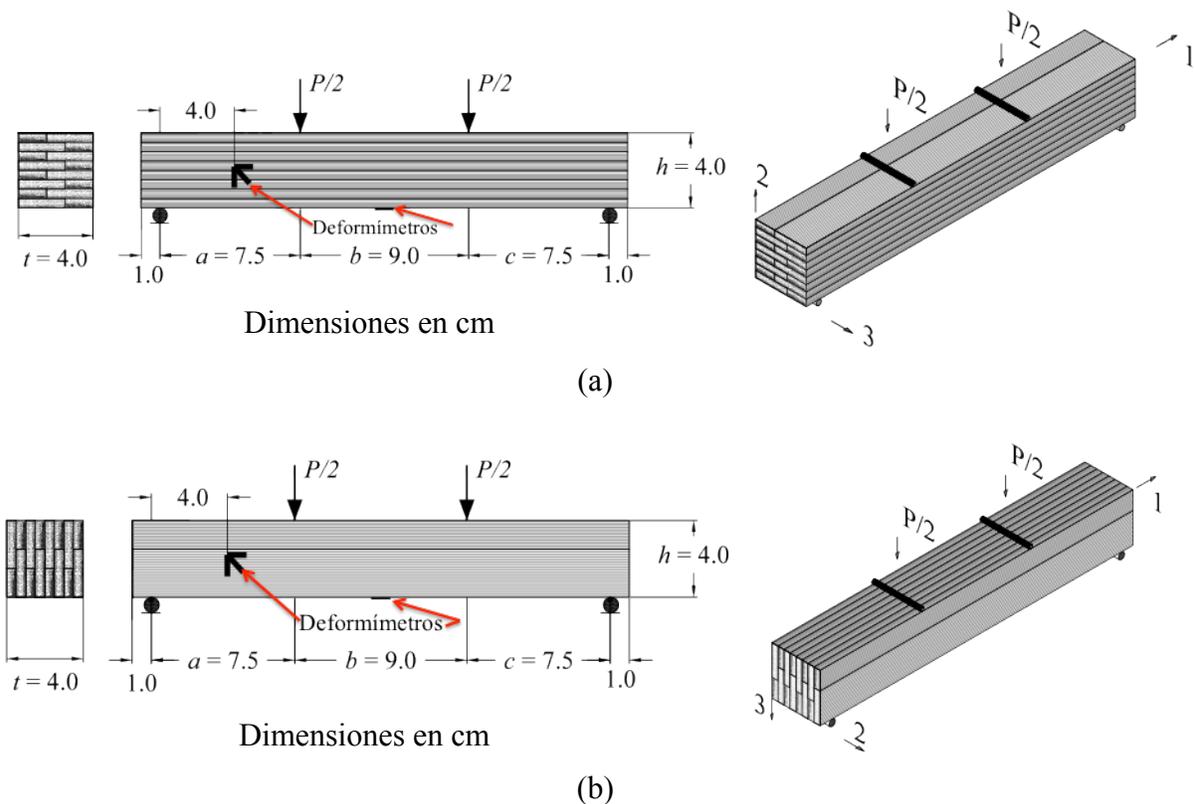


Fuente: Autor

### 8.1.1 Descripción de los ensayos

Se realizaron 19 ensayos de flexión en probetas cortas, 10 en probetas Fc11a y 9 en probetas Fc11b, con dos cargas concentradas centradas con una distancia de separación fija de 9cm, utilizando para esto, un perfil doble T con varillas soldadas con un peso total de 6N. En la Figura 8.3 se observa el esquema del ensayo.

Figura 8.3 Montaje ensayo probetas cortas (a) Fc11a y (b) Fc11b



Fuente: Autor

Para cada probeta, se midió el espesor,  $t$ , en las caras superior e inferior, y la altura,  $h$ , en las caras frontal y posterior, en tres puntos: el extremo izquierdo, en el centro y en el extremo derecho. Con el promedio de estos se calculó el módulo de sección. La longitud,  $L$ , se midió en la parte frontal y en la posterior. En la Tabla K.1 y la Tabla K.2 de la sección K.1 del anexo K se encuentran los valores anteriormente mencionados, para cada una de las probetas.

Los ensayos fueron realizados a una velocidad de 0.045mm/s (2.5mm/min). Se midió la deformación longitudinal de todas la probetas, por medio de un deformímetro unidireccional, ubicado en la cara inferior y en la mitad de la luz. Adicionalmente se instaló

un deformímetro tridireccional a 3 probetas Tipo Fc11a (1Fc11a, 5Fc11a y 9Fc11a) y 3 probetas Tipo Fc11b (1Fc11b, 5Fc11b y 9Fc11b) en el eje neutro a 4cm de uno de los apoyos.

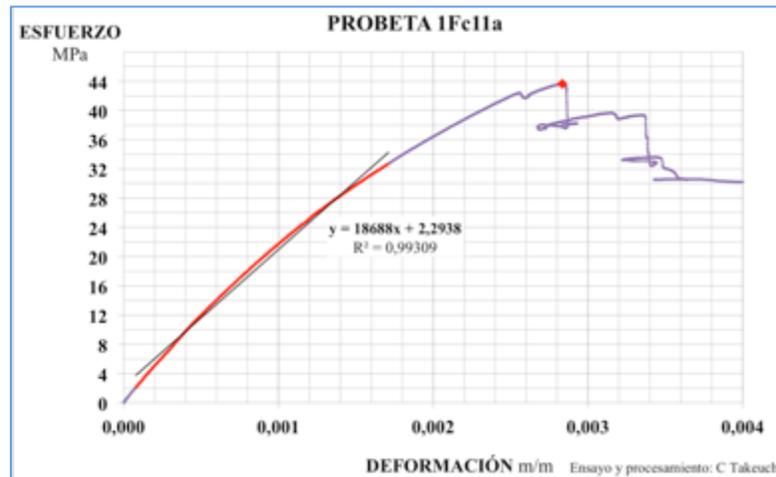
### 8.1.2 Cálculos y resultados

El esfuerzo normal de flexión longitudinal fue calculado con base en la Ecuación 8.1 donde  $M$  es el momento flector en el tercio medio de la probeta y  $S$  el módulo de sección.

$$\sigma_f = \frac{M}{S} = \frac{Pa}{2} \frac{th^2}{6} \quad \text{Ecuación 8.1}$$

Se determinó el módulo de elasticidad longitudinal a flexión,  $E_1$ , con base en la lectura de la deformación longitudinal,  $\epsilon_1$ . Se calculó, como la pendiente de la regresión lineal de los puntos de la curva esfuerzo deformación que se encuentran entre el 20% y el 75% del esfuerzo máximo. En la Figura 8.4 se observa el diagrama de esfuerzo deformación de la probeta 1Fc11a. En la sección K.1.1 del Anexo K se encuentran los diagramas esfuerzo deformación para el resto de las probetas Fc11a y en la sección K.1.2 se encuentran las que corresponden a las probetas Fc11b.

Figura 8.4. Gráfica esfuerzo deformación probeta 1Fc11a

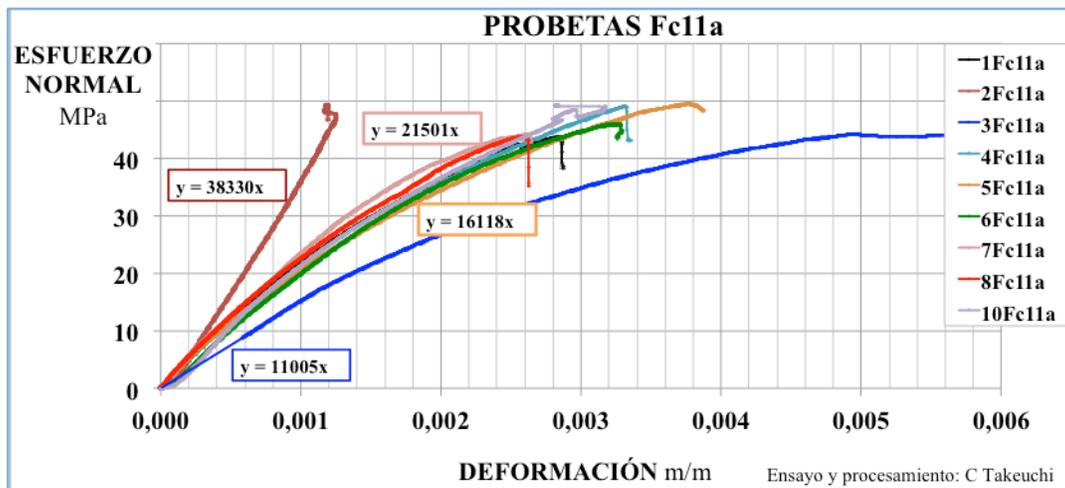


Fuente: Autor

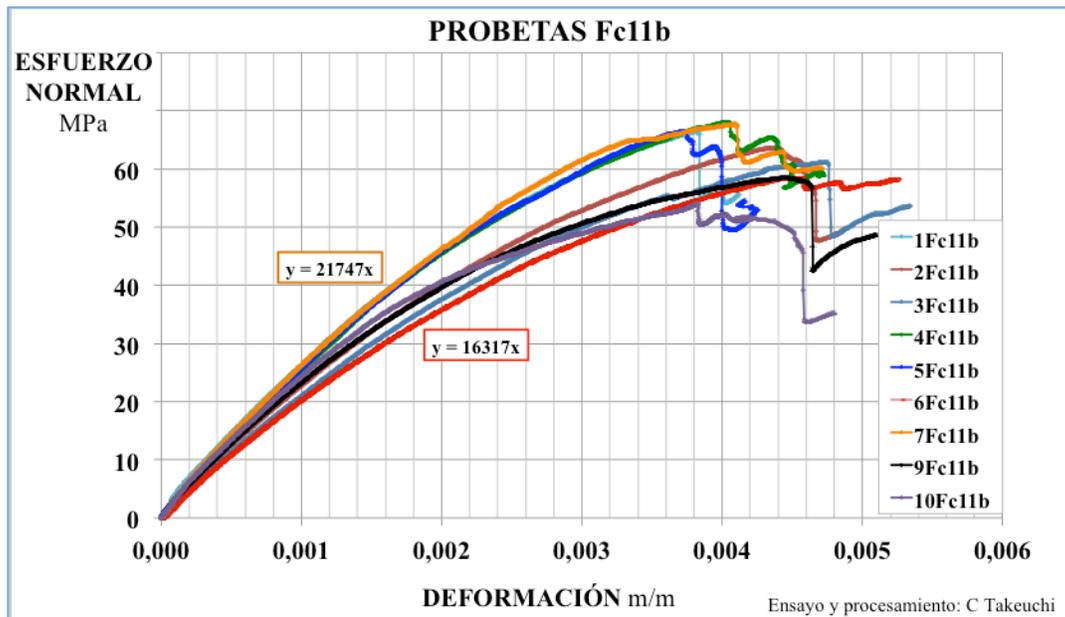
En la Figura 8.5(a) se muestran las curvas esfuerzo normal vs deformación longitudinal hasta alcanzar la carga máxima de las probetas Fc11a, con excepción de la que corresponde a la probeta 9Fc11a debido a que las lecturas de deformación no cambiaron durante el proceso de carga, y en la Figura 8.5(b) se muestran las curvas esfuerzo normal vs deformación longitudinal que corresponden a las probetas Fc11b. Se indican en las gráficas los mayores y menores módulos de elasticidad determinados.

En la Tabla 8.1 se encuentran los valores de módulo de elasticidad longitudinal. El valor promedio de módulo de elasticidad en probetas Fc11a fue de 18473MPa con una desviación estándar de 1725MPa y un coeficiente de variación de 0.09. No se tuvieron en cuenta los valores de módulo de elasticidad de las probetas 2Fc11a y 3Fc11a por considerarse valores atípicos. El valor promedio de módulo de elasticidad en probetas Fc11b fue de 19545MPa con una desviación estándar de 2128MPa y un coeficiente de variación de 0.11.

Figura 8.5. Gráfica esfuerzo normal vs deformación probetas (a) Fc11a y (b) Fc11b



(a)



(b)

Fuente: Autor

Tabla 8.1. Módulo de elasticidad probetas Fc11

Fc11a			Fc11b		
Probeta	$E_1$ Mpa	Coef Correlación	Probeta	$E_1$ Mpa	Coef Correlación
1Fc11a	18688	0,9931	1Fc11b	21328	0,9933
2Fc11a	*38330	0,9997	2Fc11b	18250	0,9930
3Fc11a	*11005	0,9881	3Fc11b	17033	0,9939
4Fc11a	16961	0,9953	4Fc11b	21350	0,9941
5Fc11a	16118	0,9890	5Fc11b	21688	0,9952
6Fc11a	18280	0,9945	6Fc11b	16317	0,9930
7Fc11a	21501	0,9978	7Fc11b	21747	0,9946
8Fc11a	19352	0,9935	9Fc11b	18215	0,9909
10Fc11a	18413	0,9859	10Fc11b	19975	0,9912

El asterisco\* indica los resultados excluidos del promedio

Fuente: Autor

El esfuerzo cortante fue calculado con base en la Ecuación 8.2 donde  $V$  es el cortante en los tercios extremos y  $P$  es la carga aplicada. Se calcula el esfuerzo cortante máximo con la Ecuación 8.2, considerando  $P$  como la carga máxima aplicada  $P_{max}$ .

$$\tau = \frac{3V}{2th} = \frac{3P/2}{2th} \quad \text{Ecuación 8.2}$$

La deformación angular de las probetas 1Fc11a, 5Fc11a, 1Fc11b, 5Fc11b y 9Fc11b se calculó con base en la Ecuación 8.3 donde  $\epsilon_{45^\circ}$  es la deformación a  $45^\circ$ ,  $\epsilon_1$  es la deformación horizontal en la dirección 1 y  $\epsilon_2$  es la deformación vertical en la dirección 2, medidos en la roseta de deformaciones.

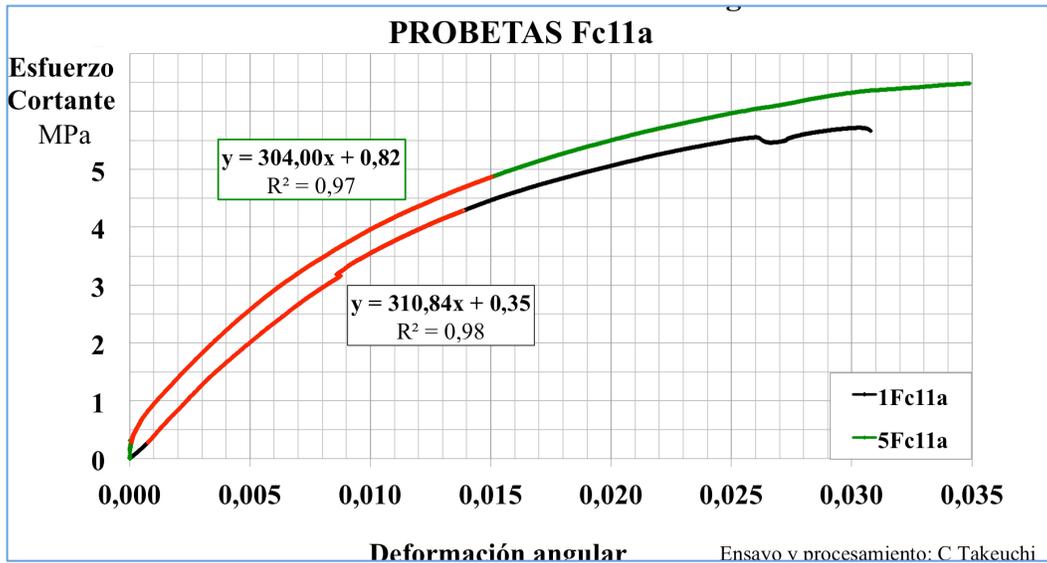
$$\gamma_{12} = 2\epsilon_{45^\circ} - \epsilon_1 - \epsilon_2 \quad \text{Ecuación 8.3}$$

Para las probetas anteriormente mencionadas se calculó el módulo de elasticidad a cortante,  $G$ , como la pendiente de la regresión lineal de los puntos de la curva esfuerzo cortante vs deformación angular, entre el 20% y el 75% del esfuerzo cortante máximo (Figura 8.6).

