



TESIS DOCTORAL

**CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA DE LOS LAMINADOS DE BAMBÚ
DENDROCALAMUS ASPER COMO MATERIAL SOSTENIBLE CONSTRUCTIVO
PARA PROYECTOS ARQUITECTÓNICOS EN EL NOROCCIDENTE DE LA
PROVINCIA DE PICHINCHA ECUADOR**

MYRIAN ALEXANDRA LARCO BENÍTEZ

DEPARTAMENTO DE EXPRESIÓN GRÁFICA

Conformidad de los Directores:

Fdo.: Dr. José Luis Canito Lobo

Fdo.: Dr. Antonio Manuel Reyes Rodríguez

2017

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a mis directores Dr. José Luis Canito Lobo y Dr. Antonio Manuel Reyes Rodríguez quienes han sabido acompañarme y guiarme a lo largo de este trabajo.

Agradezco a la Dra. Caori Takeuchi, brillante investigadora de la Universidad Nacional de Colombia, quien supo brindarme toda su experiencia, facilitar el uso de los laboratorios y sobre todo darle las gracias por acogerme con toda su calidad humana y apoyarme en este proyecto.

Agradezco a Darío Moreno Pineda, quién colaboró cuando se realizaron los ensayos en el laboratorio de estructuras de la Universidad Nacional de Colombia.

Agradezco al Ing. Ricardo Moya Barberá por su acertada ayuda en la interpretación de los datos de los ensayos.

Agradezco al Gobierno Autónomo de la provincia de Pichincha quienes facilitaron los datos necesarios para esta investigación.

Agradezco a la Universidad Tecnológica Equinoccial del Ecuador, Institución que me ha impulsado a conseguir mayores logros académicos.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia:

A Pablo mi esposo que con su constante apoyo y cariño me han dado soporte, a mis amados hijos Samantha y Andrés Nicolás que llenan de luz mi vida y me impulsan a ser mejor cada día.

A mis padres que creyeron en mí y me enseñaron que uno puede lograr todo lo que se propone con decisión, voluntad y tenacidad.

A mis hermanos cada uno de ellos con su manera de ser a Verónica y David que me han enseñado mucho, y en forma especial dedico este trabajo a mi hermana Patricia quien ha sido en mi vida una guía constante que modeló quién soy.

A mis suegros y cuñados por ser y estar presentes con su cariño, y a mis queridos sobrinos que espero que luchen con optimismo por lo que les apasiona y no dejen que nada los detenga.

LISTADO DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I:

INTRODUCCIÓN	1
1.1 Título	1
1.2 Justificación	1
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivos Específicos	4
1.3.2 Objetivo General	4
1.4 Hipótesis	5
1.5 Estructura del Documento	5

CAPÍTULO II:

MATERIALES Y MÉTODOS	7
-----------------------------	----------

CAPÍTULO III:

MARCO TEÓRICO	9
3.1 El bambú dendrocalamus asper como material sostenible en el Noroccidente de la provincia de Pichincha Ecuador.	9
3.2 La CENBA y los LBDA laminados de bambú dendrocalamus asper	11

CAPÍTULO IV:

COMPRESIÓN EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER (LBDA)	21
4.1 COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA EN PROBETAS SERIE C11	23
4.1.1 Descripción de los ensayos	23
4.1.2 Cálculo y Resultados	26
4.1.3 Observaciones durante el ensayo	37
4.1.4 Determinación de la densidad serie C11	50
4.1.4.1 Descripción de los ensayos	50
4.1.4.2 Resultados	51
4.1.5 Determinación del contenido de humedad serie C11	51

4.1.5.1	Descripción de los ensayos	51
4.1.5.2	Resultados	52
4.1.6	Análisis de resultados serie C11	53
4.2	COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PERPENDICULAR AL PLANO DE LOS TABLEROS EN PROBETAS SERIE C22	59
4.2.1	Descripción de los ensayos	59
4.2.2	Cálculo y Resultados	61
4.2.3	Observaciones durante los ensayos	72
4.2.4	Determinación de la densidad serie C22	83
4.2.4.1	Descripción de los ensayos	83
4.2.4.2	Resultados	84
4.2.5	Determinación del contenido de humedad serie C22	85
4.2.5.1	Descripción de los ensayos	85
4.2.5.2	Resultados	86
4.2.6	Análisis de resultados serie C22	
4.3	COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PARALELO AL PLANO DE UNIÓN ENTRE TABLEROS EN PROBETAS SERIE C33	90
4.3.1	Descripción de los ensayos	90
4.3.2	Cálculo y Resultados	92
4.3.3	Observaciones durante el ensayo	104
4.3.4	Determinación de la densidad serie C33	117
4.3.4.1	Descripción de los ensayos	117
4.3.4.2	Resultados	118
4.3.5	Determinación del contenido de humedad serie C33	118
4.3.5.1	Descripción de los ensayos	118
4.3.5.2	Resultados	119
4.3.6	Análisis de resultados serie C33	120
4.4	RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN	123
CAPÍTULO V:		
<i>CORTANTE EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ <i>DENDROCALAMUS</i></i>		
<i>ÁSPER (LBDA)</i>		
125		
5.1	CORTANTE PARALELO A LA FIBRA EN PROBETAS SERIE V13	128
5.1.1	Descripción de los ensayos	128
5.1.2	Cálculo y Resultados	130

*CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA DE LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER
COMO MATERIAL SOSTENIBLE CONSTRUCTIVO PARA PROYECTOS ARQUITECTÓNICOS EN EL
NOROCCIDENTE DE LA PROVINCIA DE PICHINCHA*

5.1.3	Observaciones durante el ensayo	133	
5.1.4	Determinación de la densidad serie V13	144	
5.1.4.1	Descripción de los ensayos	144	
5.1.4.2	Resultados	145	
5.1.5	Determinación del contenido de humedad serie V13	145	
5.1.5.1	Descripción de los ensayos	145	
5.1.5.2	Resultados	146	
5.1.6	Análisis de resultados serie V13	147	
5.2 CORTANTE PARALELO A LA FIBRA EN PROBETAS SERIE V12			150
5.2.1	Descripción de los ensayos	150	
5.2.2	Cálculo y Resultados	152	
5.2.3	Observaciones durante el ensayo	156	
5.2.4	Determinación de la densidad serie V12	168	
5.2.4.1	Descripción de los ensayos	168	
5.2.4.2	Resultados	169	
5.2.5	Determinación del contenido de humedad serie V12	170	
5.2.5.1	Descripción de los ensayos	170	
5.2.5.2	Resultados	170	
5.2.6	Análisis de resultados serie V12	171	
5.3 CORTANTE PERPENDICULAR A LA FIBRA EN PROBETAS SERIE V23			174
5.3.1	Descripción de los ensayos	175	
5.3.2	Cálculo y Resultados	175	
5.3.3	Observaciones durante el ensayo	179	
5.3.4	Determinación de la densidad serie V23	191	
5.3.4.1	Descripción de los ensayos	191	
5.3.4.2	Resultados	191	
5.3.5	Determinación del contenido de humedad serie V23	192	
5.3.5.1	Descripción de los ensayos	192	
5.3.5.2	Resultados	193	
5.3.6	Análisis de resultados serie V23	193	
5.4 CORTANTE PERPENDICULAR A LA FIBRA EN PROBETAS SERIE V32			196
5.4.1	Descripción de los ensayos	196	
5.4.2	Cálculo y Resultados	197	
5.4.3	Observaciones durante el ensayo	201	
5.4.4	Determinación de la densidad serie V32	212	
5.4.4.1	Descripción de los ensayos	212	

5.4.4.2	Resultados	213
5.4.5	Determinación del contenido de humedad serie V32	213
5.1.5.1	Descripción de los ensayos	213
5.1.5.2	Resultados	214
5.4.6	Análisis de resultados serie V32	215
5.5	RESULTADOS DE RESISTENCIA CORTANTE	218

CAPÍTULO VI:

FLEXIÓN EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS

<i>ASPER (LBDA)</i>	223
----------------------------	-----

6.1	FLEXION LONGITUDINAL EN PROBETAS SERIE Fc11a	223
6.1.1	Descripción de los ensayos	223
6.1.2	Cálculo y Resultados	225
6.1.3	Observaciones durante el ensayo	226
6.1.4	Determinación de la densidad serie Fc11a	237
6.1.4.1	Descripción de los ensayos	237
6.1.4.2	Resultados	238
6.1.5	Determinación del contenido de humedad serie Fc11a	238
6.1.5.1	Descripción de los ensayos	238
6.1.5.2	Resultados	239
6.1.6	Análisis de resultados serie Fc11a	239
6.2	FLEXION LONGITUDINAL EN PROBETAS SERIE Fc11b	241
6.2.1	Descripción de los ensayos	241
6.2.2	Cálculo y Resultados	242
6.2.3	Observaciones durante el ensayo	243
6.2.4	Determinación de la densidad serie Fc11b	254
6.2.4.1	Descripción de los ensayos	254
6.2.4.2	Resultados	255
6.2.5	Determinación del contenido de humedad serie Fc11b	255
6.2.5.1	Descripción de los ensayos	255
6.2.5.2	Resultados	256
6.2.6	Análisis de resultados serie Fc11b	257

6.3	RESULTADOS DE RESISTENCIA FLEXIÓN	258
CAPÍTULO VII:		
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	260
7.1	CONCLUSIONES	260
7.2	RECOMENDACIONES	263
	BIBLIOGRAFÍA	265

*CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA DE LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER
COMO MATERIAL SOSTENIBLE CONSTRUCTIVO PARA PROYECTOS ARQUITECTÓNICOS EN EL
NOROCCIDENTE DE LA PROVINCIA DE PICHINCHA*

LISTADO DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN		
Figura 1-1	Bambú rollizo dendrocalamus asper (morfología natural)	4
Figura 1-2	Laminados de bambú dendrocalamus asper (LBDA)	4
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO		
Figura 3-1	Mayor presencia de bambú en las provincias de Ecuador	10
Figura 3-2	Proceso para la industrialización del bambú rollizo para convertirlo en LBDA (laminados de bambú dendrocalamus asper)	12
Figura 3-3	Compra de materia prima. Selección de bambúes.	13
Figura 3-4	Despuntado	13
Figura 3-5	Latillado	14
Figura 3-6	Denudado de las latillas de bambú.	14
Figura 3-7	Cepillado de 2 caras.	15
Figura 3-8	Preservado. Se sumergen las latillas en agua con preservantes.	15
Figura 3-9	Pre Secado.	16
Figura 3-10	Emparrillado.	16
Figura 3-11	Secado en Cámara.	17
Figura 3-12	Cepillado de una cara.	18
Figura 3-13	Cepillado 4 caras latillas.	18
Figura 3-14	Armado de tablero y encolado.	19
Figura 3-15	Prensado.	19
Figura 3-16	Lijado Laminados.	20
CAPÍTULO IV: COMPRESIÓN EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER		
Figura 4-1	Probetas para ensayos a compresión Series C11, C22, C33	22
Figura 4-2	Probeta para ensayo de Compresión Paralela a la Fibra Serie C11	23
Figura 4-3	Ensayo a compresión paralela a la fibra colocación de la muestra en la máquina universal	25
Figura 4-4	Colocación de deformímetros para ensayo de compresión paralela a la fibra.	25
Figura 4-5	Relación entre el esfuerzo o tensión normal al área de referencia (σ) y la deformación longitudinal unitaria (δ/L).	27
Figura 4-6	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, datos registrados con el deformímetro 1, muestra C11-1	29

Figura 4-7	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, datos registrados con el deformímetro 2, muestra C11-1	29
Figura 4-8	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-1	30
Figura 4-9	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-2	31
Figura 4-10	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-3	31
Figura 4-11	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-4	32
Figura 4-12	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-5	32
Figura 4-13	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-6	33
Figura 4-14	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-7	33
Figura 4-15	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-8	34
Figura 4-16	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-9	34
Figura 4-17	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-10	35
Figura 4-18	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-1 estado final	38
Figura 4-19	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-2 estado final	38
Figura 4-20	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-3 estado final	39
Figura 4-21	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-4 estado final	39
Figura 4-22	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-5 estado final	40
Figura 4-23	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-7 estado final	40
Figura 4-24	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-8 estado final	41
Figura 4-25	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-9 estado final	41
Figura 4-26	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-10 estado final	42
Figura 4-27	Relación carga-desplazamiento, muestra C11-1	43
Figura 4-28	Relación carga-desplazamiento, muestra C11-2	44
Figura 4-29	Relación carga-desplazamiento, muestra C11-3	44
Figura 4-30	Relación carga-desplazamiento, muestra C11-4	45
Figura 4-31	Relación carga-desplazamiento, muestra C11-5	45
Figura 4-32	Relación carga-desplazamiento, muestra C11-6	46
Figura 4-33	Relación carga-desplazamiento, muestra C11-7	46
Figura 4-34	Relación carga-desplazamiento, muestra C11-8	47
Figura 4-35	Relación carga-desplazamiento, muestra C11-9	47
Figura 4-36	Relación carga-desplazamiento, muestra C11-10	48
Figura 4-37	Relación carga-desplazamiento, muestras C11	48

Figura 4-38	Determinación del Contenido de Humedad serie C11, ingreso al horno.	52
Figura 4-39	Probeta para ensayo de Compresión Perpendicular a la Fibra Perpendicular al Plano de los Tableros Serie C22	59
Figura 4-40	Relación entre el esfuerzo o tensión normal al área de referencia (σ_c) y la deformación longitudinal unitaria (δ/L).	62
Figura 4-41	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, datos registrados con el deformímetro 1, muestra C22-1	64
Figura 4-42	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, datos registrados con el deformímetro 2, muestra C22-1	64
Figura 4-43	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-1	65
Figura 4-44	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-2	66
Figura 4-45	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-3	66
Figura 4-46	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-4	67
Figura 4-47	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-5	67
Figura 4-48	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-6	68
Figura 4-49	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-7	68
Figura 4-50	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-8	69
Figura 4-51	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-9	69
Figura 4-52	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-10	70
Figura 4-53	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-1 estado final	73
Figura 4-54	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-2 estado final	73
Figura 4-55	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-3 estado final	73
Figura 4-56	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-4 estado final	74
Figura 4-57	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-5 estado final	74
Figura 4-58	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-6 estado final	74
Figura 4-59	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-7 estado final	75
Figura 4-60	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-8 estado final	75
Figura 4-61	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-9 estado final	75
Figura 4-62	Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-10 estado final	76
Figura 4-63	Relación carga-desplazamiento, muestra C22-1	77
Figura 4-64	Relación carga-desplazamiento, muestra C22-2	77

Figura 4-65	Relación carga-desplazamiento, muestra C22-3	78
Figura 4-66	Relación carga-desplazamiento, muestra C22-4	78
Figura 4-67	Relación carga-desplazamiento, muestra C22-5	79
Figura 4-68	Relación carga-desplazamiento, muestra C22-6	79
Figura 4-69	Relación carga-desplazamiento, muestra C22-7	80
Figura 4-70	Relación carga-desplazamiento, muestra C22-8	80
Figura 4-71	Relación carga-desplazamiento, muestra C22-9	81
Figura 4-72	Relación carga-desplazamiento, muestra C22-10	81
Figura 4-73	Relación carga-desplazamiento, muestras C22	82
Figura 4-74	Probeta para ensayo de Compresión Perpendicular a la Fibra Paralela al Plano de y unión entre Tableros Serie C33.	90
Figura 4-75	Figura 4-75. Ubicación de deformímetros en las Probetas ensayadas a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probetas Series C33	92
Figura 4-76	Relación entre el esfuerzo o tensión normal al área de referencia (σ_c) y la deformación longitudinal unitaria (δ/L).	93
Figura 4-77	Relación entre el esfuerzo o tensión normal al área de referencia (σ_c) y la deformación longitudinal unitaria (δ/L), con mayor detalle en la zona donde confluyen la mayoría de gráficos	94
Figura 4-78	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, datos registrados con el deformímetro 1, muestra C33-1	96
Figura 4-79	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, datos registrados con el deformímetro 2, muestra C33-1	96
Figura 4-80	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-1	97
Figura 4-81	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-2	98
Figura 4-82	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-3	98
Figura 4-83	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-4	99
Figura 4-84	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-5	99
Figura 4-85	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-6	100
Figura 4-86	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-7	100
Figura 4-87	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-8	101
Figura 4-88	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-9	101

Figura 4-89	Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-10	102
Figura 4-90	Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-1 estado final	105
Figura 4-91	Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-2 estado final	105
Figura 4-92	Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-3 estado final	106
Figura 4-93	Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-4 estado final	106
Figura 4-94	Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-5 estado final	107
Figura 4-95	Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-6 estado final	107
Figura 4-96	Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-7 estado final	108
Figura 4-97	Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-8 estado final	108
Figura 4-98	Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-9 estado final	109
Figura 4-99	Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-10 estado final	109
Figura 4-100	Relación carga-desplazamiento, muestra C33-1	110
Figura 4-101	Relación carga-desplazamiento, muestra C33-2	111
Figura 4-102	Relación carga-desplazamiento, muestra C33-3	111
Figura 4-103	Relación carga-desplazamiento, muestra C33-4	112
Figura 4-104	Relación carga-desplazamiento, muestra C33-5	112
Figura 4-105	Relación carga-desplazamiento, muestra C33-6	113
Figura 4-106	Relación carga-desplazamiento, muestra C33-7	113
Figura 4-107	Relación carga-desplazamiento, muestra C33-8	114
Figura 4-108	Relación carga-desplazamiento, muestra C33-9	114
Figura 4-109	Relación carga-desplazamiento, muestra C33-10	115
Figura 4-110	Relación carga-desplazamiento, muestras C33	115
Figura 4-111	Relación carga-desplazamiento de las 10 muestras C11 (rojo), las 9 muestras de C22 (azul) y las 10 muestras C33 (amarillo)	123
<i>CAPÍTULO V: CORTANTE EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ <i>DENDROCALAMUS ASPER</i></i>		
Figura 5-1	Tipos de probetas a corte V13, V12, V23, V32	126
Figura 5-2	Probetas para esfuerzo cortante, orientación de las fibras	127
Figura 5-3	Ubicación de probeta V13 en la máquina Universal con un dispositivo para la sujeción.	128

Figura 5-4	Probeta V13, dimensiones y vista lateral con carga	129
Figura 5-5	Esfuerzo cortante vs δ/L probetas a cortante V13	131
Figura 5-6	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 1 estado final	133
Figura 5-7	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 2 estado final	134
Figura 5-8	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 3 estado final	134
Figura 5-9	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 4 estado final	135
Figura 5-10	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 5 estado final	135
Figura 5-11	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 6 estado final	136
Figura 5-12	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 7 estado final	136
Figura 5-13	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 8 estado final	136
Figura 5-14	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 9 estado final	137
Figura 5-15	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 10 estado final	137
Figura 5-16	Relación carga-desplazamiento, muestra V13-1	138
Figura 5-17	Relación carga-desplazamiento, muestra V13-2	138
Figura 5-18	Relación carga-desplazamiento, muestra V13-3	139
Figura 5-19	Relación carga-desplazamiento, muestra V13-4	139
Figura 5-20	Relación carga-desplazamiento, muestra V13-5	140
Figura 5-21	Relación carga-desplazamiento, muestra V13-6	140
Figura 5-22	Relación carga-desplazamiento, muestra V13-7	141
Figura 5-23	Relación carga-desplazamiento, muestra V13-8	141
Figura 5-24	Relación carga-desplazamiento, muestra V13-9	142
Figura 5-25	Relación carga-desplazamiento, muestra V13-10	142
Figura 5-26	Relación carga-desplazamiento, muestras tipo V13	143
Figura 5-27	Ingreso al horno de las probetas V13	146
Figura 5-28	Ubicación de probeta V12 en la máquina Universal con un dispositivo para la sujeción.	150
Figura 5-29	Probeta V12. Esquema ensayo de corte.	151
Figura 5-30	Esfuerzo cortante vs δ/L probetas a cortante V12	153
Figura 5-31	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 1 estado final	157
Figura 5-32	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 2 estado final	157
Figura 5-33	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 3 estado final	158
Figura 5-34	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 4 estado final	158
Figura 5-35	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 5 estado final	159
Figura 5-36	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 6 estado final	159
Figura 5-37	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 7 estado final	160
Figura 5-38	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 8 estado final	160
Figura 5-39	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 9 estado final	161
Figura 5-40	Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 10 estado final	161
Figura 5-41	Relación carga-desplazamiento, muestra V12-1	162
Figura 5-42	Relación carga-desplazamiento, muestra V12-2	163

Figura 5-43	Relación carga-desplazamiento, muestra V12-3	163
Figura 5-44	Relación carga-desplazamiento, muestra V12-4	164
Figura 5-45	Relación carga-desplazamiento, muestra V12-5	164
Figura 5-46	Relación carga-desplazamiento, muestra V12-6	165
Figura 5-47	Relación carga-desplazamiento, muestra V12-7	165
Figura 5-48	Relación carga-desplazamiento, muestra V12-8	166
Figura 5-49	Relación carga-desplazamiento, muestra V12-9	166
Figura 5-50	Relación carga-desplazamiento, muestra V12-10	167
Figura 5-51	Relación carga-desplazamiento, muestras tipo V12	167
Figura 5-52	Probeta V23. Esquema ensayo de corte.	174
Figura 5-53	Esfuerzo cortante vs δ/L probetas a cortante V23	176
Figura 5-54	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 1 estado final	179
Figura 5-55	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 2 estado final	180
Figura 5-56	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 3 estado final	180
Figura 5-57	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 4 estado final	181
Figura 5-58	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 5 estado final	181
Figura 5-59	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 6 estado final	182
Figura 5-60	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 7 estado final	182
Figura 5-61	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 8 estado final	183
Figura 5-62	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 9 estado final	183
Figura 5-63	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 10 estado final	184
Figura 5-64	Relación carga-desplazamiento, muestra V23-1	184
Figura 5-65	Relación carga-desplazamiento, muestra V23-2	185
Figura 5-66	Relación carga-desplazamiento, muestra V23-3	185
Figura 5-67	Relación carga-desplazamiento, muestra V23-4	186
Figura 5-68	Relación carga-desplazamiento, muestra V23-5	186
Figura 5-69	Relación carga-desplazamiento, muestra V23-6	187
Figura 5-70	Relación carga-desplazamiento, muestra V23-7	187
Figura 5-71	Relación carga-desplazamiento, muestra V23-8	188
Figura 5-72	Relación carga-desplazamiento, muestra V23-9	188
Figura 5-73	Relación carga-desplazamiento, muestra V23-10	189
Figura 5-74	Relación carga-desplazamiento, muestras tipo V23	189
Figura 5-75	Probeta V32. Esquema ensayo de corte.	196
Figura 5-76	Esfuerzo cortante vs δ/L probetas a cortante V32	198

Figura 5-77	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra V32–1. Estado final	201
Figura 5-78	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra V32–2. Estado final	202
Figura 5-79	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra V32–3. Estado final	202
Figura 5-80	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra V32–4. Estado final	203
Figura 5-81	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra V32–5. Estado final	203
Figura 5-82	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra V32–6. Estado final	204
Figura 5-83	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra V32–7. Estado final	204
Figura 5-84	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra V32–8. Estado final	205
Figura 5-85	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra V32–9. Estado final	205
Figura 5-86	Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra V32–10. Estado final	205
Figura 5-87	Relación carga-desplazamiento, muestra V32-1	206
Figura 5-88	Relación carga-desplazamiento, muestra V32-2	206
Figura 5-89	Relación carga-desplazamiento, muestra V32-3	207
Figura 5-90	Relación carga-desplazamiento, muestra V32-4	207
Figura 5-91	Relación carga-desplazamiento, muestra V32-5	208
Figura 5-92	Relación carga-desplazamiento, muestra V32-6	208
Figura 5-93	Relación carga-desplazamiento, muestra V32-7	209
Figura 5-94	Relación carga-desplazamiento, muestra V32-8	209
Figura 5-95	Relación carga-desplazamiento, muestra V32-9	210
Figura 5-96	Relación carga-desplazamiento, muestra V32-10	210
Figura 5-97	Relación carga-desplazamiento, muestras tipo V32	211
Figura 5-98	Relación carga-desplazamiento de las 10 muestras V13 (rojo), V12 (amarillo), V23 (gris) y V32 (verde)	218

CAPÍTULO VI: FLEXIÓN EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ *DENDROCALAMUS ASPER*

Figura 6-1	Tipos de probetas a Flexión: Fc11a y Fc11b	222
Figura 6-2	Colocación de la probeta Fc11a para ensayo de flexión longitudinal.	223
Figura 6-3	Montaje ensayo de flexión longitudinal.	224
Figura 6-4	Esquema del ensayo para flexión longitudinal en probetas Fc11a	224
Figura 6-5	Probeta Fc11a - 1 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	227
Figura 6-6	Probeta Fc11a - 2 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	227
Figura 6-7	Probeta Fc11a - 3 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	228
Figura 6-8	Probeta Fc11a - 4 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	228
Figura 6-9	Probeta Fc11a - 5 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	228
Figura 6-10	Probeta Fc11a - 6 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	229
Figura 6-11	Probeta Fc11a - 7 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final.	229
Figura 6-12	Probeta Fc11a - 8 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final.	229
Figura 6-13	Colocación de la probeta Fc11a - 9 para ensayo de flexión longitudinal.	230

Figura 6-14	Colocación de la probeta Fc11a - 10 para ensayo de flexión longitudinal.	230
Figura 6-15	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-2	231
Figura 6-16	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-3	232
Figura 6-17	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-4	232
Figura 6-18	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-5	233
Figura 6-19	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-6	233
Figura 6-20	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-7	234
Figura 6-21	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-8	234
Figura 6-22	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-9	235
Figura 6-23	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-10	235
Figura 6-24	Relación carga-desplazamiento de las 9 muestras Fc11a	236
Figura 6-25	Esquema del ensayo para flexión longitudinal en probetas Fc11b	241
Figura 6-26	Probeta Fc11b - 1 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	244
Figura 6-27	Probeta Fc11b - 2 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	244
Figura 6-28	Probeta Fc11b - 3 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	245
Figura 6-29	Probeta Fc11b - 4 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	245
Figura 6-30	Probeta Fc11b - 5 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	245
Figura 6-31	Probeta Fc11b - 6 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	246
Figura 6-32	Probeta Fc11b - 7 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	246
Figura 6-33	Probeta Fc11b - 8 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	246
Figura 6-34	Probeta Fc11b - 9 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	247
Figura 6-35	Probeta Fc11b - 10 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final	247
Figura 6-36	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-2	248
Figura 6-37	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-3	249
Figura 6-38	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-4	249
Figura 6-39	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-5	250
Figura 6-40	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-6	250
Figura 6-41	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-7	251
Figura 6-42	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-8	251
Figura 6-43	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-9	252
Figura 6-44	Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-10	252
Figura 6-45	Relación carga-desplazamiento de las 9 muestras Fc11b	253
Figura 6-46	Relación carga-desplazamiento de las 9 muestras Fc11a (rojo) y las 9 muestras Fc11b (azul)	258

*CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA DE LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER
COMO MATERIAL SOSTENIBLE CONSTRUCTIVO PARA PROYECTOS ARQUITECTÓNICOS EN EL
NOROCCIDENTE DE LA PROVINCIA DE PICHINCHA*

LISTADO DE TABLAS

Figura	Descripción	Pág.
CAPÍTULO IV: COMPRESIÓN EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER		
Tabla 4-1	Diferentes características geométricas utilizadas para realizar el ensayo de compresión paralela a las fibras	24
Tabla 4-2	Valores de módulo de Young de cada deformímetro y el valor medio para cada probeta	36
Tabla 4-3	Principales parámetros físico-mecánicos de las muestras C11	37
Tabla 4-4	Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie C11	50
Tabla 4-5	Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie C11	51
Tabla 4-6	Determinación del Contenido de Humedad serie C11.	53
Tabla 4-7	Resumen de análisis de resultados	55
Tabla 4-8	Diferentes características geométricas utilizadas para realizar el ensayo de compresión perpendicular a las fibras (C22)	60
Tabla 4-9	Valores de módulo de Young de cada deformímetro y el valor medio para cada probeta	71
Tabla 4-10	Principales parámetros físico-mecánicos de las muestras C22	72
Tabla 4-11	Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie C22	84
Tabla 4-12	Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie C22	85
Tabla 4-13	Determinación del Contenido de Humedad serie C22.	86
Tabla 4-14	Resumen de análisis de resultados	87
Tabla 4-15	Diferentes características geométricas utilizadas para realizar el ensayo de compresión perpendicular a las fibras (C33)	91
Tabla 4-16	Valores de módulo de Young de cada deformímetro y el valor medio para cada probeta	103
Tabla 4-17	Principales parámetros físico-mecánicos de las muestras C33	104
Tabla 4-18	Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie C33	117
Tabla 4-19	Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie C33	118
Tabla 4-20	Determinación del Contenido de Humedad serie C33.	119
Tabla 4-21	Resumen de análisis de resultados	120
Tabla 4-22	Valores medios de los principales parámetros resistentes de las 3 series de ensayo a compresión	124
CAPÍTULO V: CORTANTE EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER		
Tabla 5-1	Resistencia a cortante promedio de las muestras V13	132
Tabla 5-2	Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie V13	144
Tabla 5-3	Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie V13	145

Tabla 5-4	Determinación del Contenido de Humedad serie V13.	147
Tabla 5-5	Resumen de análisis de resultados	148
Tabla 5-6	Resistencia a cortante promedio de las muestras V12	155
Tabla 5-7	Resistencia a cortante promedio de las muestras V12 y V13	156
Tabla 5-8	Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie V12	169
Tabla 5-9	Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie V12	169
Tabla 5-10	Determinación del Contenido de Humedad serie V12.	171
Tabla 5-11	Resumen de análisis de resultados	172
Tabla 5-12	Resistencia a cortante promedio de las muestras V23	178
Tabla 5-13	Resistencia a cortante promedio de las muestras V12, V13 y V23	178
Tabla 5-14	Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie V23	191
Tabla 5-15	Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie V23	192
Tabla 5-16	Determinación del Contenido de Humedad serie V23.	193
Tabla 5-17	Resumen de análisis de resultados	195
Tabla 5-18	Resistencia a cortante promedio de las muestras V32	200
Tabla 5-19	Resistencia a cortante promedio de las muestras V12, V13, V23 y V32	200
Tabla 5-20	Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie V32	212
Tabla 5-21	Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie V32	213
Tabla 5-22	Determinación del Contenido de Humedad serie V32.	214
Tabla 5-23	Resumen de análisis de resultados	216
Tabla 5-24	Valores medios de los principales parámetros resistentes de las 4 series de ensayo a cortante	219

CAPÍTULO VI: FLEXIÓN EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER

Tabla 6-1	Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie Fc11a	237
Tabla 6-2	Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie Fc11a	238
Tabla 6-3	Determinación del contenido de humedad serie Fc11a	239
Tabla 6-4	Tabla comparativa entre las probetas de la serie Fc11a	240
Tabla 6-5	Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie Fc11b	254
Tabla 6-6	Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie Fc11b	255
Tabla 6-7	Determinación del contenido de humedad de la serie Fc11b	256
Tabla 6-8	Tabla comparativa entre las probetas de la serie Fc11a	257
Tabla 6-9	Valores medios de los principales parámetros resistentes de las 2 series de ensayo a flexión	259

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación	Detalle	Página
CAPÍTULO IV: COMPRESIÓN EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER		
Ecuación 4-1	Esfuerzo de Compresión C11	26
Ecuación 4-2	Resistencia a Compresión Serie C11	28
Ecuación 4-3	Esfuerzo de Compresión C22	61
Ecuación 4-4	Resistencia a Compresión Serie C22	63
Ecuación 4-5	Esfuerzo de Compresión C33	92
Ecuación 4-6	Resistencia a Compresión Serie C33	95
CAPÍTULO V: CORTANTE EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER		
Ecuación 5-1	Esfuerzo Cortante V13	130
Ecuación 5-2	Resistencia a Cortante V13	132
Ecuación 5-3	Esfuerzo Cortante V12	152
Ecuación 5-4	Resistencia a Cortante V12	154
Ecuación 5-5	Esfuerzo Cortante V23	175
Ecuación 5-6	Resistencia a Cortante V23	177
Ecuación 5-7	Esfuerzo Cortante V32	197
Ecuación 5-8	Resistencia a Cortante V32	199
CAPÍTULO VI: FLEXIÓN EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER		
Ecuación 6-1	Ley de Navier Serie Fc11a	226
Ecuación 6-2	Expresión Simplificada Ley de Navier Serie Fc11a	226
Ecuación 6-3	Esfuerzo de flexión Serie Fc11a	226
Ecuación 6-4	Inercia Serie Fc11a	226
Ecuación 6-5	Momento Máximo Serie Fc11a	227
Ecuación 6-6	Tensión Máxima Serie Fc11a	227
Ecuación 6-7	Ley de Navier Serie Fc11b	243
Ecuación 6-8	Expresión Simplificada Ley de Navier Serie Fc11b	243
Ecuación 6-9	Esfuerzo de flexión Serie Fc11b	243
Ecuación 6-10	Inercia Serie Fc11b	243
Ecuación 6-11	Momento Máximo Serie Fc11b	244
Ecuación 6-12	Tensión Máxima Serie Fc11b	244

*CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA DE LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER
COMO MATERIAL SOSTENIBLE CONSTRUCTIVO PARA PROYECTOS ARQUITECTÓNICOS EN EL
NOROCCIDENTE DE LA PROVINCIA DE PICHINCHA*

Resumen

Los procesos de construcción de proyectos arquitectónicos son los responsables de generar un significativo nivel de impacto ambiental. Desde esta perspectiva se vuelve imperioso realizar investigaciones que brinden alternativas de uso de materiales de construcción que ayuden a este propósito.

El bambú es un material natural que gracias a sus características, a lo largo de todo su ciclo productivo, brinda grandes beneficios medio ambientales, desde bosques con mayor capacidad de absorción del CO₂, periodos muy rápidos de crecimiento en los que se encuentra con los niveles de resistencia adecuados para su aprovechamiento como material de construcción.

La posibilidad de uso de laminados de bambú en el sector de la construcción, con indicadores de sostenibilidad muy favorecedores, podría constituirse en una alternativa viable que brinde ventajas tales como la modulación para la sistematización de los procesos constructivos optimizando tiempos y costos.

Esta investigación tiene como objetivo principal realizar la caracterización físico mecánica de los Laminados de Bambú fabricados con la especie *Dendrocalamus Asper* (LBDA), que se están produciendo en el Noroccidente de la Provincia de Pichincha en el Ecuador.

Los resultados de esta investigación buscan dar respuesta al comportamiento estructural de este material frente a los esfuerzos de compresión, cortante y flexión, determinando así la posibilidad de su uso en proyectos arquitectónicos que apliquen criterios de construcción sostenible.

Palabras Clave: Bambú *dendrocalamus asper* laminado, valores de resistencia, materiales constructivos sostenibles.

Abstract

The processes of construction of architectural projects are responsible for generating a significant level of environmental impact. From this perspective, it is imperative to carry out research that provides alternatives for the use of construction materials that contribute to reduce such impact.

Bamboo is a natural material that thanks to its characteristics - throughout its productive cycle - provides great environmental benefits, from forests with greater ability to absorb CO₂ until very fast periods of growth in which it has levels of resistance suitable for use as building material.

The possibility of using bamboo laminates in the construction sector, with very favorable sustainability indicators, could constitute a viable alternative that offers advantages such as the use of modules that in turn enable the systematization of the construction processes, thus optimizing time and costs.

The main objective of this research is to perform the mechanical physical characterization of Bamboo Laminates made with the species *dendrocalamus asper* (LBDA), which are being produced in the Northwest of the Province of Pichincha in Ecuador.

The results of this research try to respond to the structural behavior of this material in front of the compression, shear and bending strengths, thus determining the possibility of its use in architectural projects that apply sustainable construction criteria.

Keywords: Bamboo *dendrocalamus asper* laminates, resistance values, sustainable building materials.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Título

“Caracterización físico mecánica de los laminados de bambú *dendrocalamus asper* como material sostenible constructivo para proyectos arquitectónicos en el Noroccidente de la Provincia de Pichincha Ecuador”

1.2 Justificación del tema

El bambú es una gramínea que crece en abundancia alrededor del mundo en todos los continentes excepto Europa y los polos, se estima que existen más de 1439 especies y en América se desarrolla desde México hasta la Argentina con aproximadamente 429 especies, según la International Network for Bambú and Ratán.

El bambú es un recurso natural, ecológico, renovable y sostenible, que desarrolla más oxígeno y absorbe un 30% más dióxido de carbono CO₂ que un bosque de madera dura, lo que supone un beneficio ambiental puesto que combate el efecto invernadero.

El bambú puede propagarse a través de semilla pero tiene la capacidad de auto multiplicarse vegetativamente, brotando naturalmente en periodos cortos.

Otra ventaja notable del bambú es el rápido crecimiento, que para efectos de uso como material constructivo está listo, es decir ha alcanzado los niveles de

resistencia adecuados, entre los cuatro y cinco años de edad. Adicionalmente a ello y a diferencia de un árbol que muere cuando es cortado, el bambú puede seguir renaciendo de la misma cepa dependiendo de la especie por más de cien años.

Según Acevedo, P. J. (2014) en su artículo la bio-construcción como una alternativa en la búsqueda de la sostenibilidad, sostiene que *“Durante la búsqueda de materiales sustentables y ecológicamente amigables se ha podido identificar el bambú como una opción muy promisorio”*.

En Ecuador en el noroccidente de la provincia de Pichincha en la localidad de Pedro Vicente Maldonado, el Gobierno Autónomo descentralizado de la Provincia de Pichincha (GAD P Pichincha), como se lo explica ampliamente en el marco teórico ha instalado una fábrica para elaborar tableros *LBDA* (laminados bambú de la especie *dendrocalamus asper*), con el fin de promover y fortalecer el proyecto de la cadena del valor del bambú, corroborando lo que García Pazmiño, C. G. (2013) sostiene, referente a que las especies de bambú pueden aumentar los beneficios económicos, sociales y medioambientales de las economías rurales de América Latina.

A diferencia del uso en la construcción de edificaciones que se le da al bambú en su estado morfológico natural, es decir, rollizo, (ver figura 1.2.1) el contar con elementos constructivos que han sido sometidos a un proceso de elaboración transformando al bambú en laminados de bambú (ver figura 1.2.2) ofrece la

posibilidad de medidas estandarizadas, viabilizando diseños con sistemas modulares con las ventajas que se detallan:

- Precisión en los cálculos estructurales que permita prever la respuesta de la edificación frente a un evento sísmico.
- Optimización del uso del material, garantizando calidad.
- Comercialización de los laminados de bambú a gran escala.
- Reducción de plazos en la ejecución de las obras, con el ahorro económico que esto supone.
- Posibilidad de diseños modernos y flexibles.

Figura 1-1. Bambú rollizo *dendrocalamus asper* (morfología natural)



Fuente: BambúExport Bambú Ecuatoriano de Exportación (2016)

Figura 1-2. Laminados de bambú *dendrocalamus asper* (LBDA)



Fuente: Autor

Siendo así, la producción de laminados de bambú constituye una opción que merece una investigación profunda sobre sus características físico mecánicas que permitan establecer las posibilidades de uso en la construcción de proyectos arquitectónicos.

Los laminados de bambú *dendrocalamus asper* LBDA producidos en la CENBA (Central de Bambú Andoas) nunca han sido sometidos a los estudios pertinentes de la caracterización físico mecánica por lo que el actual empleo que se le da se limita a la fabricación de muebles y artesanías, sub utilizando el uso de este material.

El resultado de esta investigación podrá conducir a futuras aplicaciones de los laminados de bambú *dendrocalamus asper* LBDA para una diversa gama de usos constructivos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Realizar la caracterización físico mecánica de los laminados de bambú *dendrocalamus asper* producidos en el noroccidente de Pichincha, mediante ensayos experimentales de modelos físicos.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la resistencia a compresión paralela a la fibra en probetas; compresión perpendicular a la fibra perpendicular al plano de los

laminados y compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de los laminados de bambú *dendrocalamus asper LBDA*.

- Determinar el esfuerzo cortante máximo paralelo y perpendicular a la fibra de los laminados de bambú *dendrocalamus asper LBDA*.
- Determinar el esfuerzo cortante máximo y el módulo elástico de cortante, el esfuerzo de rotura y el módulo elástico longitudinal en ensayos de flexión de los laminados de bambú *dendrocalamus asper LBDA*.
- Determinar la densidad, y contenido de humedad de los laminados de bambú *dendrocalamus asper LBDA*.

1.4 HIPÓTESIS

Las propiedades físico mecánicas de los laminados de bambú *dendrocalamus asper LBDA* fabricados en la CENBA (Central de bambú Andoas) permiten una confiabilidad estructural para diferentes usos constructivos del material en proyectos arquitectónicos.

1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este trabajo consta de seis capítulos, el primero de los cuales es la introducción donde se encuentran la justificación, los objetivos y la hipótesis.

En el capítulo II se trata materiales y métodos donde se describe detalladamente el material objeto de esta investigación y los procedimientos generales con los cuales se ha afrontado esta investigación.

El marco teórico será revisado en el capítulo III y abarca una visión del bambú *dendrocalamus asper* como material sostenible, después se enfoca al *dendrocalamus asper* en el contexto específico del noroccidente de la provincia de Pichincha de Ecuador, para finalmente concretar el marco teórico en el sitio de producción de los laminados, la Central del Bambú Andoas (CENBA).

En el capítulo IV se describirán los Ensayos, que comprenden tres grandes grupos: los de compresión, los de esfuerzo cortante y los de flexión. Cada ensayo a su vez tiene su propia descripción, cálculos y resultados, observaciones durante los ensayos y análisis de los resultados.

El capítulo V presenta una compilación de los resultados de resistencia.

Finalmente en el capítulo VI encontramos las conclusiones referentes al trabajo completo y algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la presente investigación en forma macro existen 3 grandes fases: La primera fase consiste en un levantamiento bibliográfico, que permite establecer el estado del arte referente al objeto de investigación, en el caso específico de este los laminados de *bambú dendrocalamus asper LBDA*, producidos por la CENBA (Central del Bambú Andoas).

En la segunda fase se realizaron ensayos de laboratorio, que permitieron establecer las propiedades físico mecánicas de los laminados de bambú *dendrocalamus asper LBDA*, fabricados en la CENBA (Central del Bambú Andoas). En los capítulos IV, V y VI, correspondientes a los ensayos de compresión, cortantes y flexión se encuentran detallados las respectivas descripciones de cada uno de los ensayos. En todos los casos el método utilizado se rige por la Norma ASTM 143 D (Ver anexo 1) que es la que determina como realizar las pruebas en pequeñas muestras de maderas para poder evaluar las diferentes propiedades mecánicas y físicas.

Se utiliza la Norma ASTM 143 D particular para maderas, ya que no existe una norma específica para laminados de bambú.

Finalmente en la tercera fase se realiza una sistematización de la información que establece conclusiones.

El material utilizado para la adherencia de las láminas de bambú es el pegante PVAc 3339, la información detallada del producto puede revisarse en el Anexo 2

CAPITULO III. MARCO TEÓRICO

3.1 El bambú *dendrocalamus asper* como material sostenible en el Noroccidente de la provincia de Pichincha Ecuador

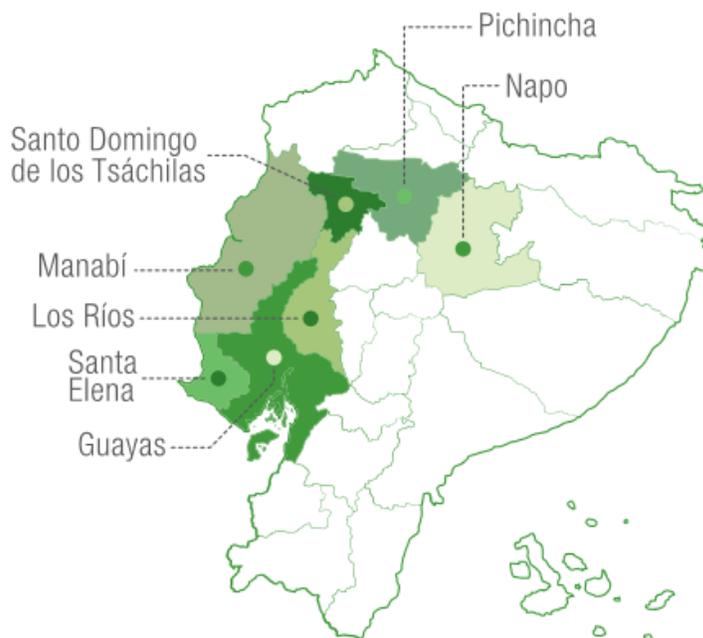
La presente investigación tiene por objeto teórico los materiales sostenibles de construcción los mismos que tienen una relevante importancia en el contexto global actual. Dada la justificada incertidumbre frente a los cambios climáticos y la emergente necesidad de la humanidad de tomar acciones respecto a esta problemática, es de vital importancia que desde nuestros respectivos campos del conocimiento busquemos soluciones y propuestas que contribuyan a mejorar esta situación. Según Alarcón, 2005 citado en Rodríguez y Fernández 2010 el sector de la construcción utiliza el 50% de los recursos que el hombre consume de la naturaleza por lo que tiene una influencia fundamental en esta problemática, dicha afirmación a la vez supone que acertadas estrategias y decisiones tomadas desde este sector se constituyan en una considerable contribución medio ambiental. La “huella ecológica” que suma cada edificación es radicalmente diferente dependiendo de las decisiones tomadas en cada aspecto del ciclo íntegro del proceso edificatorio (González-Vallejo, P., Marrero, M., Solís-Guzmán, J. (2015); dentro de este ciclo la elección de los materiales constructivos con los cuales edificamos los proyectos arquitectónicos implica una relevante decisión.

Según el Análisis Sectorial “Bambú 2016” realizado por el Instituto de promoción de exportaciones e inversiones “Pro Ecuador” respaldado por el Ministerio de Comercio Exterior, en el Ecuador se encuentran más de 15.000 ha cubiertas de

bambú, de las cuales el 60% serían manchas naturales donde prevalece la especie *Guadua agustifolia* Kont y el 40% restante pertenece a plantaciones de *Guadua Agustifolia*, *Dendrocalamus Asper* y en menor medida *Phyllostachys aurea* y *Bambusa vulgaris*.

Según Alfaro, M. (2010) citado en Jaramillo A., Librelotto L., Larco M. (2016) en el Ecuador en el noroccidente de la provincia de Pichincha existen alrededor de 1200 ha de plantaciones de bambú de la especie *dendrocalamus asper*.

Figura 3-1. Mayor presencia de bambú en las provincias de Ecuador



Fuente: Instituto de promoción de exportaciones e inversiones “Pro Ecuador” (2016)

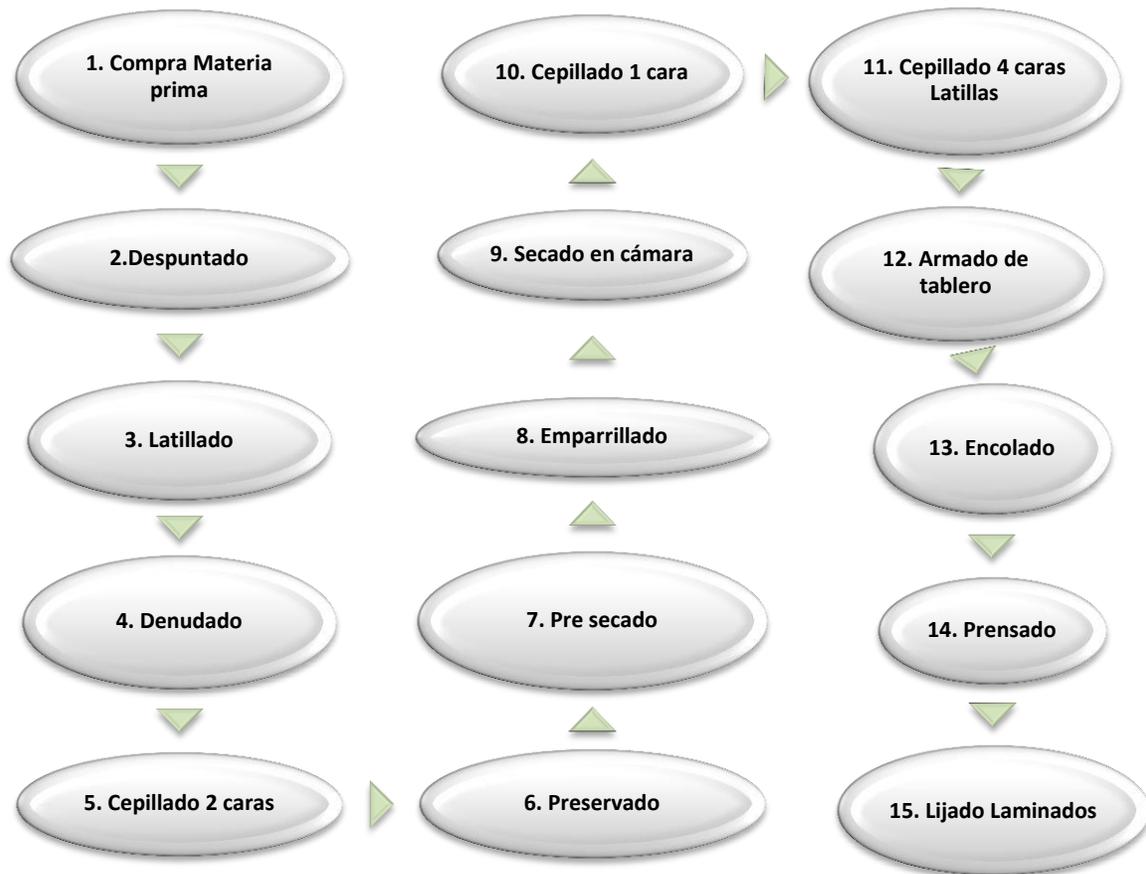
3.2 La CENBA y los LBDA (laminados de bambú *dendrocalamus asper*)

El Gobierno Autónomo Descentralizado de Pichincha instaló la CENBA (Central del bambú Andoas) ubicada en Pedro Vicente Maldonado, conscientes de las nefastas consecuencias de la deforestación de especies madereras en la zona, decide transformar una antigua fábrica maderera en una que elabora tableros de bambú.

Esta investigación aportará a las iniciativas de los gobiernos autónomos descentralizados locales que están impulsando en la zona la producción del bambú, puesto que hasta la actualidad se ha venido haciendo un uso indiscriminado de las maderas extraídas de estos bosques subtropicales que necesitan de períodos de muchos años (ente 20 y 40 años dependiendo de cada especie) para su regeneración, a diferencia del bambú del cual se puede obtener un rendimiento de hasta 20 veces más que el de los árboles, puesto que en tan solo 4 años el bambú está en listo para su aprovechamiento, convirtiendo a este recurso en sostenible y ecológicamente amigable, el GADPP (Gobierno autónomo descentralizado de la Provincia de Pichincha).

Para la transformación del Bambú *dendrocalamus asper* de su morfología natural “rollizo” a los LBDA (laminados de bambú *dendrocalamus asper*) es necesario un proceso de industrialización (este proceso está tomado de la información proporcionada por la CENBA Ing. Jorge Macías R. y las visitas insitu) que se detalla en la figura 3-2.

Figura 3-2. Proceso para la industrialización del bambú rollizo para convertirlo en LBDA (laminados de bambú *dendrocalamus asper*)



Fuente: Macías, J (2017) Elaboración: Autor

Compra de Materia Prima: Se selecciona bambúes de la especie *dendrocalamus asper* para la compra revisando que tengan 2,60 m. de longitud para que después del despuntado la medida de longitud sea de 2,50 m. (Ver figura 3-3)

Figura 3-3. Compra de materia prima. Selección de bambúes.



Fuente: Macías, J (2017)

Despuntado: Se despunta ambos lados de cada bambú y se uniformiza su medida de longitud a 2,50 m.

Figura 3-4 Despuntado



Fuente: Macías, J (2017)

Latillado: Se utiliza la máquina latilladora de corte longitudinal con la finalidad de separar al bambú como se indica en la figura 3-5.

Figura 3-5. Latillado del bambú



Fuente: Macías, J (2017)

Denudado: Este procedimiento tiene el propósito de retirar tanto los nudos internos (tabiques) como los externos en las latillas, ver la siguiente figura.

Figura 3-6 Denudado de las latillas de bambú.



Fuente: Macías, J (2017)

Cepillado de 2 caras: En este proceso se utiliza la máquina cepilladora, en donde se ingresa cada latilla horizontalmente de esta forma la máquina trabaja a lo largo

de toda la longitud de la latilla cepillando tanto la cara interna (nudos y parénquima) como la cara externa retirando la epidermis.

Figura 3-7 Cepillado de 2 caras.



Fuente: Macías, J (2017)

Preservado: Para preservar las latillas se las sumerge por 24 horas en una concentración al 5% de bórax y ácido bórico, esto es en 100 litros de agua 5 kilos de preservante, ver figura 3-8.

Figura 3-8. Preservado. Se sumergen las latillas en agua con preservantes.



Fuente: Macías, J (2017)

Pre Secado: Se dejan las latillas por un periodo de 5 a 15 días a temperatura ambiente, figura 3-9.

Figura 3-9 Pre Secado.



Fuente: Macías, J (2017)

Emparrillado: Se colocan las latillas de acuerdo a la figura 3.3.9, sobre unos soportes de rodamiento que facilitan el ingreso de las latillas posteriormente a la cámara de secado.

Figura 3-10 Emparrillado.



Fuente: Macías, J (2017)

Secado en Cámara: La cámara de secado funciona con un caldero a diesel de 30 BTU y tiene una capacidad para secar de 10.000 a 12.000 latillas, las cuales ingresan en los coches de transporte. Dependiendo del porcentaje de humedad con el entran las latillas, deben permanecer de 8 a 12 días, para conseguir finalmente que el contenido de humedad sea del 10%.

Para ello la temperatura en la cámara oscila entre 60° y 65°, el aire se mueve gracias a unos motores eléctricos con hélices de 1 m. de diámetro que permiten la circulación del aire dentro de la cámara. Adicionalmente existe otro factor que hay que controlar en este proceso y es mantener dentro de la cámara un adecuado nivel de humedad, puesto que si el aire es muy seco puede causar grietas en las latillas, es por esto que la cámara cuenta con un sistema de flautas que de ser necesario inyectan agua. (Ver figura 3-11.)

Figura 3-11 Secado en Cámara.



Fuente: Macías, J (2017)

Secado de una Cara: Una vez que las latillas han salido de cámara de secado, se procede a cepillar de ambos lados nuevamente para eliminar cualquier imperfección, ver figura 3-12.

Figura 3-12. Cepillado de una cara.



Fuente: Macías, J (2017)

Cepillado 4 caras latillas: Es un cepillado final que cubre además de las dos caras, los dos ángulos laterales de las latillas. Ver figura 3-13

Figura 3-13. Cepillado 4 caras latillas.



Fuente: Macías, J (2017)

Armado de tablero y Encolado: Es un proceso manual que consiste en agrupar organizadamente las latillas, ya sea en forma horizontal o vertical, dependiendo el espesor del tablero y luego aplicar el pegante (ver anexo 2) con un rodillo de felpa.

Figura 3-14. Armado de tablero y encolado.



Fuente: Macías, J (2017)

Prensado: Este proceso se lo realiza con una máquina prensadora que permite trabajar dos tableros de 2,40 m. de largo por 60 cm. de ancho. Realiza una presión tanto vertical como horizontal a una temperatura de 60° fijando el pegante, el tiempo aproximado de este proceso es de 18 minutos. Ver figura 3-15.

Figura 3-15 Prensado.



Fuente: Macías, J (2017)

Lijado Laminados: Finalmente los laminados son lijados de ambas caras para tener un material acabado. Ver figura 3-16.

Figura 3-16. Lijado Laminados.



Fuente: Macías, J (2017)

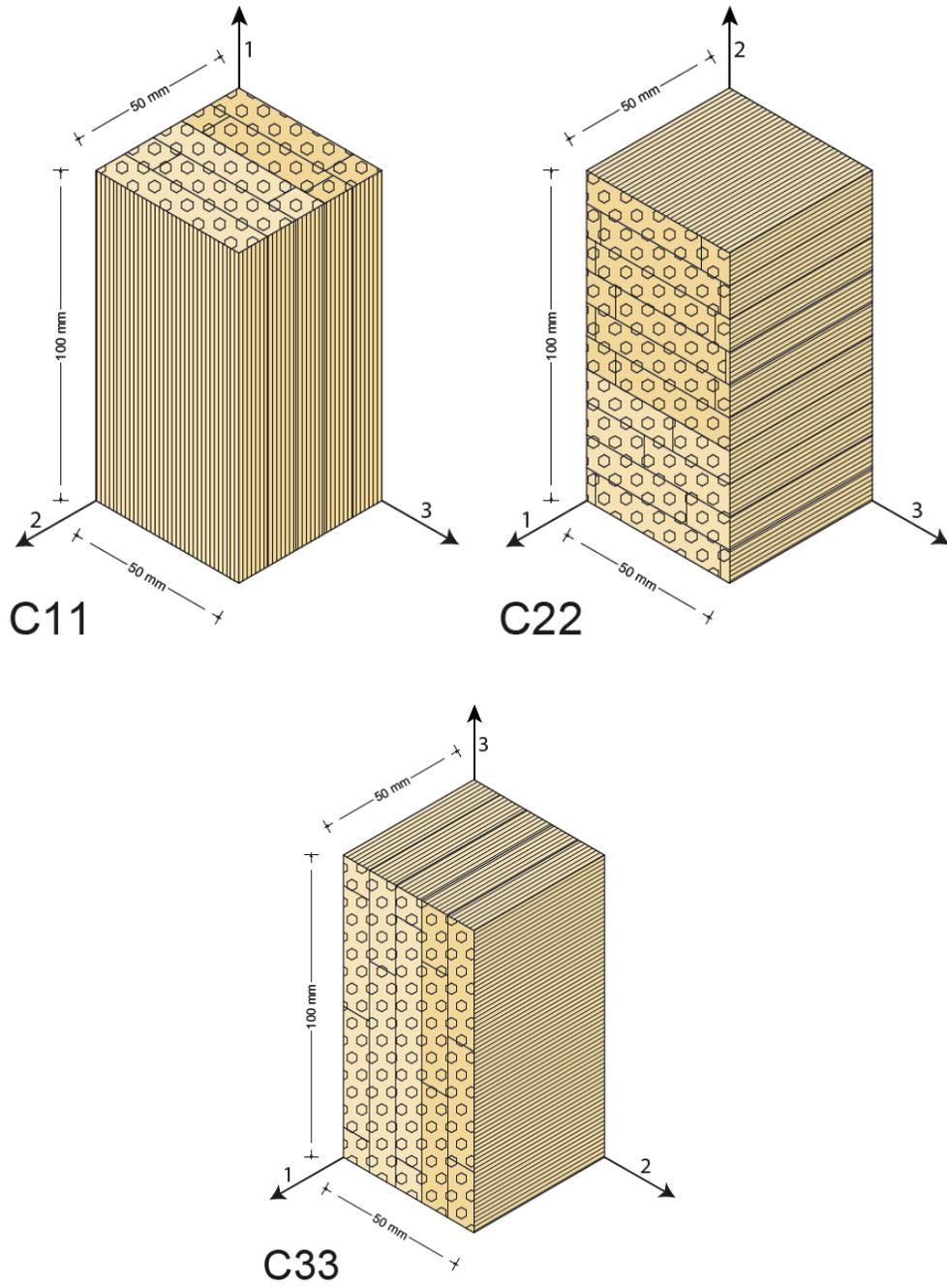
CAPITULO IV

COMPRESIÓN EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER (LBDA)

Considerando que el material en estudio laminado de bambú *dendrocalamus asper* (LBDA) es anisótropo, es decir que sus propiedades mecánicas dependen de la orientación según la cual se hace la medición (Real Academia de la Lengua Española, 2014), es fundamental la realización de los ensayos de compresión en tres direcciones diferentes para analizar su comportamiento, esto es: Compresión Paralela a la Fibra (Probetas Serie C11), Compresión Perpendicular a la Fibra Perpendicular al Plano de los Tableros (Probetas Serie C22) y Compresión Perpendicular a la Fibra Paralelo al Plano de los Tableros (Probetas Serie C33) conforme a la figura 4.1.

Los criterios de nomenclatura para los tipos de series de probetas son los mundialmente aceptados, en los que se dispone la letra del tipo de esfuerzo que se va a aplicar (C de compresión), acompañado de dos números iguales, éstos son el número del eje al cual la compresión es paralela (C11 compresión paralela al eje 1, C22 compresión paralela al eje 2 y C33 compresión paralela al eje 3). Por otro lado, la asignación de los ejes va en función de la disposición de las fibras y de las latillas, ya que el eje 1 coincide con la dirección de las fibras, el eje 2 coincide con la menor dirección de las tablillas y el eje 3 con la dirección perpendicular a las otras dos.

Figura 4-1 Probetas para ensayos a compresión Series C11, C22, C33



Fuente: Autor

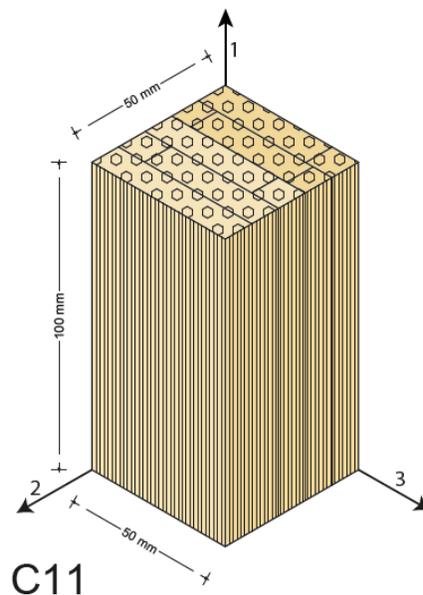
4.1 COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA EN PROBETAS SERIE C11

4.1 Descripción de los ensayos

El ensayo siguió los lineamientos de la norma ASTM 143 D (Ver anexo 3, Certificado de Calibración). Para realizar el ensayo de compresión paralela a la fibra en probetas Serie C11 se marcó cada una de las 10 probetas para identificar las muestras, y luego numeradas del 1 al 10. (Ver figura 4-1)

Se pesó cada probeta para determinar la masa, también se realizaron las mediciones de largo, alto y ancho de cada probeta, con el fin de determinar el área resistente a compresión y su volumen. (Ver Tabla 4-1)

Figura 4-2 Probeta para ensayo de Compresión Paralela a la Fibra Serie C11



Fuente: Autor

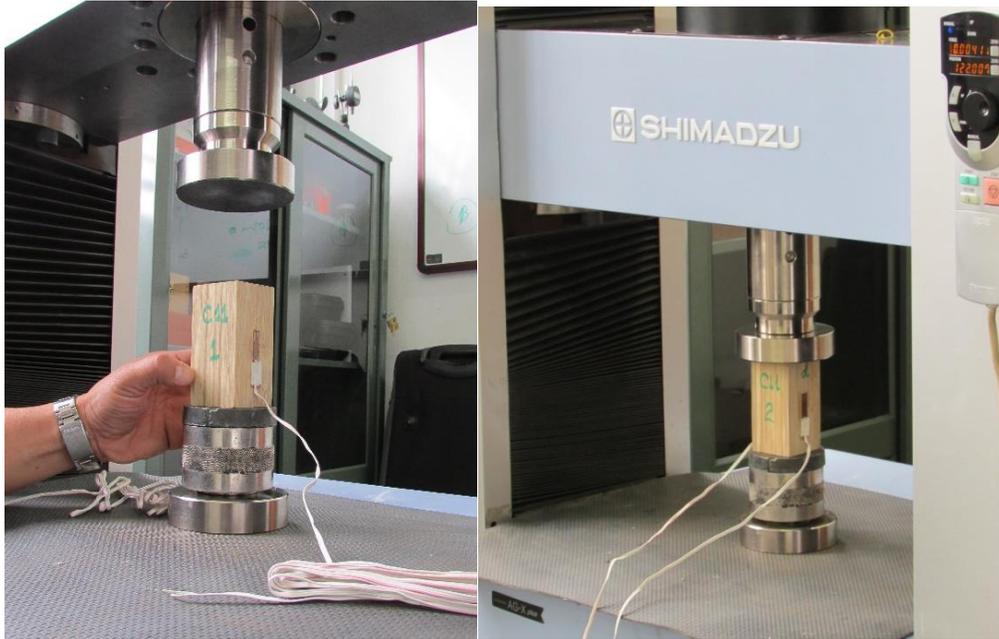
Tabla 4-1. Diferentes características geométricas utilizadas para realizar el ensayo de compresión paralela a las fibras

Muestras	Masa (g)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Volumen (mm ³)	Área Resistente (mm ²)
C11-1	201,03	49,79	100,57	49,21	246413,18	2450,17
C11-2	186,20	49,83	100,33	50,55	252721,89	2518,91
C11-3	177,33	49,86	100,33	49,85	249372,32	2485,52
C11-4	186,20	49,83	100,33	50,55	252721,89	2518,91
C11-5	186,06	50,00	99,00	49,78	246411,00	2489,00
C11-6	189,75	50,28	99,00	49,78	247790,90	2502,94
C11-7	181,38	48,98	99,87	49,82	243701,14	2440,18
C11-8	200,09	49,63	100,31	49,70	247425,75	2466,61
C11-9	194,34	49,20	100,24	50,43	248711,08	2481,16
C11-10	191,69	48,68	99,76	49,53	240533,37	2411,12

Fuente: Autor

Se realizaron 10 ensayos de compresión paralela a la fibra, en una máquina universal de ensayos AG-X plus marca Shimadzu (Anexo 3 Certificado de Calibración) donde las probetas fueron ubicadas en forma directa sobre los platos de carga, a una velocidad de 0.01 mm/s (Ver figura 4.2)

Figura 4-3 Ensayo a compresión paralela a la fibra colocación de la muestra en la máquina universal



Fuente: Autor

Se colocaron deformímetros en las caras opuestas (ver figura 4.3) en todas las probetas de la serie C11 con el fin de definir el módulo de elasticidad.

Figura 4-4 Colocación de deformímetros para ensayo de compresión paralela a la fibra.



Fuente: Autor

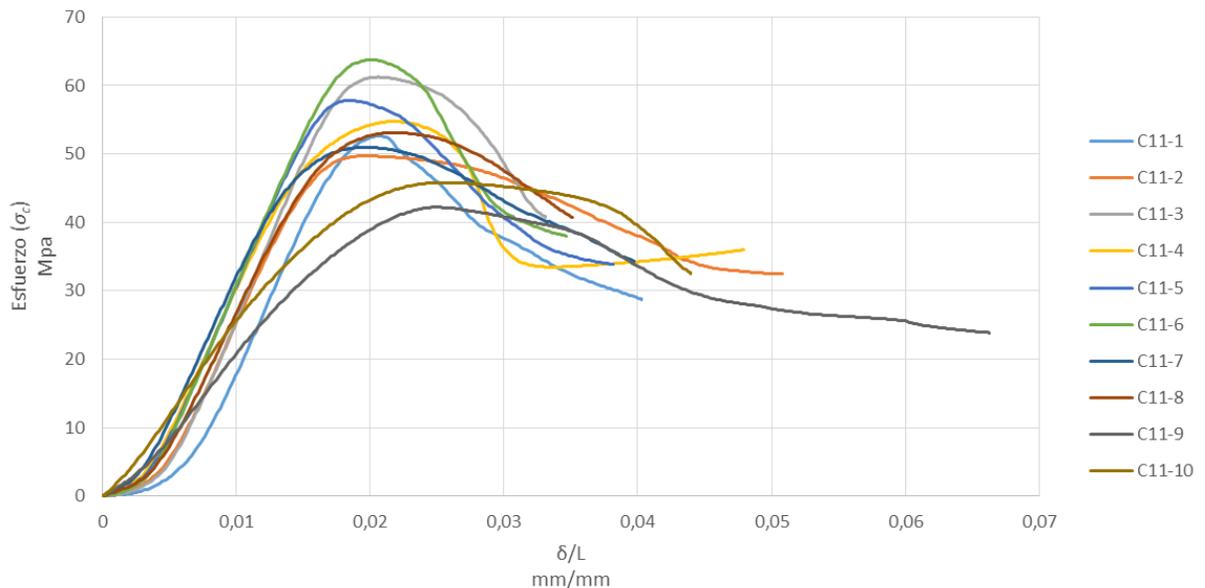
4.2 Cálculo y Resultados

Para obtener el esfuerzo de compresión que sufre cada probeta se hace uso de la Ecuación 4-1, la cual nos relaciona la tensión resultante (σ_c) con el cociente de la fuerza aplicada (P) y el área de referencia (A), que en este caso concreto y al tratarse de un ensayo de compresión, es el área de la muestra perpendicular a la fuerza aplicada.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

Para poder comparar el comportamiento de las 10 muestras tipo C11, se compara la relación de la tensión normal al área de referencia aplicada (σ_c) con la deformación longitudinal unitaria (δ/L). Se decide trabajar con la deformación longitudinal unitaria y no con la deformación registrada, porque las dimensiones de las 10 muestras no coinciden, y este parámetro nos indica en forma de proporción o porcentaje la deformación que se va registrando (δ) respecto a la dimensión inicial (L), lo que nos permite poder comparar el comportamiento de las 10 muestras. En la Figura 4-4, se representa dicha relación, situando en el eje vertical la tensión normal al área de referencia aplicada (σ_c) y en el eje horizontal la deformación longitudinal unitaria (δ/L), para diferentes niveles de carga. En este caso, la deformada registrada (δ) coincide con el desplazamiento del plato de carga.

Figura 4-5. Relación entre el esfuerzo o tensión normal al área de referencia (σ_c) y la deformación longitudinal unitaria (δ/L).



Fuente: Autor

Si se analiza el gráfico, queda patente un comportamiento similar de las 10 muestras, en todas ellas podemos observar un tramo inicial cuyo comportamiento se puede asumir a lineal, ya que la relación entre tensión y deformación es prácticamente lineal. Posteriormente se da paso a una fase en la que la pendiente de la función varía disminuyendo paulatinamente hasta alcanzar el valor máximo de tensión ($\sigma_{c,max}$), esto significa que en esta fase el material tiene un comportamiento plástico, ya que la relación tensión-deformación es no lineal. Después de alcanzar dicho valor, se pasa a una fase en la que la deformación sigue aumentando a la vez que se disminuye la tensión, esta disminución tiene dos fases diferenciadas, en la primera la tensión disminuye de forma rápida y en la segunda de una forma más paulatina. Durante la carga y antes de alcanzar el

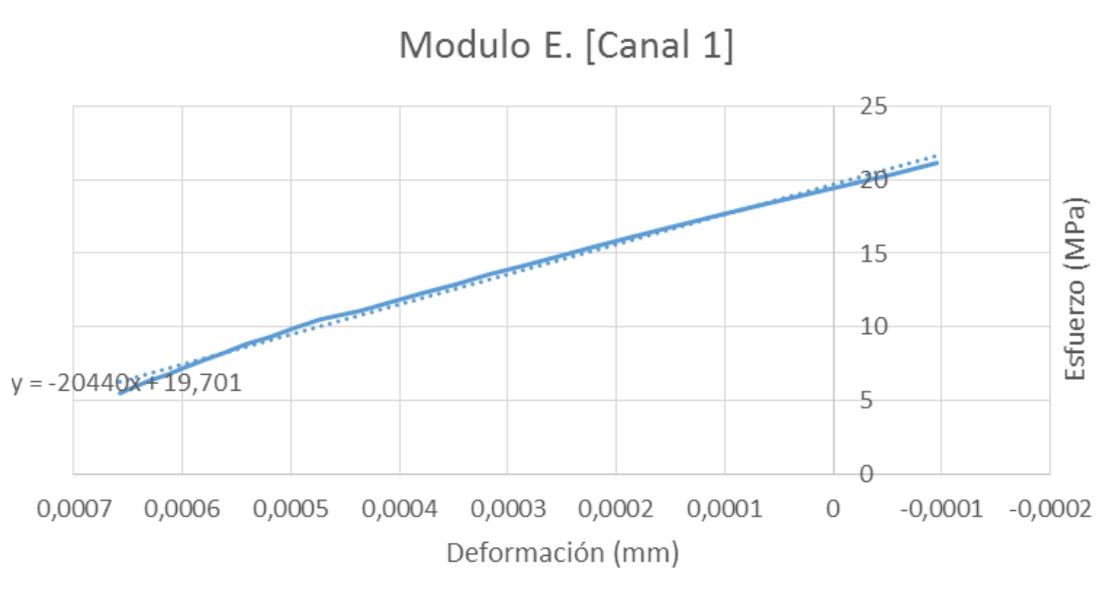
esfuerzo máximo, la variabilidad de comportamientos no es destacable, sólo la muestra C11-1 tiene un comportamiento ligeramente diferente, que se comentará en el apartado 4.1.6. Análisis de resultados serie C11. En la fase de descarga aparece una mayor dispersión de comportamientos que se analizará en el apartado 4.1.6. Análisis de resultados serie C11.

La resistencia a compresión de cada probeta se obtuvo mediante la Ecuación 4-2, donde P_{max} es la máxima fuerza que se aplica y A es el área de la sección transversal de cada probeta. Dicho esfuerzo se obtuvo en el límite de proporcionalidad σ_{cLP} , como el 75% de la resistencia a compresión.

$$\sigma_{c,max} = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

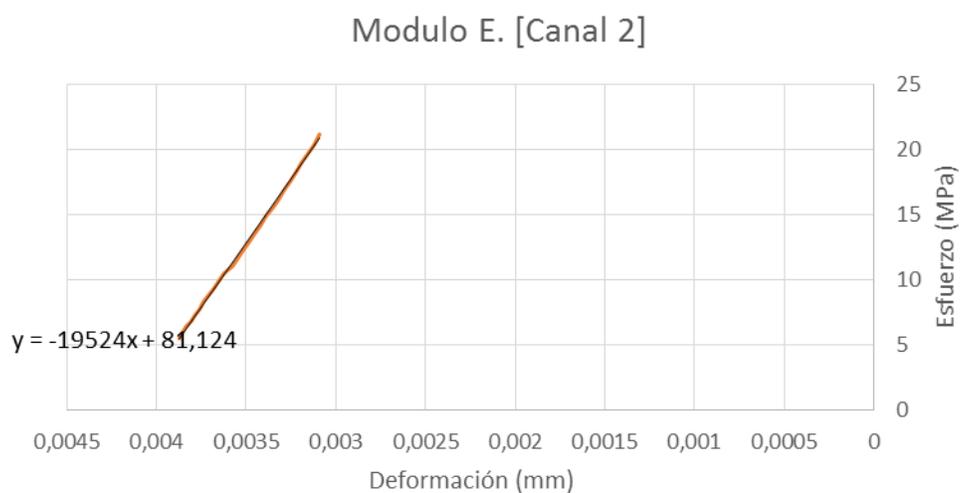
Respecto al módulo de Young o módulo de deformación longitudinal (E), se han registrado dos valores, E_1 y E_2 , cada uno según los datos obtenidos de cada deformímetro situado en los dos laterales de las 10 muestras, asumiendo como el módulo de Young de la probeta (E) el valor medio de los dos valores. Los valores E_1 y E_2 , se obtuvieron como la pendiente de la regresión lineal de los valores de la curva esfuerzo-deformación comprendidos entre el 10% y el 40% del esfuerzo máximo (En las Figuras 4-5. y 4-6 se ejemplifica lo dicho para la probeta C11-1).

Figura 4-6. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, datos registrados con el deformímetro 1, muestra C11-1



Fuente: Autor

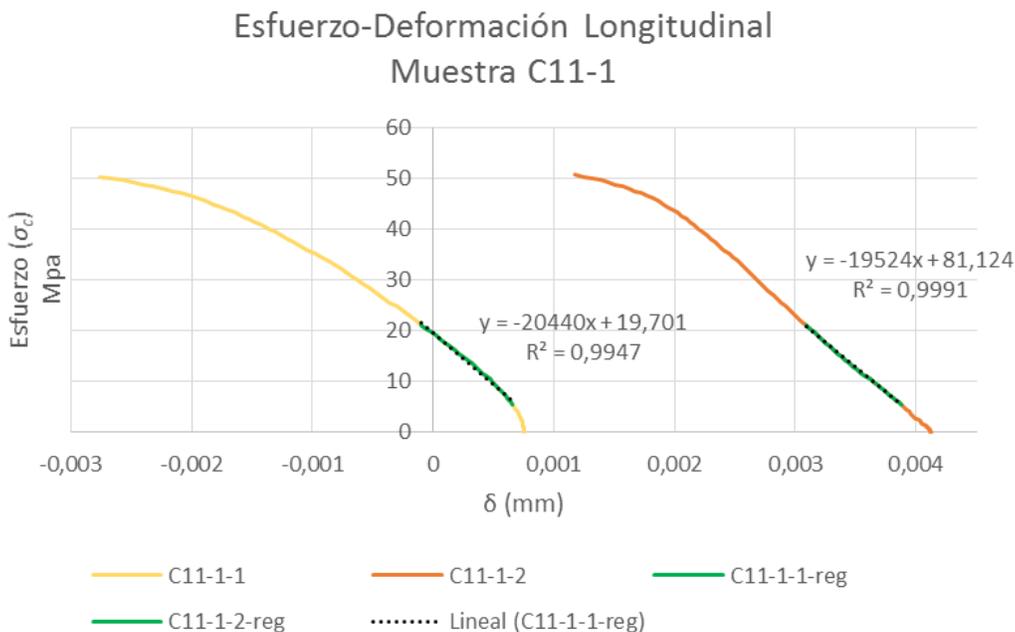
Figura 4-7. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, datos registrados con el deformímetro 2, muestra C11-1



Fuente: Autor

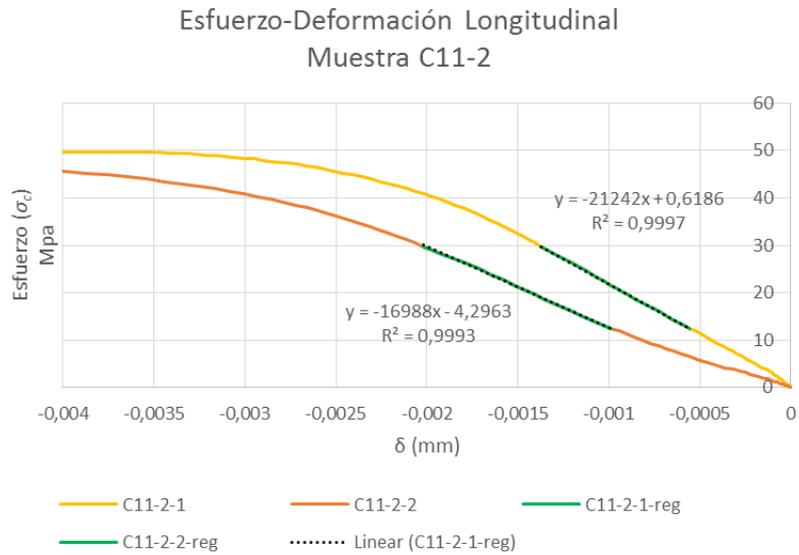
En ambas imágenes podemos ver la gráfica que relaciona las tensiones ejercidas (σ_c) con las correspondientes deformaciones longitudinales (δ), en ambas graficas sólo se grafican los valores que corresponden al conjunto de tensiones que están comprendidas entre el 10% y el 40% de la tensión máxima ($\sigma_{c,max}$) y sus correspondientes deformaciones. También se puede ver la gráfica y expresión matemática de la recta resultante de la regresión lineal de la nube de puntos registrados.