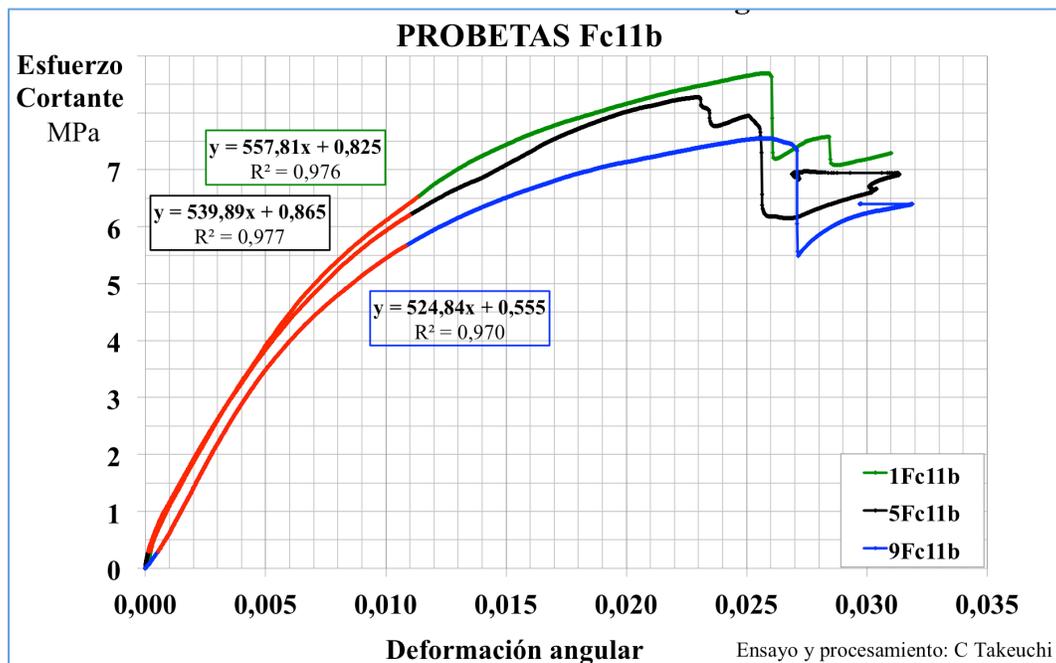
En la Tabla 8.2 se encuentran los valores de esfuerzo cortante máximo y módulo de elasticidad a cortante. Para las probetas Fc11a, el valor promedio de esfuerzo cortante máximo fue de 6.2MPa con una desviación estándar de 0.4MPa y un coeficiente de variación de 0.06. El valor promedio de módulo de elasticidad a cortante fue de 307MPa con una desviación estándar de 4.8MPa y un coeficiente de variación de 0.02. Para las probetas Fc11b el valor promedio de esfuerzo cortante máximo fue de 8.2MPa con una desviación estándar de 0.5MPa y un coeficiente de variación de 0.06, no se incluyó el valor de la probeta 10Fc11b, debido a que el ensayo se detuvo antes de que se observaran fisuras.

El valor promedio de módulo de elasticidad a cortante fue de 541MPa con una desviación estándar de 16.5MPa y un coeficiente de variación de 0.03.

Figura 8.6. Gráfica esfuerzo cortante vs deformación angular probetas (a) Fc11a y (b) Fc11b



(a)



(b)

Fuente: Autor

Tabla 8.2. Esfuerzo cortante máximo, Módulo de elasticidad a cortante

Fc11a				Fc11b			
Probeta	$\tau_{max}$ Mpa	G Mpa	Coef Correlación	Probeta	$\tau_{max}$ Mpa	G Mpa	Coef Correlación
1Fc11a	5,72	311	0,9922	1Fc11b	8,69	558	0,9762
2Fc11a	6,50			2Fc11b	8,03		
3Fc11a	5,77			3Fc11b	7,88		
4Fc11a	6,50			4Fc11b	8,88		
5Fc11a	6,50	304	0,9945	5Fc11b	8,27	540	0,9774
6Fc11a	6,11			6Fc11b	7,64		
7Fc11a	5,74			7Fc11b	8,44		
8Fc11a	5,85						
9Fc11a	6,40			9Fc11b	7,55	525	0,9699
10Fc11a	6,52			10Fc11b			

Fuente: Autor

### 8.1.3 Observaciones durante los ensayos

#### Probetas Fc11a

Todas las probetas Fc11a presentaron fisuras paralelas en los tercios extremos cerca de las uniones entre tableros y no necesariamente en el plano neutro. Estas fisuras representan una falla por cortante paralelo a las fibras. La superficie de falla se presenta en el tablero que en la zona de unión tiene menor densidad de fibras, por separación de las fibras de la parénquima. Se observa aplastamiento tanto en los apoyos como en los puntos de aplicación de la carga.

Los diagramas carga desplazamiento de las probetas tuvieron aproximadamente el mismo comportamiento. La curva crece de manera continua hasta que alcanza su carga máxima. Se observa la primera superficie de falla y una pérdida de resistencia. A pesar de todo la probeta sigue resistiendo carga y se presentan saltos en el tramo de descarga a la par que la superficie de falla se extiende y aparecen nuevas superficies de falla. Cuando ya la deformación es grande, hay rotura de fibras en la parte inferior. En la Figura 8.7 se observa el estado final de la probeta 1Fc11a y el diagrama carga desplazamiento. En la sección K.1.1 del Anexo K se encuentran las imágenes de las fallas y las curvas carga desplazamiento de las otras probetas Fc11a.

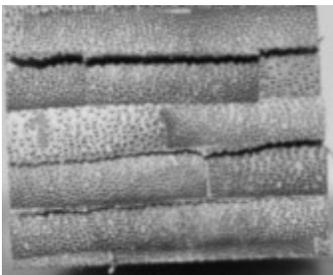
Figura 8.7. Probeta 1Fc11a, (a) vista general, (b) apoyo izquierdo, (c) acercamiento fisuras en apoyo izquierdo y (d) diagrama carga desplazamiento.



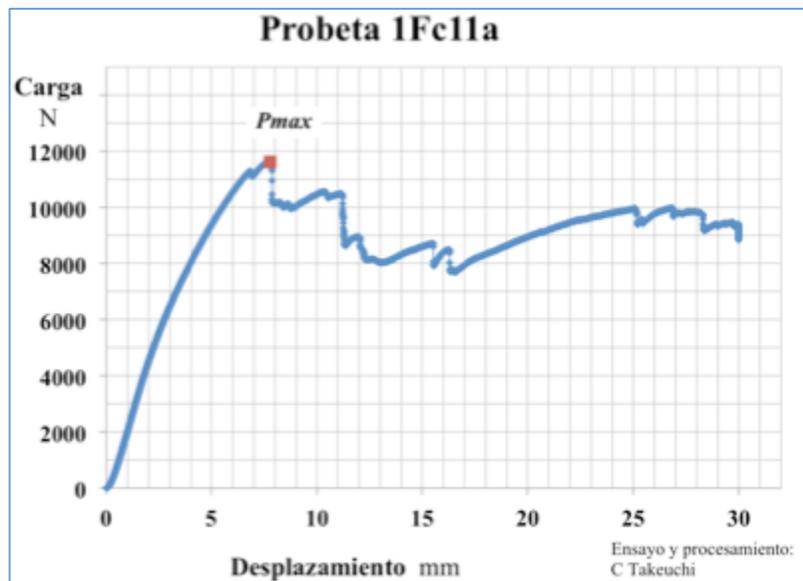
(a)



(b)



(c)



(d)

Fuente: Autor

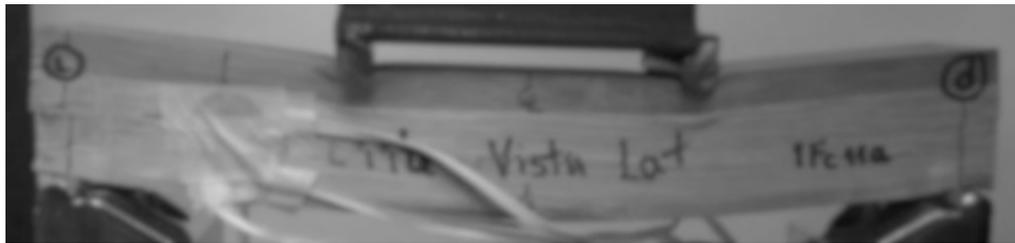
### Probetas Fc11b

En todas las probetas Fc11b, con excepción de la probeta 10Fc11b que no se llevó a la falla, se presenta una superficie de fisura casi sobre el plano neutro en cada uno de los tercios extremos de la viga. Este tipo de fractura representa una falla por cortante paralelo a la fibra. Adicionalmente, se observa aplastamiento tanto en los apoyos como en los puntos de aplicación de la carga.

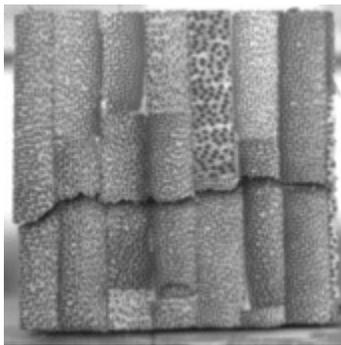
Los diagramas carga desplazamiento de las probetas tuvieron aproximadamente el mismo comportamiento. La curva crece de manera continua hasta que alcanza su carga máxima. Se observa la primera superficie de falla y una pérdida de resistencia. A pesar de todo la probeta sigue resistiendo carga y se presentan saltos en el tramo de descarga cuando la

superficie de la fisura se extiende o aparecen nuevas fisuras. En la Figura 8.8 se observa la probeta 1Fc11b después de la aparición de la primera fisura, el extremo izquierdo y el diagrama carga desplazamiento.

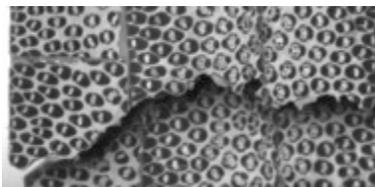
Figura 8.8. Probeta 1Fc11b, (a) vista general, (b) estado final del extremo izquierdo, (c) acercamiento fisura tres primeras láminas y (e) diagrama carga desplazamiento.



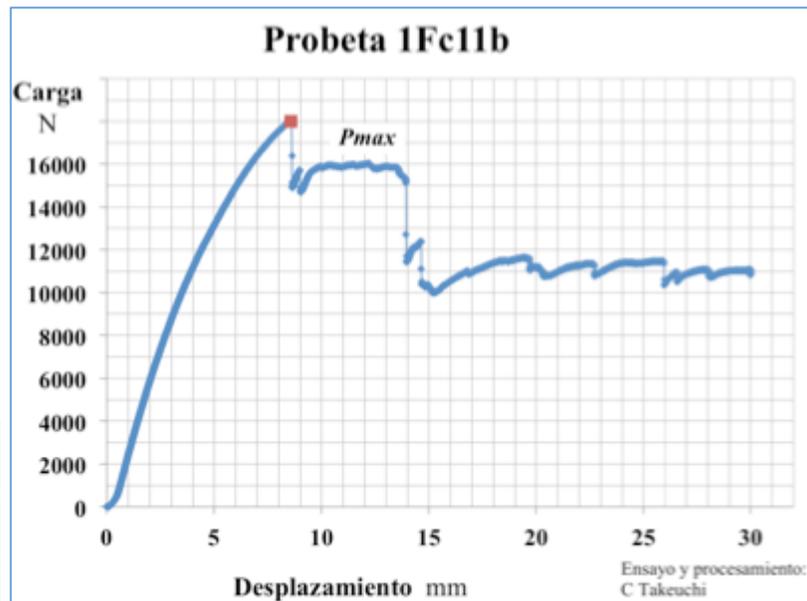
(a)



(b)



(c)



(d)

Fuente: Autor

En la sección K.1.2 del Anexo K se encuentran las curvas carga desplazamiento e imágenes de las fallas del resto de probetas Fc11b ensayadas.

#### 8.1.4 Análisis de resultados

Todas las probetas fallaron por cortante paralelo a la fibra. El valor promedio de esfuerzo cortante máximo en las probetas Fc11a fue de 6.2MPa, con un coeficiente de variación de 0.06 y en probetas Fc11b fue de 8.2MPa con un coeficiente de variación de 0.03. El valor

de esfuerzo cortante paralelo a la fibra encontrado en el presente trabajo fue de 5.7MPa en probetas V12 (Cortante paralelo a las fibras paralelo al plano de tableros) y de 6.9 MPa en probetas V13 (Cortante paralelo a las fibras perpendicular al plano de tableros).

En general la curva carga desplazamiento para las probetas de flexión corta son similares, tienen una zona de acomodamiento, una parte elástica y una parte inelástica antes de la carga máxima. Después de alcanzar la carga máxima, la probeta sigue resistiendo carga.

El valor promedio de módulo de elasticidad longitudinal a flexión de las probetas Fc11a fue de 18473MPa, con un coeficiente de variación de 0.09 y de las probetas Fc11b fue 19545MPa con un coeficiente de variación de 0.11. López y Correal (López & Correal, 2009) reportan valores de 9523MPa y 11456MPa con coeficientes de variación de 0.12 y 0.13 para elementos solicitados a flexión con láminas horizontales en el primer caso y verticales en el segundo caso. Correal y colaboradores (Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014) reportan valores de 12720MPa y 13260MPa con coeficientes de variación de 0.05 y 0.004 en el caso de flexión de probetas con láminas horizontales y verticales respectivamente. Hackmayer y colaboradores (Hackmayer, Rodríguez, & Takeuchi, 2010) reportan un valor promedio de 20000MPa y de 19000MPa determinados a partir del desplazamiento en el centro de la luz en 10 vigas, para cada caso, con disposición de láminas verticales con relación luz altura de 28 y 24, respectivamente, donde el componente de deflexión por cortante no es importante.

En guadua rolliza se encuentran valores promedio del módulo de elasticidad de 16000Mpa, 15470MPa y 16120MPa con guadas de 3.0m, 2.5 y 2.0 de luz respectivamente (Prieto & Sánchez, 2000). Luna y colaboradores (Luna, Lozano, & Takeuchi, 2014) reportan un valor promedio de 13670MPa de ensayos en guadua rolliza de la parte media del culmo.

En ensayos de láminas se encontraron valores promedio de módulo de elasticidad longitudinal de 19559MPa a compresión, de 21123MPa a tensión determinados a partir de lecturas de deformación y de 15984MPa a flexión en láminas con menor densidad de fibra en la parte inferior, determinado a partir de la lectura de desplazamiento del dispositivo de carga.

Se encontró un valor promedio del módulo de elasticidad a cortante G de 307MPa con un coeficiente de variación de 0.02 en probetas Fc11a y de 541MPa con un coeficiente de variación de 0.03 en probetas Fc11b. A partir del giro y momento torsor en ensayos de guadas rollizas a torsión Torres (Torres, 2005) encontró valores de 650MPa a 930MPa y Luna y colaboradores (Luna et al., 2014) encontraron valores promedio de 550MPa y 660MPa en probetas de la parte media y baja del culmo respectivamente.

## 8.2 FLEXIÓN LONGITUDINAL EN PROBETAS LARGAS DE BGLPP

Las probetas largas tienen 104cm de longitud y se ensayaron con una luz libre de 99.7cm. La relación entre la luz libre y la altura fue de 24.9. Se ensayaron dos tipos de probetas de flexión largas denominadas FL11a y FL11b.

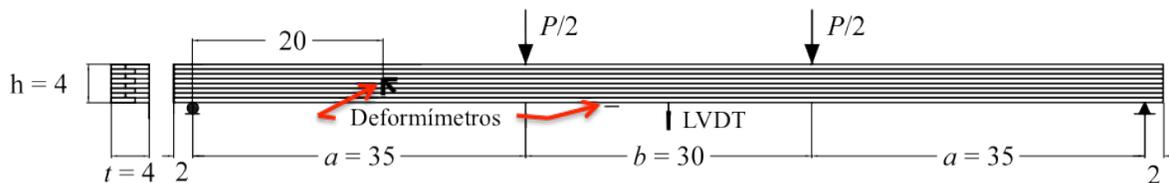
Las probetas FL11a son probetas ensayadas con las láminas en posición horizontal. En este caso, la carga fue aplicada perpendicularmente al plano de unión entre tableros y los esfuerzos normales por flexión a una distancia determinada del eje neutro, se encuentran con una distribución de fibras por lámina relativamente uniforme.

Las probetas FL11b son probetas ensayadas con las láminas en posición vertical. Por tanto, la aplicación de la carga fue aplicada paralelamente al plano de unión entre tableros y los esfuerzos normales por flexión a una distancia determinada del eje neutro, se encuentran con una distribución alterna entre zonas de baja y alta densidad de fibras por lámina.

### 8.2.1 Descripción de los ensayos

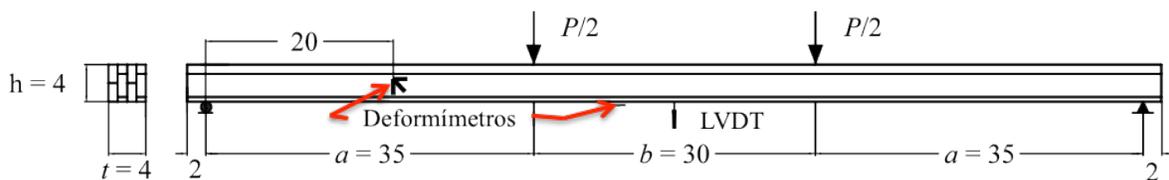
Se realizaron 19 ensayos de vigas de cuatro puntos, es decir, vigas simplemente apoyadas con dos cargas concentradas localizadas a 35cm de cada apoyo, 9 en probetas FL11a y 10 en probetas FL11b. En la Figura 8.9 se observa el esquema del ensayo.

Figura 8.9 Montaje con medidas teóricas del ensayo probetas largas (a) FL11a y (b) FL11b



Dimensiones en cm

(a)



Dimensiones en cm

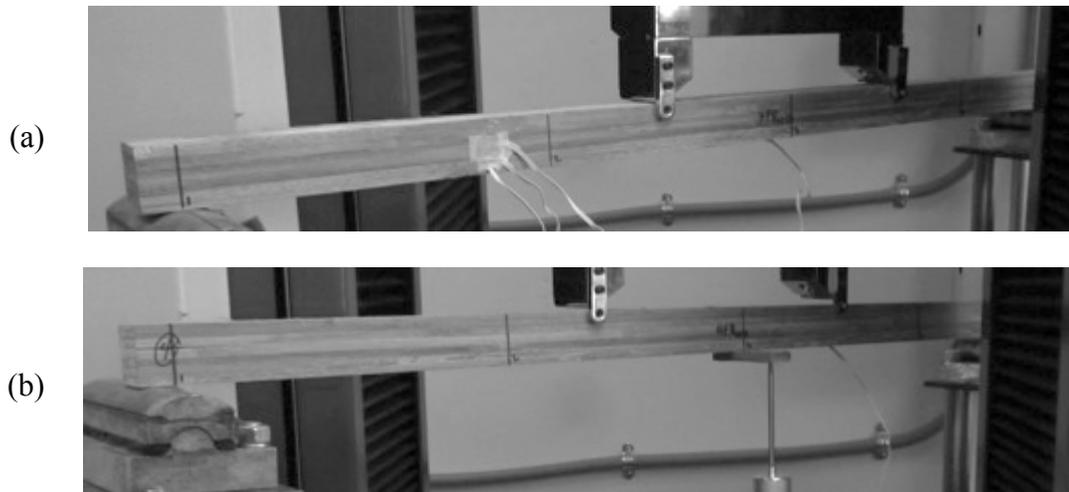
(b)

Fuente: Autor

Para cada probeta, se midió el espesor,  $t$ , en las caras superior e inferior, y la altura,  $h$ , en las caras frontal y posterior, en cinco puntos: el extremo izquierdo, en el cuarto izquierdo, en el centro, en el cuarto derecho y en el extremo derecho. Con el promedio de estos se calculó el módulo de sección. En la Tabla K.3 y en la Tabla K.4 de la sección K.2 del anexo K se encuentran los valores anteriormente mencionados así como la distancia  $a$  exacta para cada caso.

Los ensayos fueron realizados a una velocidad de 0.045mm/s (2.5mm/min). Se midió la deformación longitudinal de todas la probetas en el vano central, por medio de un deformímetro unidireccional localizado en la cara inferior. Adicionalmente se instaló un deformímetro tridireccional a 3 probetas de cada tipo (3FL11a, 6FL11a y 7FL11a, y 2FL11b, 5FL11b y 10FL11b) en el eje neutro a 20cm de uno de los apoyos. En el resto de las probetas (las que no tienen deformímetros tridireccionales), adicional al deformímetro longitudinal, se les colocó un transductor de desplazamiento en el centro de la luz. En la Figura 8.10 se observa el montaje de las probetas 7FL11a y 4FL11a.

Figura 8.10. Ensayo probetas: (a) 7FL11a y (b) 4FL11a



Fuente: Autor

### 8.2.2 Cálculos y resultados

El esfuerzo normal de flexión longitudinal fue calculado con base en la Ecuación 8.1 mencionada en la sección 8.1.2.

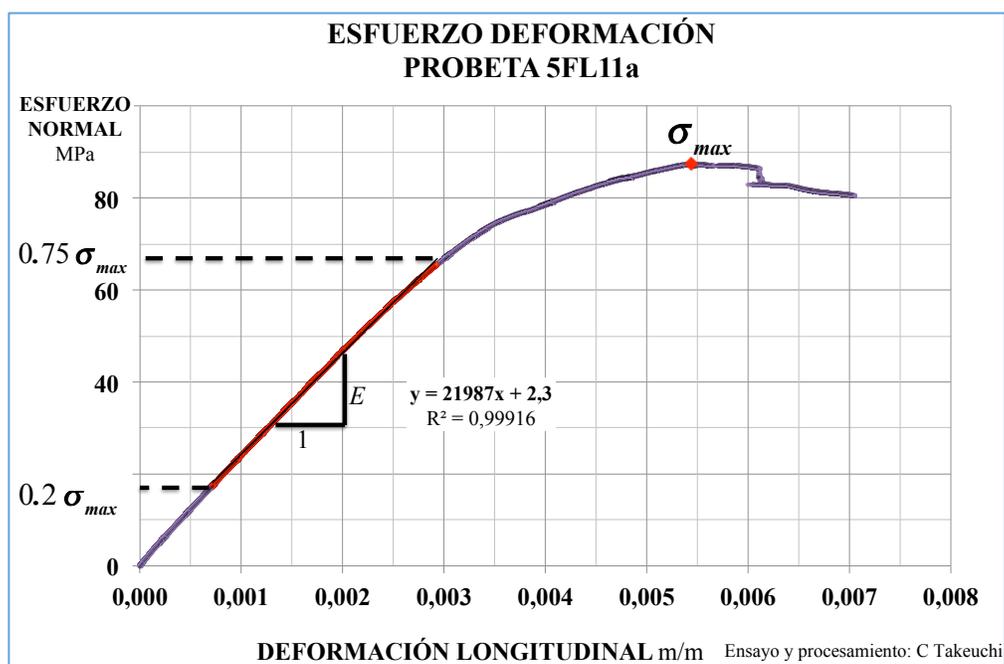
El esfuerzo de rotura se calculó con base en la Ecuación 8.4 donde  $M_{max}$  es el momento máximo aplicado en el tercio medio de la probeta y  $S_{inel}$  es el módulo inelástico mencionado en la sección 4.3.1.2. del capítulo 4.

$$f_r = \frac{M_{max}}{S_{inel}} = \frac{P_{max} a}{2S_{inel}}$$

Ecuación 8.4

Se determinó el módulo de elasticidad longitudinal a flexión,  $E_1$ , con base en la lectura de la deformación longitudinal de la misma manera a la mencionada en la sección 8.1.2. En la Figura 8.11 se observa el diagrama esfuerzo deformación de la probeta 5FL11a. En el Anexo K se encuentran los diagramas esfuerzo deformación para el resto de las probetas.

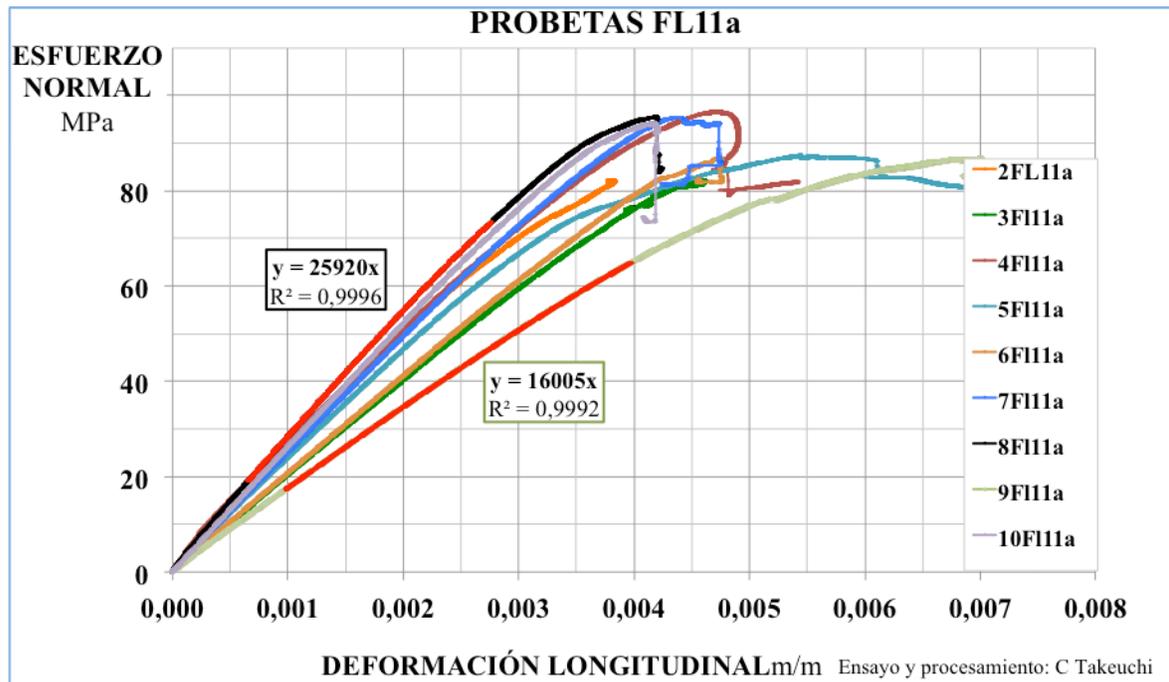
Figura 8.11. Gráfica esfuerzo deformación probeta 5FL11a



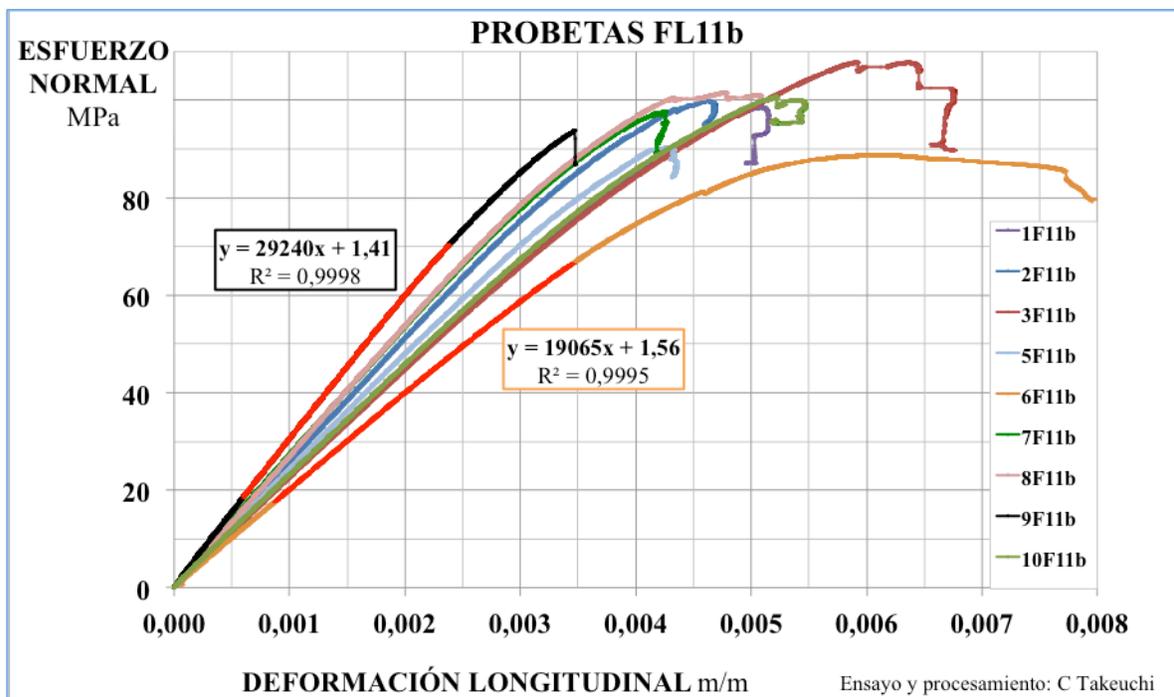
Fuente: Autor

En la Figura 8.12 se muestran las curvas esfuerzo normal vs deformación longitudinal hasta alcanzar la carga máxima, de las probetas FL11a y FL11b. Se indican en la gráfica los mayores y menores módulos de elasticidad determinados. Para ambos casos, la dispersión de las curvas en el rango elástico es baja.

Figura 8.12. Esfuerzo normal vs deformación longitudinal probetas (a) FL11a y (b) FL11b



(a)



(b)

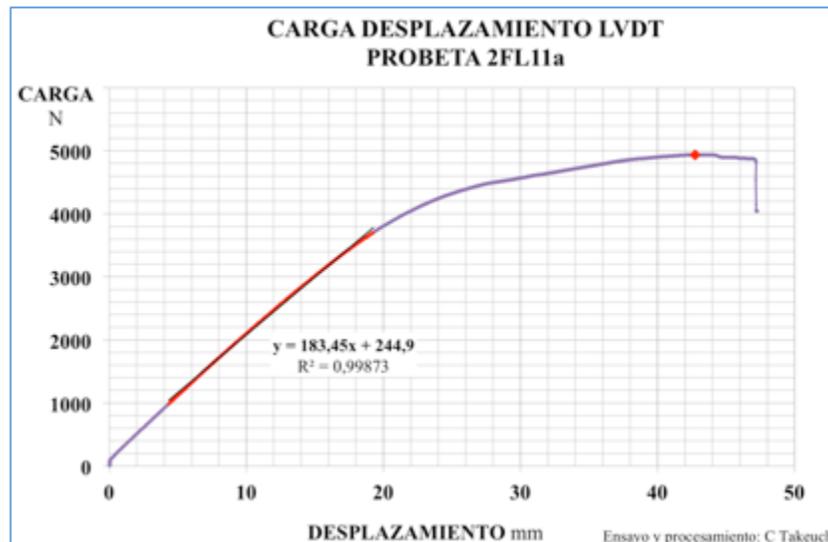
Fuente: Autor

También se determinó el módulo de elasticidad a partir de la lectura de desplazamiento con el LVDT. Para esto se elaboró el diagrama carga desplazamiento y se calculó la pendiente de la regresión lineal de los puntos comprendidos entre el 20 y el 75% de la carga máxima. Se determinó el módulo de elasticidad con base en la Ecuación 8.5 donde  $m$  es la pendiente del diagrama carga desplazamiento,  $a$  la distancia entre el apoyo y el punto de aplicación de la carga,  $I$  el momento de inercia y  $L$  la luz.

$$E = \frac{m}{2} \frac{a}{24I} (3L^2 - 4a^2) \quad \text{Ecuación 8.5}$$

En la Figura 8.13 se muestra la gráfica carga desplazamiento para la probeta 2FL11a elaborada con la lectura de desplazamiento del LVDT.

Figura 8.13. Gráfica esfuerzo deformación probetas FL11a



Fuente: Autor

En la Tabla 8.3 se encuentran los valores de esfuerzo de rotura y de módulo de elasticidad determinados. Para las probetas FL11a el valor promedio de esfuerzo de rotura fue de 93.9MPa con una desviación estándar de 6.1MPa y un coeficiente de variación de 0.06. El valor promedio de módulo de elasticidad calculado con las lecturas de deformación longitudinal fue de 23050MPa con una desviación estándar de 2337MPa y un coeficiente de variación de 0.10. No se tuvo en cuenta el valor de módulo de elasticidad de la probeta 9FL11a por ser un valor atípico según el criterio de exclusión de Chauvenet. El valor promedio de módulo de elasticidad calculado con las lecturas de desplazamiento fue de 17159MPa con una desviación estándar de 1059MPa y un coeficiente de variación de 0.06.

Para las probetas FL11b el valor promedio de esfuerzo rotura fue de 103.1MPa con una desviación estándar de 6.5MPa y un coeficiente de variación de 0.06. El valor promedio de módulo de elasticidad calculado con las lecturas de deformación longitudinal fue de 23674MPa con una desviación estándar de 3170MPa y un coeficiente de variación de 0.13. El valor promedio de módulo de elasticidad calculado con las lecturas de desplazamiento fue de 18498MPa con una desviación estándar de 1016MPa y un coeficiente de variación de 0.05.