Figura 4-8. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-1



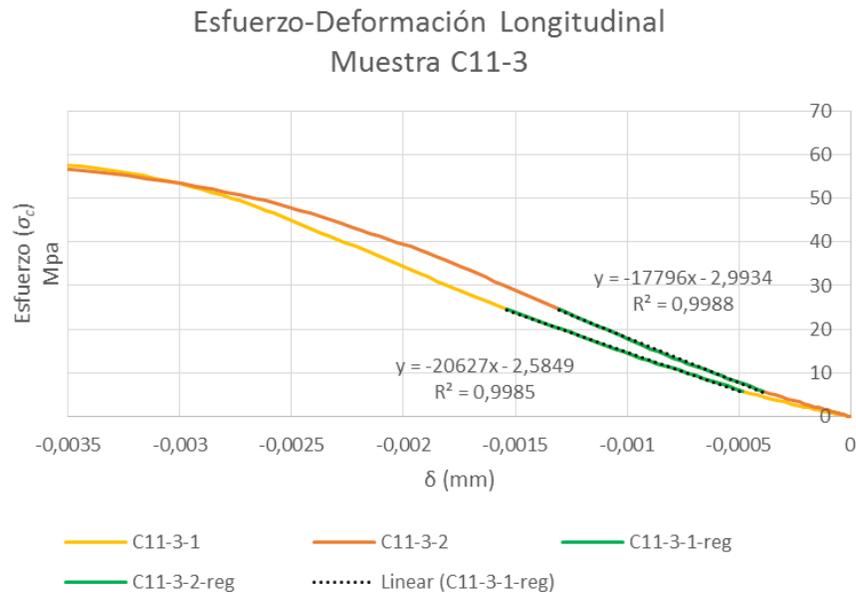
Fuente: Autor

Figura 4-9. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-2



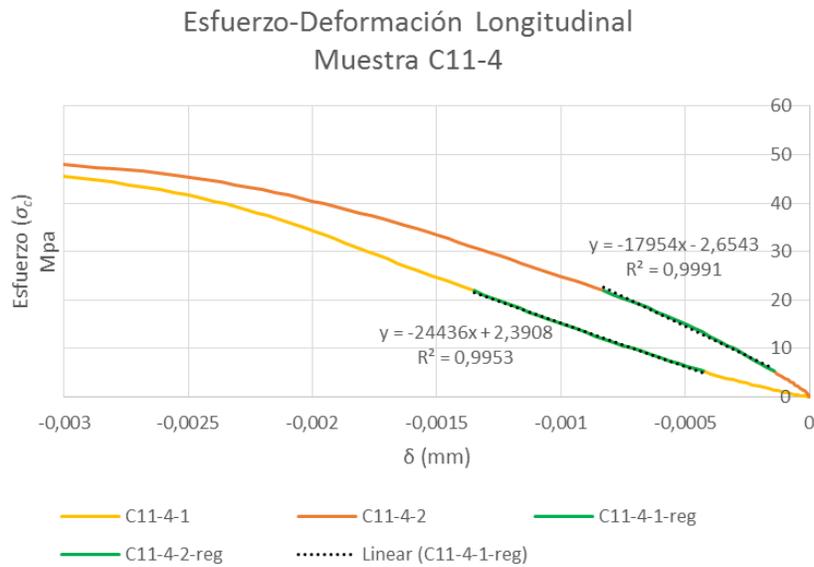
Fuente: Autor

Figura 4-10. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-3



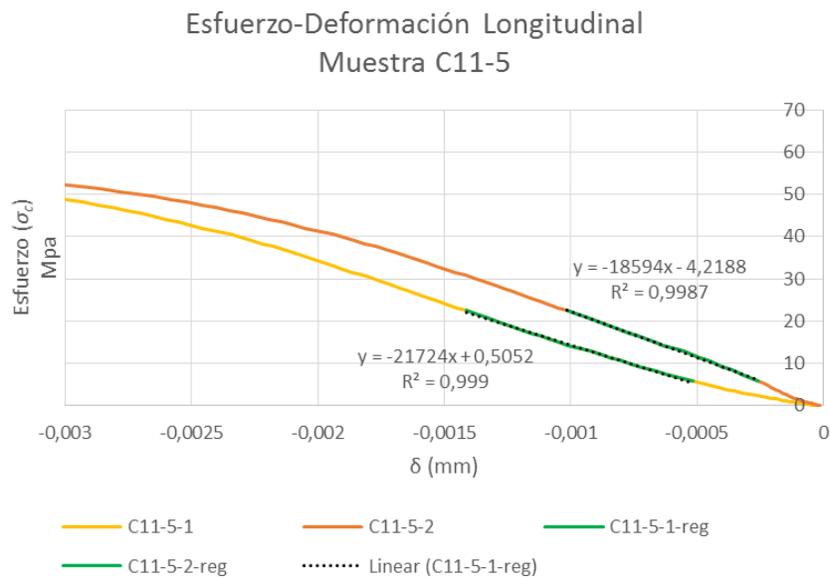
Fuente: Autor

Figura 4-11. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-4



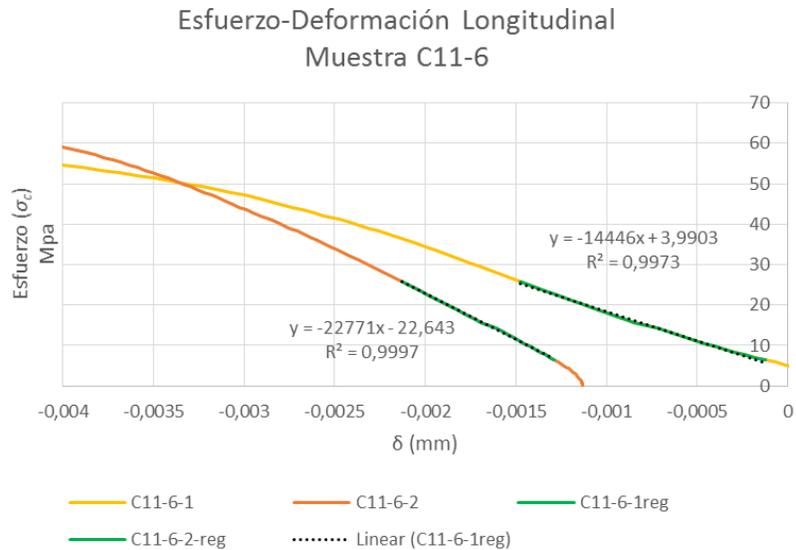
Fuente: Autor

Figura 4-12. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-5



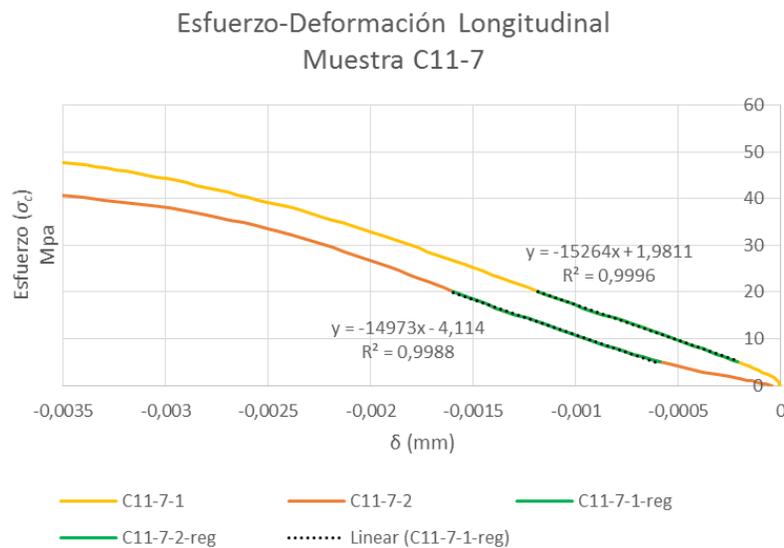
Fuente: Autor

Figura 4-13. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-6



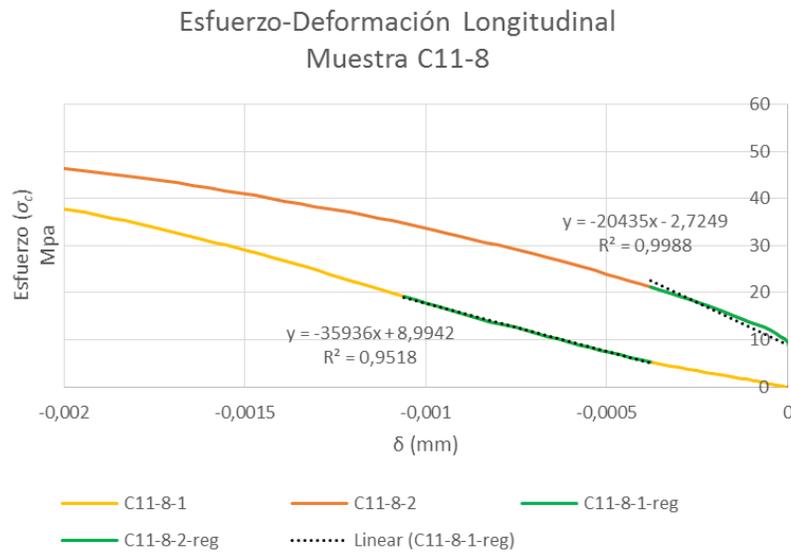
Fuente: Autor

Figura 4-14. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-7



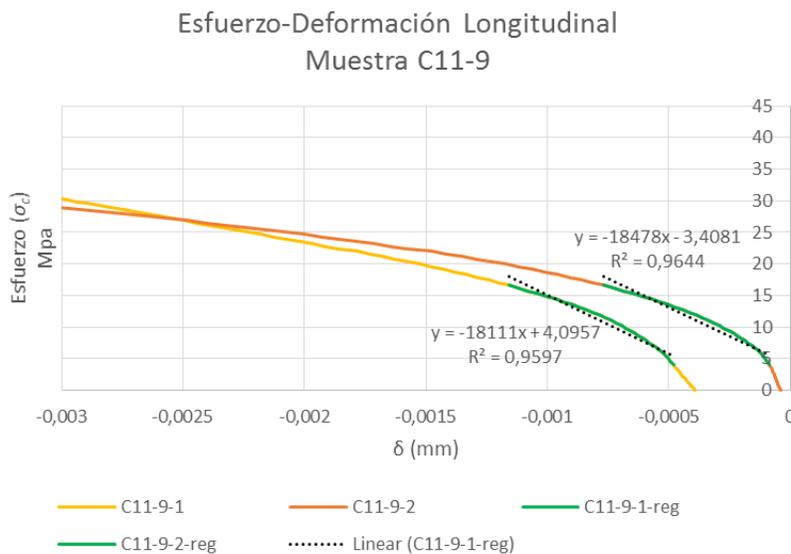
Fuente: Autor

Figura 4-15. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-8



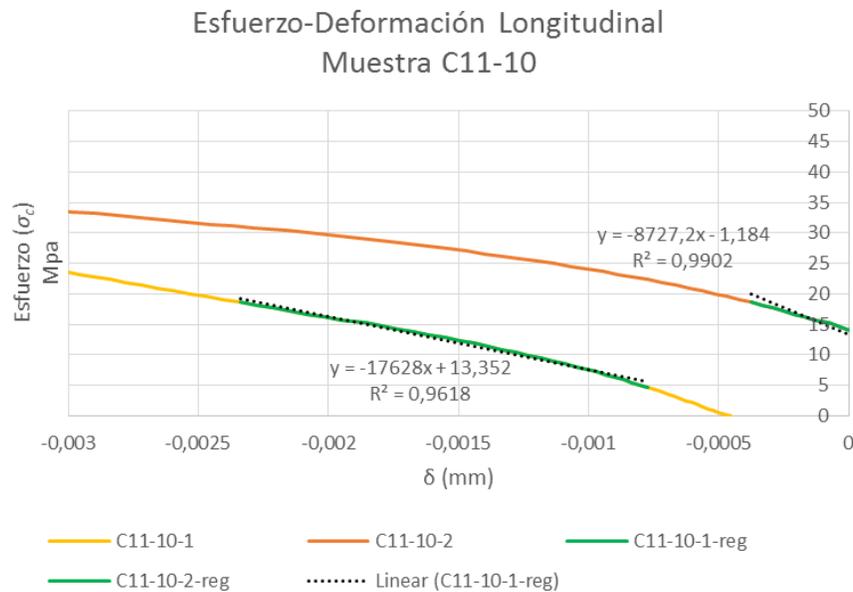
Fuente: Autor

Figura 4-16. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-9



Fuente: Autor

Figura 4-17. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C11-10



Fuente: Autor

En las tablas anteriores podemos ver la representación de parte de la relación tensión deformación de todas las probetas C11, en estos gráficos se representan los datos registrados por el deformímetro 1 (C11-X-1) y por el deformímetro 2 (C11-X-2), además se marca en verde el tramo de los datos considerados para realizar la regresión lineal de los puntos para obtener el valor del módulo de Young según el deformímetro 1 (C11-X-1-reg) y el deformímetro 2 (C11-X-2-reg). En líneas a puntos negros se marca la recta resultante de la regresión lineal con su correspondiente expresión matemática y el valor de R^2 . En la siguiente tabla se resume los valores del módulo de Young obtenidos por ambos deformímetros (E_1 y E_2) y el valor medio (E) de cada probeta.

Tabla 4-2. Valores de módulo de Young de cada deformímetro y el valor medio para cada probeta

Probeta	E ₁ (Mpa)	E ₂ (Mpa)	E (Mpa)
C11-1	20440	19524	19982
C11-2	20645	15082	17864
C11-3	17796	20627	19212
C11-4	17954	24436	21195
C11-5	18594	21724	20159
C11-6	14446	22771	18609
C11-7	15264	14973	15119
C11-8	20775	35936	28356
C11-9	18478	18111	18295
C11-10	8727,2	18095	13411

Fuente: Autor

En la siguiente tabla se resumen los valores de resistencia a compresión, de módulo Young medio y de densidad de cada muestra. El valor medio de la resistencia a compresión de las 10 muestras es de 53.17 MPa, con una desviación típica de 6.26 MPa y un coeficiente de variación de 0.117. Por otro lado, el valor medio del módulo de Young medio de los deformímetros es de 19219.91 MPa, con una desviación típica de 3774.34 MPa y un coeficiente de variación de 0.196. En todas las regresiones lineales realizadas para obtener el módulo de Young, se han obtenido coeficientes de correlación mayores de 0.9.

Tabla 4-3. Principales parámetros físico-mecánicos de las muestras C11

Muestras	Densidad (g/mm ³)	Densidad (Kg/m ³)	σ_c (N/mm ²)	E (Mpa)
C11-1	0,00081582	815,82	52,61	19982
C11-2	0,000736777	736,78	49,68	17863,5
C11-3	0,000711089	711,09	61,21	19211,5
C11-4	0,000736777	736,78	54,73	21195
C11-5	0,000755068	755,07	57,82	20159
C11-6	0,000765759	765,76	63,73	18608,5
C11-7	0,000744293	744,29	50,94	15118,5
C11-8	0,000808686	808,69	53,06	28355,5
C11-9	0,000781381	781,38	42,20	18294,5
C11-10	0,000796917	796,92	45,76	13411,1

Fuente: Autor

4.3 Observaciones durante el ensayo

Se puede observar un patrón de comportamiento en todas las probetas ensayadas una vez alcanzada la carga máxima o tensión máxima de compresión ($\sigma_{c,max}$), ya que en todas las muestras se tienden a separar en primera instancia los tableros laminados exteriores, el comportamiento posterior varía levemente, aunque la gran mayoría de muestras tienden a romperse de manera más o menos ortogonal al esfuerzo (debido a las tracciones generadas por el efecto de Poisson), la fisura de rotura no es completamente ortogonal porque se trata de un material anisotrópico formado por latillas unidas artificialmente, por lo que la fisura de rotura busca los puntos débiles del material, que la mayoría se ubican en las uniones de los tableros. En algunas muestras, se llegan a aplastar los tableros extremos que se han separado, quedando una sección resistente reducida para seguir soportando las cargas que se le aplican hasta el fin del ensayo. Esto se aprecia claramente en la probeta C11-1 en la Figura 4-17.

Figura 4-18 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-1 estado final



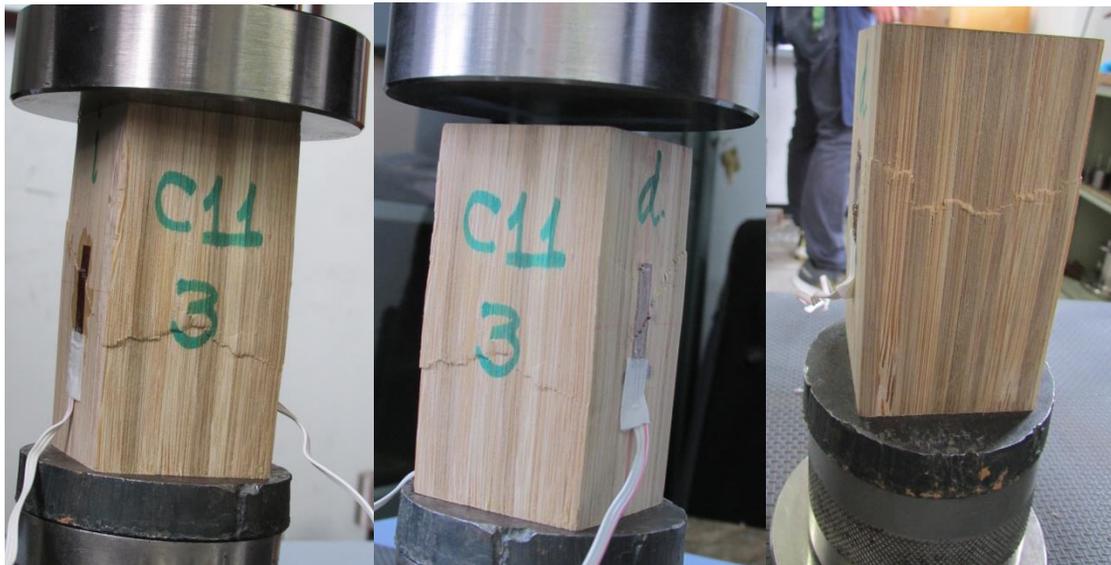
Fuente: Autor

Figura 4-19 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-2 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-20 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-3 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-21 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-4 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-22 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-5 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-23 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-7 estado final



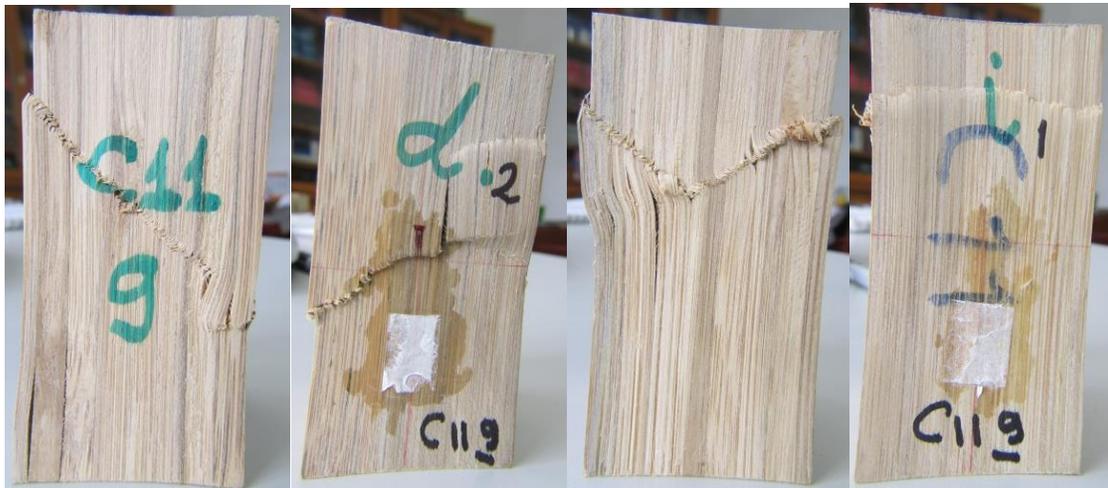
Fuente: Autor

Figura 4-24 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-8 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-25 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-9 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-26 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C11-10 estado final



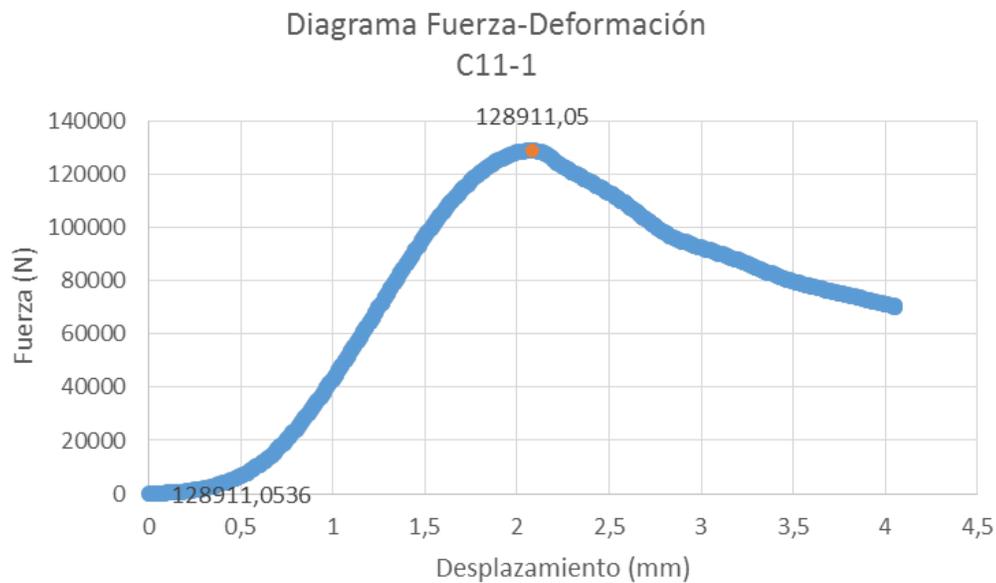
Fuente: Autor

Se pueden observar varios patrones de rotura en las 10 probetas sometidas a compresión (C11). El primer patrón de rotura lo han sufrido las muestras C11-1, C11-2 y C11-8, y se caracteriza por la separación de una o de ambas latillas laterales debida a la deficiente adhesión con el resto de latillas, y a una deformación de una o de ambas latillas de forma excéntrica cerca de la posición central de la altura de la muestra, este tipo de deformación es la típica que se obtiene por la acción del pandeo, ya que este esfuerzo depende de la altura de pandeo y de la sección transversal de la muestra, que una vez separadas las latillas laterales, éstas tienen la misma altura pero con mucha menor área transversal. El segundo patrón de rotura se caracteriza por la aparición de una fisura por todo el perímetro y relativamente perpendicular al esfuerzo de compresión, este tipo de rotura la sufren las muestras C11-3 y C11-4, y se debe a la rotura por esfuerzo de compresión de las fibras y de la parénquima. El tercer

patrón de rotura queda definido por la aparición de unas fisuras perimetrales pero siguiendo un trazado diagonal, las muestras C11-5, C11-7, C11-9, C11-10, esta rotura también se produce por esfuerzo de compresión de las fibras y de la parénquima, pero debido a esta rotura y la permanencia de la carga de compresión, se produce un deslizamiento de parte de la muestra.

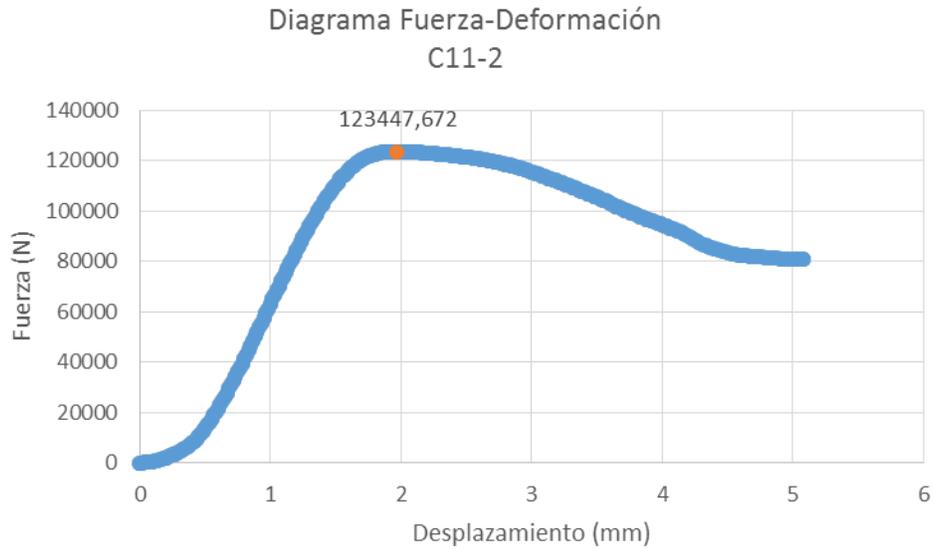
En las gráficas carga-desplazamiento se puede ver el comportamiento de la muestra a lo largo de todo el ensayo y mediante éstas, se pueden comparar entre ellas y sacar conclusiones.

Figura 4-27. Relación carga-desplazamiento, muestra C11-1



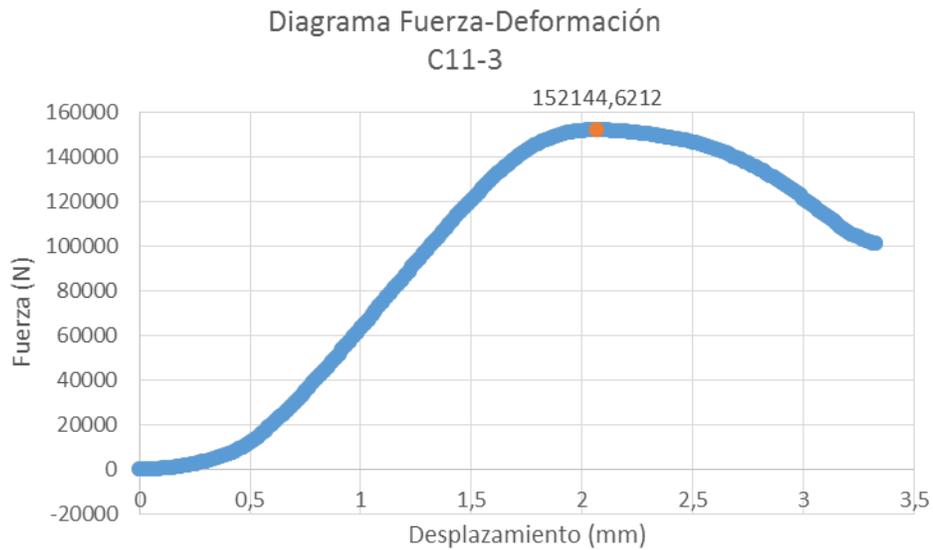
Fuente: Autor

Figura 4-28. Relación carga-desplazamiento, muestra C11-2



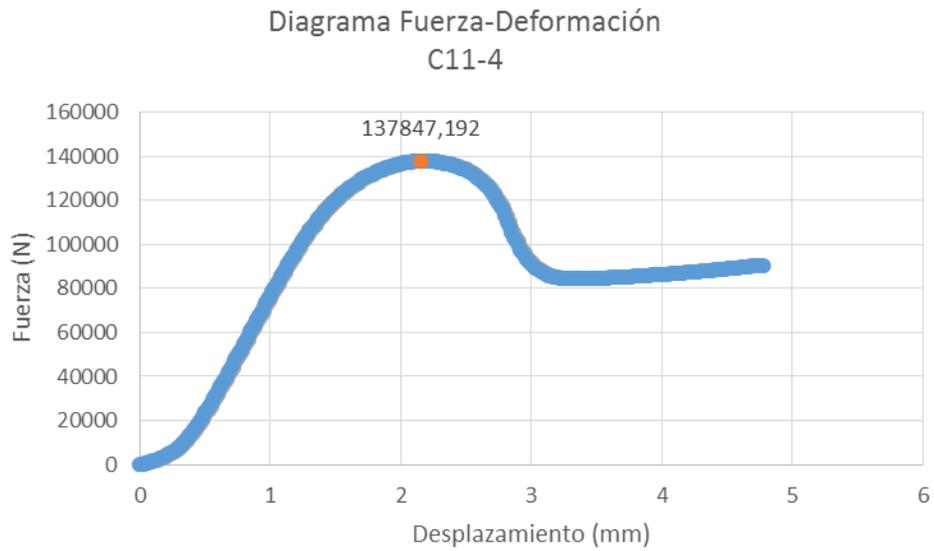
Fuente: Autor

Figura 4-29. Relación carga-desplazamiento, muestra C11-3



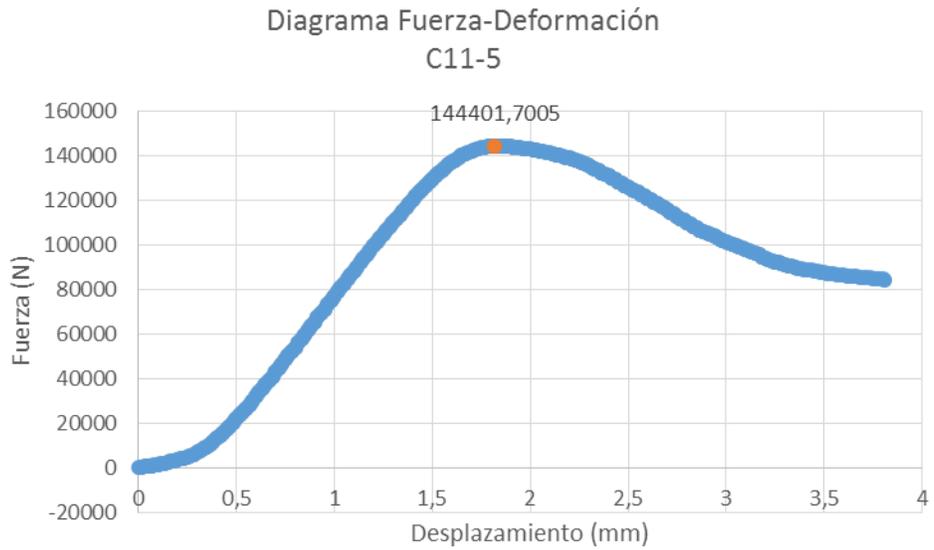
Fuente: Autor

Figura 4-30. Relación carga-desplazamiento, muestra C11-4



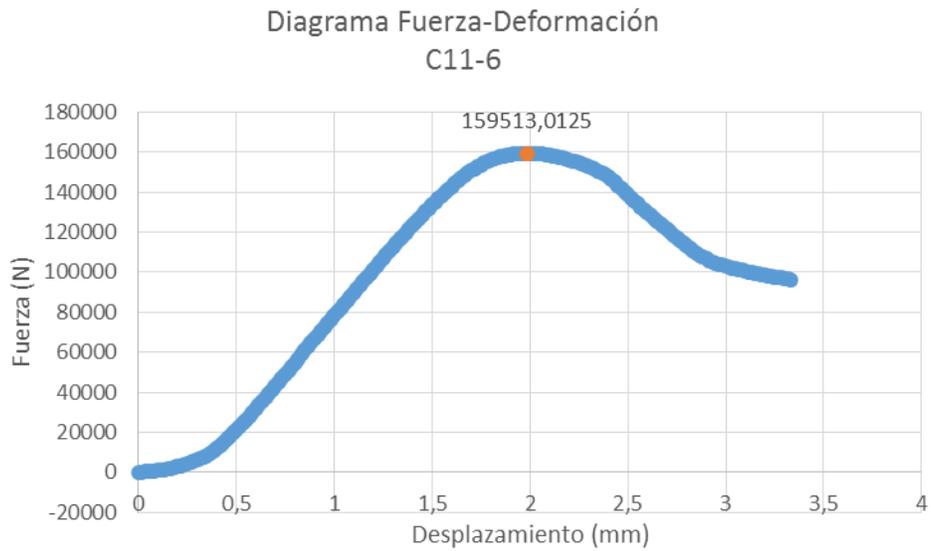
Fuente: Autor

Figura 4-31. Relación carga-desplazamiento, muestra C11-5



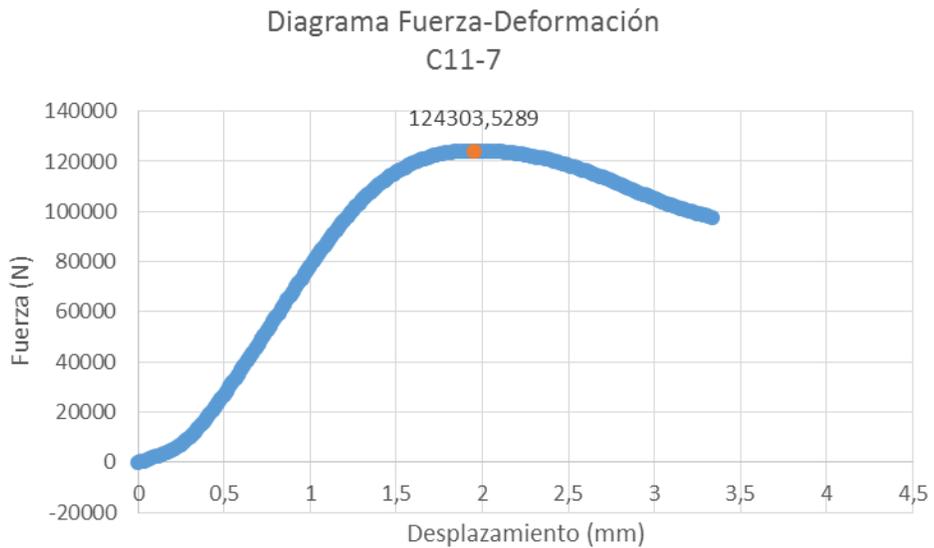
Fuente: Autor

Figura 4-32. Relación carga-desplazamiento, muestra C11-6



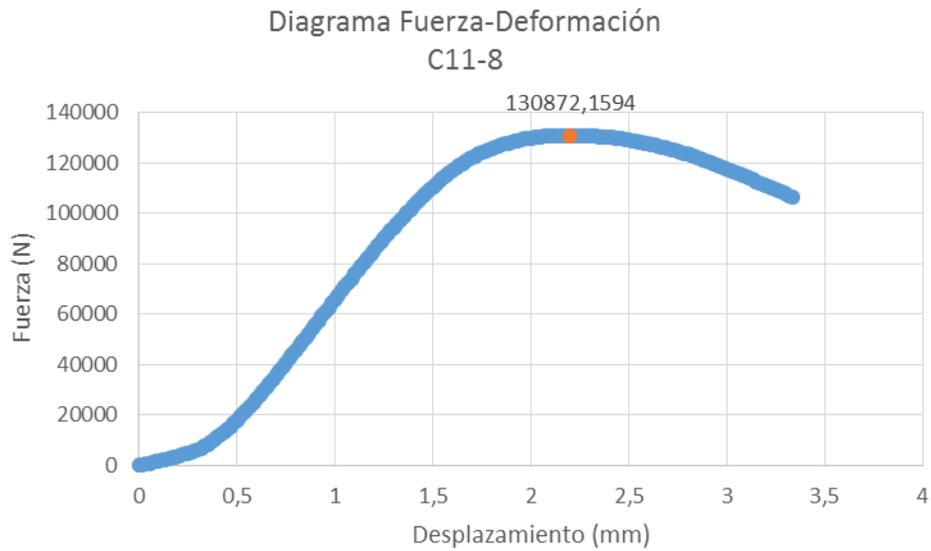
Fuente: Autor

Figura 4-33. Relación carga-desplazamiento, muestra C11-7



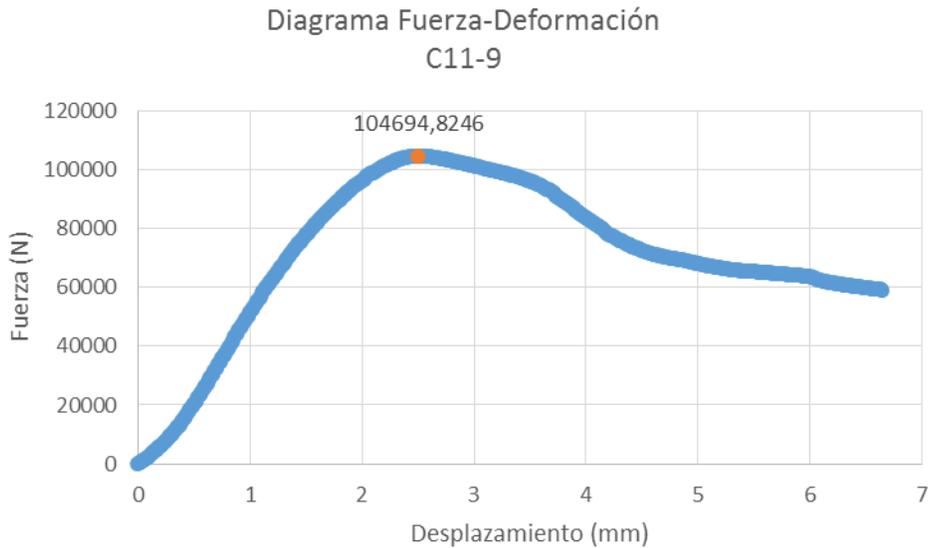
Fuente: Autor

Figura 4-34. Relación carga-desplazamiento, muestra C11-8



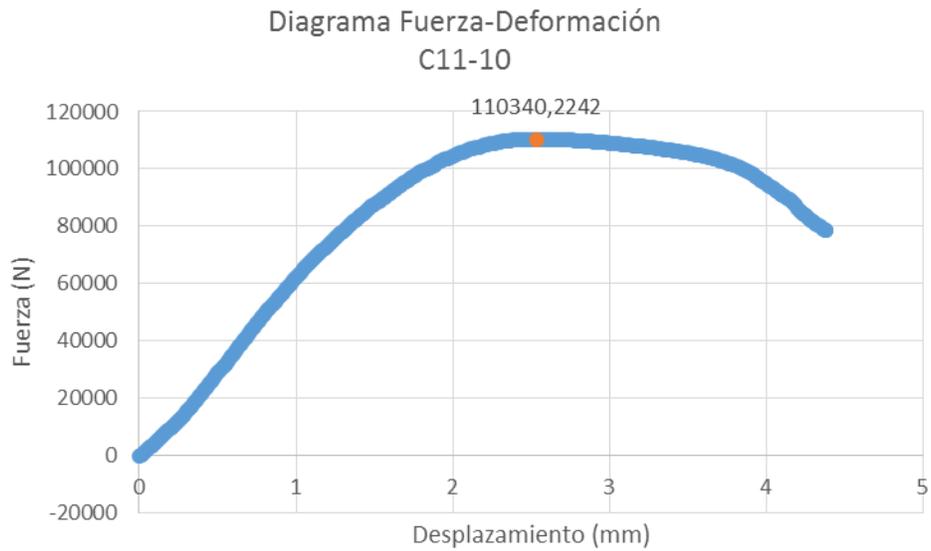
Fuente: Autor

Figura 4-35. Relación carga-desplazamiento, muestra C11-9



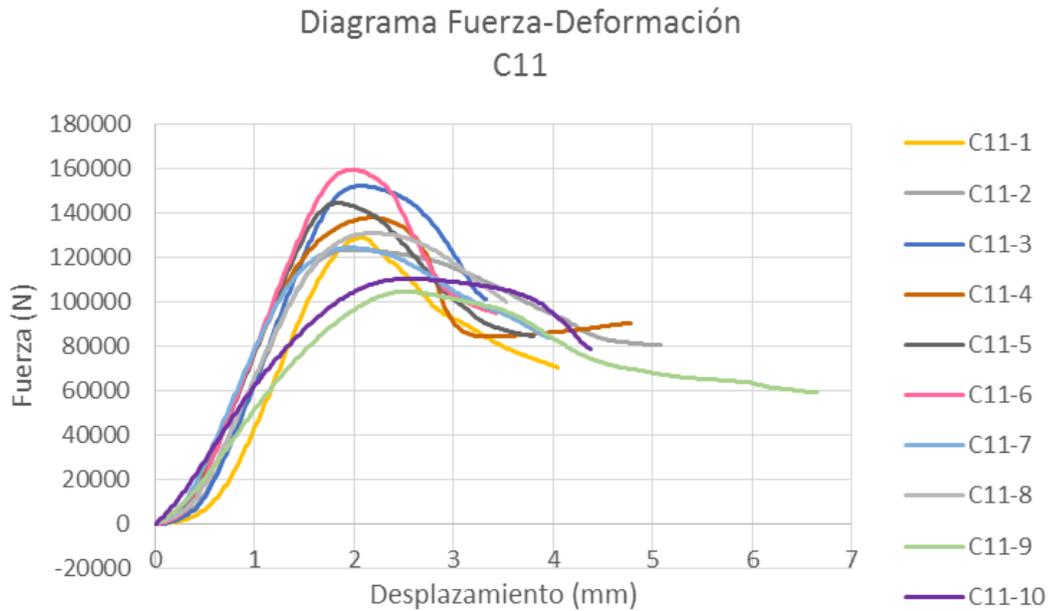
Fuente: Autor

Figura 4-36. Relación carga-desplazamiento, muestra C11-10



Fuente: Autor

Figura 4-37. Relación carga-desplazamiento, muestras C11



Fuente: Autor

Si se analizan detenidamente las anteriores gráficas, se puede observar que hay probetas que han tenido un comportamiento similar, como podrían ser C11-1, C11- 2, C11-5, C11-6, C11-9, ya que todas estas probetas tienen un diagrama fuerza-desplazamiento que marca una evolución similar, esto se debe a que todas estos gráficos poseen una primera fase en que la probeta se reajusta geométricamente a las condiciones de contorno de la máquina de ensayo, y por eso aparece una relación carga-desplazamiento curva (la muestra C11-9 tiene esta fase prácticamente nula), una vez pasada esta fase de acople geométrico, se continúa con una fase que se puede asimilar a lineal, por lo que el material posee un comportamiento elástico, esto hasta llegar a un siguiente tramo curvo en el que el comportamiento del material pasa a ser plástico, en esta curva se alcanza el valor de carga máxima que es capaz de soportar la muestra (se marca en color naranja), a partir de este punto se registra una fase en la que la carga va disminuyendo pero la deformación aumenta, esto se debe a que los enlaces atómicos de las moléculas que conforman el material ya han roto, pero el material aún puede resistir cargas menores hasta que la rotura del material es completamente visible (lo que se le llama carga de ruptura), en estas muestras, la fase entre la carga máxima y la carga de ruptura es bastante prolongada y con un trazado bastante “suave” (cabe destacar la gran deformación que sufre la muestra C11-9, más del 50% que el resto). Por otro lado, tenemos las muestras C11-3, C11-7, C11-8, C11-10, las cuales difieren de las anteriores en que la fase entre la carga máxima y la de ruptura es mucho más reducida y sin la última parte de la curva que tiende a ser una recta prácticamente horizontal. Por último, tenemos la muestra C11-4, esta muestra tiene un comportamiento muy similar a las probetas

del primer grupo, pero con la salvedad que ésta posee una fase entre la carga máxima y de ruptura bastante anómala, ya que posee una fase de caída de carga muy fuerte con poca deformación y luego rompe con una carga ligeramente mayor.

4.4 Determinación de la densidad serie C11

4.4.1 Descripción de los ensayos

La densidad es una magnitud intensiva que relaciona la masa de un cuerpo determinado y su volumen. Para obtener la densidad de las muestras de la serie C11, se procedió a obtener la geometría de cada una de las muestras midiendo el largo, el ancho y la profundidad, además de obtener su correspondiente masa, pesando cada probeta en una balanza digital con una precisión de 0.01g. Estos dos procedimientos se llevaron a cabo previos al ensayo de rotura por compresión paralela a las fibras.

Tabla 4-4. Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie C11

Muestras	Masa (g)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Volumen (mm ³)
C11-1	201,03	49,79	100,57	49,21	246413,18
C11-2	186,20	49,83	100,33	50,55	252721,89
C11-3	177,33	49,86	100,33	49,85	249372,32
C11-4	186,20	49,83	100,33	50,55	252721,89
C11-5	186,06	50,00	99,00	49,78	246411,00
C11-6	189,75	50,28	99,00	49,78	247790,90
C11-7	181,38	48,98	99,87	49,82	243701,14
C11-8	200,09	49,63	100,31	49,70	247425,75
C11-9	194,34	49,20	100,24	50,43	248711,08
C11-10	191,69	48,68	99,76	49,53	240533,37

Fuente: Autor

4.4.2 Resultados

Una vez obtenidos los resultados del ensayo de densidad, que se aportan en la siguiente tabla, se obtiene un valor de densidad media de $0.000765257 \text{ g/mm}^3$ o 765.26 Kg/m^3 , con una desviación estándar o típica de $3.29 \times 10^{-5} \text{ g/mm}^3$ o 32.87 Kg/m^3 , y con un coeficiente de variación (se recuerda que es el cociente entre la variación estándar y la densidad media) de 0.043.

Tabla 4-5. Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie C11

Muestras	Densidad (g/mm^3)	Densidad (Kg/m^3)
C11-1	0,00081582	815,82
C11-2	0,00073678	736,78
C11-3	0,00071109	711,09
C11-4	0,00073678	736,78
C11-5	0,00075507	755,07
C11-6	0,00076576	765,76
C11-7	0,00074429	744,29
C11-8	0,00080869	808,69
C11-9	0,00078138	781,38
C11-10	0,00079692	796,92

Fuente: Autor

4.5 Determinación del Contenido de Humedad

4.5.1 Descripción de los ensayos

Para poder determinar el contenido de humedad de las probetas de la serie C11, se procedió a pesar cada una de ellas, después de realizado el ensayo de compresión, en una balanza digital con aproximación de 0.01g, registrándose los

datos en una tabla antes de entrar al horno. Ingresaron al horno a una temperatura de 104,4° C (Ver figura 4-37). A las 48 horas de permanecer en el horno se pesaron cada una de las probetas, registrándose su peso final en la correspondiente tabla (Ver Tabla 4-6).

Figura 4-38. Determinación del Contenido de Humedad serie C11, ingreso al horno.



Fuente: Autor

4.5.2 Resultados

En la Tabla 4.1.1 se detallan los valores de contenido de humedad de cada una de las probetas de la serie C11. El contenido de Humedad promedio de la Serie C11 fue de 10%, con una desviación estándar de 0.63% y un coeficiente de variación del 0.063.

Tabla 4-6. Determinación del Contenido de Humedad serie C11.

Probeta Identificación	Peso Antes horno	Peso Final	Diferencia de Peso	Porcentaje Diferencial
Serie	g	g	g	%
C11-1	174,4	155,8	18,6	11%
C11-2	192,2	172,6	19,6	10%
C11-3	170,2	153,3	16,9	10%
C11-4	172,5	156,1	16,4	10%
C11-5	177,8	159,5	18,3	10%
C11-6	191,2	171,8	19,4	10%
C11-7	191,1	172,3	18,8	10%
C11-8	178,1	159,2	18,9	11%
C11-9	181	164,8	16,2	9%
C11-10	192,2	174,3	17,9	9%

Porcentaje Contenido Humedad Serie C11

10%

Fuente: Autor

4.6 Análisis de resultados serie C11

Las muestras que mayor tensión máxima han conseguido son las C11-3, la C11-5 y la C11-6 (63.73 N/mm², 61.21 N/mm² y 57.82 N/mm², respectivamente), la gran mayoría de muestras han registrado el mismo modo de rotura pero con pequeñas diferencias entre unas y otras. Todas han experimentado un tipo de rotura normal al esfuerzo, cosa poco habitual en roturas puras de compresión, que son paralelas al esfuerzo, esto se debe a que la rotura se produce por pandeo de las fibras, no debemos de olvidar que las fibras son elementos lineales con una esbeltez muy

elevada a las que les estamos aplicando un esfuerzo de compresión alineado con su mayor dimensión.

Una de las diferencias en el modo de rotura, es que algunas muestras además de la rotura por pandeo presentan una separación entre latillas, en el caso de la C11-1 se produce en las exteriores en su práctica totalidad, en el caso de la C11-2, C11-8 y de la C11-9 hay una leve separación en una exterior, en la C11-5, C11-7 y la C11-9 hay una separación en las centrales. Otra diferencia que aparece es que algunas muestras presentan la fisura de rotura es perimetral y relativamente horizontal (C11-2 y C11-8) y en otras la fisura es perimetral pero tiende a la diagonal (C11-1, C11-3, C11-4, C11-5, C11-7, C11-9 y C11-10). La última diferencia es que una de las dos partes de la muestra desliza por el plano de rotura, produciéndose un desplazamiento entre ambas partes, las muestras que sí sufren este proceso son C11-2, C11-5, C11-7 y C11-9, las que no lo sufren son las muestras C11-1, C11-3, C11-4, C11-6, C11-8 y C11-10.

A continuación se procede a analizar cómo son las deformaciones longitudinales unitarias (δ/L) que han sufrido las muestras, se puede observar mediante los diagramas tensión-deformación longitudinal unitaria, que la muestra C11-9 posee una deformación longitudinal unitaria alta, por otro lado las muestras C11-1, C11-2, C11-4 y C11-10 la poseen media y la C11-3, C11-5, C11-6, C11-7 y C11-8 baja. Toda esta información se resume en la siguiente tabla.

Tabla 4-7. Resumen de análisis de resultados

Código de Muestra	Diagrama Tensión-Deformación						Modo de Rotura						
	Deformación Longitudinal Unitaria			Tensión Máxima			Separación Latillas Exteriores		Separación Latillas Centrales		Fisura Perimetral		Desplazamiento
	Baja	Media	Elevada	Baja	Media	Elevada	Leve	Total	Leve	Total	Horizontal	Diagonal	
C11-1		X			X			X				X	
C11-2		X		X			X				X		X
C11-3	X					X						X	
C11-4		X			X							X	
C11-5	X					X			X			X	X
C11-6	X					X						X	
C11-7	X				X				X			X	X
C11-8	X				X		X				X		
C11-9			X	X			X		X			X	X
C11-10		X		X								X	

Fuente: Autor

Según lo comentado en el punto 4.1.3. y utilizando como base los diagramas fuerza-desplazamiento, se puede concluir que todas las muestras se comportan de una manera similar, empezando con una fase elástica del material, la cual se traduce a una relación prácticamente lineal entre carga y desplazamiento (que en algunos casos tiene una pendiente mayor y en otras menor), para pasar a otra fase plástica en la que la relación se convierte en una curva cuyo máximo representa la carga máxima, a partir de este punto la rama de la curva es decreciente hasta llegar a la carga de ruptura, en unos casos esta curva es más suave y en otros más brusca.

El valor medio de la máxima tensión de compresión ($\sigma_{c,max,media}$), que soportan las muestras es de 53.17 Mpa, la desviación típica o estándar es de 6.26 Mpa y el coeficiente de variación es de 0.118.

Los resultados obtenidos en todo a lo que se refiere a los ensayos de resistencia a compresión paralela a fibra son comparables a otros estudios ya realizados mediante ensayos con probetas de altura y sección transversal similares.

En un estudio realizado por Correal y colaboradores (Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014) concluyen con valor promedio de resistencia a compresión paralela a las fibras de 62MPa, después de realizar 20 ensayos de probetas elaborados con un 50% de úrea formaldehído y 50% de melanina formaldehído.

Cortés y colaboradores (Cortes, Lozano, Rusinque, & Takeuchi, 2010) obtienen valores de resistencia a compresión paralela a las fibras de 41.9MPa, 42.4MPa, 50.5MPa y 37.5MPa. Mediante ensayos de muestras de sección cuadrada de 50 mm de lado y altura de 200 mm de bambú guadua laminado, además estaban elaboradas con úrea melanina formaldehído, fenol resorcinol, Polivinil Acetato (PVA) y cola de origen animal respectivamente.

López (López, 2008) después de sus ensayos en los que analizaron 33 probetas fabricadas con Polivinil Acetato (PVA), halló un valor promedio de 47.6 MPa con un coeficiente de variación de 0.054.

Barreto (Barreto, 2003), una vez ensayadas 11 probetas elaboradas con úrea formaldehído (Pol 216), concluyó que el valor promedio de la resistencia de compresión paralela a las fibras de sus muestras era 47.1 MPa, con un valor máximo de 70.4 MPa y un valor mínimo de 17.9 MPa y un coeficiente de variación de 0.36. Por otro lado, también ensayó 20 probetas elaboradas con Policloropreno vulcanizado con polisicianato (PC3000), y halló un valor promedio de 46.5 MPa,

con un valor máximo de 52.2 MPa y un valor mínimo de 40.0 MPa con un coeficiente de variación de 0.36. En este caso, se manifestó el efecto del pandeo en las láminas.

Li y colaboradores (Li, Zhang, Huang, & Deeks, 2013), realizaron ensayos con probetas prismáticas de Bambú Mosso (*Phyllostachys pubescens*), con sección cuadrada de 100 mm y de alto 300 mm, elaborados con fenol, se hallaron valores de resistencia a compresión paralela a las fibras promedio de 57.9 MPa, 61.2 MPa y 62.7 MPa, para probetas elaboradas con bambú de la parte baja, media y alta respectivamente. En cada grupo de muestras se ensayaron 8 probetas. Los coeficientes de variación fueron 0.03, 0.08 y 0.11 por cada grupo respectivamente.

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 formaldehido 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*.

En lo que se refiere al valor medio de del módulo de Young a compresión se ha obtenido un valor de 19219.91 MPa con un coeficiente de variación de 0.196. 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.

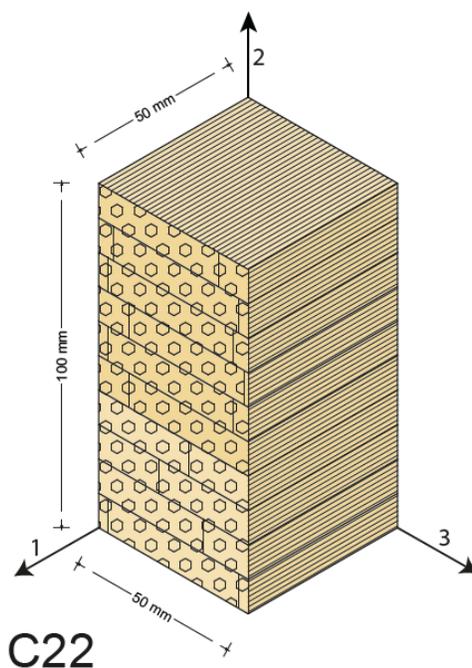
4.2 COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PERPENDICULAR AL PLANO DE LOS TABLEROS EN PROBETAS SERIE C22

4.2.1 Descripción de los ensayos

Cada probeta de la Serie C22 fue marcada para su identificación y numeradas del 1 al 10. (Ver Figura 4-1)

Se realizaron las mediciones de largo, alto y ancho de cada probeta, con el fin de determinar el área resistente a compresión y su volumen. (Ver Tabla 4-8)

Figura 4-39 Probeta para ensayo de Compresión Perpendicular a la Fibra Perpendicular al Plano de los Tableros Serie C22



Fuente: Autor

Tabla 4-8. Diferentes características geométricas utilizadas para realizar el ensayo de compresión perpendicular a las fibras (C22)

Muestras	Masa (g)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Volumen (mm ³)	Área Resistente (mm ²)
C22-1	174,80	50,55	48,19	99,07	241334,97	5007,99
C22-2	173,70	50,38	47,75	99,11	238423,48	4993,16
C22-3	172,40	50,12	48,13	99,42	239828,44	4982,93
C22-4	176,70	50,57	48,61	99,53	244665,41	5033,23
C22-5	174,70	50,60	48,31	99,89	244179,71	5054,43
C22-6	175,10	50,38	48,25	99,33	241454,84	5004,25
C22-7	172,40	49,50	47,80	99,33	235024,71	4916,84
C22-8	176,30	50,47	48,20	99,28	241513,89	5010,66
C22-9	171,90	50,30	48,15	99,03	239845,21	4981,21
C22-10	176,20	50,48	48,38	99,72	243538,42	5033,87

Fuente: Autor

Se realizaron 10 ensayos de compresión perpendicular a la fibra perpendicular al plano de los tableros, en una máquina universal de ensayos AG-X plus (Anexo B1 Certificado de Calibración), las probetas se colocaron directamente sobre el plato de carga.

En las 10 probetas de esta serie se colocaron dos deformímetros unidireccionales en las caras laterales, para obtener el módulo de deformación longitudinal.

Cabe reseñar que durante el ensayo de la muestra C22-2, aparecieron una serie de problemas que provocaron que no haya un registro fiable del mismo, por lo que no se va a considerar en los cálculos estadísticos.

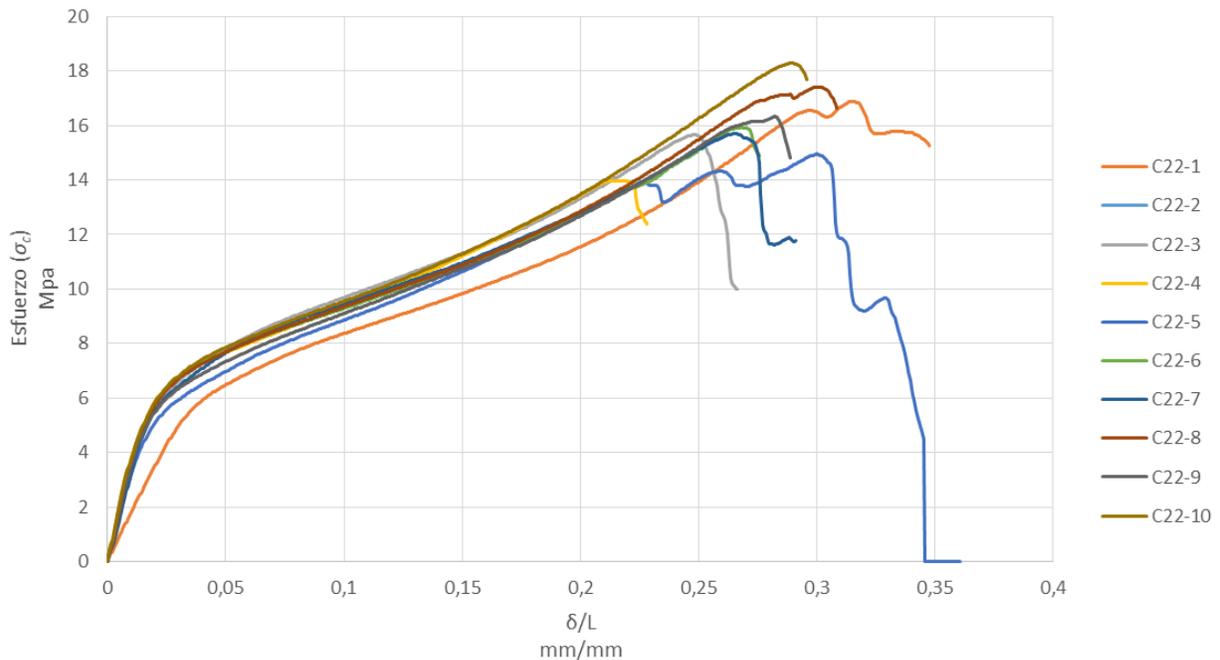
4.2.2 Cálculos y resultados

Para obtener el esfuerzo de compresión que sufre cada probeta se hace uso de la Ecuación 4-3, la cual nos relaciona la tensión resultante (σ_c) con el cociente de la fuerza aplicada (P) y el área de referencia (A), que en este caso concreto y al tratarse de un ensayo de compresión, es el área de la muestra perpendicular a la fuerza aplicada.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 4-3}$$

Para poder comparar el comportamiento de las 9 muestras tipo C22, se compara la relación de la tensión normal al área de referencia aplicada (σ_c) con la deformación longitudinal unitaria (δ/L). Se decide trabajar con la deformación longitudinal unitaria y no con la deformación registrada, porque las dimensiones de las 9 muestras no coinciden, y este parámetro nos indica en forma de proporción o porcentaje la deformación que se va registrando ($\bar{\delta}$) respecto a la dimensión inicial (L), lo que nos permite poder comparar el comportamiento de las 9 muestras. En la Figura 4-38, se representa dicha relación, situando en el eje vertical la tensión normal al área de referencia aplicada (σ_c) y en el eje horizontal la deformación longitudinal unitaria (δ/L), para diferentes niveles de carga. En este caso, la deformada registrada ($\bar{\delta}$) coincide con el desplazamiento del plato de carga.

Figura 4-40. Relación entre el esfuerzo o tensión normal al área de referencia (σ_c) y la deformación longitudinal unitaria (δ/L).



Fuente: Autor

Si se analiza el gráfico, queda patente un comportamiento similar de las 9 muestras, en todas ellas podemos observar un tramo inicial cuyo comportamiento se puede asumir a lineal, ya que la relación entre tensión y deformación es prácticamente lineal. Posteriormente se da paso a una fase en la que la pendiente de la función varia disminuyendo paulatinamente hasta alcanzar el valor máximo de tensión ($\sigma_{c,max}$), esto significa que en esta fase el material tiene un comportamiento plástico, ya que la relación tensión-deformación es no lineal. Después de alcanzar dicho valor, se pasa a una fase en la que la deformación sigue aumentando a la vez que se disminuye la tensión, esta disminución tiene dos fases diferenciadas, en la primera la tensión disminuye de forma rápida y en la

segunda de una forma más paulatina. Durante la carga y antes de alcanzar el esfuerzo máximo, la variabilidad de comportamientos no es destacable, sólo el hecho de que la deformación que experimenta cada muestra cuando se alcanza la tensión máxima varía visiblemente, ya que las muestras C22-1 y C22-5 tienen una deformación en la tensión máxima un 50% mayor que la de la muestra C22-4.

La resistencia a compresión de cada probeta se obtuvo mediante la Ecuación 4-4, donde P_{max} es la máxima fuerza que se aplica y A es el área de la sección transversal de cada probeta. Dicho esfuerzo se obtuvo en el límite de proporcionalidad σ_{cLP} , como el 75% de la resistencia a compresión.

$$\sigma_{c,max} = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{Ecuación 4-4}$$

Respecto al módulo de Young o módulo de deformación longitudinal (E), se han registrado dos valores, E_1 y E_2 , cada uno según los datos obtenidos de cada deformímetro situado en los dos laterales de las 9 muestras, asumiendo como el módulo de Young de la probeta (E) el valor medio de los dos valores. Los valores E_1 y E_2 , se obtuvieron como la pendiente de la regresión lineal de los valores de la curva esfuerzo-deformación comprendidos entre el 10% y el 40% del esfuerzo máximo (En las Figuras 4-39 y 4-40 se ejemplifica lo dicho para la probeta C22-1).

Figura 4-41. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, datos registrados con el deformímetro 1, muestra C22-1

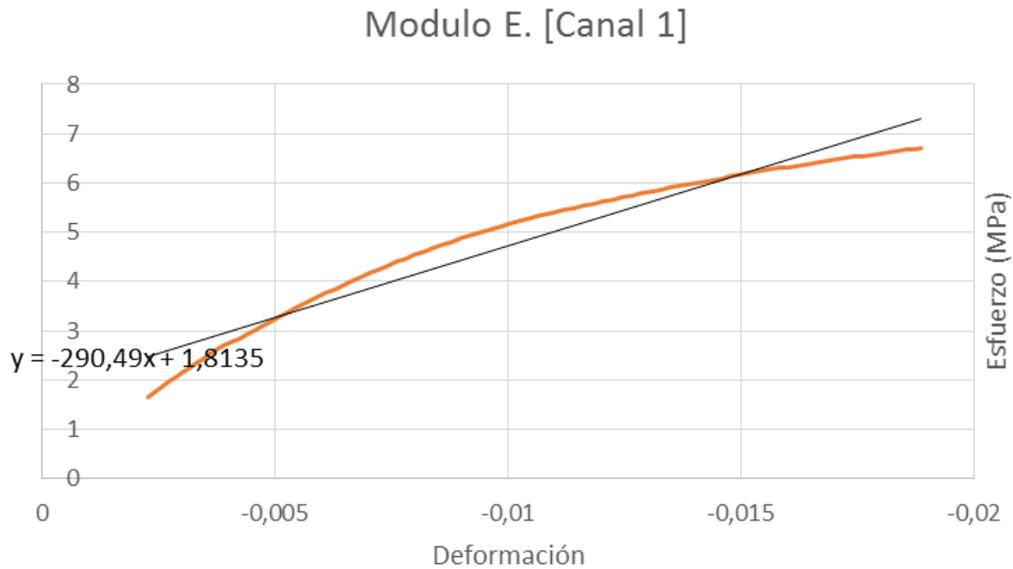
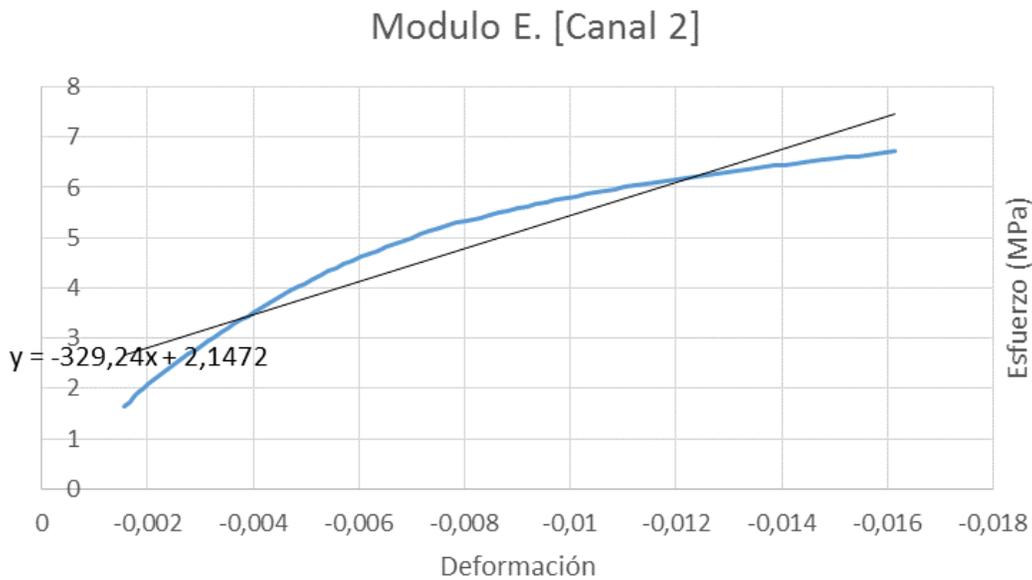


Figura 4-42. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, datos registrados con el deformímetro 2, muestra C22-1



En ambas imágenes podemos ver la gráfica que relaciona las tensiones ejercidas (σ_c) con las correspondientes deformaciones longitudinales (δ), en ambas gráficas sólo se grafican los valores que corresponden al conjunto de tensiones que están comprendidas entre el 10% y el 40% de la tensión máxima ($\sigma_{c,max}$) y sus correspondientes deformaciones. También se puede ver la gráfica y expresión matemática de la recta resultante de la regresión lineal de la nube de puntos registrados.

Figura 4-43. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-1

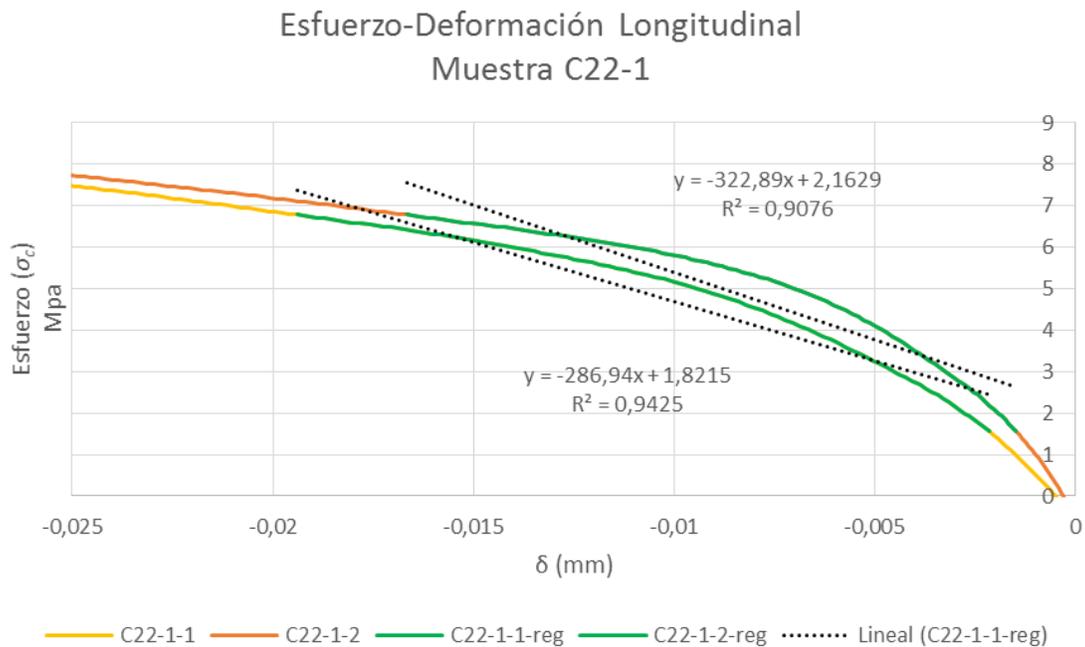


Figura 4-44. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-2

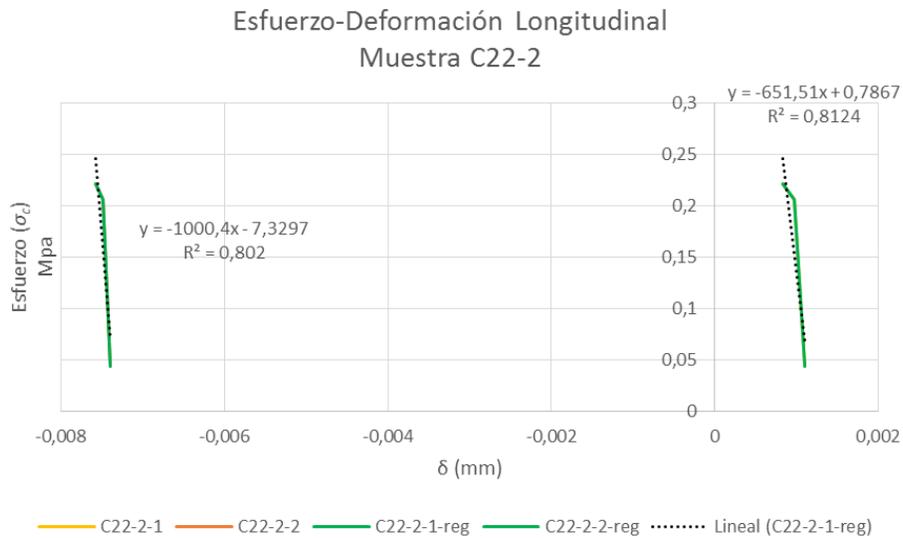


Figura 4-45. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-3

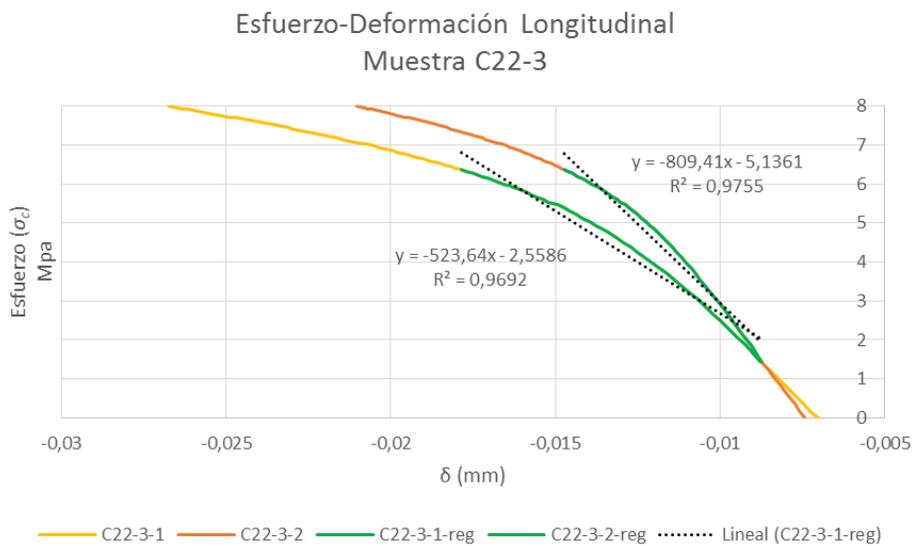


Figura 4-46. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-4

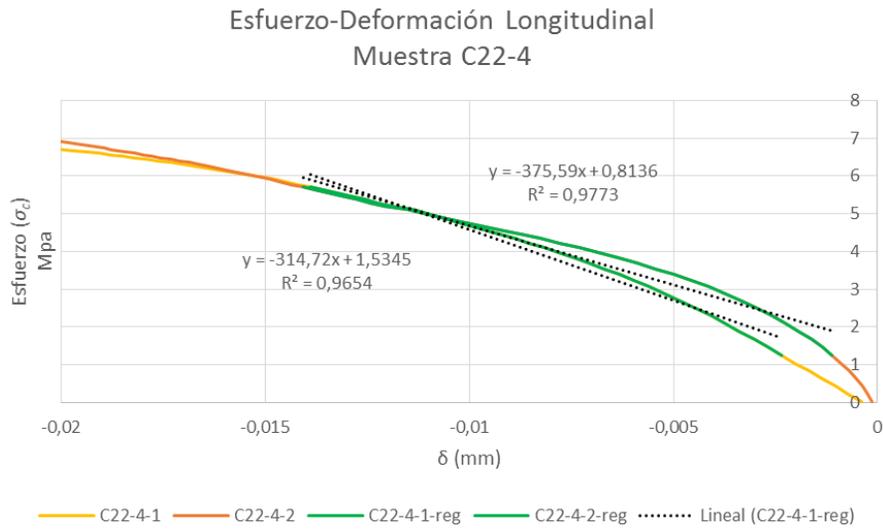


Figura 4-47. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-5

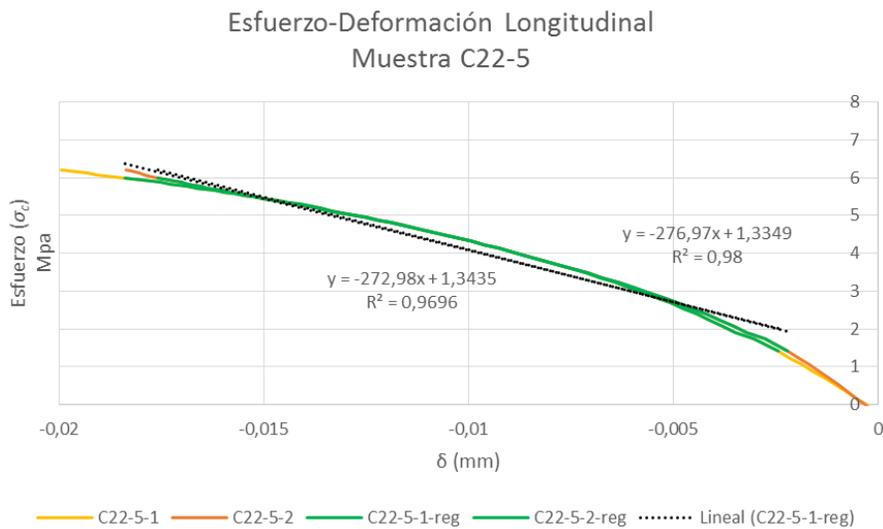
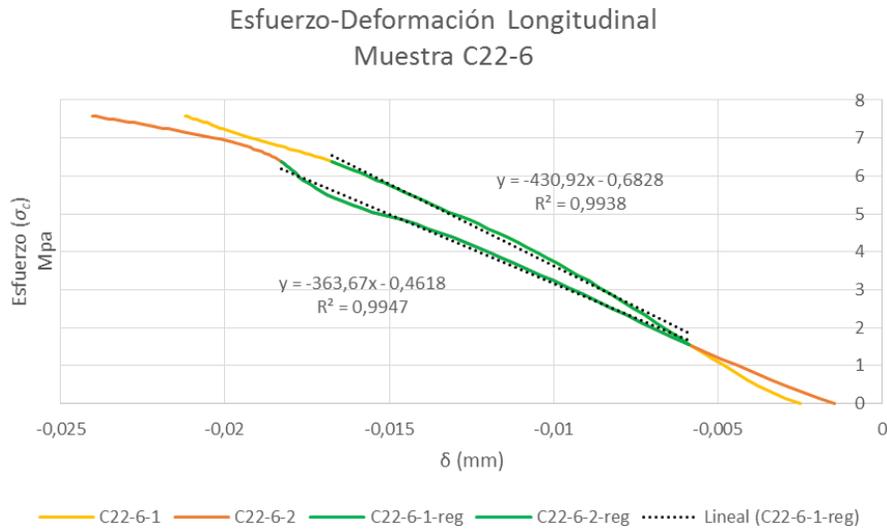
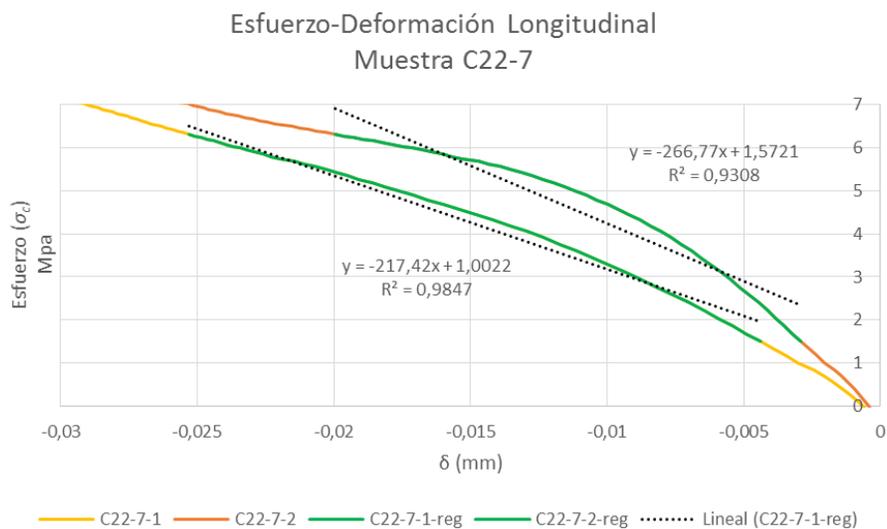


Figura 4-48. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-6



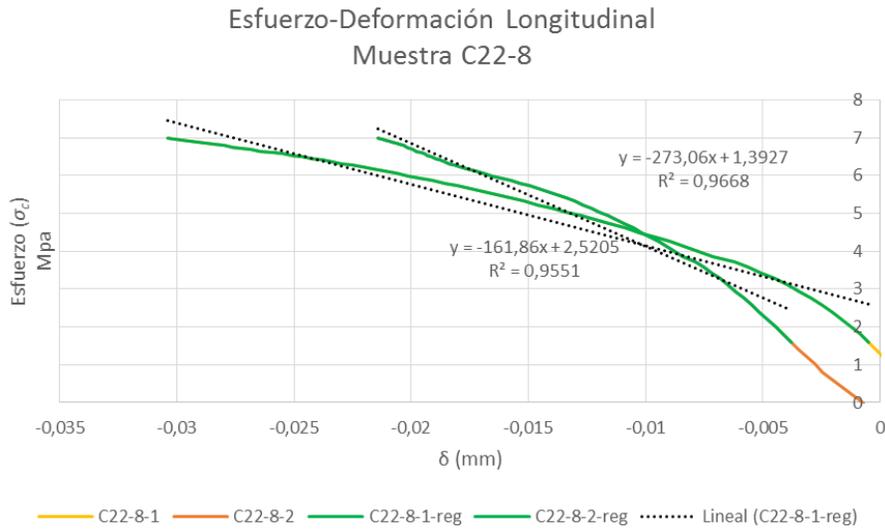
Fuente: Autor

Figura 4-49. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-7



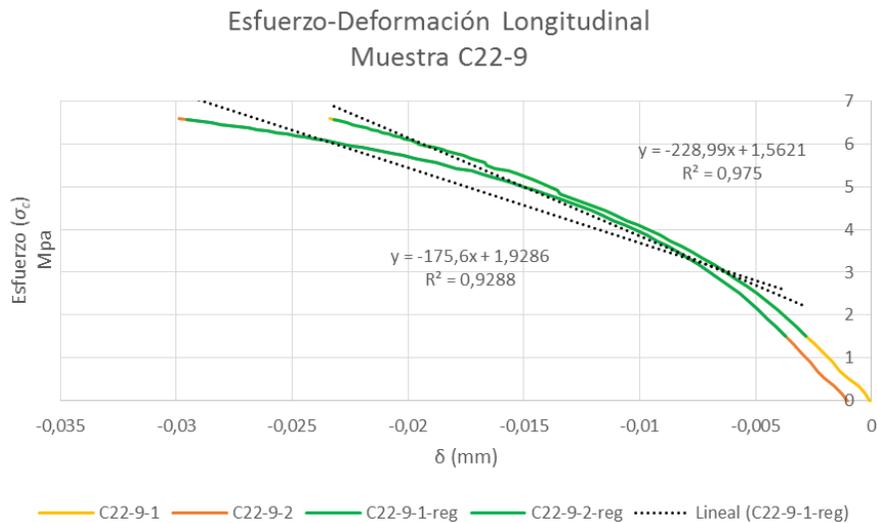
Fuente: Autor

Figura 4-50. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-8



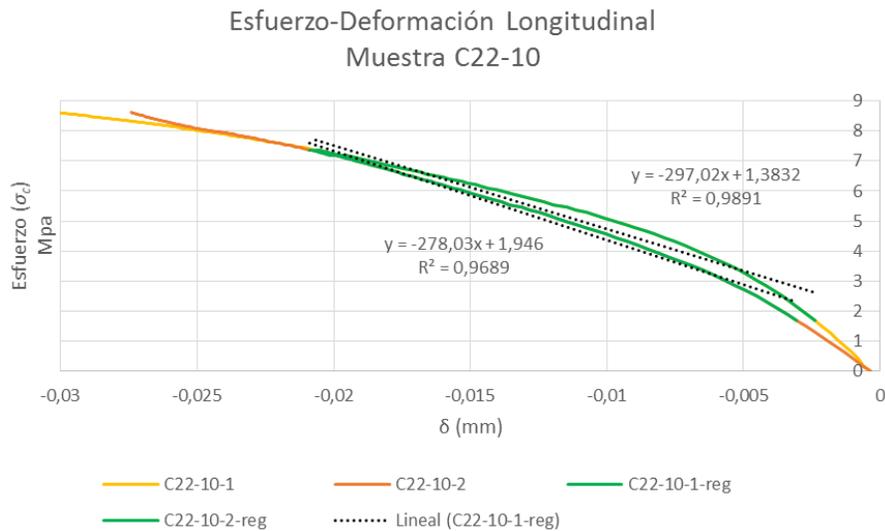
Fuente: Autor

Figura 4-51. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-9



Fuente: Autor

Figura 4-52. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C22-10



En las tablas anteriores podemos ver la representación de parte de la relación tensión deformación de todas las probetas C22, en estos gráficos se representan los datos registrados por el deformímetro 1 (C22-X-1) y por el deformímetro 2 (C22-X-2), además se marca en verde el tramo de los datos considerados para realizar la regresión lineal de los puntos para obtener el valor del módulo de Young según el deformímetro 1 (C22-X-1-reg) y el deformímetro 2 (C22-X-2-reg). En líneas a puntos negros se marca la recta resultante de la regresión lineal con su correspondiente expresión matemática y el valor de R^2 . En la siguiente tabla se resume los valores del módulo de Young obtenidos por ambos deformímetros (E_1 y E_2) y el valor medio (E) de cada probeta.