Tabla 8.3. Esfuerzo Rotura, Módulo de elasticidad

FL11a						FL11b					
Probeta	Esfuerzo Rotura $f_r$ Mpa	$E_1$ Def. Mpa	Coef Correlac	$E_1$ Despl Mpa	Coef Correlac	Probeta	Esfuerzo Rotura $f_r$ Mpa	$E_1$ Deforma Mpa	Coef Correlac	$E_1$ Desplaza Mpa	Coef Correlac
2FL11a	85,95	24107	0,9998	15530	0,9994	1FL11b	103,18	21421	0,9998	17669	0,9998
3FL11a	86,11	19596	0,9999			2FL11b	104,49	24986	0,9999		
4FL11a	101,11	22889	0,9997	18386	0,9996	3FL11b	112,91	21075	0,9995	17945	0,9995
5FL11a	91,55	21987	0,9996	16698	0,9993	4FL11b	111,01				
6FL11a	91,03	20203	0,9999			5FL11b	94,65	23253	0,9999		
7FL11a	99,97	24065	0,9999			6FL11b	92,89	19065	0,9997	17312	0,9995
8FL11a	100,11	25920	0,9998	18106	0,9990	7FL11b	102,16	25879	0,9999	18943	0,9999
9FL11a	90,76	*16005	0,9996	16706	0,9996	8FL11b	106,38	26225	0,9998	19160	0,9998
10FL11a	98,50	25630	0,9999	17526	0,9993	9FL11b	98,18	29240	0,9999	19956	0,9996
						10FL11b	105,41	21925	0,9998		

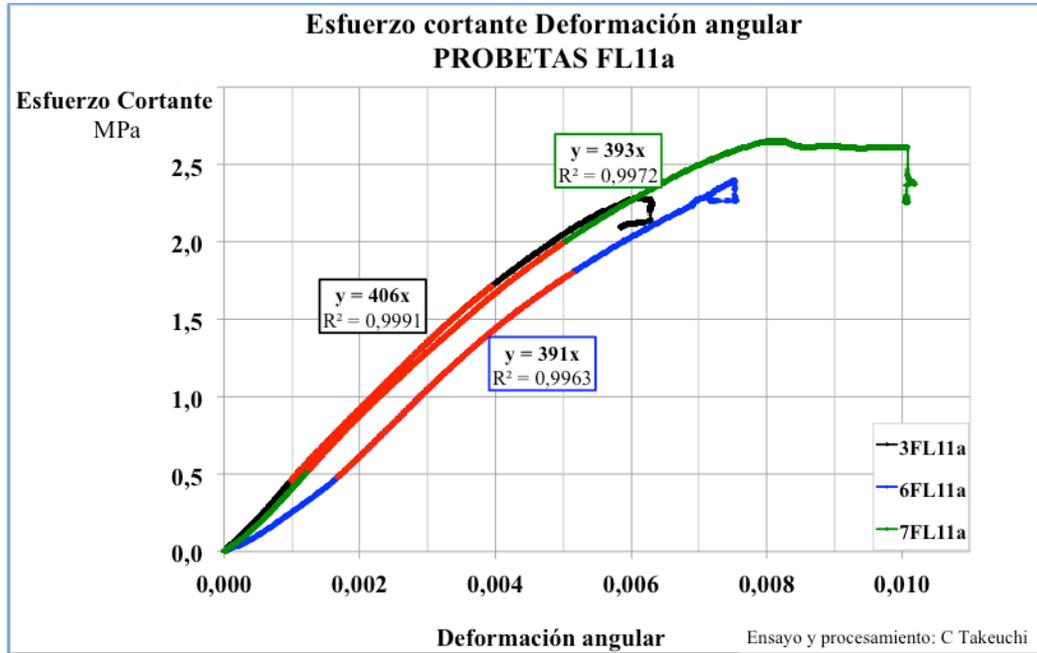
El asterisco\* indica los resultados excluidos del promedio

Fuente: Autor

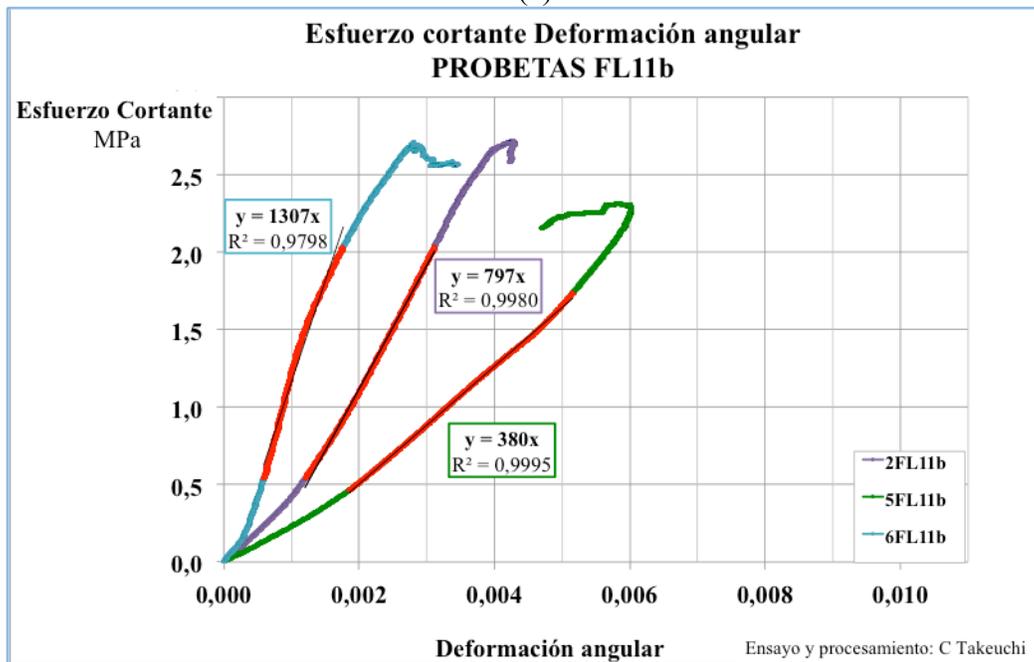
El esfuerzo cortante fue calculado con base en la Ecuación 8.2 mencionada en la sección 8.1.2. La deformación angular de las probetas 3FL11a, 6FL11a, 7FL11a, y 2FL11b, 5FL11b y 10FL11b se calculó con base en las lecturas de la roseta de deformación utilizando la Ecuación 8.3 de la sección 8.1.2.. Se determinó el módulo de elasticidad a cortante  $G$ , como la pendiente de la regresión lineal de los puntos de la curva esfuerzo cortante vs deformación angular, entre el 20% y el 75% del esfuerzo cortante máximo alcanzado. En la Figura 8.14 se observan las curvas esfuerzo cortante deformación angular de las tres probetas mencionadas para cada tipo. La dispersión de las curvas que corresponden a las probetas FL11a es baja y la dispersión que presentan las curvas que corresponden a las probetas FL11b es alta.

En la Tabla 8.4 se encuentran los valores de módulo de elasticidad a cortante. Para las probetas FL11a el valor promedio de módulo de elasticidad a cortante fue de 396MPa con una desviación estándar de 8.2MPa y un coeficiente de variación de 0.02. Para las probetas FL11b el valor promedio de módulo de elasticidad a cortante fue de 737MPa con una desviación estándar de 331.6MPa y un coeficiente de variación de 0.45. Ningún valor se consideró atípico

Figura 8.14. Esfuerzo cortante vs deformación angular probetas (a) 3FL11a, 6FL11a y 7FL11a y (b) 2FL11b, 5FL11b y 10FL11b



(a)



(b)

Fuente: Autor

Tabla 8.4. Módulo de elasticidad a cortante en probetas FL11

FL11a			FL11a		
Probeta	G Mpa	Coef Correlación	Probeta	G Mpa	Coef Correlación
3FL11a	406	0,9995	2FL11b	797	0,9990
6FL11a	391	0,9981	5FL11b	380	0,9997
7FL11a	393	0,9986	10FL11b	1035	0,9905

Fuente: Autor

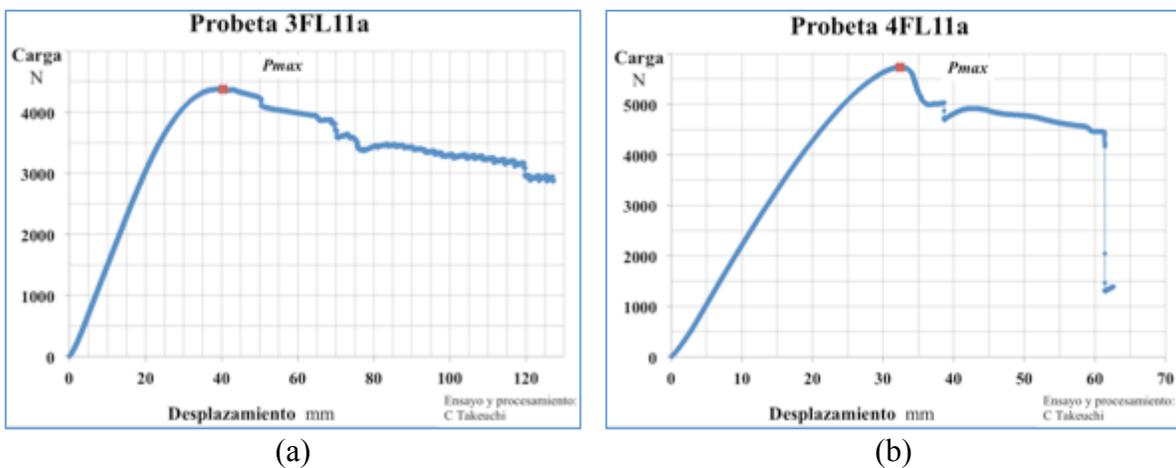
### 8.2.3 Observaciones durante los ensayos

#### Probetas FL11a

Las probetas FL11a presentan un comportamiento elástico seguido por un comportamiento inelástico antes de alcanzar la carga máxima. En este momento, se presenta rotura de las fibras ubicadas en la parte inferior de la mitad de la luz. Después se reduce suavemente la carga mientras que aumenta la flexión. En algunas probetas (2FL11a, 3FL11a, 8FL11b y 10FL11a) se obtuvieron deflexiones elevadas que obligaron a limitar el ensayo. En las probetas 4FL11a, 5FL11a, 6FL11a, 7FL11a y 9FL11a se presenta falla por cortante en los tercios extremos. En la Figura 8.15 se observa el diagrama carga desplazamiento de las probetas 3FL11a y 4FL11a y en la Figura 8.16 la falla de la probeta 4FL11a.

En general, las roturas por tensión empiezan por nudos. En otros casos, porque las fibras se han interrumpido al fabricar la probeta por estar sesgadas con respecto a la cara inferior del elemento. Se observa en todas las probetas aplastamiento en los puntos de aplicación de la carga.

Figura 8.15. Diagramas carga desplazamiento probetas (a)3FL11a y (b) 4FL11a



Fuente: Autor

Figura 8.16. Probeta 4FL11a: (a) Rotura por tensión y (b) fisura de cortante en el apoyo



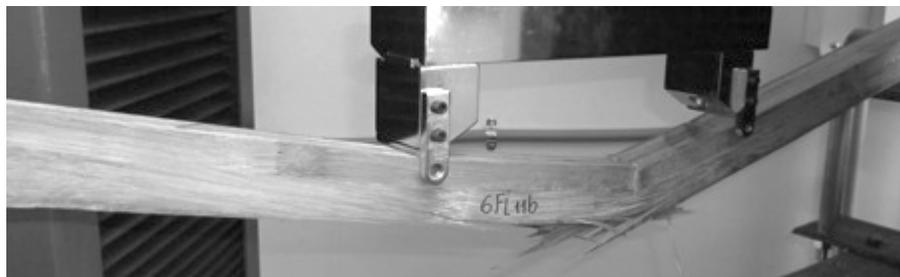
Fuente: Autor

Las imágenes de falla y las curvas carga desplazamiento del resto de probetas FL11a se encuentran en la sección K.2.1 del Anexo K.

### Probetas FL11b

Todas las probetas presentan roturas por tensión en la parte inferior. En la Figura 8.17 se observa la falla de la probeta 6FL11b.

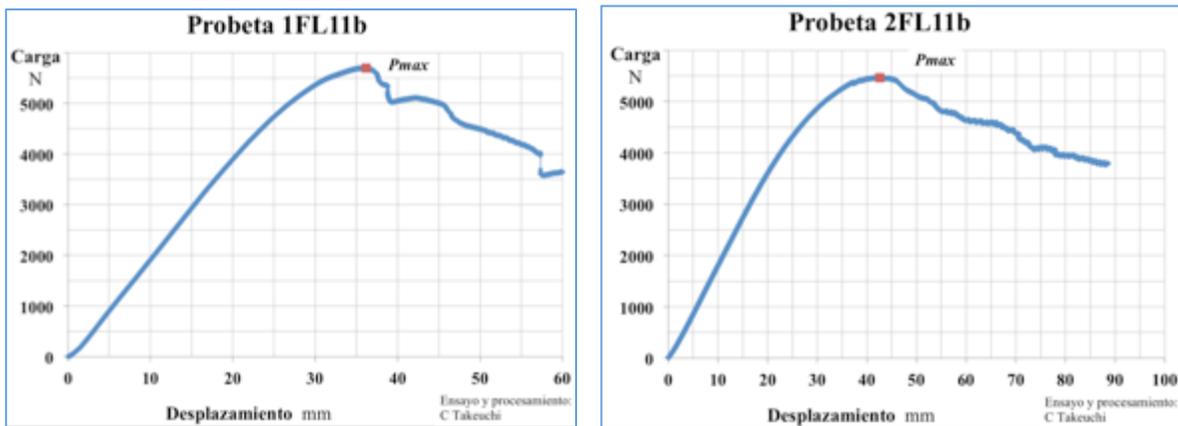
Figura 8.17. Probeta 6FL11b al final del ensayo



Fuente: Autor

Los diagramas carga desplazamiento de las probetas tuvieron aproximadamente el mismo comportamiento. La curva crece de manera continua hasta alcanzar su carga máxima. Después la pérdida de carga es gradual hasta que el ensayo se interrumpe debido a que la deflexión es grande. En la Figura 8.18 se observan los diagramas carga desplazamiento de las probetas 1FL11b y 2FL11b y en la sección K.2.2 del Anexo K se encuentran las curvas carga desplazamiento de las otras probetas FL11b.

Figura 8.18. Diagramas carga desplazamiento probetas (a) 1FL11b y (b) 2FL11b



Fuente: Autor

#### 8.2.4 Análisis de resultados

Cuando las probetas alcanzan la carga máxima se presenta fractura por tensión en la parte inferior de las probetas. El valor promedio de esfuerzo de rotura en las probetas FL11a fue de 89.7MPa y en probetas FL11b fue de 98.5MPa. En ambos casos el coeficiente de variación fue de 0.06. Al considerar todas las probetas FL11, el valor promedio de esfuerzo de rotura fue de 94.4MPa con un coeficiente de variación de 0.08. López y Correal (López & Correal, 2009) reportan valores de 74MPa y 80MPa con coeficientes de variación de 0.14 y 0.15 para elementos solicitados a flexión con láminas horizontales en el primer caso y verticales en el segundo caso. Correal y colaboradores (Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014) reportan valores de 103MPa y 122MPa con coeficientes de variación de 0.10 y 0.05 en el caso de flexión de probetas con láminas horizontales y verticales respectivamente.

Después de alcanzar la carga máxima, algunas probetas FL11a fallan por corte paralelo a la fibra y en ese momento se presenta una caída brusca en la curva carga desplazamiento; esto no ocurre con las probetas FL11b que presentan un pérdida gradual de resistencia y en algunos casos no fallan.

Los valores obtenidos de módulo de elasticidad varían cuando se calculan con base en la deformación longitudinal que cuando se mide el desplazamiento con el transductor de desplazamiento. En el primer caso, los valores promedio obtenidos fueron 23047MPa y 23674MPa para las probetas FL11a y FL11b respectivamente. En el segundo caso, los valores promedio obtenidos fueron 17158MPa y 18497MPa para las probetas FL11a y FL11b respectivamente. Al considerar los dos tipos de probetas el valor promedio de módulo de elasticidad longitudinal a flexión fue de 23380MPa para el primer caso y de

17828MPa en el segundo caso. En el caso de las probetas de flexión corta, se había encontrado un valor promedio de 19076MPa.