Tabla 4-9. Valores de módulo de Young de cada deformímetro y el valor medio para cada probeta

Probeta	E ₁ (Mpa)	E ₂ (Mpa)	E (Mpa)
C22-1	290,49	329,24	310
C22-2	651,51	1000	826
C22-3	535,44	826,34	681
C22-4	363,27	306,65	335
C22-5	268,56	272,89	271
C22-6	432,65	362,15	397
C22-7	218,36	271,27	245
C22-8	159,86	269,32	215
C22-9	226,29	173,48	200
C22-10	275,66	295	285

Fuente: Autor

En la siguiente tabla se resumen los valores de resistencia a compresión, de módulo Young medio y de densidad de cada muestra. El valor medio de la resistencia a compresión de las 9 muestras (no se considera la C22-2) es de 16.13 MPa, con una desviación típica de 1.30 MPa y un coeficiente de variación de 0.08. Por otro lado, el valor medio del módulo de Young medio de los deformímetros es de 326 MPa, con una desviación típica de 146.2 MPa y un coeficiente de variación de 0.448. En todas las regresiones lineales realizadas para obtener el módulo de Young, se han obtenido coeficientes de correlación mayores de 0.9.

Tabla 4-10. Principales parámetros físico-mecánicos de las muestras C22

Muestras	Densidad (g/mm ³)	Densidad (Kg/m ³)	σ_c (N/mm ²)	E (Mpa)
C22-1	0,0007243	724,30	16,89	310
C22-2	0,00072854	728,54	0,22	826
C22-3	0,00071885	718,85	15,66	681
C22-4	0,00072221	722,21	13,97	335
C22-5	0,00071546	715,46	14,96	271
C22-6	0,00072519	725,19	15,93	397
C22-7	0,00073354	733,54	15,69	245
C22-8	0,00072998	729,98	17,42	215
C22-9	0,00071671	716,71	16,34	200
C22-10	0,0007235	723,50	18,28	285

Fuente: Autor

4.2.3 Observaciones durante los ensayos

Se puede observar un patrón de rotura en todas las probetas ensayadas en esta serie, y es que en todos los casos se produce una o varias fisuras relativamente paralelas al esfuerzo, en algunos casos tiende a ser una diagonal, esto se debe a que la fisura se propagó por la parénquima en las zonas de menor presencia de fibras. Esta fisura o fisuras se producen por las tracciones perpendiculares al esfuerzo generadas por el efecto Poisson, este efecto produce que la fisura sea un plano que traspasa la muestra siempre de forma paralela a las fibras por la anisotropía del material generada por la presencia de dichas fibras.

Figura 4-53 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-1 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-54 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-2 estado final



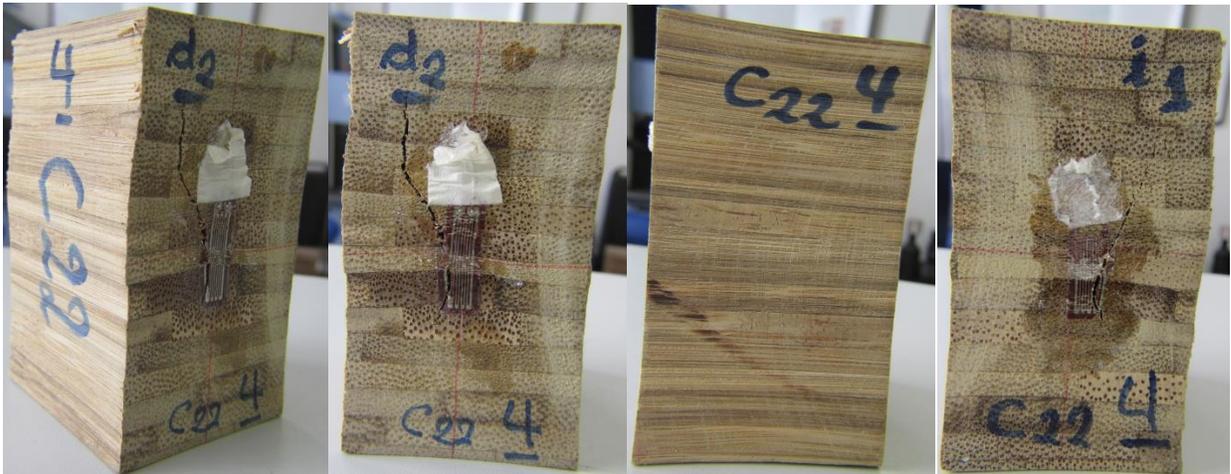
Fuente: Autor

Figura 4-55 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-3 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-56 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-4 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-57 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-5 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-58 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-6 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-59 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-7 estado final



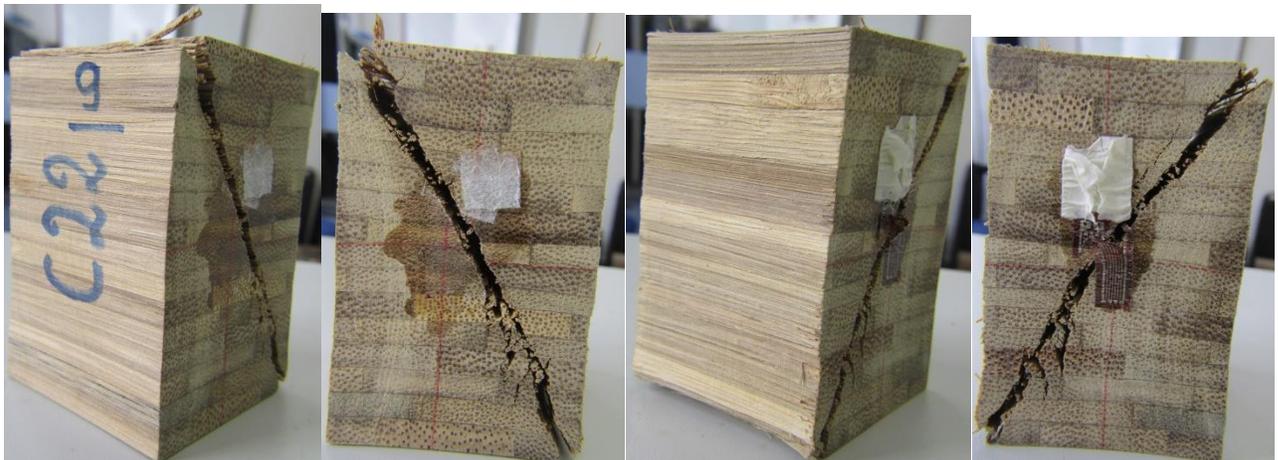
Fuente: Autor

Figura 4-60 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-8 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-61 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-9 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-62 Ensayo a compresión paralela a la fibra probeta C22-10 estado final

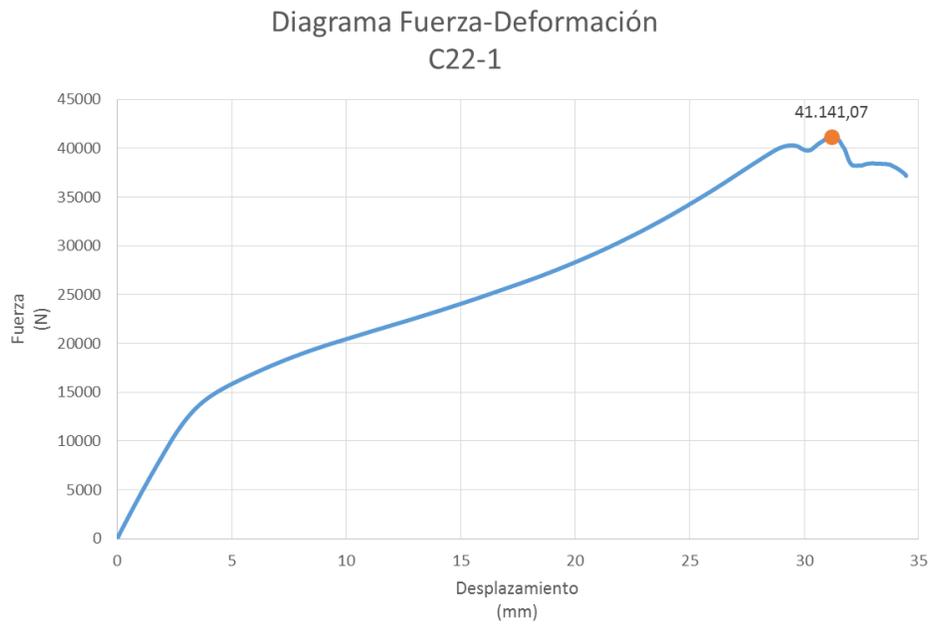


Fuente: Autor

Se puede observar que existe un único patrón de rotura pero con pequeñas variantes. Este patrón es el de roturas por fisuras paralelas al esfuerzo, pero con la variante de que dichas fisuras pueden propagarse de forma diagonal, según las zonas con menor contenido en fibras, que son los puntos débiles del material. Las muestras C22-1, C22-4 y la C22-8 presentan fisuras prácticamente paralelas al esfuerzo, aunque la muestra C22-8 también presenta una pequeña fisura diagonal en una de sus esquinas superiores, las muestras C22-2, C22-3, C22-9 y C22-10 presentan una rotura provocada por una única fisura y completamente diagonal, la muestra C22-5 presenta una rotura con unas fisuras en diagonal generando una cruz de San Andrés, por último, las muestras C22-6 y C22-7 presentan unas fisuras con un trazado paralelo al esfuerzo en un tramo y diagonal en otro tramo.

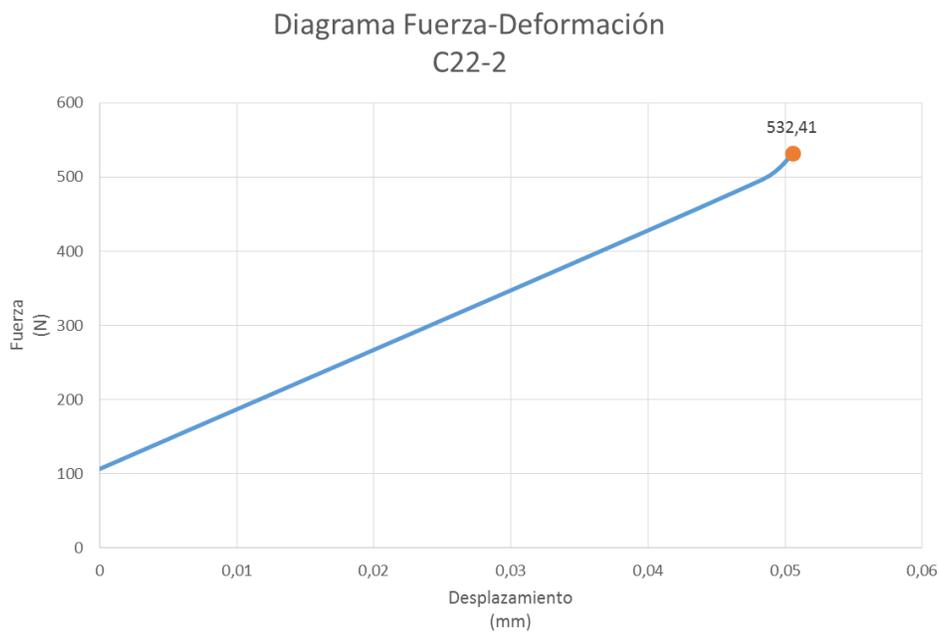
En las gráficas carga-desplazamiento se puede ver el comportamiento de la muestra a lo largo de todo el ensayo y mediante éstas, se pueden comparar entre ellas y sacar conclusiones.

Figura 4-63. Relación carga-desplazamiento, muestra C22-1



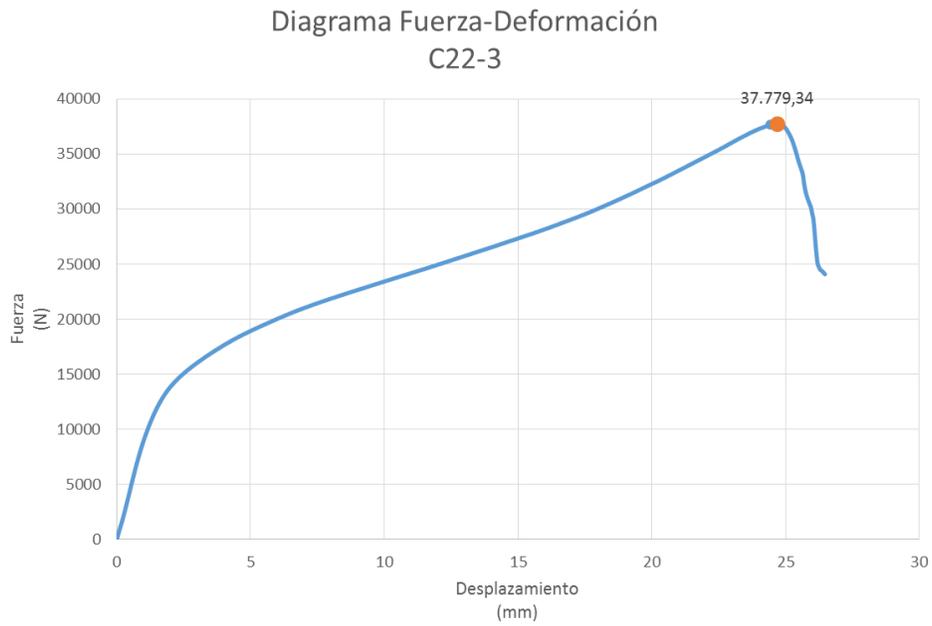
Fuente: Autor

Figura 4-64. Relación carga-desplazamiento, muestra C22-2



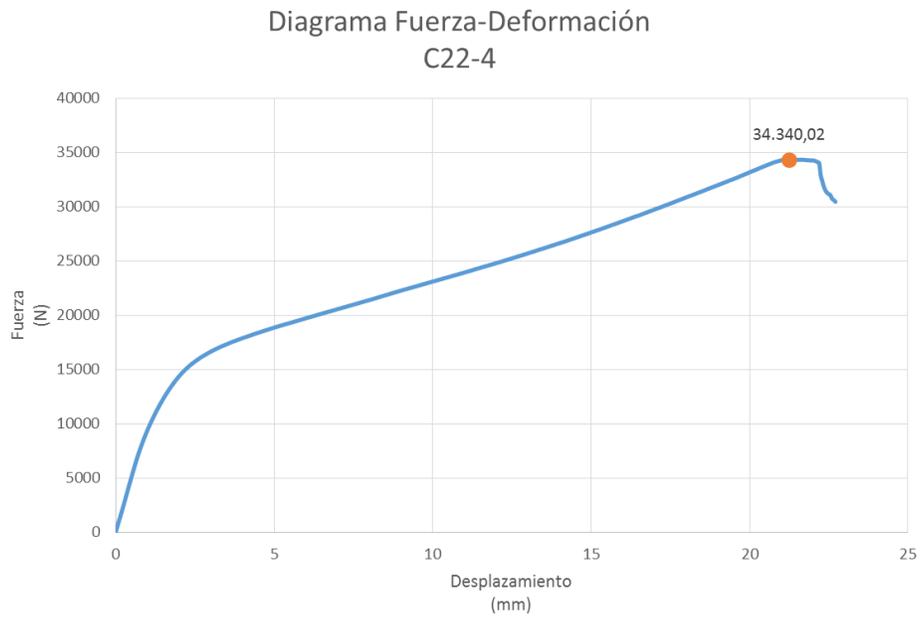
Fuente: Autor

Figura 4-65. Relación carga-desplazamiento, muestra C22-3



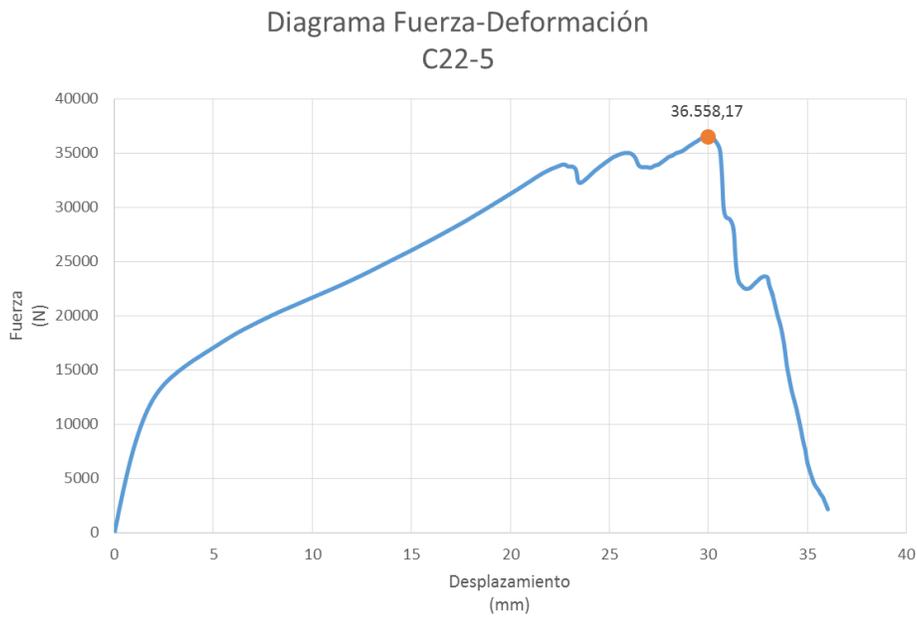
Fuente: Autor

Figura 4-66. Relación carga-desplazamiento, muestra C22-4



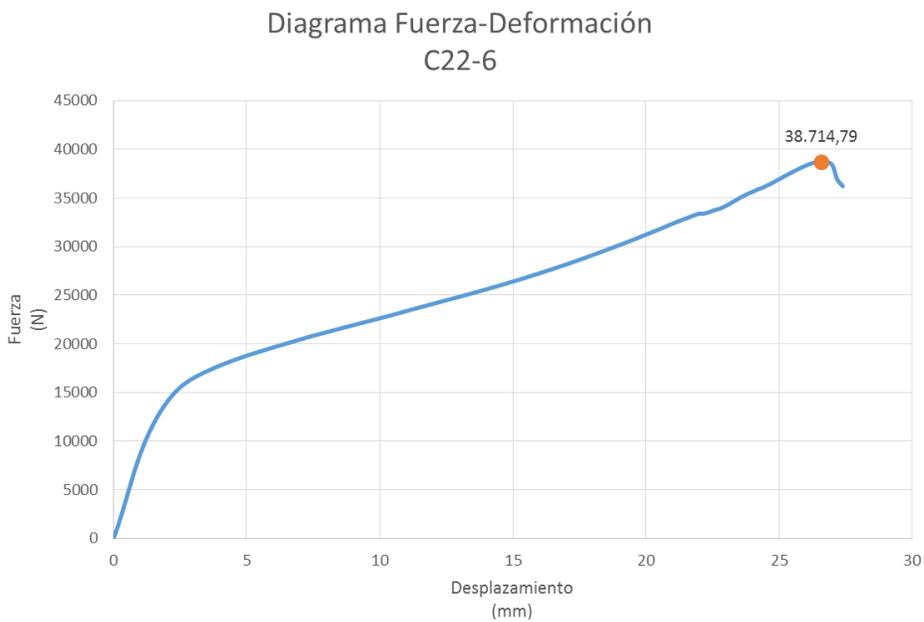
Fuente: Autor

Figura 4-67. Relación carga-desplazamiento, muestra C22-5



Fuente: Autor

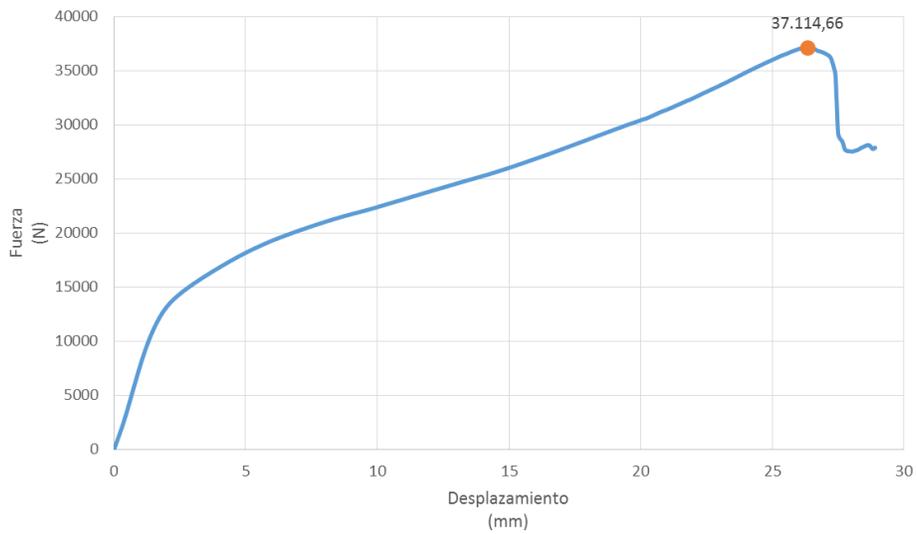
Figura 4-68. Relación carga-desplazamiento, muestra C22-6



Fuente: Autor

Figura 4-69. Relación carga-desplazamiento, muestra C22-7

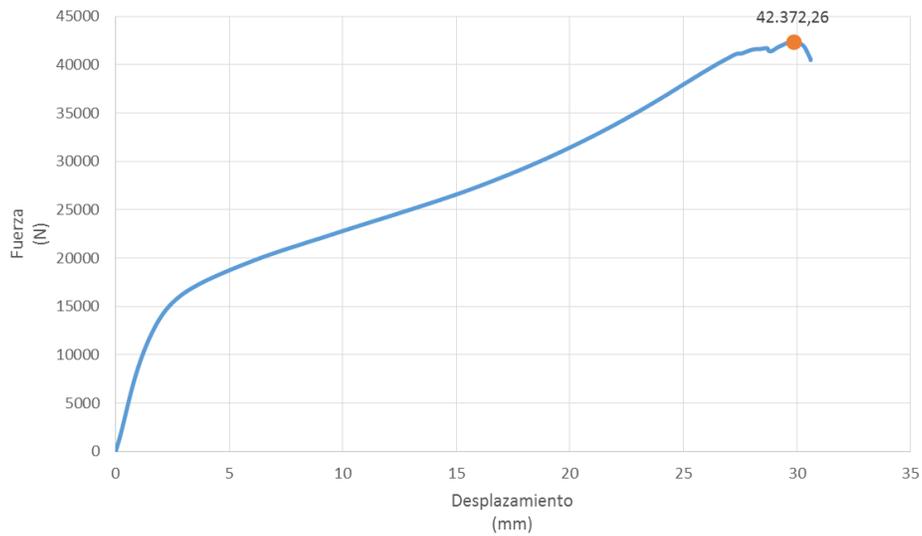
Diagrama Fuerza-Deformación
C22-7



Fuente: Autor

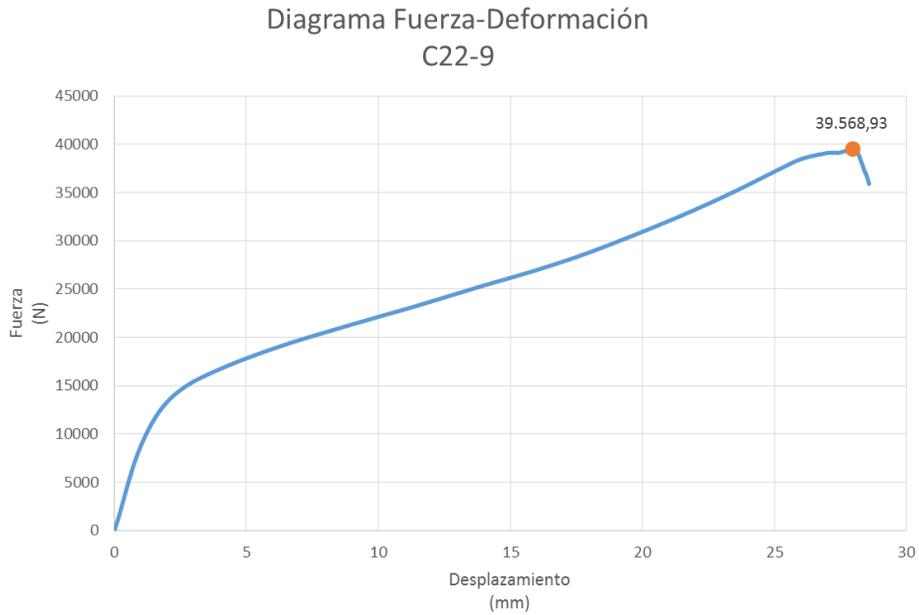
Figura 4-70. Relación carga-desplazamiento, muestra C22-8

Diagrama Fuerza-Deformación
C22-8



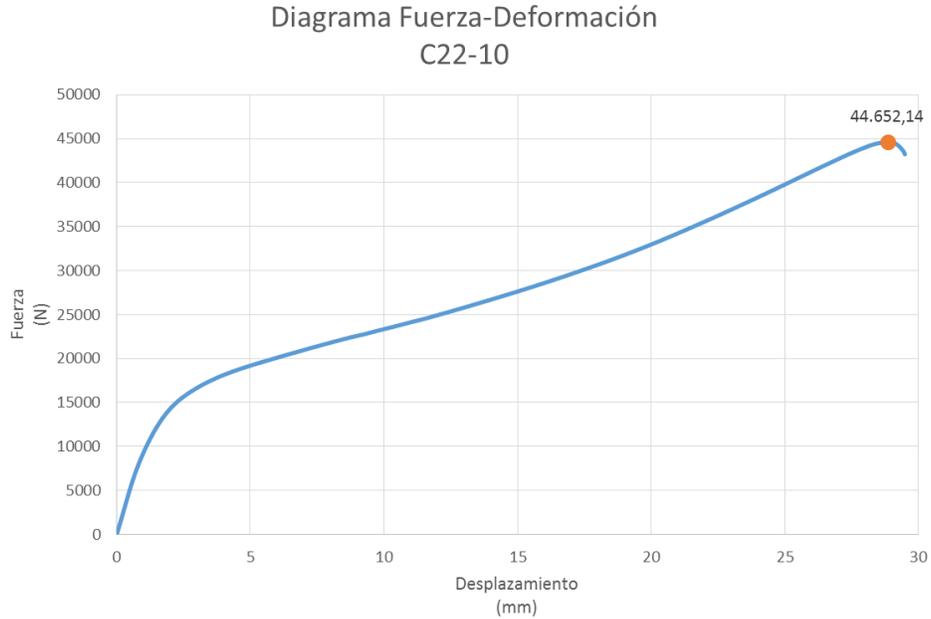
Fuente: Autor

Figura 4-71. Relación carga-desplazamiento, muestra C22-9

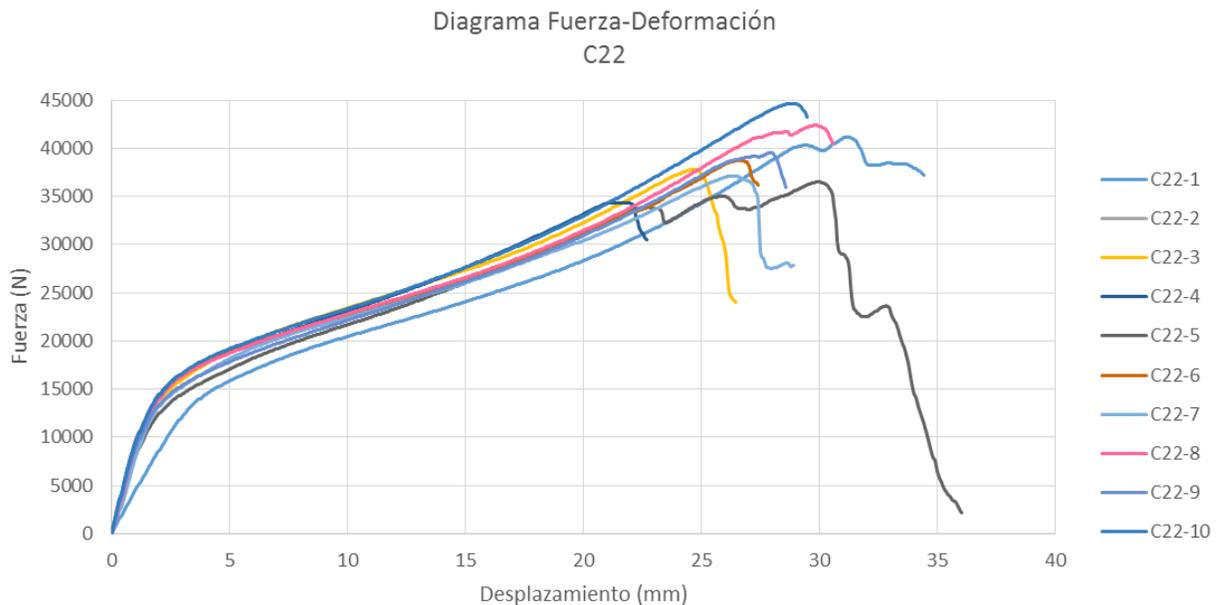


Fuente: Autor

Figura 4-72. Relación carga-desplazamiento, muestra C22-10



Fuente: Autor

Figura 4-73. Relación carga-desplazamiento, muestras C22

Fuente: Autor

Si se analizan detenidamente las anteriores gráficas, se puede observar que todas las muestras poseen un diagrama el cual se desarrolla con las mismas fases, una primera fase en que la probeta se reajusta geoméricamente a las condiciones de contorno de la máquina de ensayo, una vez pasada esta fase se continúa con una fase que se puede asimilar a lineal, por lo que el material posee un comportamiento elástico, esto hasta llegar a un siguiente tramo curvo en el que el comportamiento del material pasa a ser plástico, en esta curva se alcanza el valor de carga máxima que es capaz de soportar la muestra (se marca en color naranja), a partir de este punto se registra una fase de descarga en la que la carga va disminuyendo pero la deformación aumenta, esto se debe a que los enlaces atómicos de las moléculas que conforman el material ya han roto, pero el material aún puede resistir cargas menores hasta que la rotura del material es

completamente visible (lo que se le llama carga de ruptura), en estas muestras, la fase entre la carga máxima y la carga de ruptura es bastante corta y con un trazado bastante “brusco”.

Las diferencias más notables residen en las deformaciones una vez alcanzada la carga máxima, ya que las muestras C22-1 y la C22-5 poseen unas deformaciones de rotura elevadas, la muestra C22-4 registra la menor deformación (alrededor de un 40% de las primeras muestras), y el resto de muestras registran unas deformaciones intermedias.

4.2.4 Determinación de la densidad Serie C22

4.2.4.1 Descripción de los ensayos

La densidad es una magnitud intensiva que relaciona la masa de un cuerpo determinado y su volumen. Para obtener la densidad de las muestras de la serie C22, se procedió a obtener la geometría de cada una de las muestras midiendo el largo, el ancho y la profundidad, además de obtener su correspondiente masa, pesando cada probeta en una balanza digital con una precisión de 0.01g. Estos dos procedimientos se llevaron a cabo previos al ensayo de rotura por compresión perpendicular a las fibras.

Tabla 4-11. Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie C22

Muestras	Masa (g)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Volumen (mm ³)
C22-1	174,80	50,55	48,19	99,07	241334,97
C22-2	173,70	50,38	47,75	99,11	238423,48
C22-3	172,40	50,12	48,13	99,42	239828,44
C22-4	176,70	50,57	48,61	99,53	244665,41
C22-5	174,70	50,60	48,31	99,89	244179,71
C22-6	175,10	50,38	48,25	99,33	241454,84
C22-7	172,40	49,50	47,80	99,33	235024,71
C22-8	176,30	50,47	48,20	99,28	241513,89
C22-9	171,90	50,30	48,15	99,03	239845,21
C22-10	176,20	50,48	48,38	99,72	243538,42

Fuente: Autor

4.2.4.2 Resultados

Una vez obtenidos los resultados del ensayo de densidad, que se aportan en la siguiente tabla, se obtiene un valor de densidad media de $0.000723304 \text{ g/mm}^3$ o 723.30 Kg/m^3 , con una desviación estándar o típica de $5.58 \times 10^{-6} \text{ g/mm}^3$ o 5.58 Kg/m^3 , y con un coeficiente de variación (se recuerda que es el cociente entre la variación estándar y la densidad media) de 0.077.

Tabla 4-12. Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie C22

Muestras	Densidad (g/mm ³)	Densidad (Kg/m ³)
C22-1	0,00072430	724,30
C22-2	0,00072854	728,54
C22-3	0,00071885	718,85
C22-4	0,00072221	722,21
C22-5	0,00071546	715,46
C22-6	0,00072519	725,19
C22-7	0,00073354	733,54
C22-8	0,00072998	729,98
C22-9	0,00071671	716,71
C22-10	0,00072350	723,50

Fuente: Autor

4.2.5 Determinación del contenido de humedad serie C22

4.2.5.1 Descripción de los ensayos

Para determinar el contenido de humedad de las probetas de la serie C22 en este ensayo se ha procedido de igual manera que en la Serie C11, es decir, después de realizado el ensayo de compresión, se ha pesado cada probeta, en una balanza digital con aproximación de 0.01g, registrándose los datos en una tabla antes de entrar al horno. Ingresaron al horno a una temperatura de 61° C. A las 48 horas de permanecer en el horno se pesaron cada una de las probetas, registrándose su peso final en la correspondiente tabla (Ver Tabla 4-13).

4.2.5.2 Resultados

En la Tabla 4.1.1 se detallan los valores de contenido de humedad de cada una de las probetas de la serie C22. El contenido de Humedad promedio de la Serie C11 fue de 10%, con una desviación estándar de 0.67% y un coeficiente de variación del 0.067.

Tabla 4-13 Determinación del Contenido de Humedad serie C22.

Porcentaje Contenido Humedad Serie C22

Probeta Identificación	Peso Antes horno	Peso Final	Diferencia de Peso	Porcentaje Diferencial
Serie	g	g	g	%
C22-1	174,8	158,4	16,4	9%
C22-2	173,7	156,3	17,4	10%
C22-3	172,4	156,2	16,2	9%
C22-4	176,7	160,4	16,3	9%
C22-5	174,7	157,3	17,4	10%
C22-6	175,1	159,2	15,9	9%
C22-7	172,4	152,9	19,5	11%
C22-8	176,3	158,3	18	10%
C22-9	171,9	154,7	17,2	10%
C22-10	176,2	158	18,2	10%

Porcentaje Contenido Humedad Serie C22 **10%**

Fuente: Autor

4.2.6 Análisis de resultados serie C22

Las muestras que mayor tensión máxima han conseguido son las C22-10, la C22-1 y la C22-9 (18.28 N/mm², 16.89 N/mm² y 16.34 N/mm², respectivamente). El valor medio de la máxima tensión de compresión ($\sigma_{c,max,media}$), que soportan las

muestras es de 16.13 Mpa, la desviación típica o estándar es de 1.30 Mpa y el coeficiente de variación es de 0.081.

Las deformaciones longitudinales unitarias (δ/L) mayores se registran en las muestras C22-1 (0.348mm/mm) y C22-5 (0.345mm/mm), y la menor en la muestra C22-4 (0.228mm/mm).

Tabla 4-14. Resumen de análisis de resultados

Código de Muestra	Diagrama Tensión-Deformación						Modo de Rotura					
	Deformación Longitudinal Unitaria			Tensión Máxima			Forma de Rotura				Número de Fisuras	
	Baja	Media	Elevada	Baja	Media	Elevada	Vertical	Diagonal	Doble Diagonal (Cruz)	Vertical y Diagonal	Una	Múltiples
C22-1			X			X	X				X	
C22-2								X			X	
C22-3		X			X			X			X	
C22-4	X				X		X				X	
C22-5			X		X				X			X
C22-6		X			X					X		X
C22-7		X			X					X		X
C22-8		X			X		X	X				X
C22-9		X				X		X			X	
C22-10		X				X		X			X	

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos en todo a lo que se refiere a los ensayos de resistencia a compresión paralela a fibra son comparables a otros estudios ya realizados mediante ensayos con probetas de altura y sección transversal similares.

En un estudio realizado por Correal y colaboradores (Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014) concluyen con valor promedio de resistencia a compresión paralela a las fibras de 62MPa, después de realizar 20 ensayos de probetas elaborados con un 50% de urea formaldehído y 50% de melanina formaldehído.

Cortés y colaboradores (Cortes, Lozano, Rusinque, & Takeuchi, 2010) obtienen valores de resistencia a compresión paralela a las fibras de 41.9MPa, 42.4MPa, 50.5MPa y 37.5MPa. Mediante ensayos de muestras de sección cuadrada de 50 mm de lado y altura de 200 mm de bambú guadua laminado, además estaban elaboradas con urea melanina formaldehído, fenol resorcinol, Polivinil Acetato (PVA) y cola de origen animal respectivamente.

López (López, 2008) después de sus ensayos en los que analizaron 33 probetas fabricadas con Polivinil Acetato (PVA), halló un valor promedio de 47.6 MPa con un coeficiente de variación de 0.054.

Barreto (Barreto, 2003), una vez ensayadas 11 probetas elaboradas con urea formaldehído (Pol 216), concluyó que el valor promedio de la resistencia de compresión paralela a las fibras de sus muestras era 47.1 MPa, con un valor máximo de 70.4 MPa y un valor mínimo de 17.9 MPa y un coeficiente de variación de 0.36. Por otro lado, también ensayó 20 probetas elaboradas con Policloropreno vulcanizado con polisicianato (PC3000), y halló un valor promedio de 46.5 MPa, con un valor máximo de 52.2 MPa y un valor mínimo de 40.0 MPa con un coeficiente de variación de 0.36. En este caso, se manifestó el efecto del pandeo en las láminas.

Li y colaboradores (Li, Zhang, Huang, & Deeks, 2013), realizaron ensayos con probetas prismáticas de Bambú Mosso (*Phyllostachys pubescens*), con sección cuadrada de 100 mm y de alto 300 mm, elaborados con fenol, se hallaron valores de resistencia a compresión paralela a las fibras promedio de 57.9 MPa, 61.2 MPa

y 62.7 MPa, para probetas elaboradas con bambú de la parte baja, media y alta respectivamente. En cada grupo de muestras se ensayaron 8 probetas. Los coeficientes de variación fueron 0.03, 0.08 y 0.11 por cada grupo respectivamente.

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*.

En lo que se refiere al valor medio de del módulo de Young a compresión se ha obtenido un valor de 326 MPa con un coeficiente de variación de 0.448. 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.

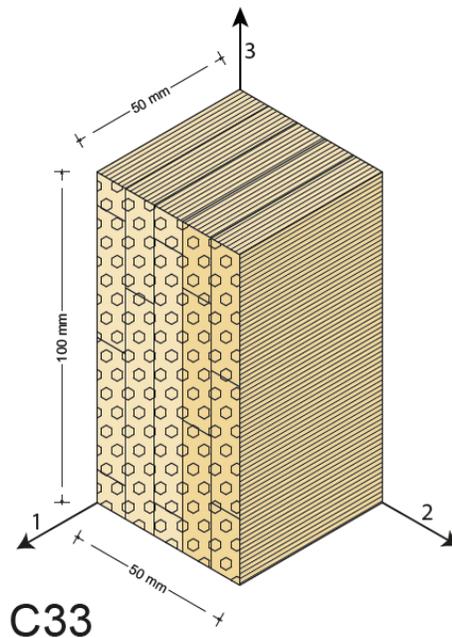
4.3 COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA PARALELA AL PLANO DE UNIÓN ENTRE TABLEROS EN PROBETAS SERIE C33

4.3.1 Descripción de los ensayos

El ensayo de compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros se lo realizó en 10 probetas correspondientes a la serie C33 y que fueron marcadas y enumeradas del 1 al 10.

Los ensayos fueron en una máquina universal de ensayos AG-X plus (Anexo B1 Certificado de Calibración) Las probetas se colocaron directamente en los platos de carga.

Figura 4-74 Probeta para ensayo de Compresión Perpendicular a la Fibra Paralela al Plano de y unión entre Tableros Serie C33.



Fuente: Autor

Cada probeta de la Serie C33 fue medida en alto, largo y ancho, con la finalidad de establecer su volumen y el área resistente a compresión. (Ver Tabla 4-15)

Tabla 4-15. Diferentes características geométricas utilizadas para realizar el ensayo de compresión perpendicular a las fibras (C33)

Muestras	Masa (g)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Volumen (mm ³)	Área Resistente (mm ²)
C33-1	174,40	50,87	49,17	99,74	249477,46	5073,77
C33-2	192,20	50,76	48,96	99,55	247402,62	5053,16
C33-3	170,20	51,19	49,85	100,16	255590,44	5127,19
C33-4	172,50	50,89	48,48	99,06	244395,60	5041,16
C33-5	177,80	52,30	49,30	99,85	257452,24	5222,16
C33-6	191,20	50,58	50,25	99,28	252334,52	5021,58
C33-7	191,10	50,70	49,87	99,22	250868,74	5030,45
C33-8	178,10	51,05	49,42	99,35	250649,22	5071,82
C33-9	181,00	49,53	49,70	98,51	242496,25	4879,20
C33-10	192,20	51,07	49,91	99,02	252392,44	5056,95

Fuente: Autor

Adicionalmente a las 10 probetas se les colocó un deformímetro unidireccional (Ver Figura 4.3.2) en las dos caras laterales, es decir, derecha e izquierda para definir el módulo elástico transversal.

Figura 4-75. Ubicación de deformímetros en las Probetas ensayadas a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probetas Series C33



Fuente: Autor

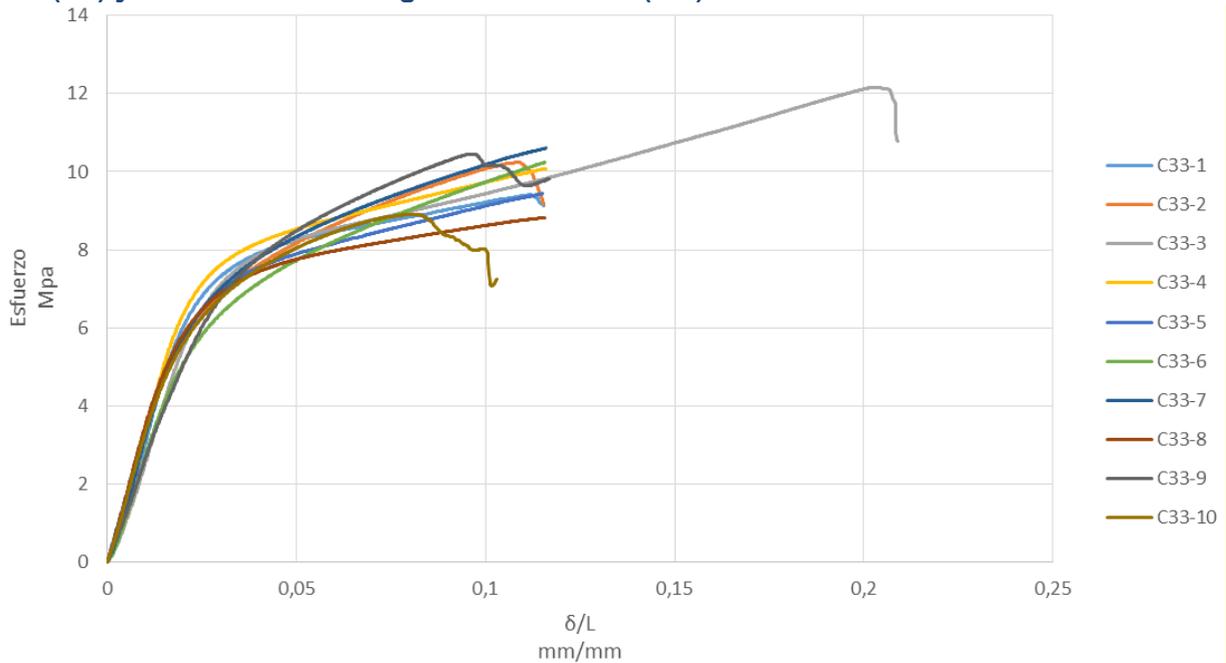
4.3.2 Cálculo de resultados

Para obtener el esfuerzo de compresión que sufre cada probeta se hace uso de la Ecuación 4-5, la cual nos relaciona la tensión resultante (σ_c) con el cociente de la fuerza aplicada (P) y el área de referencia (A), que en este caso concreto y al tratarse de un ensayo de compresión, es el área de la muestra perpendicular a la fuerza aplicada.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 4-5}$$

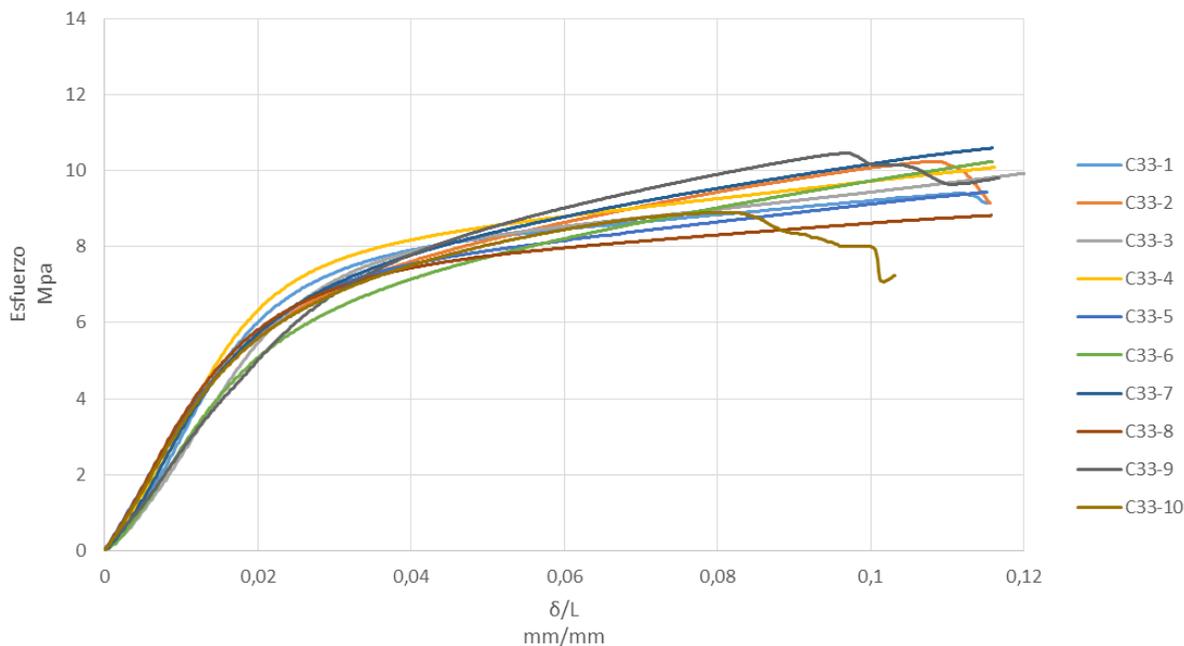
Para poder comparar el comportamiento de las 10 muestras tipo C33, se compara la relación de la tensión normal al área de referencia aplicada (σ_c) con la deformación longitudinal unitaria (δ/L). Se decide trabajar con la deformación longitudinal unitaria y no con la deformación registrada, porque las dimensiones de las 10 muestras no coinciden, y este parámetro nos indica en forma de proporción o porcentaje la deformación que se va registrando (δ) respecto a la dimensión inicial (L), lo que nos permite poder comparar el comportamiento de las 10 muestras. En la Figura 4-75, se representa dicha relación, situando en el eje vertical la tensión normal al área de referencia aplicada (σ_c) y en el eje horizontal la deformación longitudinal unitaria (δ/L), para diferentes niveles de carga. En este caso, la deformada registrada (δ) coincide con el desplazamiento del plato de carga.

Figura 4-76. Relación entre el esfuerzo o tensión normal al área de referencia (σ_c) y la deformación longitudinal unitaria (δ/L).



Fuente: Autor

Figura 4-77. Relación entre el esfuerzo o tensión normal al área de referencia (σ) y la deformación longitudinal unitaria (δ/L), con mayor detalle en la zona donde confluyen la mayoría de gráficos



Fuente: Autor

Si se analiza el gráfico, queda patente un comportamiento similar de las 10 muestras, en todas ellas podemos observar un tramo inicial cuyo comportamiento se puede asumir a lineal, ya que la relación entre tensión y deformación es prácticamente lineal. Posteriormente se da paso a una fase en la que la pendiente de la función varia disminuyendo paulatinamente hasta alcanzar el valor máximo de tensión ($\sigma_{c,max}$), esto significa que en esta fase el material tiene un comportamiento plástico, ya que la relación tensión-deformación es no lineal.

Después de alcanzar dicho valor, solo las muestras C33-2, C33-3, C33-9 y la C33-10 pasan a una fase en la que la deformación sigue aumentando a la vez que se disminuye la tensión, esta disminución tiene dos fases diferenciadas, en el resto de muestras la tensión máxima y de rotura coinciden. Durante la carga y antes de

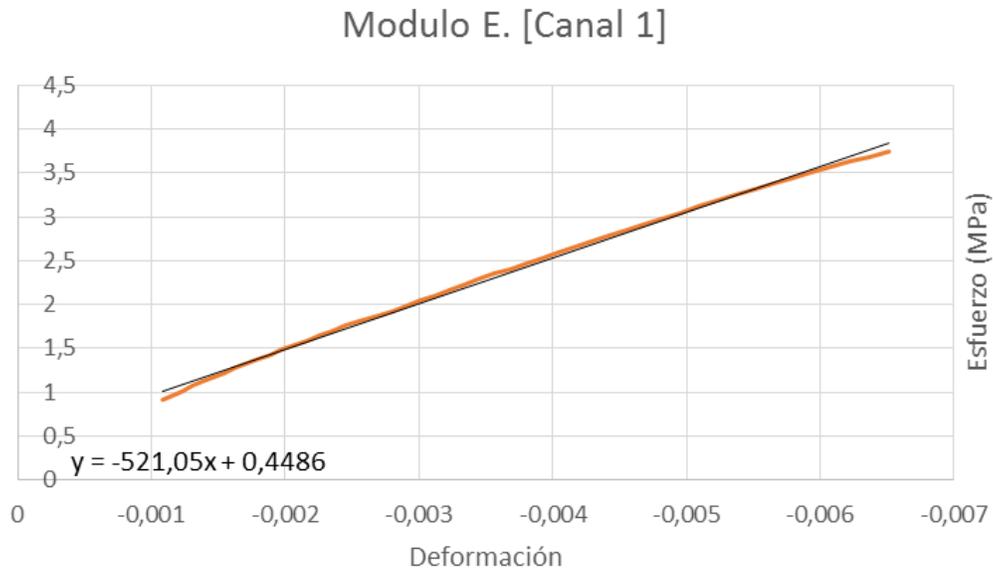
alcanzar el esfuerzo máximo, la variabilidad de comportamientos no es destacable, sólo el hecho de que la deformación de rotura que experimenta la muestra C33-3 es aproximadamente el doble que el resto.

La resistencia a compresión de cada probeta se obtuvo mediante la Ecuación 4-6, donde P_{max} es la máxima fuerza que se aplica y A es el área de la sección transversal de cada probeta. Dicho esfuerzo se obtuvo en el límite de proporcionalidad σ_{cLP} , como el 75% de la resistencia a compresión.

$$\sigma_{c,max} = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{Ecuación 4-6}$$

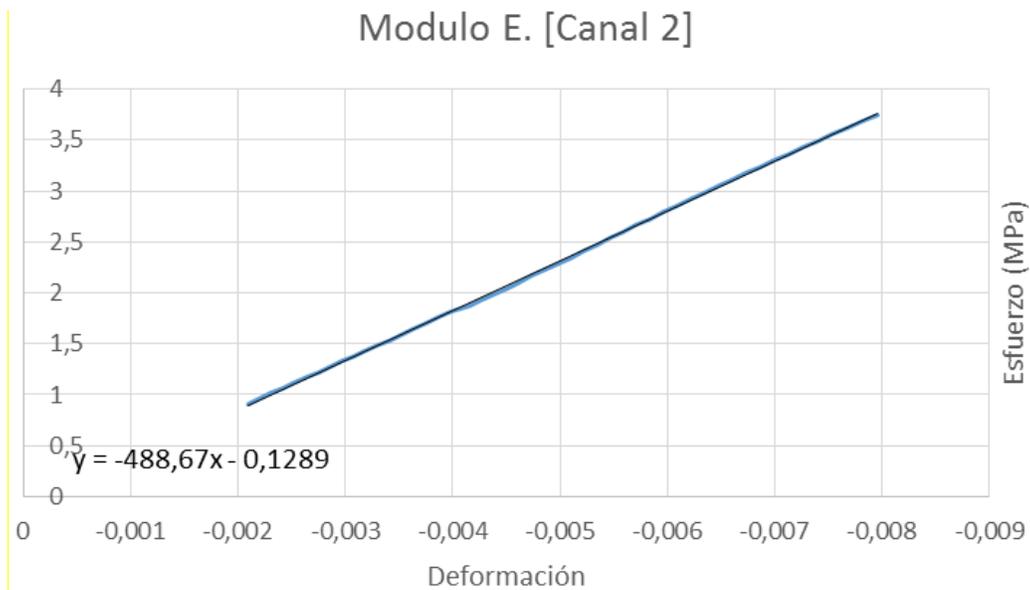
Respecto al módulo de Young o módulo de deformación longitudinal (E), se han registrado dos valores, E_1 y E_2 , cada uno según los datos obtenidos de cada deformímetro situado en los dos laterales de las 10 muestras, asumiendo como el módulo de Young de la probeta (E) el valor medio de los dos valores. Los valores E_1 y E_2 , se obtuvieron como la pendiente de la regresión lineal de los valores de la curva esfuerzo-deformación comprendidos entre el 10% y el 40% del esfuerzo máximo (En las Figuras 4-77 y 4-78 se ejemplifica lo dicho para la probeta C33-1).

Figura 4-78. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, datos registrados con el deformímetro 1, muestra C33-1



Fuente: Autor

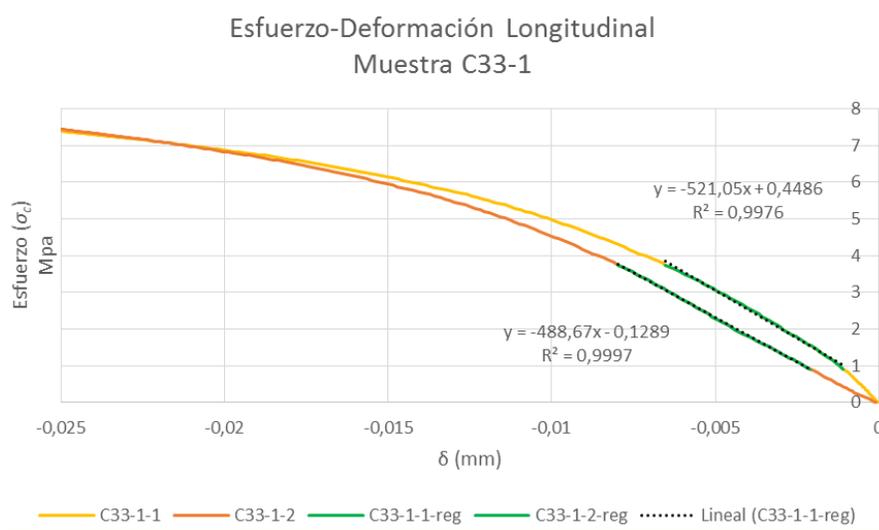
Figura 4-79. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, datos registrados con el deformímetro 2, muestra C33-1



Fuente: Autor

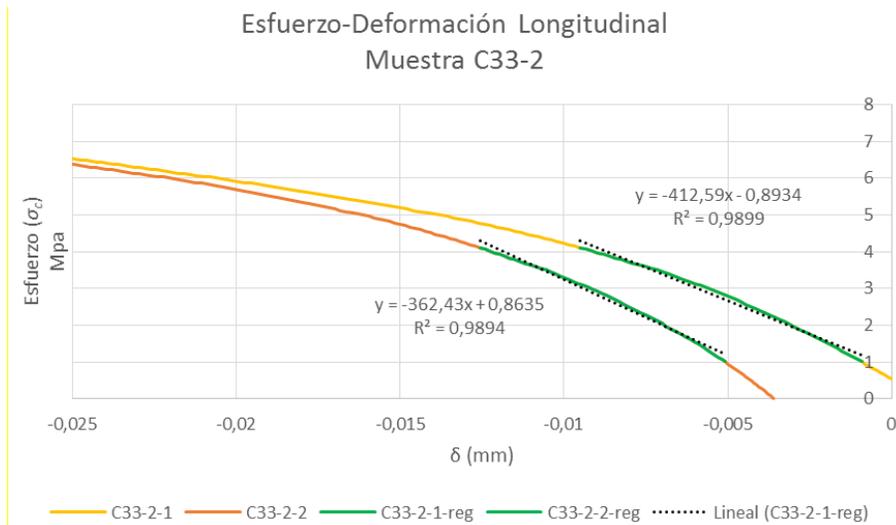
En ambas imágenes podemos ver la gráfica que relaciona las tensiones ejercidas (σ_c) con las correspondientes deformaciones longitudinales (δ), en ambas gráficas sólo se grafican los valores que corresponden al conjunto de tensiones que están comprendidas entre el 10% y el 40% de la tensión máxima ($\sigma_{c,max}$) y sus correspondientes deformaciones. También se puede ver la gráfica y expresión matemática de la recta resultante de la regresión lineal de la nube de puntos registrados.

Figura 4-80. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-1



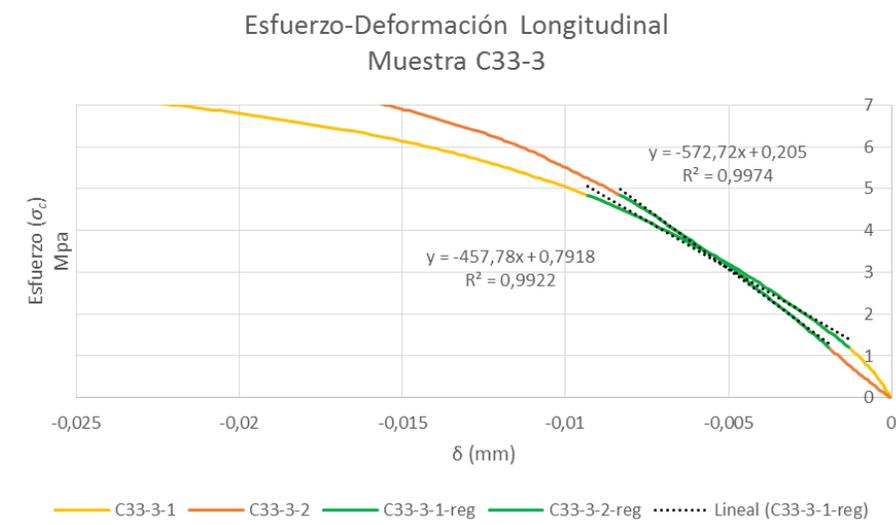
Fuente: Autor

Figura 4-81. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-2



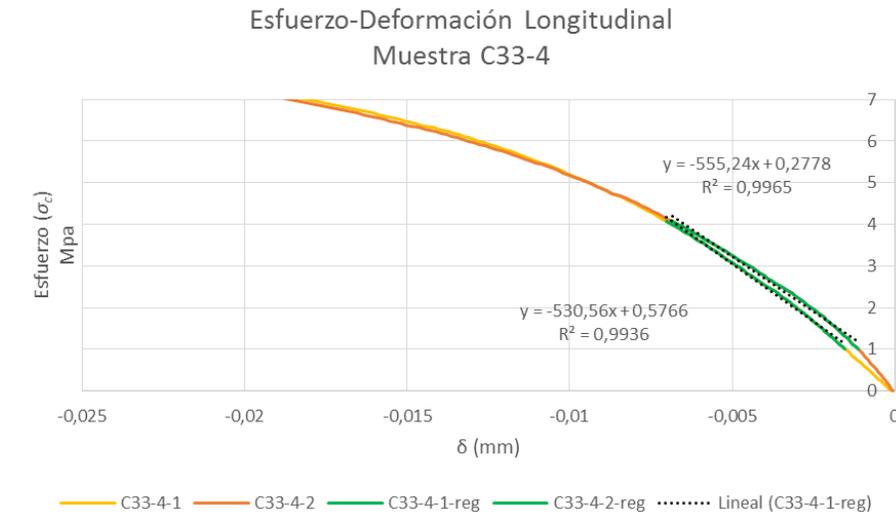
Fuente: Autor

Figura 4-82. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-3



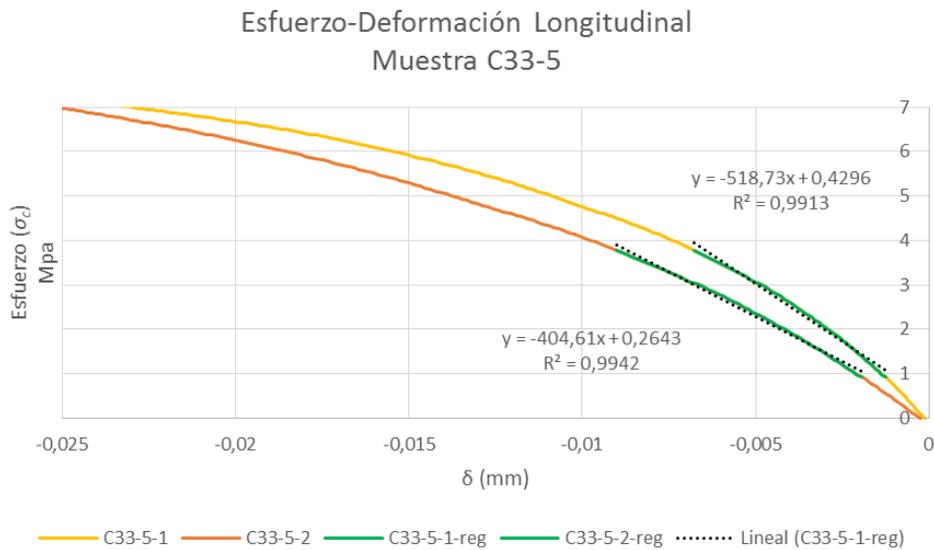
Fuente: Autor

Figura 4-83. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-4



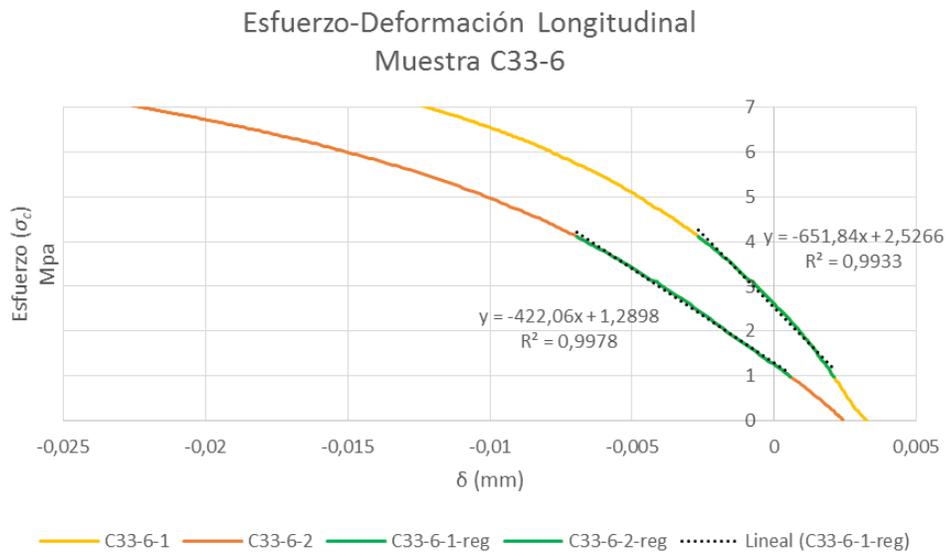
Fuente: Autor

Figura 4-84. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-5



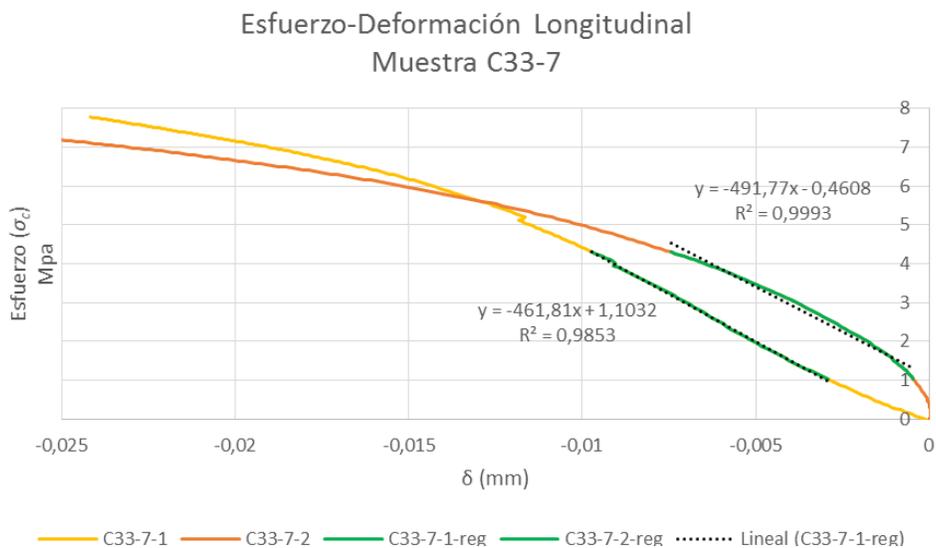
Fuente: Autor

Figura 4-85. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-6



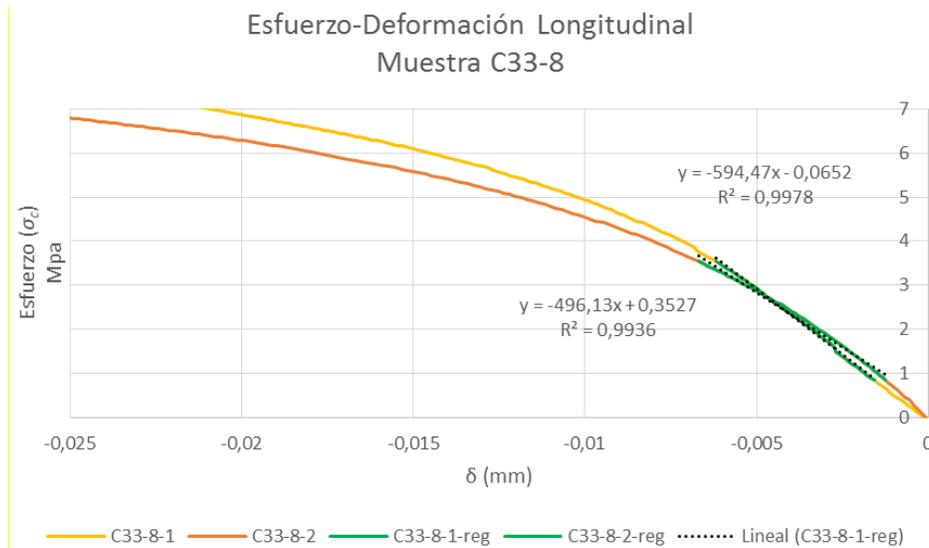
Fuente: Autor

Figura 4-86. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-7



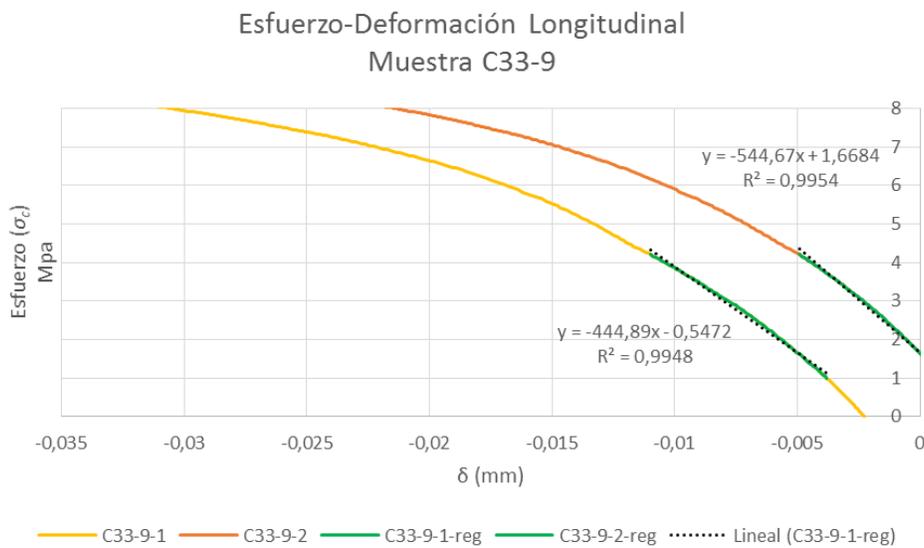
Fuente: Autor

Figura 4-87. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-8



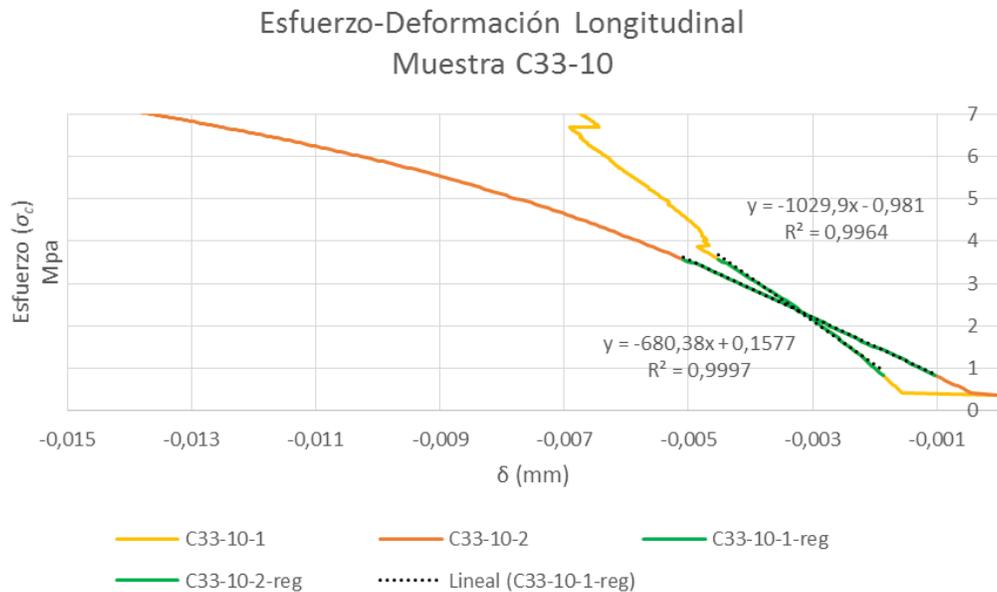
Fuente: Autor

Figura 4-88. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-9



Fuente: Autor

Figura 4-89. Relación esfuerzo-deformación longitudinal, comparativa de ambos deformímetros, muestra C33-10



Fuente: Autor

En las tablas anteriores podemos ver la representación de parte de la relación tensión deformación de todas las probetas C33, en estos gráficos se representan los datos registrados por el deformímetro 1 (C33-X-1) y por el deformímetro 2 (C33-X-2), además se marca en verde el tramo de los datos considerados para realizar la regresión lineal de los puntos para obtener el valor del módulo de Young según el deformímetro 1 (C33-X-1-reg) y el deformímetro 2 (C33-X-2-reg). En líneas a puntos negros se marca la recta resultante de la regresión lineal con su correspondiente expresión matemática y el valor de R2. En la siguiente tabla se resume los valores del módulo de Young obtenidos por ambos deformímetros (E1 y E2) y el valor medio (E) de cada probeta.

Tabla 4-16. Valores de módulo de Young de cada deformímetro y el valor medio para cada probeta

Probeta	E_1 (Mpa)	E_2 (Mpa)	E (Mpa)
C33-1	521,05	488,67	505
C33-2	365,14	415,41	390
C33-3	457,78	572,72	515
C33-4	555,24	530,56	543
C33-5	512,15	400,61	456
C33-6	634,32	414,99	525
C33-7	492,39	454,42	473
C33-8	594,47	496,13	545
C33-9	444,98	541,74	493
C33-10	1025,4	679,96	853

Fuente: Autor

En la siguiente tabla se resumen los valores de resistencia a compresión, de módulo Young medio y de densidad de cada muestra.

El valor medio de la resistencia a compresión es de 10.12 MPa, con una desviación típica de 0.99 MPa y un coeficiente de variación de 0.099. Por otro lado, el valor medio del módulo de Young medio de los deformímetros es de 530 MPa, con una desviación típica de 122.42 MPa y un coeficiente de variación de 0.231.

En todas las regresiones lineales realizadas para obtener el módulo de Young, se han obtenido coeficientes de correlación mayores de 0.9.

Tabla 4-17. Principales parámetros físico-mecánicos de las muestras C33

Muestras	Densidad (g/mm ³)	Densidad (Kg/m ³)	σ_c (N/mm ²)	E (Mpa)
C33-1	0,00069906	699,06	9,41	505
C33-2	0,00077687	776,87	10,23	390
C33-3	0,00066591	665,91	12,16	515
C33-4	0,00070582	705,82	10,21	543
C33-5	0,00069061	690,61	9,51	456
C33-6	0,00075772	757,72	10,64	525
C33-7	0,00076175	761,75	10,80	473
C33-8	0,00071055	710,55	8,86	545
C33-9	0,0007464	746,40	10,46	493
C33-10	0,00076151	761,51	8,91	853

Fuente: Autor

4.3.3 Observaciones durante el ensayo

Se puede observar un patrón de rotura en todas las probetas ensayadas en esta serie, ya que en todos los casos se produce una o varias fisuras relativamente paralelas al esfuerzo, en algunos casos tiende a ser una diagonal, esto se debe a que la fisura se propagó por la parénquima en las zonas de menor presencia de fibras. La principal diferencia en la forma de rotura respecto la serie C22, es que en esta serie el fallo del adhesivo se presenta en la mayoría de muestras, formándose una fisura por el plano de unión de las latillas, esto provoca que en algunos casos las latillas exteriores se desprendan. La fisura o fisuras relativamente paralelas al esfuerzo se producen por las tracciones perpendiculares al esfuerzo generadas por el efecto Poisson, pero en algunos casos aparecen fisuras perpendiculares al esfuerzo acompañadas por un abombamiento lateral de la muestra, esto significa que la muestra está fallando por el efecto de pandeo.

Figura 4-90. Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-1 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-91. Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-2 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-92. Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-3 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-93. Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-4 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-94. Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-5 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-95. Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-6 estado final



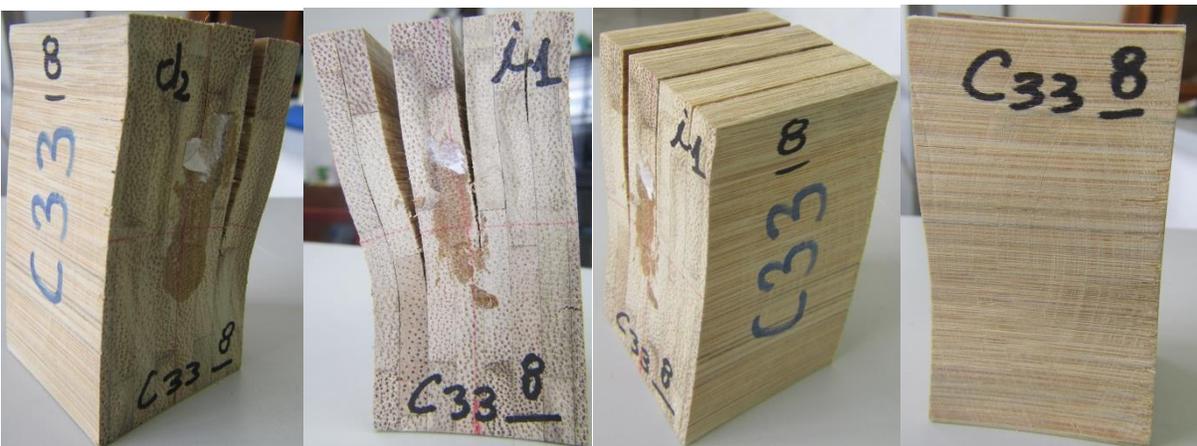
Fuente: Autor

Figura 4-96. Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-7 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-97. Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-8 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-98. Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-9 estado final



Fuente: Autor

Figura 4-99. Ensayo a compresión perpendicular a la fibra paralela al plano de unión entre tableros en probeta C33-10 estado final



Fuente: Autor

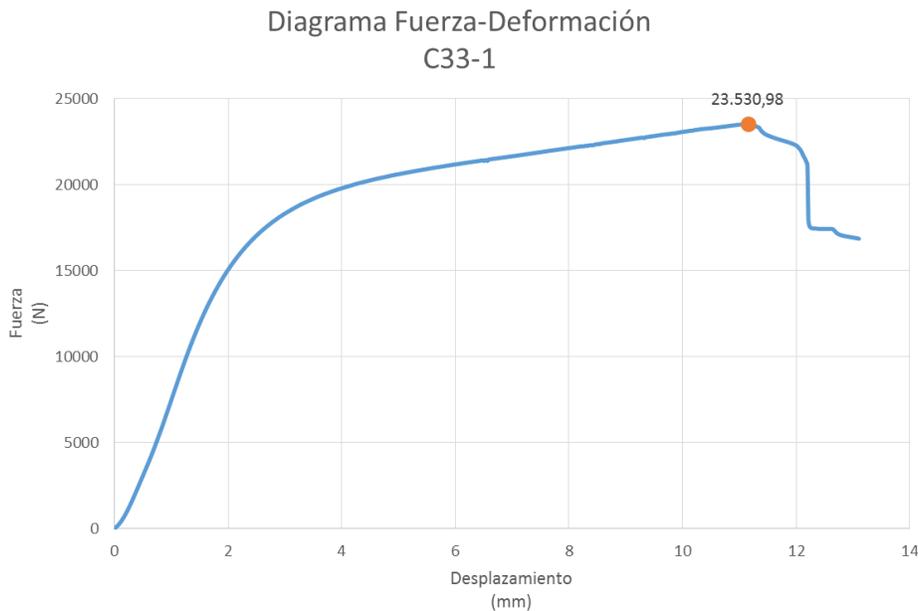
Como se ha dicho anteriormente, hay muestras que han sufrido una rotura según fisuras paralelas al esfuerzo como las muestras C33-1, C33-5 y C33-8, otras han sufrido la rotura según fisuras diagonales como las muestras C33-6, C33-7 y C33-9, y otras según fisuras con tramos paralelos al esfuerzo y tramos diagonales

como las muestras C33-2 y C33-10. En el caso de las muestras C33-3 y C33-4 no es fácil clasificar que tipo de fisura poseen.