Los valores de esfuerzo cortante máximo alcanzado no corresponden a la resistencia a corte, debido a que se presentó en primer lugar fisuras de tensión.

El valor promedio de módulo de elasticidad a cortante determinado para probetas FL11a de 396MPa fue menor al determinado para probetas FL11b de 737MPa, sin embargo se debe tener en cuenta que para el primer caso el coeficiente de variación fue de 0.02 y en el segundo de 0.45. El valor de módulo de elasticidad a cortante encontrado para las probetas Fc11a fue de 307MPa con un coeficiente de variación de 0.02 y para las probetas Fc11b fue de 541MPa.

## 9. COLUMNAS Y VIGAS DE BGLPP

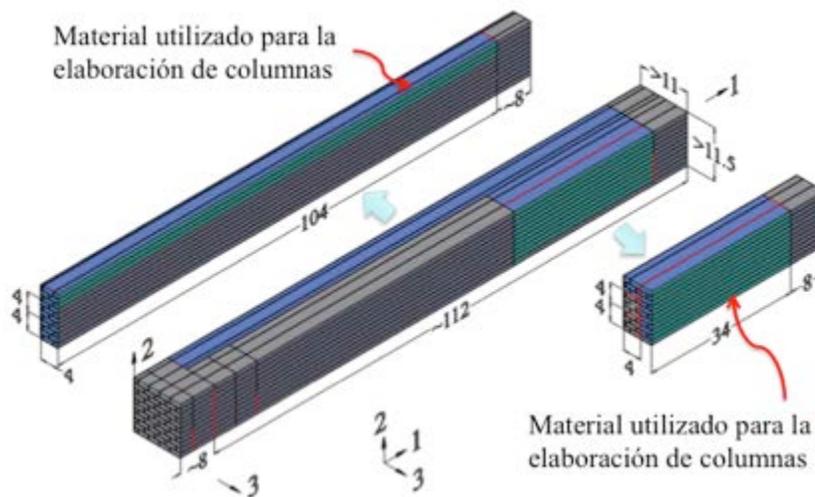
En el presente capítulo se muestran los resultados de elementos solicitados a compresión de diferentes relaciones de esbeltez. Se observa el pandeo elástico, el pandeo inelástico y el aplastamiento en función de su relación de esbeltez, como una aplicación al diseño de columnas.

### 9.1. COMPORTAMIENTO DE COLUMNAS MACIZAS DE BGLPP

#### 9.2.1 Elaboración

Los elementos, que en adelante se llamarán columnas, se extrajeron de los bloques de BGLPP mencionados en el Capítulo 3. Para las columnas, de sección transversal cuadrada de 3cm x 3cm, se utilizaron los bloques 2, 4, 5, 7 y 8 . En la Figura 9.1. se muestran las porciones de bloque a partir de las cuales se elaboraron las columnas.

Figura 9.1. Material para elaboración de columnas



Dimensiones en centímetros

Fuente: Autor

Se elaboraron columnas de cinco longitudes diferentes 99cm, 55cm, 33cm, 20cm y 6cm.

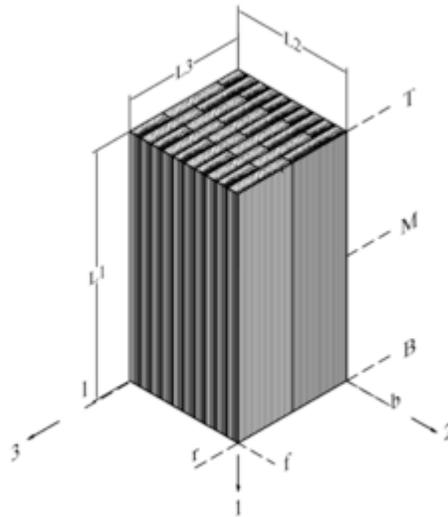
#### 9.2.2 Descripción de los ensayos

Se realizaron 28 ensayos de compresión paralela a la fibra en elementos de sección cuadrada de 3cm de lado. Para identificar cada una de las probetas, fueron marcadas con un número que corresponde al bloque de material de BGLPP de donde fueron obtenidos, seguido del tipo de elemento y un número consecutivo. El tipo de elemento identifica la

relación de esbeltez del elemento. Las columnas C1 son las más largas, es decir, las de mayor relación de esbeltez y las C5 son las más cortas, estas últimas con relación altura/lado igual a 2 (relación de esbeltez de 1.75). Se ensayaron 3 réplicas de las columnas C1 y C2, 4 de las columnas C3 y C4 y 14 de las columnas C5.

Para cada elemento ensayado, se tomaron dos medidas del alto y tres medidas de ancho o espesor por cada cara vertical en la base (B), a mitad de altura (M) y en la parte superior (T) mostrados en la Figura 9.2. Con base en el promedio de estas medidas, se calculó el área resistente a compresión y el momento de inercia alrededor de los ejes 2 y 3 (Tabla L1. Anexo L).

Figura 9.2. Esquema de columna con ejes coordenados

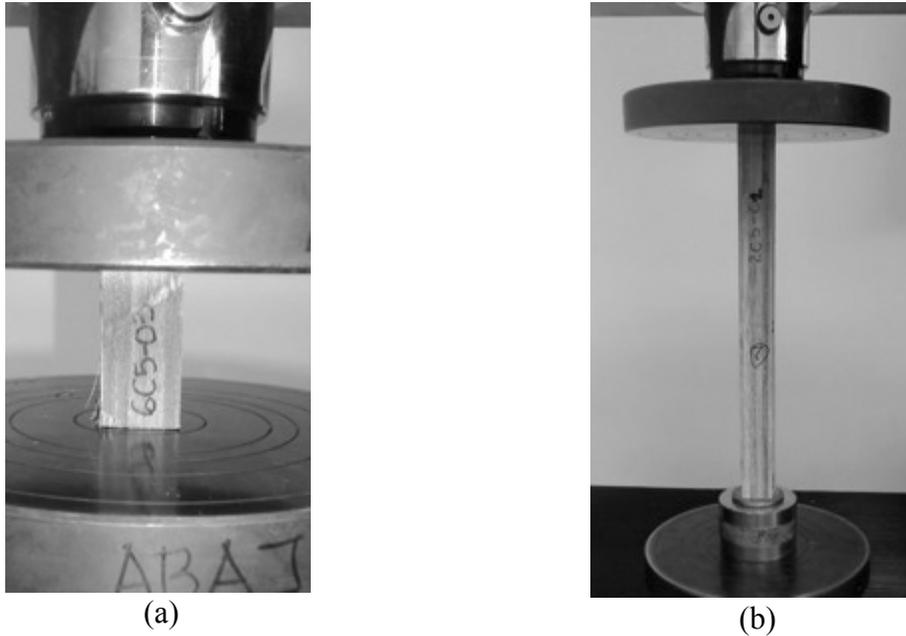


Fuente: Autor

Los ensayos fueron realizados en una máquina universal de ensayos a una velocidad de 0.01mm/s (0.6mm/min).

Las columnas C5, de 6cm, se colocaron directamente en los platos de carga. Las columnas de los otros tipos se apoyaron en la parte inferior sobre una rótula. En el caso de las columnas C1 y C2, que se esperaba presentaran falla por pandeo, se consideró un factor de longitud efectiva,  $k$ , de 0,7 y 0.8, teniendo en cuenta que en la parte superior, al no haber rótula existía restricción al giro. En la Figura 9.3 se observa el montaje de las columnas 6C5-03 y 2C3-02.

Figura 9.3 Montaje columnas: (a) 6C5-03, (b) 2C3-02



Fuente: (a) Patricia Luna, (b) autor

### 9.2.3 Cálculos y resultados

El esfuerzo máximo a compresión se calculó como la relación entre la carga máxima aplicada,  $P_{max}$ , y el área de la sección transversal,  $A$ , de la columna (Ecuación 5.2). En el caso de las columnas C5 el esfuerzo máximo a compresión corresponde a la resistencia a compresión.

Para el cálculo de la resistencia a compresión se consideraron los esfuerzos máximos alcanzados en la probetas C5. En la Tabla 9.1 se encuentran estos valores. El valor promedio de la resistencia a compresión fue de 63.2MPa con una desviación estándar de 5.4MPa y un coeficiente de variación de 0.08. No se tuvo en cuenta el resultado de la probeta 5C5-13 por considerarse un valor atípico según el criterio de exclusión de Chauvenet.

Tabla 9.1. Resistencia a compresión en probetas C5

Probeta	8C5-01	7C5-02	6C5-03	7C5-04	5C5-05	7C5-06	7C5-07
$F_c$ MPa	68,6	58,7	63,4	59,6	56,1	58,0	66,5
Probeta	8C5-08	7C5-09	6C5-10	8C5-11	6C5-12	5C5-13	8C5-14
$F_c$ MPa	67,3	66,4	59,9	72,1	56,2	*47,8	69,0

Fuente: Autor

Se calculó la relación de esbeltez de cada columna con base en la Ecuación 9.1 donde  $k$  es el factor de longitud efectiva,  $L$  la longitud del elemento y  $r$  el radio de giro de la sección transversal.

$$\lambda = \frac{kL}{r} \quad \text{Ecuación 9.1}$$

Para cada elemento se calcula la relación de esbeltez alrededor de los ejes 2 y 3. En el caso de las columnas C1 y C2, que presentaron falla por pandeo, se consideró un factor de longitud efectiva,  $k$ , de 0.7 y 0.8 respectivamente, teniendo en cuenta la deformación presentada.

Se elaboraron curvas de esfuerzo crítico en función de la relación de esbeltez. Para calcular el esfuerzo crítico en el rango inelástico se decidió considerar una ecuación parabólica de orden 2 con un valor máximo,  $F_c$ , que corresponde a la resistencia a compresión paralela a la fibra. La ecuación de la curva en el rango inelástico es:

$$\sigma_{cr} = F_c (1 - \alpha \lambda^2) \quad \text{Ecuación 9.2}$$

donde  $\sigma_{cr}$  es el esfuerzo crítico,  $\lambda$  la relación de esbeltez y  $\alpha$  el valor de la constante de amplitud de la parábola que se calcula como:

$$\alpha = \frac{\pi^2 E}{F_c C_c^4} \quad \text{Ecuación 9.3}$$

En la ecuación 8.3,  $C_c$  es la relación de esbeltez que corresponde a la transición entre la ecuación de la parábola para el rango inelástico y la ecuación de Euler para el rango elástico. Se calcula utilizando la Ecuación 9.4, donde  $E$  es el módulo de elasticidad longitudinal. La deducción de la Ecuación 9.3 y la Ecuación 9.4 se encuentra en la sección L.1.1 del Anexo L.

$$C_c = \sqrt{2 \frac{\pi^2 E}{F_c}} \quad \text{Ecuación 9.4}$$

En el rango elástico se calcula el esfuerzo crítico con base en la ecuación de Euler.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad \text{Ecuación 9.5}$$

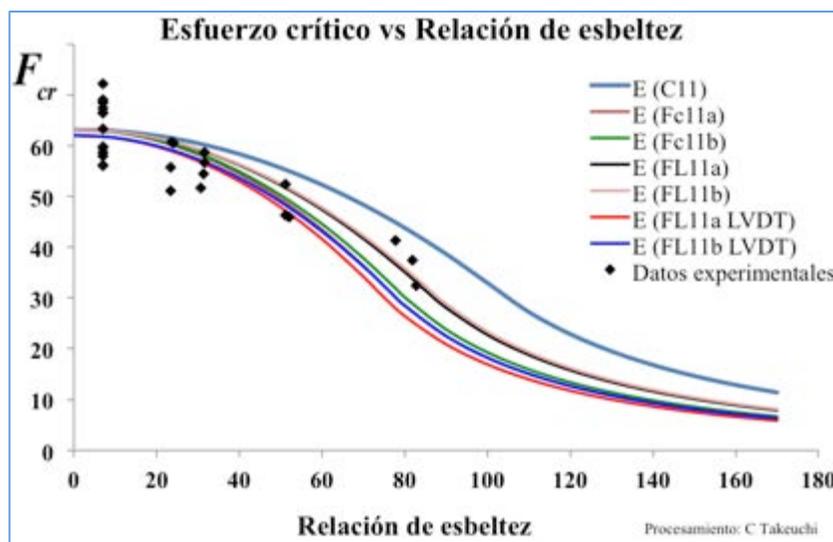
El valor considerado de resistencia a compresión paralela a la fibra,  $F_c$ , fue el promedio de los esfuerzos máximos en las probetas C5 e igual a 63.2MPa. No se consideró el valor promedio encontrado en el Capítulo 5, de 67.5, para tener en cuenta, las imperfecciones que puede tener un elemento en su fabricación. Todas las probetas ensayadas en el capítulo 5

fueron rectificadas con precisión. Las columnas ensayadas fueron elaboradas con cortes simples de sierra.

En la Figura 9.4 se observan las curvas de esfuerzo crítico en función de la relación de esbeltez, para diferentes módulos de elasticidad encontrados. Para el módulo de elasticidad encontrado con las deformaciones medidas en probetas de compresión, E (C11), probetas de flexión corta, E (Fc11a) y E (Fc11b) y probetas de flexión larga, E (FL11a) y E (FL11b). También se encuentran las curvas elaboradas con el módulo de elasticidad determinado a partir de los desplazamientos de probetas de flexión larga, E (FL11a LVDT) y E (FL11b LVDT). Para todos los casos, la relación de esbeltez,  $C_c$ , correspondió a un esfuerzo igual al 50% de la resistencia a compresión adoptada.

En el mismo gráfico se encuentran los datos experimentales para las columnas ensayadas. Por su forma de falla, para las columnas C1 y C2, se consideró la relación de esbeltez alrededor del eje 3 con excepción de la columna 6C2-04 que pandeó alrededor del eje 2. En el caso de las otras columnas se consideró la menor relación de esbeltez.

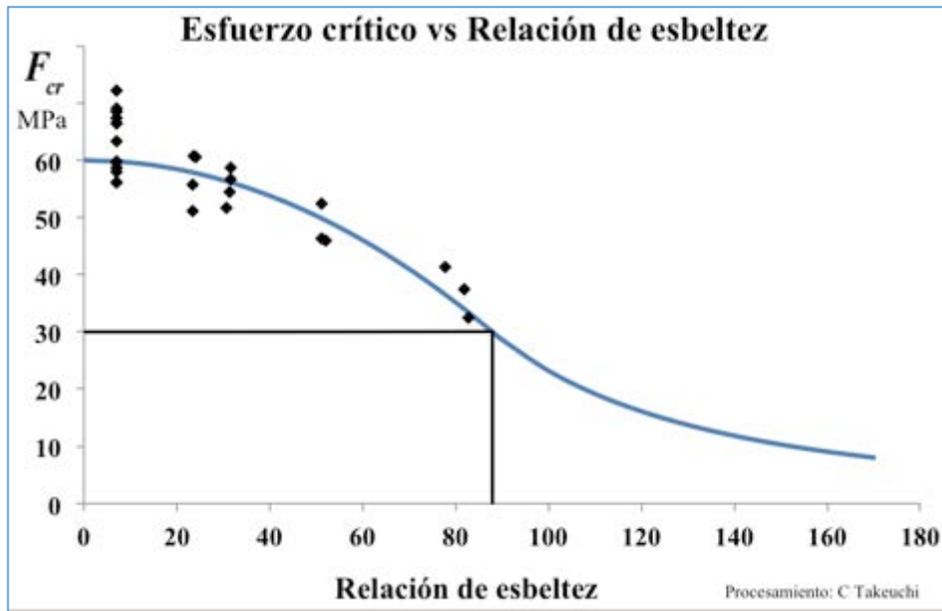
Figura 9.4. Gráficas Esfuerzo crítico vs Relación de esbeltez



Fuente: Autor

Con base en la gráfica anterior, se elaboró la gráfica de la Figura 9.5 tomando como base una resistencia a compresión de 60MPa y un valor de módulo de elasticidad de 23500MPa que corresponde al promedio de los módulos de elasticidad encontrados para las probetas de flexión largas, FL11.