Las muestras que sufren de pandeo son las C33-5, C33-6, C33-7 y C33-9, las muestras en las que la rotura es por falla completa o parcial del adhesivo son las C33-1, C33-2, C33-3, C33-4, C33-5 y C33-8. Las muestras que poseen pocas fisuras (una o dos) son las C33-2, C33-3 y C33-4, el resto de muestras poseen múltiples fisuras.

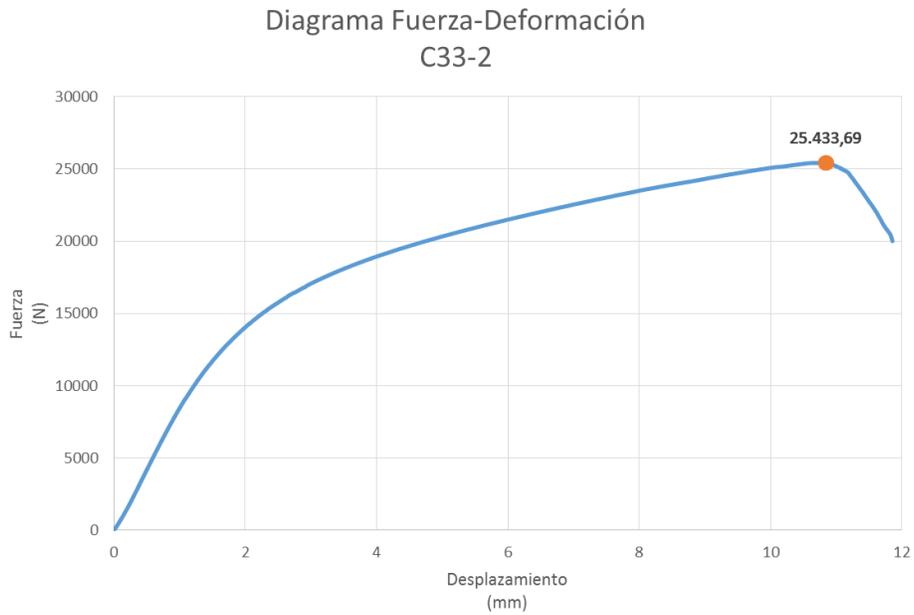
En las gráficas carga-desplazamiento se puede ver el comportamiento de la muestra a lo largo de todo el ensayo y mediante éstas, se pueden comparar entre ellas y sacar conclusiones.

Figura 4-100. Relación carga-desplazamiento, muestra C33-1



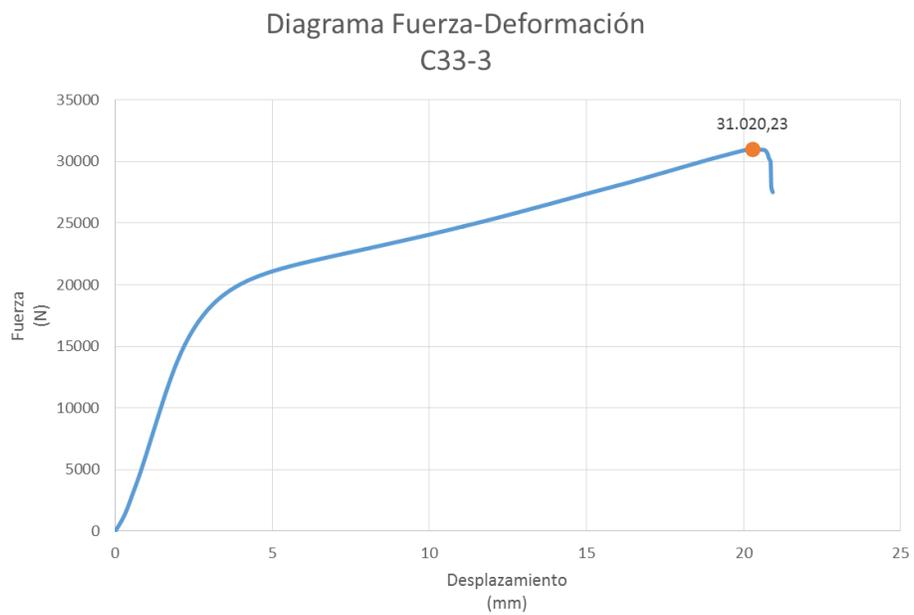
Fuente: Autor

Figura 4-101. Relación carga-desplazamiento, muestra C33-2



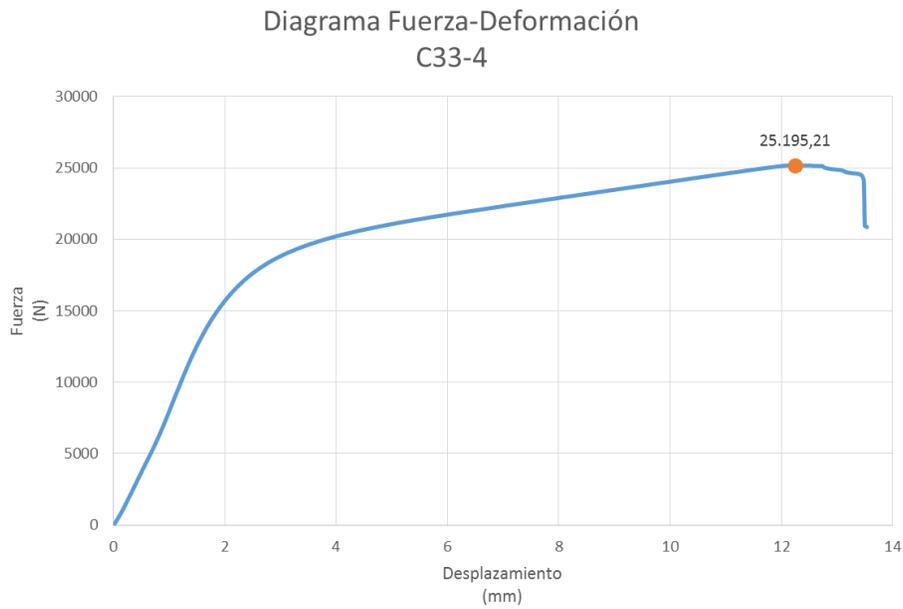
Fuente: Autor

Figura 4-102. Relación carga-desplazamiento, muestra C33-3



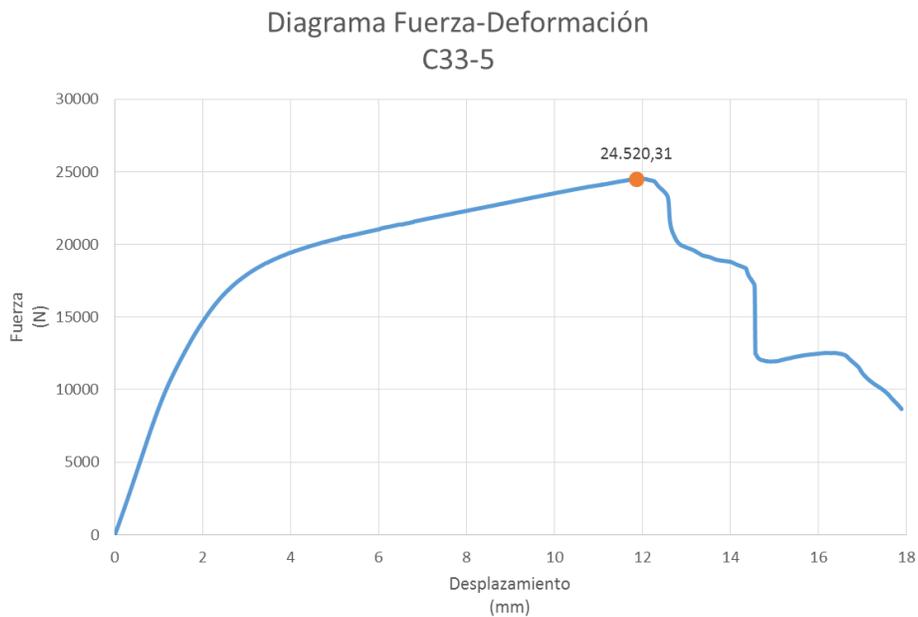
Fuente: Autor

Figura 4-103. Relación carga-desplazamiento, muestra C33-4



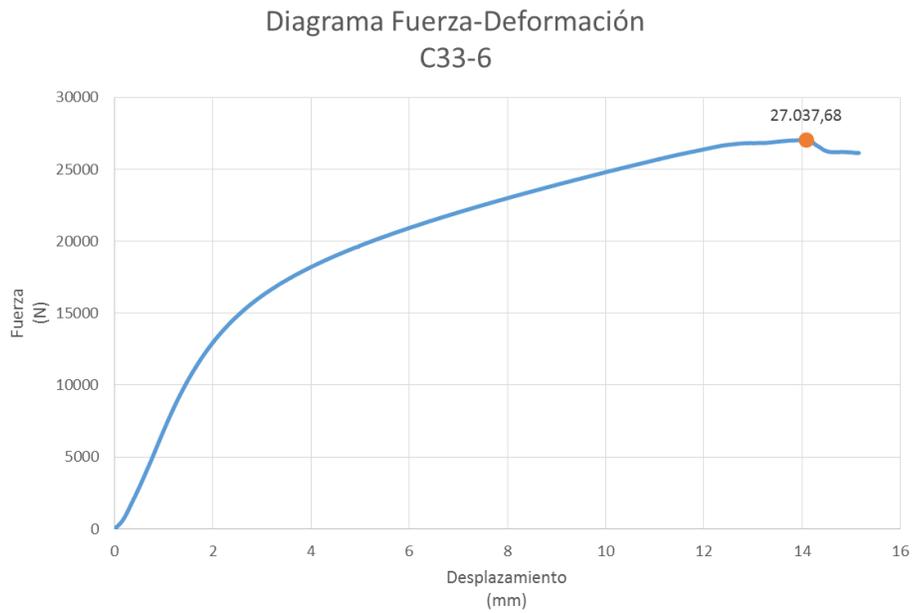
Fuente: Autor

Figura 4-104. Relación carga-desplazamiento, muestra C33-5



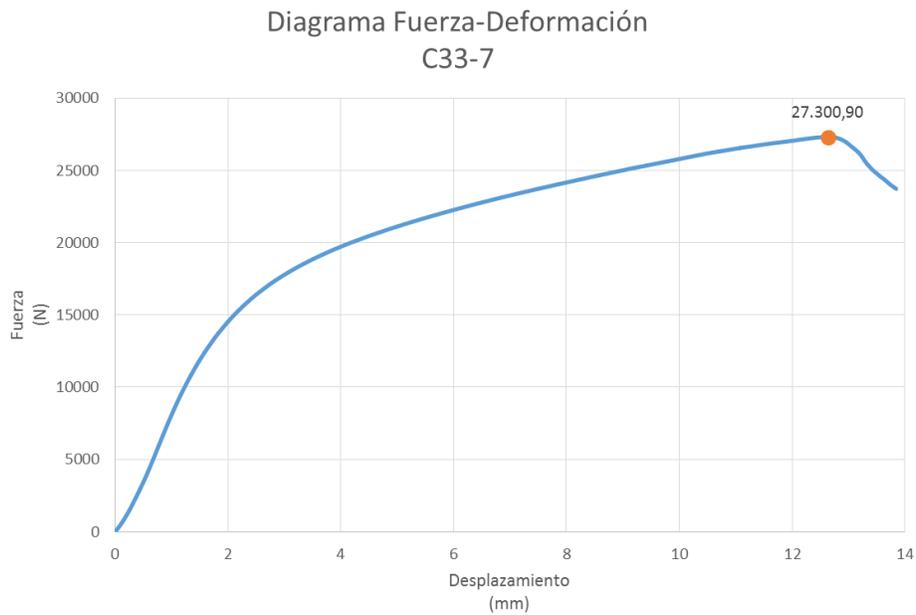
Fuente: Autor

Figura 4-105. Relación carga-desplazamiento, muestra C33-6



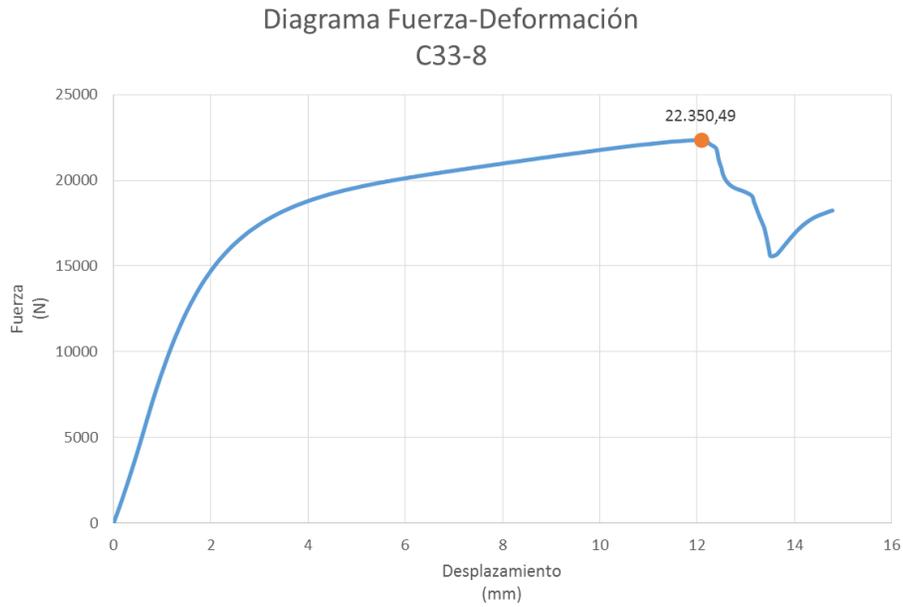
Fuente: Autor

Figura 4-106. Relación carga-desplazamiento, muestra C33-7



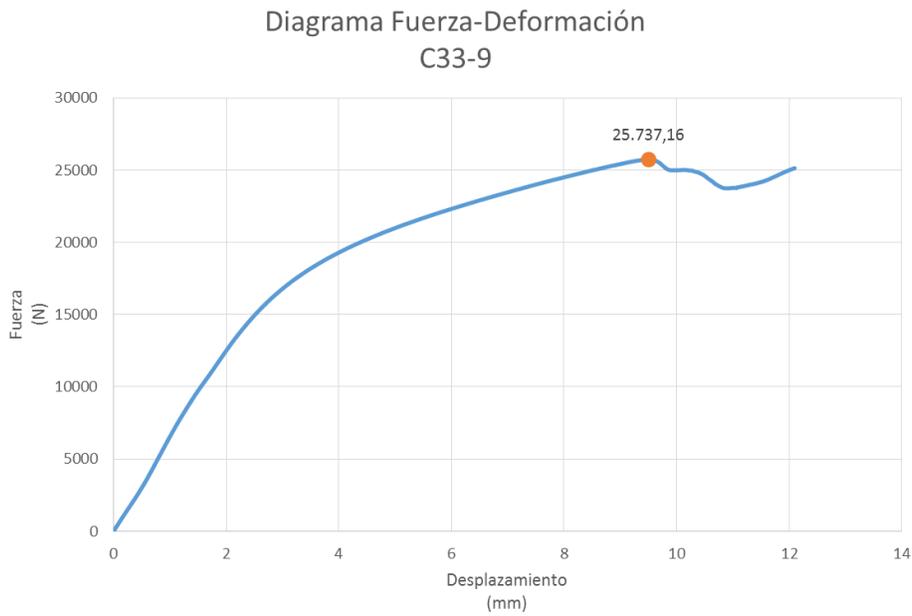
Fuente: Autor

Figura 4-107. Relación carga-desplazamiento, muestra C33-8



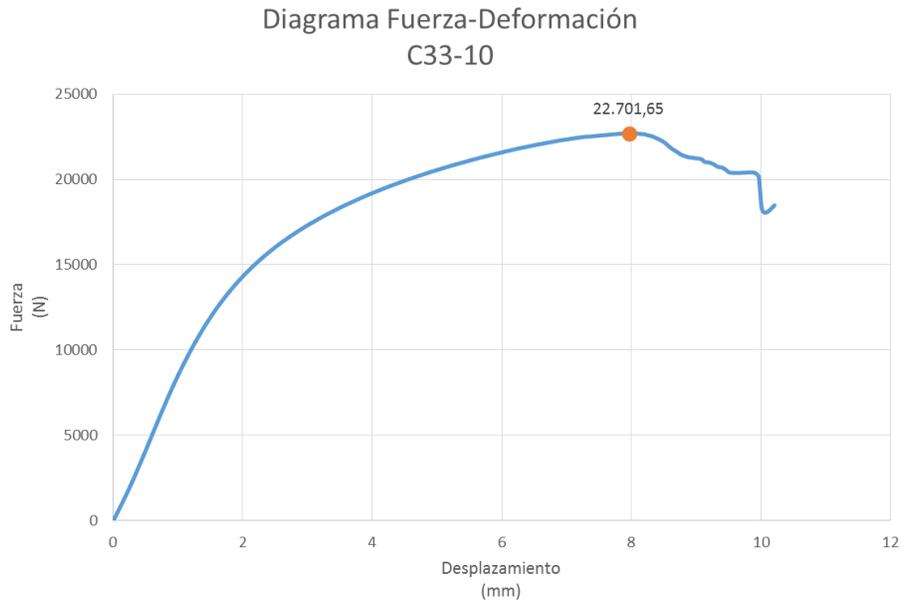
Fuente: Autor

Figura 4-108. Relación carga-desplazamiento, muestra C33-9



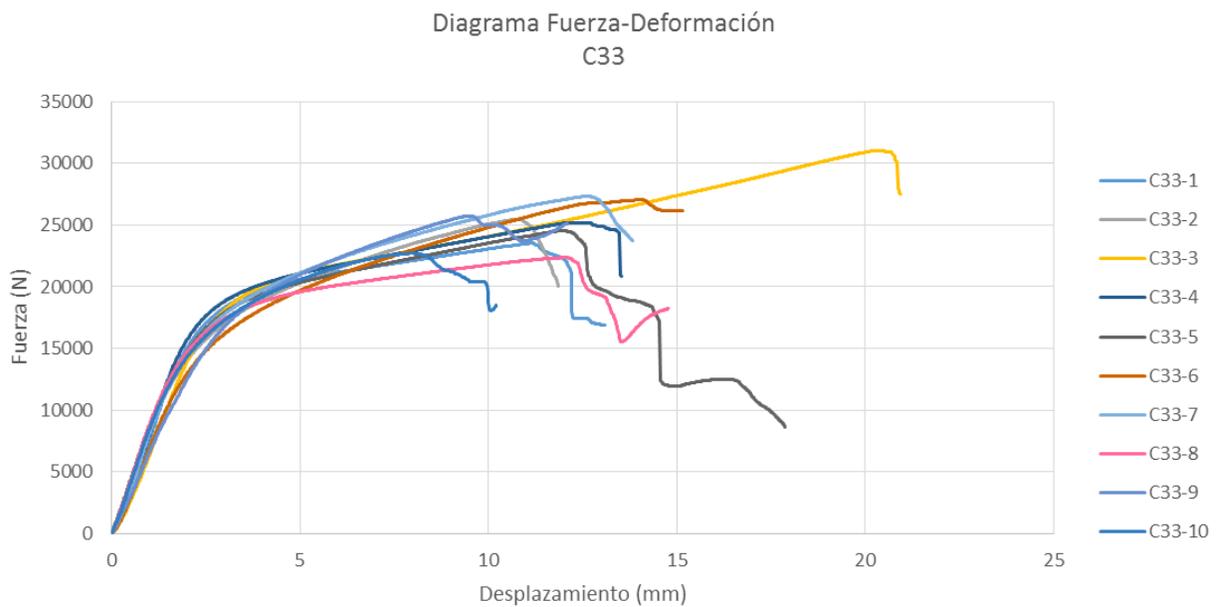
Fuente: Autor

Figura 4-109. Relación carga-desplazamiento, muestra C33-10



Fuente: Autor

Figura 4-110. Relación carga-desplazamiento, muestras C33



Fuente: Autor

Si se analizan detenidamente las anteriores gráficas, se puede observar que todas las muestras poseen un diagrama el cual se desarrolla con las mismas fases, una primera fase que se puede asimilar a lineal, por lo que el material posee un comportamiento elástico, esto hasta llegar a un siguiente tramo curvo en el que el comportamiento del material pasa a ser plástico, en esta curva se alcanza el valor de carga máxima que es capaz de soportar la muestra (se marca en color naranja), a partir de este punto se registra una fase de descarga en la que la carga va disminuyendo pero la deformación aumenta, esto se debe a que los enlaces atómicos de las moléculas que conforman el material ya han roto, pero el material aún puede resistir cargas menores hasta que la rotura del material es completamente visible (lo que se le llama carga de ruptura), en estas muestras, la fase entre la carga máxima y la carga de ruptura es bastante corta y con un trazado bastante “brusco”.

Las diferencias más notables residen en las deformaciones de rotura, ya que las muestras C33-3 y la C33-5 poseen las deformaciones de rotura más elevadas, la muestra C33-10 registra la menor deformación (alrededor de un 50% respecto la muestra C33-3), y el resto de muestras registran unas deformaciones intermedias.

4.3.4 Determinación de la densidad Serie C33

4.3.4.1 Descripción de los ensayos

La densidad es una magnitud intensiva que relaciona la masa de un cuerpo determinado y su volumen. Para obtener la densidad de las muestras de la serie C33, se procedió a obtener la geometría de cada una de las muestras midiendo el largo, el ancho y la profundidad, además de obtener su correspondiente masa, pesando cada probeta en una balanza digital con una precisión de 0.01g. Estos dos procedimientos se llevaron a cabo previos al ensayo de rotura por compresión perpendicular a las fibras.

Tabla 4-18. Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie C33

Muestras	Masa (g)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Volumen (mm ³)
C33-1	174,40	50,87	49,17	99,74	249477,46
C33-2	192,20	50,76	48,96	99,55	247402,62
C33-3	170,20	51,19	49,85	100,16	255590,44
C33-4	172,50	50,89	48,48	99,06	244395,60
C33-5	177,80	52,30	49,30	99,85	257452,24
C33-6	191,20	50,58	50,25	99,28	252334,52
C33-7	191,10	50,70	49,87	99,22	250868,74
C33-8	178,10	51,05	49,42	99,35	250649,22
C33-9	181,00	49,53	49,70	98,51	242496,25
C33-10	192,20	51,07	49,91	99,02	252392,44

Fuente: Autor

4.3.4.2 Resultados

Una vez obtenidos los resultados del ensayo de densidad, que se aportan en la siguiente tabla, se obtiene un valor de densidad media de $0.000727623 \text{ g/mm}^3$ o 727.62 Kg/m^3 , con una desviación estándar o típica de $3.77 \times 10^{-5} \text{ g/mm}^3$ o 37.65 Kg/m^3 , y con un coeficiente de variación (se recuerda que es el cociente entre la variación estándar y la densidad media) de 0.052.

Tabla 4-19. Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie C33

Muestras	Densidad (g/mm^3)	Densidad (Kg/m^3)
C33-1	0,00069906	699,06
C33-2	0,00077687	776,87
C33-3	0,00066591	665,91
C33-4	0,00070582	705,82
C33-5	0,00069061	690,61
C33-6	0,00075772	757,72
C33-7	0,00076175	761,75
C33-8	0,00071055	710,55
C33-9	0,00074640	746,40
C33-10	0,00076151	761,51

Fuente: Autor

4.3.5 Determinación del contenido de humedad Serie C33

4.3.5.1 Descripción de los ensayos

Para determinar el contenido de humedad de las probetas de la serie C33 se ha procedido de igual manera que en la Serie C11 y Serie C22, es decir, después de

realizado el ensayo de compresión, se ha pesado cada probeta, en una balanza digital con aproximación de 0.01g, registrándose los datos en una tabla antes de entrar al horno. Ingresaron al horno a una temperatura de 103,8° C. A las 48 horas de permanecer en el horno se pesaron cada una de las probetas, registrándose su peso final en la correspondiente tabla. (Ver Tabla 4-20)

4.3.5.2 Resultados

En la Tabla 4.1.1 se detallan los valores de contenido de humedad de cada una de las probetas de la serie C22. El contenido de Humedad promedio de la Serie C11 fue de 10%, con una desviación estándar de 0.67% y un coeficiente de variación del 0.067.

Tabla 4-20. Determinación del Contenido de Humedad serie C33.

Porcentaje Contenido Humedad Serie C33

Probeta Identificación	Peso Antes horno	Peso Final	Diferencia de Peso	Porcentaje Diferencial
Serie	g	g	g	%
C33-1	174,4	155,8	18,6	11%
C33-2	192,2	172,6	19,6	10%
C33-3	170,2	153,3	16,9	10%
C33-4	172,5	156,1	16,4	10%
C33-5	177,8	159,5	18,3	10%
C33-6	191,2	171,8	19,4	10%
C33-7	191,1	172,3	18,8	10%
C33-8	178,1	159,2	18,9	11%
C33-9	181	164,8	16,2	9%
C33-10	192,2	174,3	17,9	9%

Porcentaje Contenido Humedad Serie C33 **10%**

Fuente: Autor

4.3.6 Análisis de Resultados Serie C33

La muestra que mayor tensión máxima ha conseguido es la C33-3 con 12.16 N/mm² y la muestra con menor tensión máxima es la C33-8 con 8.86 N/mm², un 27% menor. El valor medio de la máxima tensión de compresión ($\sigma_{c,max,media}$), que soportan las muestras es de 10.12 Mpa, la desviación típica o estándar es de 0.998 Mpa y el coeficiente de variación es de 0.099.

La mayor deformación longitudinal unitaria (δ/L) se registra en la muestra C33-3 (0.209mm/mm), y la menor en la muestra C33-10 (0.103mm/mm).

Tabla 4-21. Resumen de análisis de resultados

Código de Muestra	Diagrama Tensión-Deformación						Modo de Rotura						
	Deformación Longitudinal			Tensión Máxima			Forma de Rotura				Número de Fisuras		
	Baja	Media	Elevada	Baja	Media	Elevada	Vertical	Diagonal	Vertical y Diagonal	Falla Adhesivo	Pandeo	Una o Dos	Múltiples
C33-1		X		X			X			X			X
C33-2	X				X				X	X		X	
C33-3			X			X				X		X	
C33-4		X			X					X		X	
C33-5			X	X			X			X	X		X
C33-6		X			X			X			X		X
C33-7		X			X			X			X		X
C33-8		X		X			X			X			X
C33-9	X				X			X			X		X
C33-10	X			X					X				X

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos en todo a lo que se refiere a los ensayos de resistencia a compresión paralela a fibra son comparables a otros estudios ya realizados mediante ensayos con probetas de altura y sección transversal similares.

En un estudio realizado por Correal y colaboradores (Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014) concluyen con valor promedio de resistencia a compresión

paralela a las fibras de 62MPa, después de realizar 20 ensayos de probetas elaborados con un 50% de urea formaldehído y 50% de melanina formaldehído.

Cortés y colaboradores (Cortes, Lozano, Rusinque, & Takeuchi, 2010) obtienen valores de resistencia a compresión paralela a las fibras de 41.9MPa, 42.4MPa, 50.5MPa y 37.5MPa. Mediante ensayos de muestras de sección cuadrada de 50 mm de lado y altura de 200 mm de bambú guadua laminado, además estaban elaboradas con urea melanina formaldehído, fenol resorcinol, Polivinil Acetato (PVA) y cola de origen animal respectivamente.

López (López, 2008) después de sus ensayos en los que analizaron 33 probetas fabricadas con Polivinil Acetato (PVA), halló un valor promedio de 47.6 MPa con un coeficiente de variación de 0.054.

Barreto (Barreto, 2003), una vez ensayadas 11 probetas elaboradas con úrea formaldehído (Pol 216), concluyó que el valor promedio de la resistencia de compresión paralela a las fibras de sus muestras era 47.1 MPa, con un valor máximo de 70.4 MPa y un valor mínimo de 17.9 MPa y un coeficiente de variación de 0.36. Por otro lado, también ensayó 20 probetas elaboradas con Policloropreno vulcanizado con polisicianato (PC3000), y halló un valor promedio de 46.5 MPa, con un valor máximo de 52.2 MPa y un valor mínimo de 40.0 MPa con un coeficiente de variación de 0.36. En este caso, se manifestó el efecto del pandeo en las láminas.

Li y colaboradores (Li, Zhang, Huang, & Deeks, 2013), realizaron ensayos con probetas prismáticas de Bambú Mosso (*Phyllostachys pubescens*), con sección

cuadrada de 100 mm y de alto 300 mm, elaborados con fenol, se hallaron valores de resistencia a compresión paralela a las fibras promedio de 57.9 MPa, 61.2 MPa y 62.7 MPa, para probetas elaboradas con bambú de la parte baja, media y alta respectivamente. En cada grupo de muestras se ensayaron 8 probetas. Los coeficientes de variación fueron 0.03, 0.08 y 0.11 por cada grupo respectivamente.

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 formaldehido 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*.

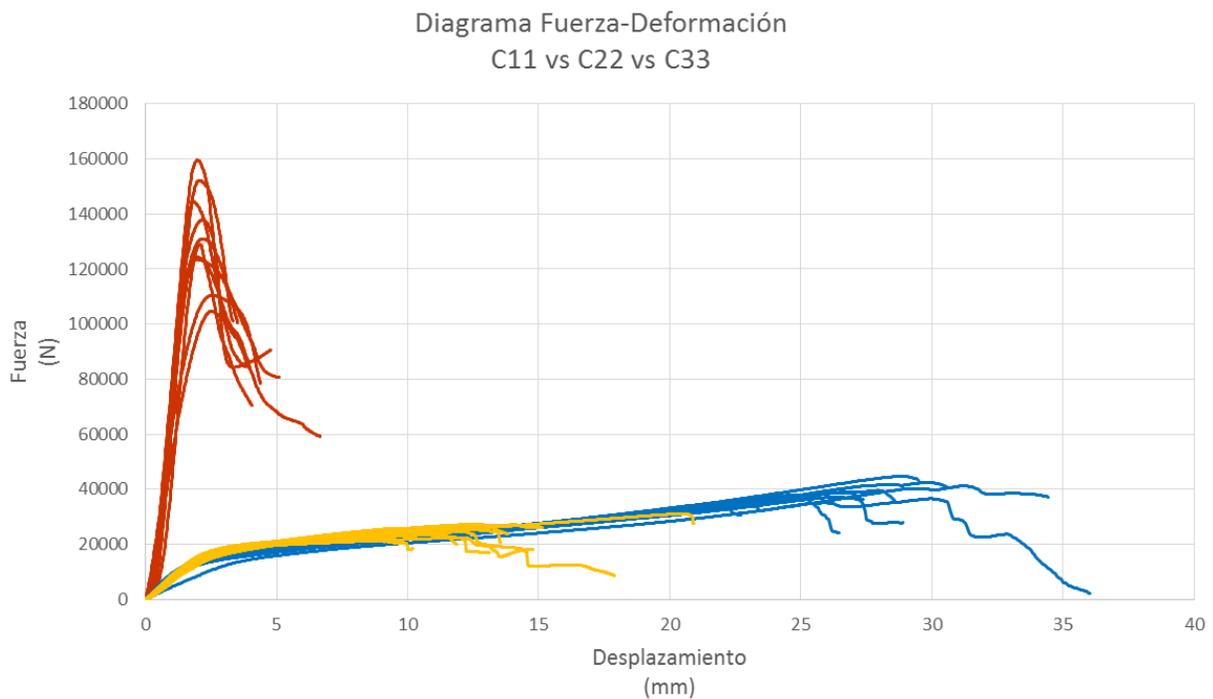
En lo que se refiere al valor medio de del módulo de Young a compresión se ha obtenido un valor de 326 MPa con un coeficiente de variación de 0.448. Correal y colaboradores (Correal et al., 2014) reportan un valor promedio de 32271MPa de los 20 ensayos de probetas mencionados. López (López, 2008) del 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.

4.4 RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Para poder realizar la comparativa de los resultados de las 3 series de compresión (C11, C22 y C33), se van a realizar unos gráficos y tablas específicos para realizar la comparativa de las dos series.

Se va a empezar la comparativa con la relación carga-desplazamiento:

Figura 4-111. Relación carga-desplazamiento de las 10 muestras C11 (rojo), las 9 muestras de C22 (azul) y las 10 muestras C33 (amarillo)



Fuente: Autor

Tabla 4-22. Valores medios de los principales parámetros resistentes de las 3 series de ensayo a compresión

Valores Medios	Series de Muestras de Compresión		
	C11	C22	C33
Carga Máxima (N)	131647,7	39137,92	25482,84
Tensión Máxima (MPa)	53,17	16,13	10,12
Desplazamiento Máximo (mm)	2,13	27,41	12,27
Carga de Rotura (N)	84414	30830,8	20560,1
Tensión de Rotura (MPa)	34,12	12,7	8,16

Fuente: Autor

De esta información podemos deducir que las muestras en las que las fibras se disponen paralelas al esfuerzo (C11) registran los mayores valores de carga máxima (la serie C22 supone el 30% y la C33 casi el 20% del valor de la C11), de tensión máxima (la serie C22 supone el 30% y la C33 el 19% del valor de la C11), de carga de rotura (la serie C22 supone casi el 37% y la C33 el 24% del valor de la C11), de tensión de rotura (la serie C22 supone el 37% y la C33 casi el 24% del valor de la C11). Sin embargo la serie C11 registra las menores deformaciones máximas (supone casi el 8% de la deformación de la serie C22 y el 17% de la C33).

Por lo que se puede decir que la serie C11 es más resistente en la rotura y en su máximo valor frente a compresión, pero al tener una deformación en rotura mucho menor, la serie se comporta de una manera frágil. Las otras dos series poseen una resistencia mucho menor pero se comportan de manera dúctil.

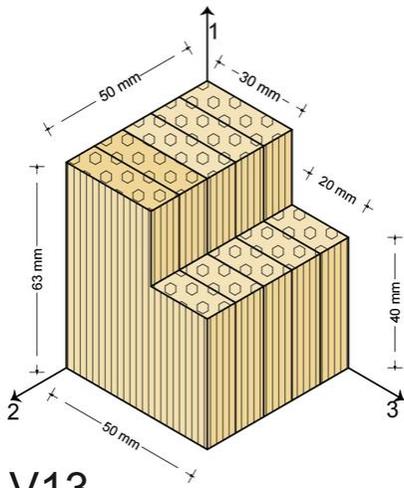
CAPITULO V

CORTANTE EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ DENDROCALAMUS ASPER (LBDA)

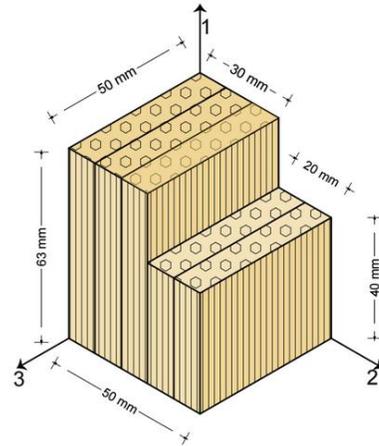
Para la realización de los ensayos de cortante en los laminados de bambú *dendrocalamus asper* (LBDA) se probaron cuatro tipos diferentes de probetas, las mismas que se las denomino con la serie V, de la siguiente manera: Series V13 y V12 cortantes paralela a la fibra y series V23 y V32 para cortante perpendicular a la fibra, como se puede observar en la figura 5.1.

Los criterios de nomenclatura para los tipos de series de probetas son los mundialmente aceptados, en los que se dispone la letra del tipo de esfuerzo que se va a aplicar (V de cortante), acompañado de dos dígitos diferentes, en el primero de ellos se trata del eje al cual el cortante es paralelo y el segundo es el eje perpendicular al plano en el que se aplica el cortante, un ejemplo sería el cortante V12, éste es un cortante paralelo al eje 1 y el eje 2 es perpendicular al plano que conforma el cortante. Por otro lado, la asignación de los ejes va en función de la disposición de las fibras y de las latillas, ya que el eje 1 coincide con la dirección de las fibras, el eje 2 coincide con la menor dirección de las tablillas y el eje 3 con la dirección perpendicular a las otras dos.