Figura 9.5. Gráfica ajustada de Esfuerzo crítico vs Relación de esbeltez



Fuente: Autor

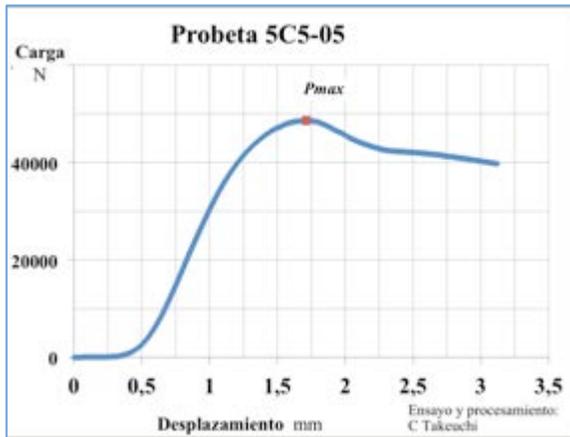
#### 9.2.4 Observaciones durante los ensayos

Las probetas C5 fallan por aplastamiento. Una vez alcanzan la carga máxima, se pierde resistencia de manera gradual. Las probetas C4 fallan igualmente por aplastamiento, sin embargo, la pendiente del tramo de descenso de la curva carga desplazamiento es mayor al que presentan las probetas C5. En las probetas C3 se observa aplastamiento y un ligero pandeo. Las probetas C2 y C1 fallan por pandeo. En estas probetas, una vez se alcanza la carga máxima hay una pérdida abrupta de resistencia. En la Figura 9.6 se observan las fallas y las curvas carga desplazamiento para las probetas 5C5-05, 5C4-01 y 8C1-01. El pandeo de estas columnas se presentó alrededor del eje 3, con excepción de la columna 6C2-04 que pandeó alrededor del eje 2.

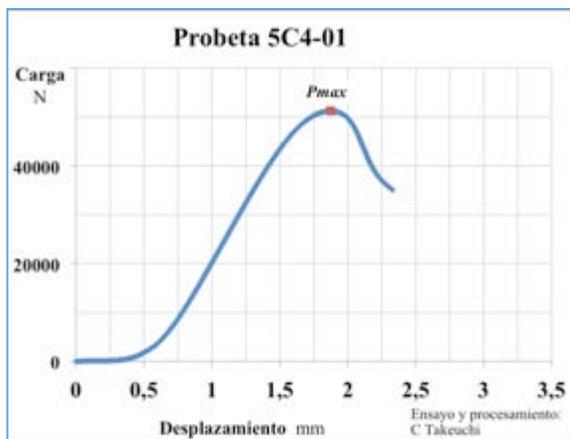
La probeta 2C2-03 presentó separación de tableros, sin que se observara desprendimiento de fibras en las superficies separadas, indicando un problema de adherencia.

En el Anexo L, se presentan las fallas y curvas carga desplazamiento de las otras columnas ensayadas.

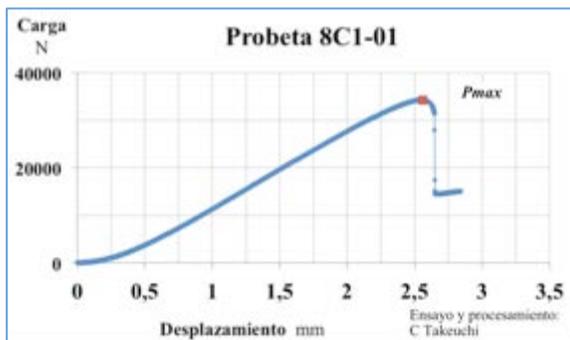
Figura 9.6 Curvas carga desplazamiento columnas: (a) 5C5-05, (b) 5C4-01 y (c) 8C1-01 y fotografías de probetas ensayadas: (d) 5C5-05, (e) 5C4-01 y (f) 8C1-01



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fuente: Autor

### 9.2.5 Análisis de resultados

Siendo las columnas de sección transversal cuadrada con relaciones de esbeltez similares en ambos ejes, aparentemente, la distribución de láminas puede influir en la carga crítica. En las columnas largas, se observó una tendencia de pandear alrededor del eje 3.

Se hace una propuesta de una curva de esfuerzo crítico en función de la relación de esbeltez. En el rango inelástico se propone una parábola de segundo grado y en el rango elástico, la ecuación de Euler. La curva propuesta considera una resistencia a compresión paralela a la fibra de 60MPa, aproximadamente el 90% del valor determinado al ensayar a compresión probetas de BGLPP y un módulo de elasticidad de 23500MPa.

En su investigación Alvarado y Moreno (Alvarado & Moreno, 2010) proponen una curva polinómica de orden 5 para la parte inelástica. Trabajan con un valor de resistencia de 36,9MPa que corresponde al valor característico (según la ISO22156) encontrado al ensayar 10 columnas macizas con relación altura/lado de 3. El módulo de elasticidad utilizado en el estudio mencionado fue de 5900MPa, el cual fue determinado a partir del ensayo de las 10 columnas macizas utilizando el desplazamiento entre platos para el cálculo de la deformación.

En su investigación Durán y Uribe (Durán & Uribe, 2002), plantean varias curvas de esfuerzo en función de la relación de esbeltez para guadua rolliza. Trabajaron con una resistencia a compresión de 51MPa. De las curvas planteadas, con módulos de elasticidad entre 10200MPa a 17850MPa la que mejor se ajustó a sus resultados experimentales fue la que corresponde a un módulo de elasticidad de 17850MPa.

## 9.2. COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE BGLPP CON TABLEROS EN DOS DIRECCIONES

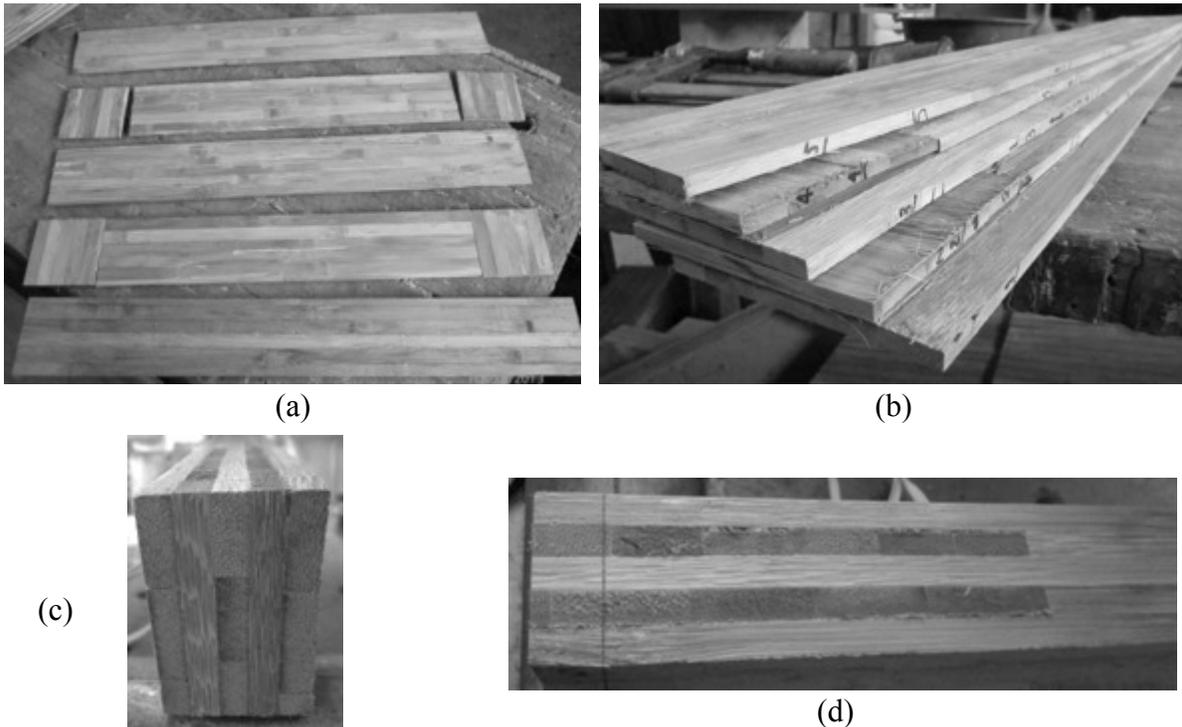
En esta sección se muestran los resultados del estudio de un tipo de vigas de BGLPP con tableros en dos direcciones.

### 9.2.1 Elaboración

Cada viga está conformada por 5 tableros pegados de BGLPP, definiendo un material compuesto de 5 capas como lo indica la Figura 9.7. Los tableros ubicados en las capas extremas y la central tienen 6 láminas dispuestas longitudinalmente. En cambio, las otras 2 capas internas son tableros que tienen láminas transversales en un tramo vecino a sus extremos como se ilustra en la Figura 9.7(a). La razón de esta disposición fue evitar fisuras por cortante en los extremos de las vigas.

En consecuencia, la viga tiene fibras longitudinales en tres zonas (frontal, posterior y parte central) y fibras transversales en los extremos en 2 zonas intermedias.

Figura 9.7. Vigas con tableros en dos direcciones (a) disposición de tableros, (b) prearmado, (c) vista lateral y (d) vista superior de vigas.



Fuente: Autor

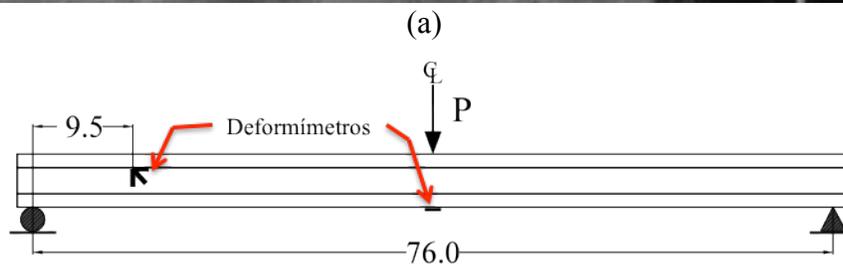
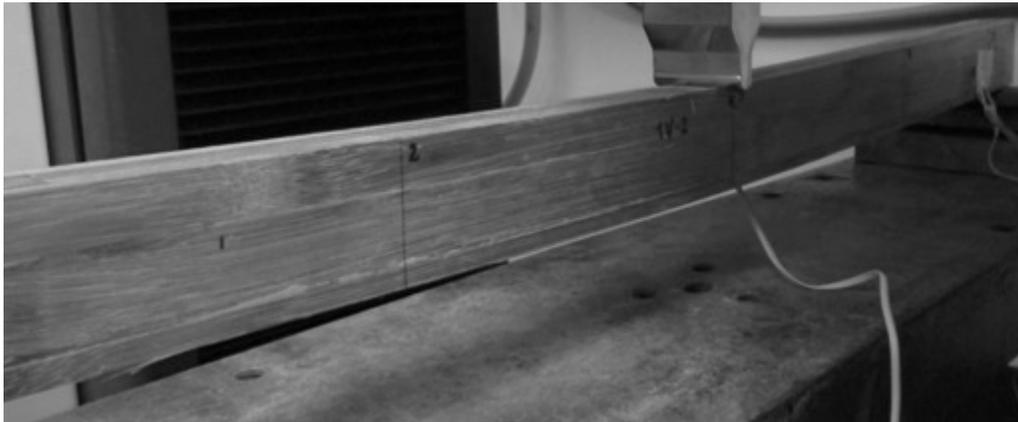
De esta manera se fabricaron dos elementos de BGLPP de 3cm de ancho, 11cm de alto y 80cm de largo, siguiendo el mismo procedimiento de aplicación de adhesivo y prensado mencionado en el capítulo 3. Después del curado, se dividió cada elemento longitudinalmente, a la mitad de la altura con una sierra de carpintería, para obtener finalmente cuatro vigas de ensayo. En la Figura 9.7(c) se observa la vista lateral de una viga y en la Figura 9.7(d) la vista superior de uno de los extremos del mismo elemento.

### 9.2.2 Descripción de los ensayos

Se ensayaron 4 vigas en un montaje de 3 puntos como se observa en la Figura 9.8. Cada una de las vigas, fue marcada con un número que corresponde al elemento de material de BGLPP de donde fueron obtenidos, seguido de la letra V para indicar que son vigas y el número de la réplica (1 o 2). Los ensayos fueron realizados en una máquina universal de ensayos a una velocidad de 0.045mm/s (2.5mm/min). El primer ensayo fue el de la viga 2V-1, posteriormente, se ensayaron las tres vigas restantes, a las cuales se les colocó un

deformímetro longitudinal en el centro en la parte inferior y una roseta de deformaciones en la cara frontal, localizada en el eje neutro a 9.5cm de uno de los apoyos como se puede apreciar en la Figura 9.2.

Figura 9.8. Montaje de ensayo: (a) Viga 1V-2 y (b) Esquema



Dimensiones en cm

Fuente: Autor

Para cada viga, se midió el espesor,  $t$ , en las caras superior e inferior, y la altura,  $h$ , en las caras frontal y posterior, en cinco puntos: el extremo izquierdo, en el cuarto izquierdo, en el centro, en el cuarto derecho en el extremo derecho. Con el promedio de estos, se calculó el momento de inercia. Se tomaron dos medidas de las longitudes en las vistas frontal y posterior. En la Tabla M1 del Anexo M se encuentran los valores anteriormente mencionados para cada una de las vigas.

### 9.2.3 Cálculos y resultados

Se calculó la carga máxima resistente con base en los resultados de esfuerzo cortante máximo y esfuerzo de rotura, encontrados en los ensayos de las probetas de flexión cortas y largas respectivamente.

Para cada probeta se calculó la carga máxima esperada por cortante con base en la Ecuación 9.6, donde se consideró  $\tau$  como el valor promedio de los esfuerzos cortantes máximos de los ensayos de las probetas de flexión corta Fc11a determinados en la sección 8.1.2.

$$P_{max1} = \frac{4th\tau}{3} \quad \text{Ecuación 9.6}$$

La carga máxima esperada por flexión se calculó con base en la Ecuación 9.7, donde se consideró  $f_r$  como el valor promedio del esfuerzo de rotura de los ensayos de las probetas de flexión larga FL11a y  $L_{libre}$  la distancia entre apoyos.

$$P_{max2} = \frac{2f_r th^2}{3L_{libre}} \quad \text{Ecuación 9.7}$$

En la Tabla 9.2 se encuentran los valores de carga máxima  $P_{max1}$  calculado con base en un esfuerzo cortante máximo de 6.2MPa y de  $P_{max2}$  calculado con base en un esfuerzo de rotura de 93.9MPa. También se encuentra el valor de la carga máxima experimental,  $P_{max}$ , obtenida al ensayar las cuatro vigas.

Tabla 9.2. Carga máxima esperada y carga máxima experimental

Probeta	$P_{max1}$ MPa	$P_{max2}$ MPa	$P_{max}$ MPa
1V-1	13244	6262	5417
1V-2	12505	5776	5142
2V-1	14353	6810	6309
2V-2	14489	6888	5577

Fuente: Autor

El esfuerzo de flexión longitudinal fue calculado con base en la Ecuación 9.8 donde  $M$  es el momento flector en el centro de la viga, y  $S$  el módulo de sección y  $L_{libre}$  la distancia entre apoyos.

$$\sigma_f = \frac{M}{S} = \frac{P L_{libre}}{4} \frac{6}{th^2} \quad \text{Ecuación 9.8}$$

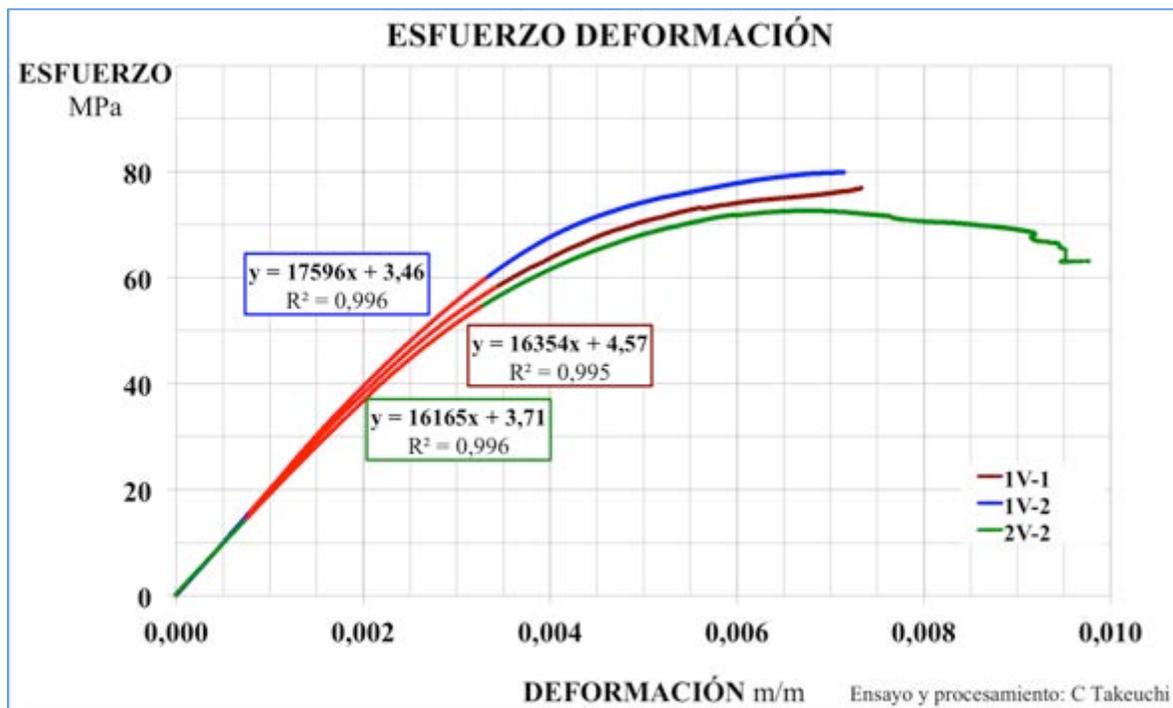
El esfuerzo rotura se calculó con base en la Ecuación 9.9 donde  $M_{max}$  es el momento máximo aplicado en el centro de la viga y  $S_{inel}$  el módulo de sección inelástico utilizado en la Sección 4.3.1.2.

$$f_r = \frac{M_{fmax}}{S} = \frac{P_{max} L_{libre}}{4} \frac{th^2}{6.3} \quad \text{Ecuación 9.9}$$

En las probetas instrumentadas, se determinó el módulo de elasticidad longitudinal a flexión,  $E_1$ , con base en la lectura de la deformación longitudinal,  $\epsilon_1$  como se hizo en la sección 8.1.2. En la Figura 9.9 se observan los diagramas esfuerzo deformación de las vigas 1V-1, 1V-2 y 2V-2 y sus correspondientes módulos de elasticidad.

En la Tabla 9.3 se encuentran los valores de esfuerzo de rotura y el módulo de elasticidad. El valor promedio de esfuerzo rotura fue de 78.3MPa con una desviación estándar de 4.4MPa y un coeficiente de variación de 0.06. El valor promedio de módulo de elasticidad fue de 16705MPa con una desviación estándar de 777MPa y un coeficiente de variación de 0.05. Ningún valor se consideró atípico.

Figura 9.9. Gráficas Esfuerzo deformación vigas 1V-1, 1V-2 y 2V-2.



Fuente: Autor

Tabla 9.3. Esfuerzo Rotura, Módulo de elasticidad

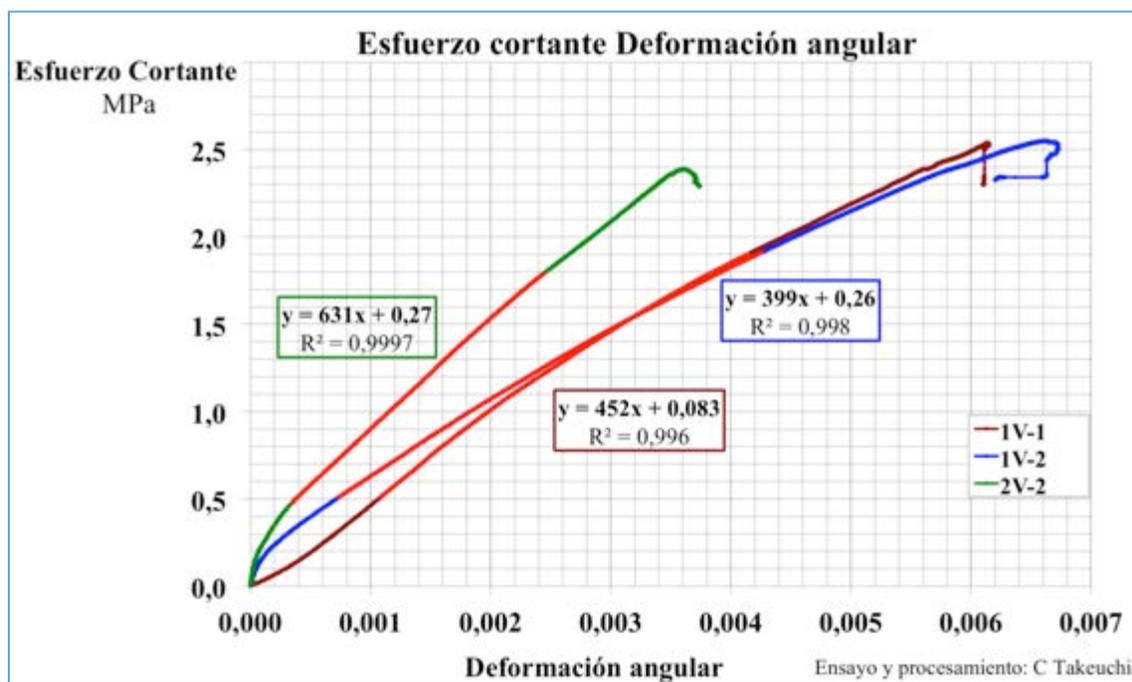
Probeta	Esfuerzo Rotura Mpa	$E_1$ Mpa	Coef Correlación
1V-1	77,59	16354	0,9947
1V-2	79,85	17596	0,9964
2V-1	83,10		
2V-2	72,63	16165	0,9963

Fuente: Autor

El esfuerzo cortante máximo fue calculado con base en la Ecuación 8.2 mencionada en la sección 8.1.2.

La deformación angular de las vigas 1V-1, 1V-2 y 2V-2, se calculó con base en las lecturas de la roseta de deformación utilizando la Ecuación 8.3 de la sección 8.1.2.. Se determinó el módulo de elasticidad a cortante,  $G$ , como la pendiente de la regresión lineal de los puntos de la curva esfuerzo cortante vs deformación angular, entre el 20% y el 75% del esfuerzo cortante máximo. En la Figura 9.10 se observan las curvas esfuerzo cortante vs deformación angular de las tres probetas mencionadas.

Figura 9.10. Esfuerzo cortante deformación angular vigas 1V-1, 1V-2 y 2V-2.



Fuente: Autor

En la Tabla 9.4 se encuentran los valores de esfuerzo cortante máximo y módulo de elasticidad a cortante. El valor promedio de esfuerzo cortante máximo alcanzado fue de 2.5MPa con una desviación estándar de 0.1MPa y un coeficiente de variación de 0.05. El valor promedio de módulo de elasticidad a cortante fue de 494MPa con una desviación estándar de 121.6MPa y un coeficiente de variación de 0.25. Ningún valor se consideró atípico.

Tabla 9.4. Esfuerzo cortante máximo, Módulo de elasticidad a cortante

Probeta	$\tau_{max}$ Mpa	G Mpa	Coef Correlación
1V-1	2,54	452	0,9956
1V-2	2,55	399	0,9976
2V-1	2,73		
2V-2	2,39	631	0,9963

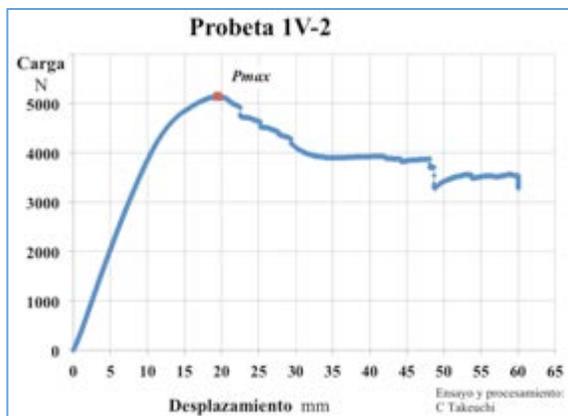
Fuente: Autor

### 9.2.4 Observaciones durante los ensayos

El comportamiento de las cuatro vigas fue similar. Durante el proceso de carga, inicialmente se presenta un comportamiento lineal, posteriormente se observa un comportamiento inelástico hasta alcanzar la carga máxima, cuando se observa rotura por tensión de las fibras inferiores en la parte central. La pérdida de carga en la viga es gradual en la medida en que otras fibras se rompen. En todas las vigas se presenta aplastamiento en el punto de aplicación de la carga. No se observa otro tipo de falla. En la Figura 9.11 se observa la curva carga desplazamiento y una imagen de la falla de la probeta 1V-2.

En el Anexo M, se presentan las fallas y curvas carga desplazamiento de las otras vigas ensayadas.

Figura 9.11 Falla y curva carga desplazamiento viga 1V-2



(a)



(b)

Fuente: Autor

### 9.2.5 Análisis de resultados

Al ser la carga máxima  $P_{max2}$ , calculada con base en el esfuerzo de rotura, menor que la carga máxima  $P_{max1}$ , calculada con base en el esfuerzo cortante máximo, se concluye que la falla de las vigas es determinada por flexión. Sin embargo la carga máxima experimental,  $P_{max}$ , fue ligeramente menor a la carga máxima,  $P_{max2}$ . Se debe tener en cuenta que la carga máxima,  $P_{max2}$ , se calculó con base en el esfuerzo de rotura promedio en probetas.

Los esfuerzos de rotura y módulos de elasticidad alcanzados en las vigas fueron menores a los obtenidos en las probetas de flexión larga.

Ninguna de las vigas presentó fisuras por cortante, después de llegar a la carga máxima. En algunas probetas de flexión largas FL11a después de alcanzar la carga máxima, se presentaron fisuras por cortante. La presencia de tableros con orientación de fibras vertical, puede prevenir la aparición de fisuras por cortante.

## 10. RESULTADOS DE RESISTENCIA Y MODULOS ELASTICOS

En este capítulo se presenta un resumen de los valores de resistencia y módulos elásticos del BGLPP obtenidos en el presente estudio. Valores que ya fueron presentados y discutidos en los capítulos que corresponden a cada tipo de sollicitación

En la Tabla 10.1 se muestran los valores promedio de resistencia del material BGLPP ante diferentes sollicitaciones. También se encuentran el número de ensayos considerados para cada caso, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 10.1. Valores de resistencia ante diferentes sollicitaciones

		n	Promedio MPa	S MPa	CV
Compresión paralela a la fibra	$F_{c1}$	10	65,7	5,4	0,082
Compresión perpendicular a la fibra	$F_{c2}$	9	9,3	0,8	0,082
Tensión perpendicular a la fibra	$F_{t2}$	37	1,39	0,27	0,194
	$F_{t3}$	12	1,89	0,16	0,084
Esfuerzo cortante paralelo a la fibra	$F_{v13}$	8	6,17	0,38	0,061
	$F_{v12}$	16	5,10	0,76	0,149
Esfuerzo cortante perpendicular a la fibra	$F_{vpe}$	5	2,30	0,59	0,258
Esfuerzo rotura	$F_{ra}$	10	89,7	5,8	0,065
	$F_{rb}$	10	98,5	6,2	0,062
Esfuerzo cortante paralelo a la fibra Probetas flexión	$F_{va}$	10	6,2	0,4	0,058
	$F_{vb}$	8	8,2	0,5	0,059

Fuente: Autor

Los valores de módulos elásticos obtenidos en los ensayos de compresión y flexión, así como las relaciones de Poisson obtenidas en los ensayos de compresión se muestra en la Tabla 10.2.

Tabla 10.2. Valores de módulos elásticos y relaciones de Poisson

Módulo de elasticidad probetas compresión

	n	Promedio MPa	S MPa	CV
$E_1$	3	30044	6559	0,22
$E_2$	3	265	34	0,13
$E_3$	3	634	124	0,20

Módulos de elasticidad probetas flexión corta

	n	Promedio MPa	S MPa	CV
$G_a$	2	307	5	0,016
$G_b$	3	541	17	0,031
$E_{1a}$	7	18473	1725	0,093
$E_{1b}$	10	19588	2011	0,10

Relaciones de Poisson

	n	Promedio MPa	S MPa	CV
$\nu_{21}$	3	0,81	0,18	0,22
$\nu_{31}$	3	1,18	0,35	0,30
$\nu_{32}$	3	0,07	0,0046	0,06
$\nu_{12}$	3	0,02	0,016	0,89
$\nu_{23}$	3	0,24	0,053	0,22
$\nu_{13}$	3	0,02	0,011	0,52

Módulos de elasticidad probetas flexión larga

	n	Promedio MPa	S MPa	CV
$G_a$	3	397	8	0,021
$G_b$	3	737	332	0,45
$E_{1a}$	9	23050	2337	0,10
$E_{1b}$	9	23674	3170	0,13

Fuente: Autor

## 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 10.1. CONCLUSIONES

Cada lámina de bambú guadua es un material compuesto natural, conformado por fibras largas orientadas en una dirección y embebidas en una matriz parenquimal, por lo cual su comportamiento no es isotrópico, mostrando mayor rigidez y resistencia en la dirección paralela a la fibra.

El bambú guadua laminado prensado pegado (BGLPP) es un material compuesto manufacturado, a partir de un conjunto de láminas de bambú guadua pegadas y prensadas entre sí que conservan la misma orientación de las fibras.

Los ensayos realizados a probetas de BGLPP, en los cuales se estudió su resistencia a la tensión, la compresión, el cortante y la flexión, no mostraron fisuras, deslizamientos o despegues entre láminas. Lo anterior demuestra que el adhesivo para unir las láminas y la forma de aplicarlo garantizaron la adherencia total entre ellas.

En general, la dispersión de la respuesta mecánica de los ensayos en probetas de BGLPP es menor que la encontrada en ensayos de los materiales que la constituyen, es decir, en láminas aisladas de guadua o en la guadua rolliza. En los ensayos de BGLPP se encontraron menores coeficientes de variación de la densidad promedio, del porcentaje de fibras, de la resistencia a compresión y del esfuerzo de rotura en comparación con los ensayos de láminas de guadua. Lo anterior indica que la transformación realizada a la guadua para convertirla en BGLPP homogeniza sus características físicas y mecánicas permitiendo una mayor confiabilidad estructural.

La densidad promedio del BGLPP es de  $0.8\text{gr/cm}^3$  con un coeficiente de variación de 0.045. Asimismo, el porcentaje de fibras varió entre el 42% y el 45%.

El valor promedio de resistencia a compresión paralela a la fibra del BGLPP fue de 68MPa y el coeficiente de variación fue de 0.08. El valor promedio de resistencia del material a la compresión perpendicular a la fibra normal al plano de los tableros fue de 9MPa con un coeficiente de variación fue de 0.08.

El valor promedio de módulo de elasticidad a compresión paralela a la fibra fue de 30044MPa con una desviación estándar de 6559MPa. El valor promedio de módulo de elasticidad a compresión perpendicular a la fibra perpendicular al plano de los tableros fue de 265MPa con una desviación estándar de 34MPa y a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de los tableros fue de 634MPa con una desviación estándar de 124MPa.

El material BGLPP exhibe sustancialmente una mayor rigidez en la dirección paralela a las fibras con respecto a las direcciones perpendiculares a ellas. Esto justifica que los coeficientes de Poisson en ensayos bajo carga paralela a la fibra sean mayores a 0.5. Los valores promedio de coeficientes de Poisson fueron de  $\nu_{21} = 0.81$  y  $\nu_{31} = 1.18$  obtenidos en ensayos donde la dirección de la carga fue paralela a la fibra.

Los valores promedio de coeficientes de Poisson fueron de  $\nu_{32} = 0.74$  y  $\nu_{12} = 0.018$  obtenidos en ensayos donde la dirección de la carga fue perpendicular a la fibra perpendicular al plano de los tableros y de  $\nu_{23} = 0.237$  y  $\nu_{13} = 0.021$  en ensayos de compresión perpendicular a la fibra paralelos al plano de los tableros.

La geometría de las probetas de tensión paralela a la fibra con entallas en el ancho y el espesor, permite identificar el esfuerzo cortante alcanzado antes del deslizamiento de las fibras con respecto a la matriz en la sección transversal reducida con respecto a la zona circundante a este. Para evitar la presencia de fisuras previas al deslizamiento fibra-matriz, los tableros deben ser perpendiculares al plano de aplicación de las cargas.

La resistencia promedio a tensión perpendicular a la fibra perpendicular al plano de los tableros encontrada fue de 1.50MPa con una desviación estándar de 0.27MPa.

El valor obtenido de la resistencia promedio a tensión perpendicular a la fibra paralelo al plano de los tableros fue de 1.86MPa con una desviación estándar de 0.19. Para evitar la presencia de fisuras diagonales y evitar la falla previa de las aletas los tableros deben ser perpendiculares al plano de aplicación de las cargas

La resistencia de tensión perpendicular a la fibra es mayor cuando el plano de los tableros es paralelo a la dirección de la carga. En este caso la superficie de fisura atraviesa zonas de alta y baja densidad de fibras, en caso contrario, es decir, cuando el plano de los tableros es normal a la dirección de la carga, la superficie de fisura pasa por zonas de baja densidad de fibras.

La respuesta estructural del BGLPP solicitado a cortante paralelo a la fibra muestra un comportamiento frágil del material compuesto, en el cual, la matriz aporta su capacidad a cortante sin la participación de las fibras. El valor promedio de resistencia a cortante paralelo a la fibra es de 5.5MPa con una desviación estándar de 0.8MPa.

El material BGLPP tiene un comportamiento post pico cohesivo ante sollicitaciones de cortante perpendicular a la fibra. El valor promedio de resistencia a cortante perpendicular a la fibra obtenido fue de 2.3MPa con una desviación estándar de 0.59MPa.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, D., & Pantoja, N. (2005). *Resistencia al corte paralelo a la fibra de la Guadua angustifolia*. Universidad Nacional de Colombia.
- AEN/CTN 56 Madera y corcho. (2004). UNE-EN 408 Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1999). *NSR-98 Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente*.
- AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2002). Capítulo E.7. Casas de uno y dos pisos en bahareque encementado. In *NSR-98 Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente* (pp. 1–21).
- AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010a). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*.
- AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010b). Título G - Estructuras de madera y estructuras de guadua. In *Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*.
- ASTM, A. S. for T. M. (1994). ASTM D143 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber.
- Alvarado, C., Moreno, J. I., & Takeuchi, C. (2010). Glued laminated guadua columns. In *12th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies "Materials & Technologies for Sustainable Infrastructure Systems" IC-NOCMAT 2010*.
- Amada, S., Ichikawa, Y., Munekata, T., Nagase, Y., & Shimizu, H. (1997). Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo. *Composites Part B: Engineering*, 28(1-2), 13–20.
- Amada, S., & Untao, S. (2001). Fracture properties of bamboo. *Composites Part B: Engineering*, 32(5), 451–459.
- Archila, H. F., Ansell, M. P., & Walker, P. (2014). Mechanical characterization of engineered guadua-bamboo panels using digital image correlation. *Key Engineering Materials*, 111–120.
- Ardila, C. L. (2012). *Determinación de los valores de esfuerzos admisibles del bambú Guadua angustifolia Kunth del departamento de Tolima, Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Atoche, J. C. (2009). *Evaluación del comportamiento estructural de conexiones de guadua laminada*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Barreto, W. (2003). *Evaluación de guadua laminada pegada aplicada a propuesta de reticulado plano*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Camacho, V., & Páez, I. (2002). *Estudio de Conexiones en guadua solicitadas a momento flector*. Universidad Nacional de Colombia.

- Capera, A. F., & Erazo, W. J. (2012). *Resistencia a la compresión paralela a la fibra y determinación del módulo de elasticidad de la guadua angustifolia del municipio de Pitalito-Huila*. Universidad SurColombiana.
- Carvajal, W., Ortegón, W., & Romero, C. (1981). *Elementos estructurales en bambú*. Bogotá.
- Ciro, H. José, Osorio, J. A., & Vélez, J. M. (2005). Determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la *Guadua angustifolia* Kunth. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 58(1), 2709–2715.
- Correal D, J. F., & Arbeláez C, J. (2010). Influence of Age and Height Position on Colombian *Guadua Angustifolia* Bamboo Mechanical Properties. *Maderas. Ciencia Y Tecnología*, 12(2), 105–113.
- Correal, J. F., Echeverry, J. S., Ramírez, F., & Yamín, L. E. (2014). Experimental evaluation of physical and mechanical properties of Glued Laminated *Guadua angustifolia* Kunth. *Construction and Building Materials*, 73, 105–112.
- Correal, J. F., & Ramirez, F. (2010). Adhesive bond performance in glue line shear and bending for glued laminated guadua bamboo. *Forest Research Institute*, 22(4), 433–439.
- Correal, J., & Varela, S. (2012). Shear walls sheathed with glued laminated guadua bamboo panels subjected to lateral loads. In *World Conference on Timber Engineering* (pp. 2–3).
- Cortés, J. C. (2009). *Evaluación de la Influencia del tipo de pegante en el comportamiento mecánico de guadua laminada prensada pegada*. Universidad Nacional de Colombia.
- Cortes, J. C., Lozano, J., Rusinque, M., & Takeuchi, C. P. (2010). Assessment of the influence of glue type in the mechanical behavior of glued laminated guadua (bamboo). In *12th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (IC NOCMAT 2010)*.
- Díaz, G. (2011). *Influencia de la densidad aparente de fibras sobre la resistencia a esfuerzos de compresión, tensión y flexión de la guadua*. Universidad Industrial de Santander.
- Díaz, G. a, Cruz, R. a, & Chávez, a M. (2013). Optimization of the bamboo guadua angustifolia kunth in the elaboration of glued laminated elements for constructive use. *Journal of Physics: Conference Series*, 466, 012032.
- Durán, M. (2003). *Estudio de guadua laminada pegada y su aplicación en sistemas tensegrity*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Durán, A., & Uribe, M. (2002). *Estudio de elementos solicitados a compresión armados por tres guaduas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Flander, K. De, & Rovers, R. (2009). One laminated bamboo-frame house per hectare per year. *Construction and Building Materials*, 23(1), 210–218.
- Giraldo, E., & Sabogal, A. (1999). *La Guadua angustifolia* Kunth en Colombia. Corporación Autónoma del Quindío. Subdirección de Recursos Naturales y Educación Ambiental. Centro Nacional para el estudio del Bambú-Guadua
- Ghavami, K., & Marinho, A. B. (2005). Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 9(1), 107–114.

- González, C. E. (2006). *Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la Guadua angustifolia y determinación del módulo de elasticidad*. Universidad Nacional de Colombia.
- González, C. E., & Takeuchi, C. P. (2007). Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua angustifolia y determinación del módulo de elasticidad. *Ingeniería Y Universidad*, 11(1), 89–103.
- González, E., Osorio, J. A., & García, E. A. (2002). Resistencia a la flexión de la *Guadua angustifolia* Kunth a escala natural. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 55(2), 1555–1572.
- González, H. A., Hellwig, S., & Montoya, J. A. (2008). Resultados del ensayo del modulo de Young y resistencia a la flexion de vigas laminadas de *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica*, (40), 291–296.
- González, H. A., Hellwig, S., & Montoya, J. A. (2008). Comportamiento a la cizalladura de vigas encoladas laminadas de *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica*, (39), 428–433.
- González, J. C., & Leguizamón, Y. (2012). *Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra de la Guadua en función del contenido de humedad*. Universidad La Gran Colombia.
- González, H. A., Montoya, J. A., & Bedoya, J. R. (2006). Esfuerzo de tensión y la influencia de la humedad relativa del ambiente y la altura a lo largo del tramo en la especie de bambú *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica*, XII(32), 445–450.
- González, H. A., Montoya, J. A., & Bedoya, J. R. (2007). Resultados del ensayo a flexión en muestras de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica*, (35), 503–508.
- Gutiérrez, J. E., & Olarte, J. F. (2013). *Esfuerzo máximo de tensión paralela a la fibra y determinación del módulo de elasticidad de la Guadua angustifolia del municipio de Pitalito-Huila*. Universidad Sur Colombiana.
- Hackmayer, L. C., Rodríguez, N., & Takeuchi, C. P. (2010). Flexion Behavior of solid section beams of glued laminated guadua. In *IC-NOCMAT 2010*. Cairo.
- ICONTEC, I. C. de N. T. y C. (2007). Norma Técnica Colombiana NTC 5525 *Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua angustifolia* Kunth. Bogotá: ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas.
- ISO, I. S. (2004). ISO 22157 Determination of physical and mechanical properties of bamboo, (December).
- Lamus, F. A. (2008). *Calificación de una conexión viga-colimna resistente a momento en guadua angustifolia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Li, H., Zhang, Q., Huang, D., & Deeks, A. J. (2013). Compressive performance of laminated bamboo. *Composites Part B: Engineering*, 54(May), 319–328.
- Liese, W. (1998). *The Anatomy of Bamboo Culms*. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan INBAR.
- Londoño, X., Camayo, G., Riaño, N., & López, Y. (2002). Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. *Bamboo Science and Culture*, 16(1), 18–31.
- López, L. F., & Correal, J. F. (2009). Estudio exploratorio de los laminados de bambú *Guadua angustifolia* como material estructural. *Maderas. Ciencia Y Tecnología*, 11(3), 171–182.

- López, L. F. (2008). *Estudio exploratorio del potencial estructural de laminados de guadua*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- López, L., & Silva, M. (2000). *Comportamiento sismorresistente de estructuras en bahareque*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Luna, P., Lozano, J., & Takeuchi, C. (2014). Determinación experimental de valores característicos de resistencia para *Guadua angustifolia*. *Maderas. Ciencia Y Tecnología*, 16(1), 77–92.
- Luna, P., Lozano, J., Takeuchi, C. P., & Gutierrez, M. (2012). Experimental Determination of Allowable Stresses for Bamboo *Guadua Angustifolia* Kunth Structures. *Key Engineering Materials*, 517, 76–80. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.517.76
- Luna, P., & Takeuchi, C. (2014). Resistencia mecánica de elementos de fibra de guadua compactada. In *II Simposio Internacional de guadua y bambú* (p. 228).
- Luna, P., Takeuchi, C., & Córdón, E. (2014). Mechanical Behavior of Glued Laminated Pressed Bamboo *Guadua* Using Different Adhesives and Environmental Conditions. *Key Engineering Materials*, 600, 57–68.
- Mahdavi, M., Clouston, P. L., & Arwade, S. R. (2012). A low-technology approach toward fabrication of Laminated Bamboo Lumber. *Construction and Building Materials*, 29, 257–262.
- Martín, J. V., & Mateus, L. R. (1981). *Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra de la guadua de Castilla*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Martínez, D. E. (1992). Puentes en do mayor. *I Congreso Mundial de Bambú*. Pereira.
- Matthews, F. L., & Rawlings, R. D. *Composite material: Engineering an Science*. (W. P. limited, Ed.) Cambridge, England: Imperial College of Science, Technology and medicine.
- Mora, L. (2009). *Contribución al estudio de caracterización mecánica de la madera prensada de esteras de bambú aplicando técnicas de modelación y experimentación*. Santa Clara: Universidad Central de las villas.
- Meylan, B., & Butterfield, B. (1972). *Three-dimensional Structure of Wood*. London: Charnab and Hall.
- Nugroto, N., & Ando, N. (2001). Development of structural composite products made from bamboo. *fundamental properties of laminated bamboo lumber*, (April 1999), 237–242.
- Osorio, J. A., Ciro, H. José, & Vélez, J. M. (2005). Influence of physical parameters in the design resistance to compression of the *Guadua angustifolia* Kunth. *Dyna*, 72, 1–6.
- Osorio, J. A., Vélez, J. M., & Ciro, H. José. (2007). Internal structure of the guadua and its incidence in the mechanical properties. *Dyna*, 74(153), 81–94.
- Osorio, L., Trujillo, E., Van Vuure, a. W., & Verpoest, I. (2011). Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/ epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(5), 396–408. doi:10.1177/0731684410397683
- Pantoja, N., & Acuña, D. (2005). *Resistencia al corte paralelo a la fibra de la Guadua Angustifolia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- Pacheco, C. A., & Takeuchi, C. P. (2006). Tension strength perpendicular to the fiber in *Guadua angustifolia* (Bamboo). In *Brazilian Conference on Non-Conventional Materials and Technologies in Ecological and Sustainable Construction. Brazil NOCMAT 2006*. Salvador de Bahía.
- Pereira, M., & Beraldo, A. (2010). *Bambú de corpo e alma*. Bauru, Brasil: canal6editora.
- Pinilla, J. J. (2010). *Comportamiento estructural de guadua angustifolia laminada ante carga perpendicular y paralela a su plano*. Universidad Nacional de Colombia.
- Prieto, E., & Sánchez, J. (2000). *Comportamiento de la Guadua angustifolia sometida a flexión*. Universidad Nacional de Colombia.
- Quiroga, R. (2009). *Influencia de nodos y uniones dentadas en laminados de Guadua Angustifolia Kunth*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Rashid, M. (2003). *Development of parenchyma cell walls in the bamboo Guadua angustifolia Kunth*. London: Imperial College. Department of Biological Sciences
- Rodríguez, N. (2011). *Elaboración de tablas y gráficos de diseño a flexión de vigas de Guadua laminada pegada prensada*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Rodríguez, N., & Takeuchi, C. (2010). Evaluation of the influence of the slats placing of different density in the flexion behavior of glue laminated guadua. In *12th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies "Materials & Technologies for Sustainable Infrastructure Systems" IC-NOCMAT 2010* (pp. 1–8).
- Rusique, M. (2007). *Influencia de la perforación, para inmunización en los tabiques, en el comportamiento de elementos solicitados a flexión de Guadua angustifolia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Sánchez, L. A., del Real, A., & Rodríguez, M. E. . (2010). Caracterización morfológica de culmos de *Guadua angustifolia* Kunth por medio de microscopía electrónica de barrido. In *X Congreso Nacional de Microscopia-Morelia*.
- Sinha, A., Way, D., & Mlasko, S. (2014). Structural performance of glued laminated bamboo beams. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 140
- Taylor, J. R. (1997). *An introduction to Error Analysis*. (Universisty Science Books, Ed.) (pp. 166–8). New York: Books, University Science.
- Torres, E., Luna, P., & Takeuchi, C. (2014). Determination of the Delamination Percentage of Compacted Bamboo *Guadua* Using Extended Field Digital Images Processing. *Key Engineering Materials*, 600, 15–20. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.600.15
- Torres, E., Plata, A., Díaz, G., & Takeuchi, C. (2014). Analysis of the Fiber Density in Bamboo *Guadua angustifolia* Kunth by Extended Field Microscopy and High Resolution Images Processing. *Key Engineering Materials*, 600, 10–14.
- Torres, L. A. (2005). *Modelo anisótropo de elementos finitos para el análisis mecánico del bambú y su verificación experimental*. Universidad del Valle.
- Universidad Nacional de Colombia. (2012). *Informe Final Proyecto de Investigación "Diseño y construcción de vivienda con elementos estructurales en guadua laminada prensada pegada."*

- Universidad Nacional de Colombia. (2010). *Informe final Proyecto de Investigación "Validación de la Guadua Angustifolia como elemento estructural para el diseño, por el método de los esfuerzos admisibles"*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Varela, S. (2009). *Estudio Experimental de Paneles de Guadua Laminada Para Uso en Muros de Corte*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Vinson, J. R., & Sieralowski, R. L. (2002). *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials* (p. 433). New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers.
- Wan, T. (2005). *NUMERICAL ANALYSIS OF LAMINATED BAMBOO STRIP LUMBER (LBSL)*. University of Birmingham.
- Wang, Z., Shyam, P., Chen, X., & Gao, L. (2009). Application of bamboo-based engineered materials in construction. In *Second International Congerence on Modern Bamboo Structures – ICBS*. Bogotá.
- Xiao, Y., Shan, B., Yang, R. Z., Li, Z., & Chen, J. (2014). Glue laminated bamboo (GluBam) for structural applications. In S. Aicher, H.-W. Reinhardt, & H. Garrecht (Eds.), *Materials and Joints in Timber Structures* (pp. 589–601). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Xiao, Y., Yang, R., & She, L. (2010). Mechanical properties of laminated bamboo sheets. *12th international Conference on Non - conventional Materials and Technologies*. El Cairo: Housing & Building national Research Center.
- Yang, R. Z., Xiao, Y., & Lam, F. (2014). Failure analysis of typical glubam with bidirectional fibers by off-axis tension tests. *Construction and Building Materials*, 58, 9–15.
- Yeh, M.-C., & Lin, Y.-L. (2011). Finger joint performance of structural laminated bamboo member. *Journal of Wood Science*, 58(2), 120–127.
- Zhon, Q., Xiao, Y., Shan, B., & She, L. (2010). Experimental Studies on Flexural Behavior of glubam beams. *12th international Conference on Non - conventional Materials and Technologies*. El Cairo: Housing & Building national Research Center.