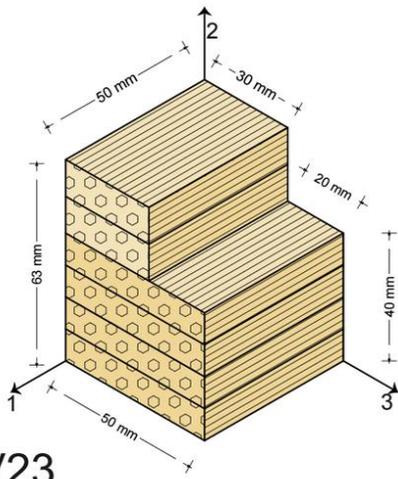
Figura 5-1. Tipos de probetas a corte V13, V12, V23, V32



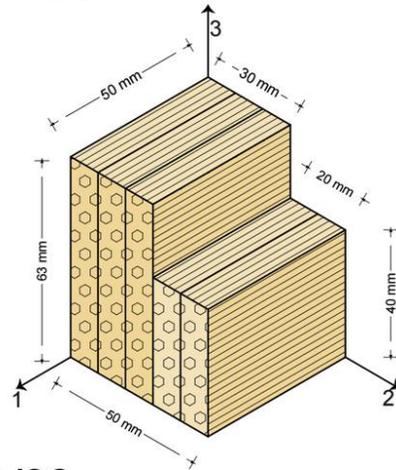
V13



V12



V23

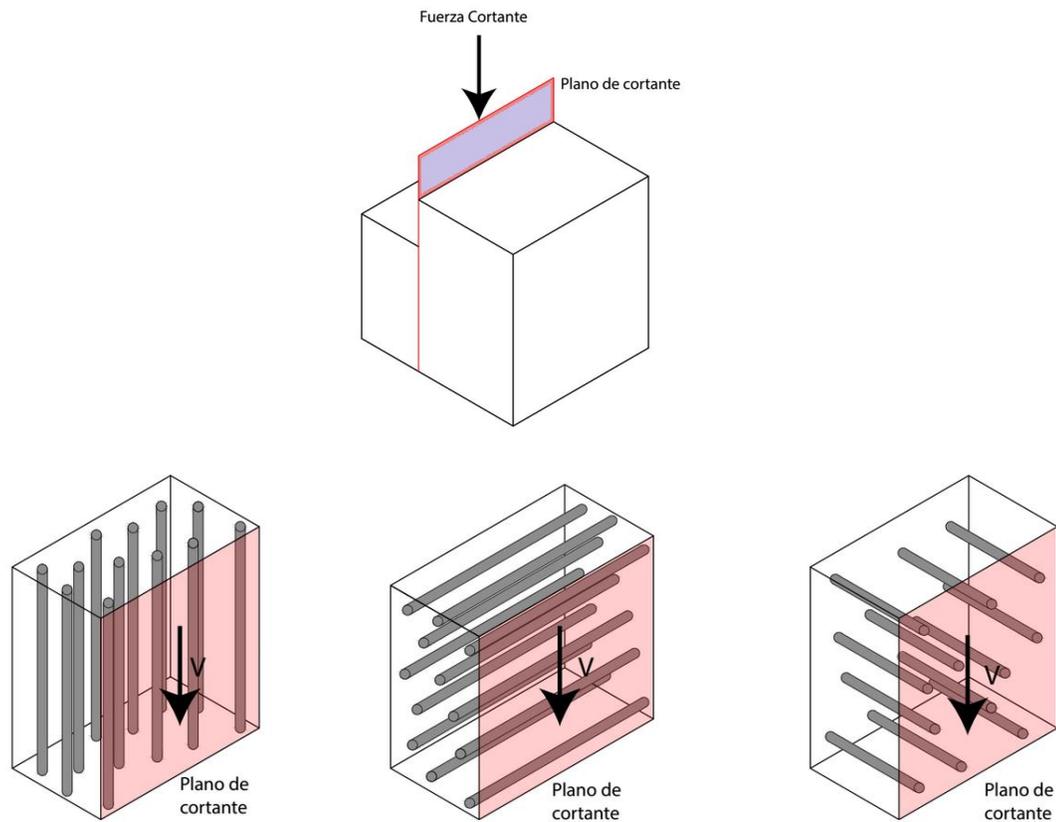


V32

Fuente: Autor

En este tipo de ensayos aparecen diferentes tipos de muestras, ya que las fibras y las tablillas se orientan en las tres direcciones ortogonales posibles. Lo que se traduce en que las fibras pueden estar paralelas a la dirección de la carga, perpendiculares a la carga pero contenidas en el plano de referencia y perpendiculares a la carga y al plano de referencia. Las mismas posibilidades se ofrecen para la disposición de las tablillas. Todas estas posibilidades se pueden apreciar en las imágenes de la figura 5-2.

Figura 5-2 Probetas para esfuerzo cortante, orientación de las fibras



Fuente: Takeuchi, C. (2014)

En todas las tipologías de muestras ensayadas lo que se pretende es analizar la capacidad frente a esfuerzo cortante de la matriz de parénquima, cuando las fibras son paralelas a la dirección de la fuerza aplicada (probetas V12 y V13) o perpendiculares a la dirección de la fuerza, pero nunca perpendicular al plano de cortante) probetas (V23 y V32). No se consideran muestras con las fibras perpendiculares a la dirección de la fuerza y al plano de cortante, porque gracias a investigaciones realizadas por Cortés y colaboradores (Cortés, Lozano, Rusinque & Takeuchi, 2010), se concluye que las probetas con las fibras en esta dirección fallan por flexión (con fisuras perpendiculares a la fibra), ya que las fibras presentan una alta resistencia a cortante.

7.1 CORTANTE PARALELO A LA FIBRA EN PROBETAS SERIE V13

5.3.1 Descripción de los ensayos

Para este ensayo se trabajaron 10 probetas de la Serie V13, cada una de las cuales fue marcada y numerada para su identificación.

Se realizaron las mediciones en todos los sentidos de cada una de las probetas. (Ver tabla 5-2)

Se realizaron 10 ensayos de cortante paralela a la fibra, en una máquina universal de ensayos AG-X plus marca Shimadzu (Anexo 3 Certificado de Calibración), las probetas se colocaron en un dispositivo específico para este tipo de ensayos con una mordaza, para sujeción de la muestra como se indica en la figura 5-3.

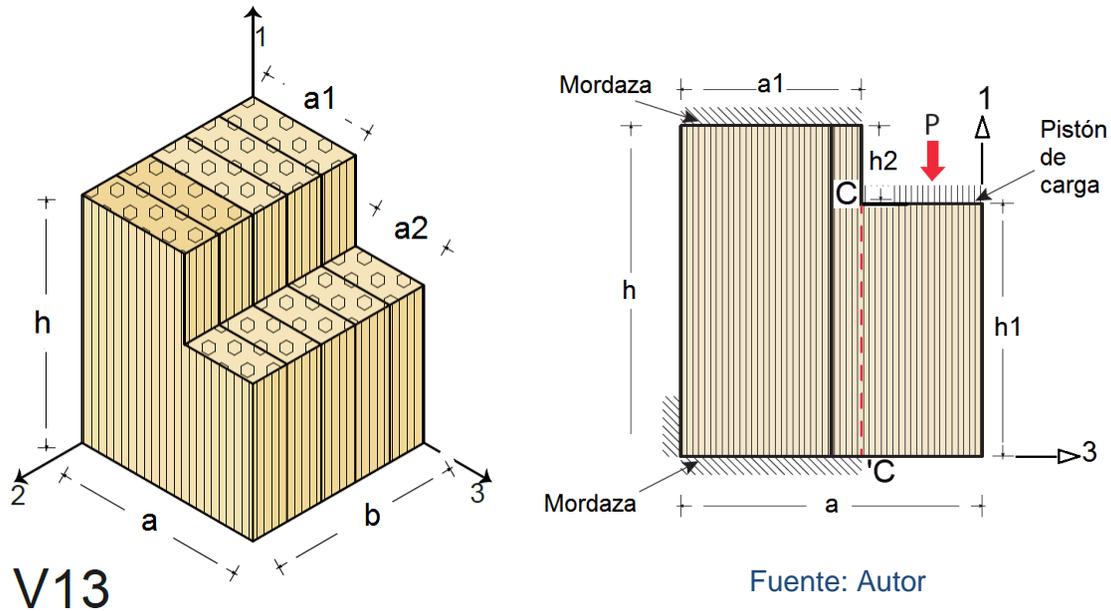
Figura 5.3 Ubicación de probeta V13 en la máquina Universal con un dispositivo para la sujeción.



Fuente: Autor

Las probetas V13 se ensayan aplicando un esfuerzo cortante paralelo a la fibra y contenido a un plano que es normal al eje 3.

Figura 5.4 Probeta V13, dimensiones y vista lateral con carga



Como en estos ensayos lo que se evalúa es la capacidad frente a esfuerzo cortante, se espera que cuando se alcance la rotura, ésta se produzca a través de una fisura. A continuación se muestran las imágenes de las caras laterales de cada probeta, en las que se puede apreciar las fisuras de rotura. En las probetas V13 y V12, las vistas superior e inferior corresponden al plano perpendicular al eje 1, en el primer caso, las vistas frontal y posterior corresponden al plano perpendicular al eje 3 y las vistas laterales corresponden al plano perpendicular al eje 2, en el segundo caso, las vistas frontal y posterior corresponden al plano perpendicular al eje 2 y las vistas laterales corresponden al plano perpendicular al eje 3.

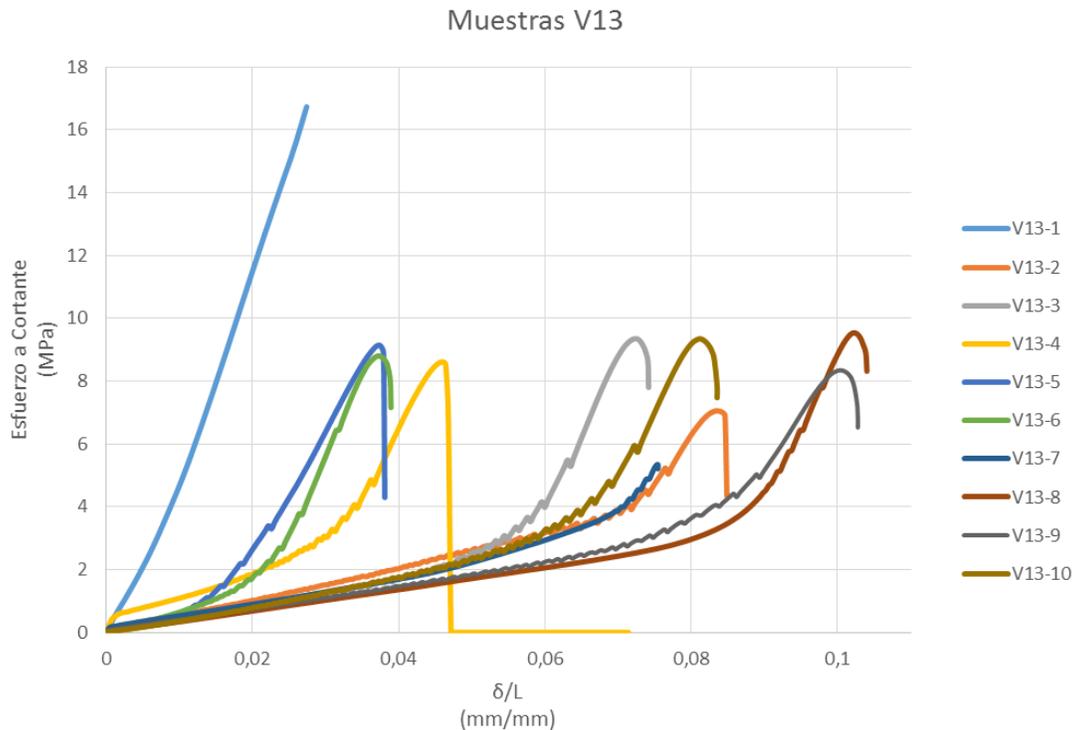
5.3.2 Cálculo y Resultados

Para obtener el esfuerzo de cortante que sufre cada probeta se hace uso de la Ecuación 5-1, la cual nos relaciona la tensión tangencial resultante (τ) como el cociente de la fuerza aplicada (P) respecto el área en la que se produce el esfuerzo cortante (A_v), o sea la paralela al esfuerzo.

$$\tau = \frac{P}{A_v} \quad \text{Ecuación 5-1}$$

Para poder comparar el comportamiento de las 10 muestras tipo V12 y V13, se realiza el mismo procedimiento que en las muestras ensayadas a compresión, por lo que se compara la relación de la tensión tangencial al área de referencia aplicada (τ) con la deformación longitudinal unitaria (δ/L), pero en este caso del área de referencia y considerando la deformación paralela al esfuerzo. En la Figura 5-4, se representa dicha relación, situando en el eje vertical la tensión tangencial al área de referencia aplicada (τ) y en el eje horizontal la deformación longitudinal unitaria (δ/L) del área de referencia y según la dirección paralela a la fuerza aplicada, para diferentes niveles de carga. En este caso, la deformada registrada (δ) coincide con el desplazamiento del plato de carga.

Figura 5-5. Esfuerzo cortante vs δ/L probetas a cortante V13



En la fase de carga y hasta alcanzar la carga máxima sólo las muestras 5 y 6 poseen un tramo elástico que se puede aproximar a una función lineal, la muestra 1 rompe sin tener comportamiento plástico, en la 7 la carga máxima y la de ruptura coinciden. Las muestras 1, 5 y 6 poseen una primera fase no muy relevante, en la que la muestra se está adaptando al esfuerzo que se le está aplicando. Por otro lado, en el resto de muestras poseen dos fases lineales antes de alcanzar la máxima tensión, la primera de ellas se debe al efecto antes mencionado, la diferencia es que en estos casos es una fase que no se puede obviar. Por lo que se puede asumir que el comportamiento elástico se produce en la primera fase lineal. En este gráfico queda patente que la dispersión de las curvas es bastante alta, debido a que la deformación de rotura es alta, en algunos casos es el doble

que el resto. Sin embargo, el valor de las tensiones de rotura es muy similar en todos los casos menos en la 1 y en la 5. A pesar de la dispersión ya mencionada, se puede apreciar que la fase de descarga de todas las muestras, menos la 1 y la 7, es muy similar, ya que la diferencia entre la deformación de la tensión máxima y la deformación de rotura es muy baja, lo que se traduce en un comportamiento frágil del material.

Hay que resaltar que según el criterio de exclusión de Chauvenet, el valor de tensión máxima de la muestra 1 es atípico y se excluye.

La resistencia a cortante (F_v) de cada probeta se obtuvo mediante la Ecuación 5-2, donde P_{max} es la máxima fuerza que se aplica y A_v es el área de cortante, que no es más que la sección paralela a P_{max} de cada probeta.

$$F_v = \frac{P_{max}}{A_v} \quad \text{Ecuación 5-2}$$

Tabla 5-1. Resistencia a cortante promedio de las muestras V13

Muestras V13			
Probeta	P_{max} (N)	A_v (mm ²)	F_v (Mpa)
V13-1	35343,71	2112,40	16,73
V13-2	15130,05	2143,92	7,06
V13-3	19557,51	2091,49	9,35
V13-4	18832,40	2187,19	8,61
V13-5	19849,01	2172,26	9,14
V13-6	18633,79	2116,99	8,80
V13-7	11216,09	2097,57	5,35
V13-8	7409,46	2087,84	3,55
V13-9	9290,88	2104,30	4,42
V13-10	19806,14	2118,77	9,35

Fuente: Autor

Según la anterior tabla la resistencia media a cortante paralela a la fibra contando las 10 muestras es de 8.23MPa con una desviación típica de 3.69MPa, pero si no se consideran los datos anómalos según el criterio de Chauvenet (sin tener en cuenta la muestra 1), la resistencia media a cortante paralela a la fibra contando las 10 muestras es de 6.56MPa con una desviación típica de 2.29MPa.

5.1.3 Observaciones durante el ensayo

Para analizar los aspectos reseñables de las muestras que han acaecido durante los ensayos, es fundamental analizar la forma de rotura de las mismas y sus correspondientes diagramas carga-desplazamiento.

Las formas de rotura que se han registrado son nueve muestras por planos paralelos al esfuerzo aplicado, han fallado por la resistencia al corte de la parénquima interna de las latillas, y una por un plano perpendicular al plano de cortante, por fallo del adhesivo.

Figura 5-6. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 1 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-7. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 2 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-8 Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 3 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-9. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 4 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-10. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 5 estado final



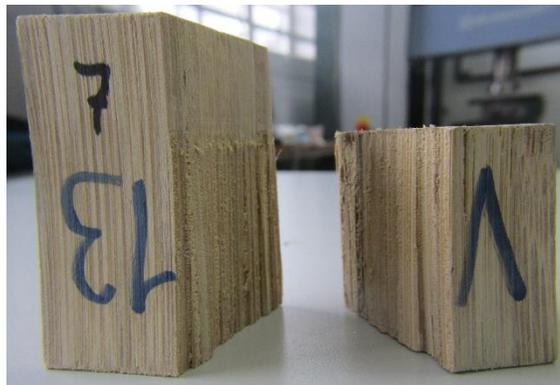
Fuente: Autor

Figura 5-11. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 6 estado final



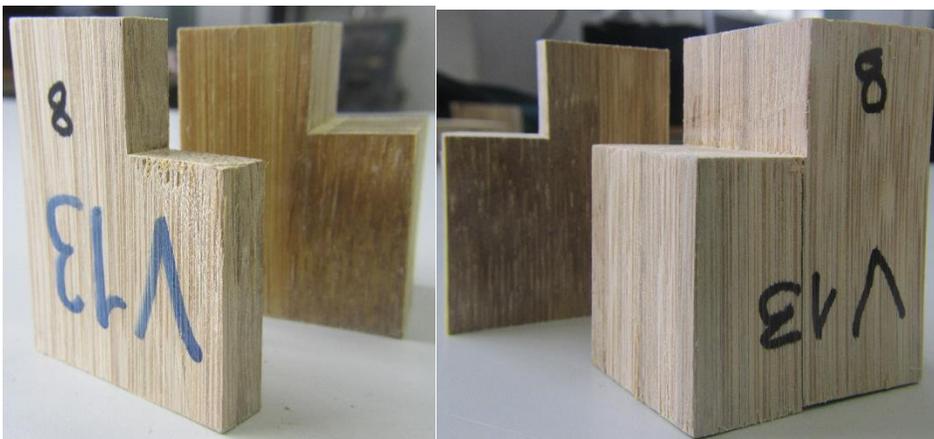
Fuente: Autor

Figura 5-12. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 7 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-13. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 8 estado final



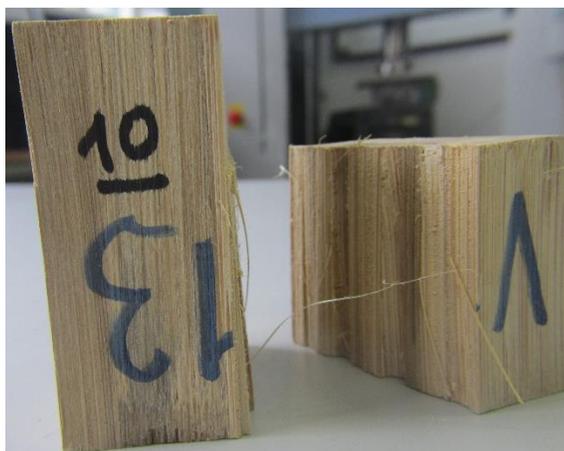
Fuente : Autor

Figura 5-14. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 9 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-15. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V13 – 10 estado final

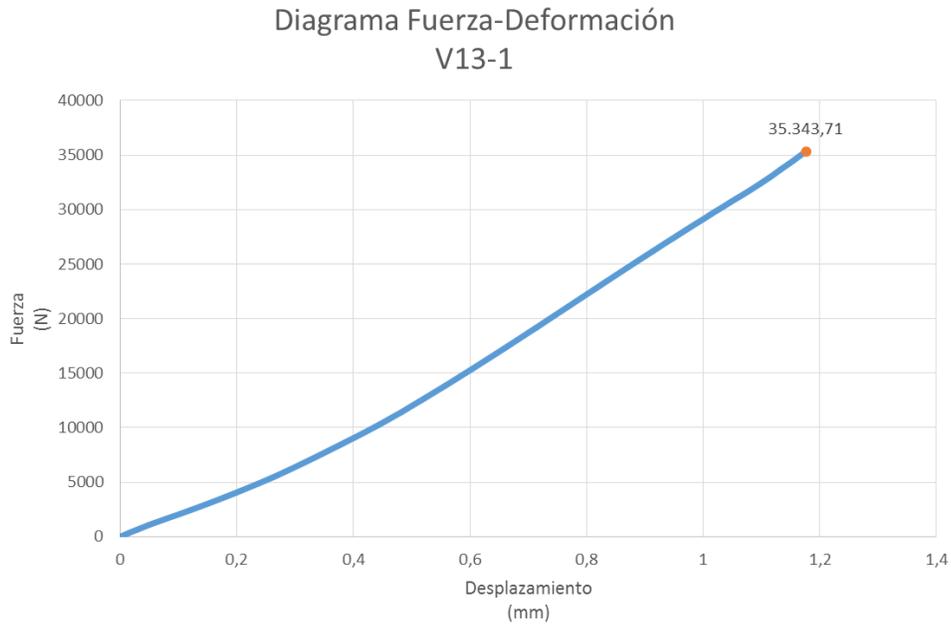


Fuente: Autor

La mayoría de las muestras de la serie V13 rompen a través de un plano paralelo al esfuerzo y que coincide con la discontinuidad volumétrica de las muestras, la muestra 8 rompe por un plano perpendicular al plano mencionado y de debe a fallo de adhesivo, además la muestra 4 combina ambas formas de ruptura. Las muestras 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 se rompen por fallo al corte de la parénquima.

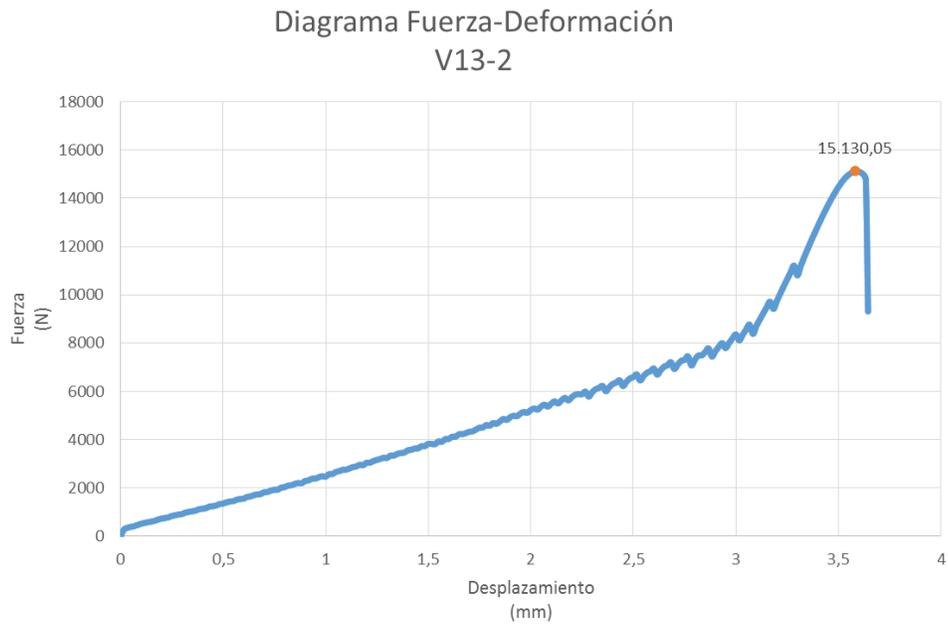
Los diagramas carga-desplazamiento que se han obtenido en los ensayos, son los siguientes:

Figura 5-16. Relación carga-desplazamiento, muestra V13-1



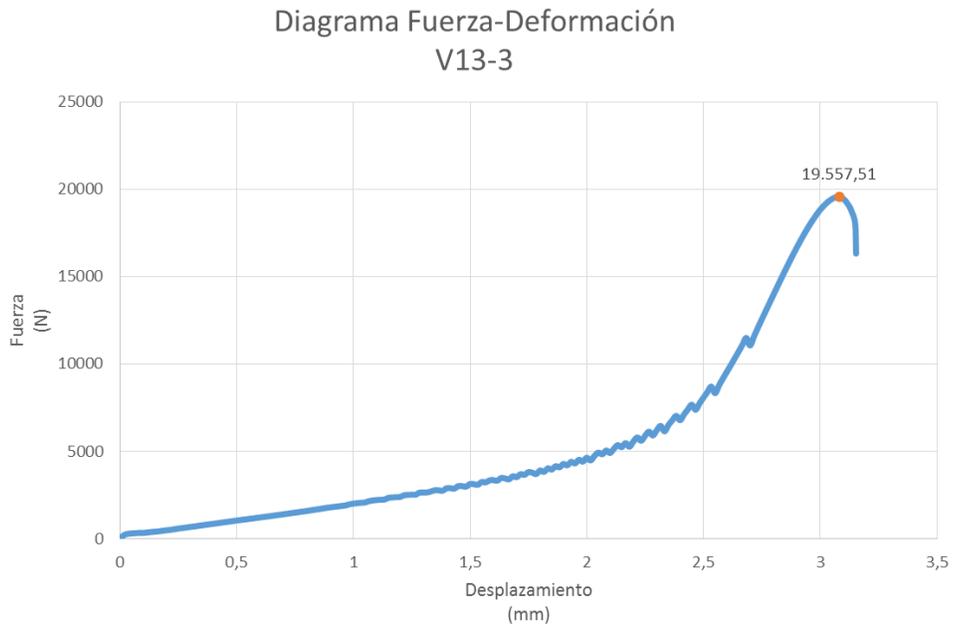
Fuente: Autor

Figura 5-17. Relación carga-desplazamiento, muestra V13-2



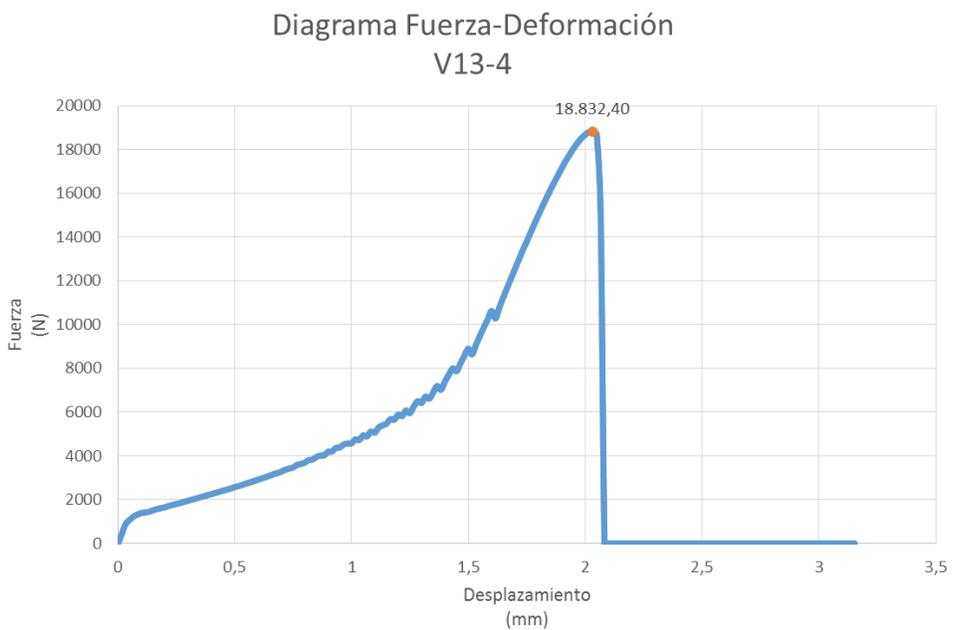
Fuente: Autor

Figura 5-18. Relación carga-desplazamiento, muestra V13-3



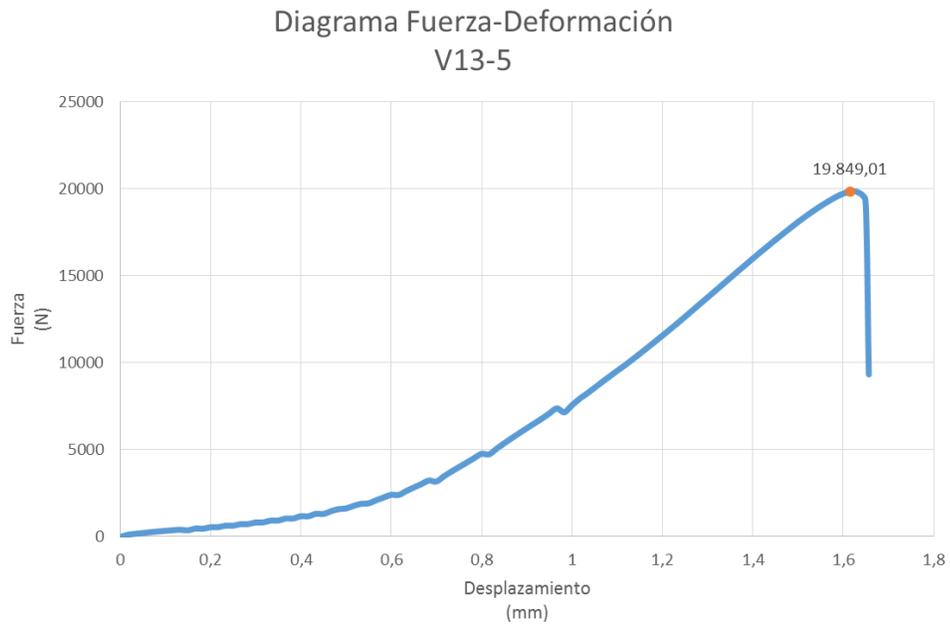
Fuente: Autor

Figura 5-19. Relación carga-desplazamiento, muestra V13-4



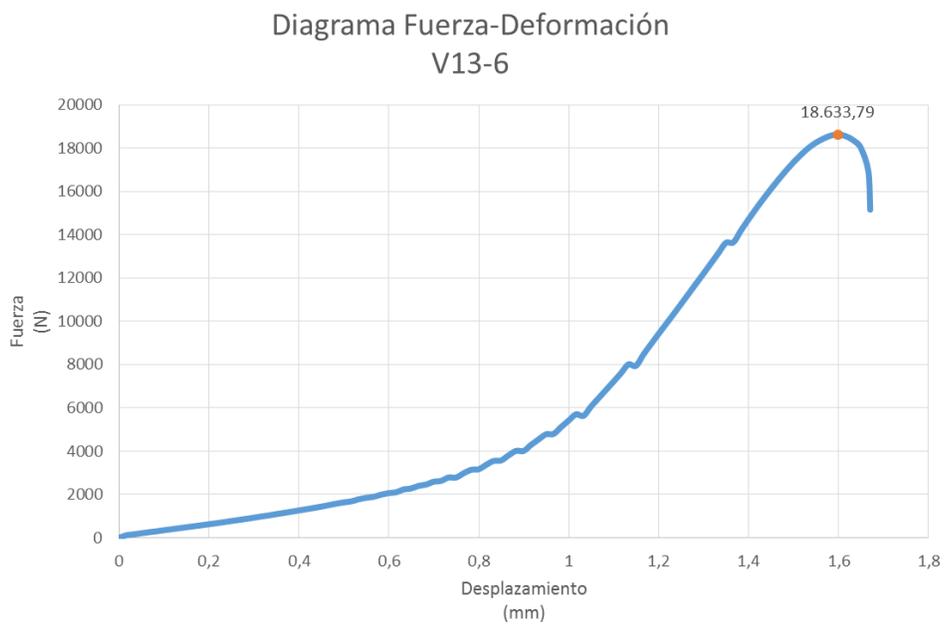
Fuente: Autor

Figura 5-20. Relación carga-desplazamiento, muestra V13-5



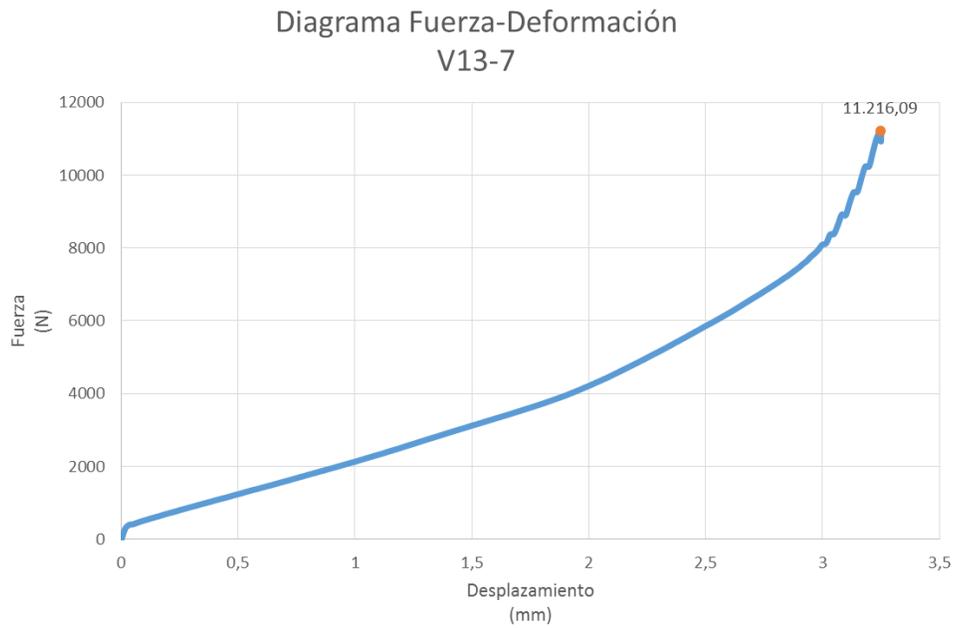
Fuente: Autor

Figura 5-21. Relación carga-desplazamiento, muestra V13-6



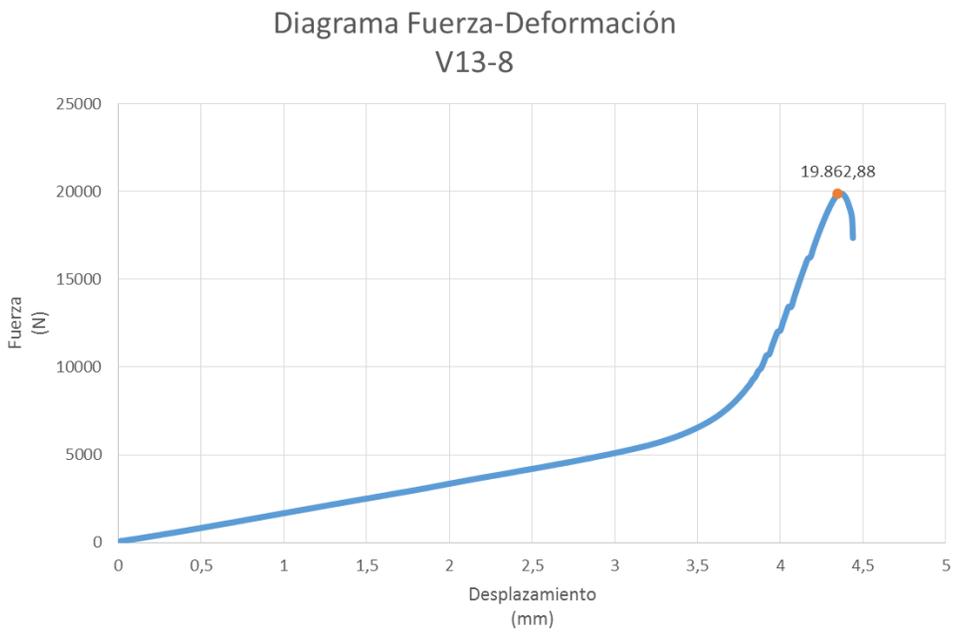
Fuente: Autor

Figura 5-22. Relación carga-desplazamiento, muestra V13-7



Fuente: Autor

Figura 5-23. Relación carga-desplazamiento, muestra V13-8



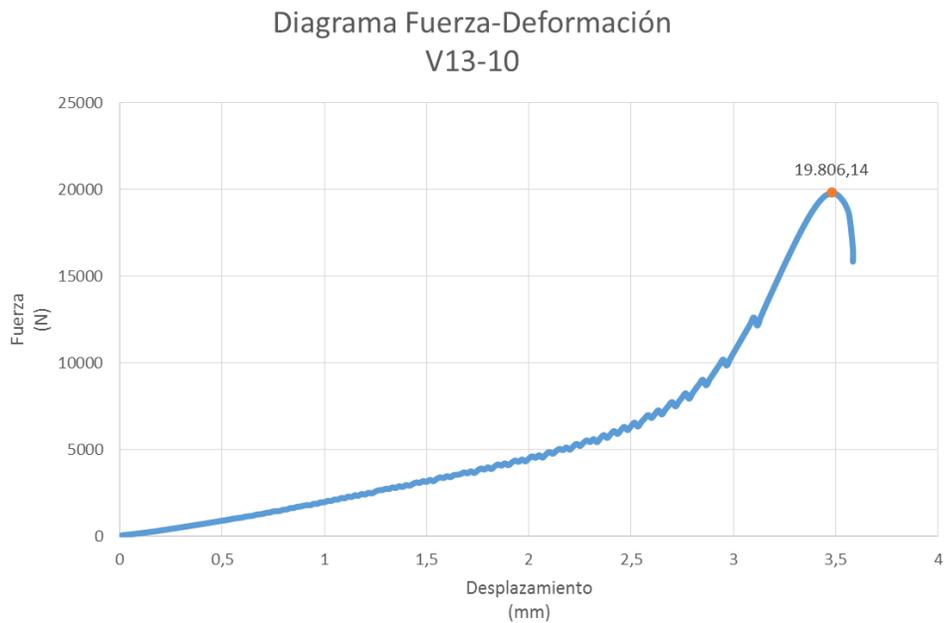
Fuente: Autor

Figura 5-24. Relación carga-desplazamiento, muestra V13-9



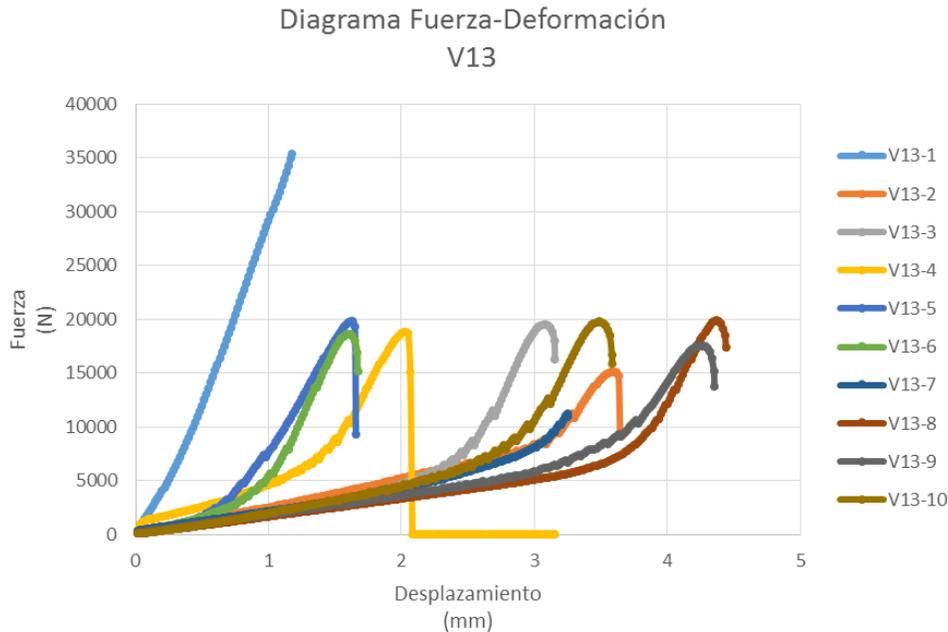
Fuente: Autor

Figura 5-25. Relación carga-desplazamiento, muestra V13-10



Fuente: Autor

Figura 5-26. Relación carga-desplazamiento, muestras tipo V13



En lo que se refiere a los diagramas Fuerza-Desplazamiento podemos ver que todas las muestras V13 tienen un comportamiento similar, salvo las muestra 1 y la 7. La muestra 1 tiene un comportamiento aproximadamente lineal desde el inicio hasta la ruptura, por otra parte la muestra 7 tiene un comportamiento similar al del resto de muestras, pero solo presenta la fase de carga, ya que la de descarga es prácticamente nula. El comportamiento del resto de las muestras se basa en una primera fase de carga y una segunda fase de descarga, la fase de carga se inicia en etapa de ajuste de la muestra al someterse a una carga, dicha fase se puede obviar por lo corta que es, posteriormente sigue una fase lineal en la que el material se comporta de manera elástica, así hasta llegar a la fuerza máxima que pueden soportar las muestras, posteriormente se inicia la descarga, en la que se va retirando carga y va aumentando la deformación hasta la rotura. Todas

registran unos valores de fuerza muy similares, es en las deformaciones donde las muestras 4, 5 y 6 registran deformaciones menores (alrededor de la mitad) a las de las muestras 2, 3, 8, 9 y 10.

5.1.4 Determinación de la densidad serie V13

5.1.4.1 Descripción de los ensayos

La densidad es una magnitud intensiva que relaciona la masa de un cuerpo determinado y su volumen. Para obtener la densidad de las muestras de la serie V13, se procedió a obtener la geometría de cada una de las muestras midiendo el largo, el ancho y la profundidad, además de obtener su correspondiente masa, pesando cada probeta en una balanza digital con una precisión de 0.01g. Estos dos procedimientos se llevaron a cabo previos al ensayo de rotura por compresión paralela a las fibras.

Tabla 5-2. Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie V13

Muestras	Masa (g)	Ancho (a) (mm)	Ancho (a ₁) (mm)	Ancho (a ₂) (mm)	Largo (b) (mm)	Alto (h) (mm)	Alto (h ₁) (mm)	Alto (h ₂) (mm)	Volumen (mm ³)
V13-1	98,30	49,27	28,82	20,61	49,24	63,47	42,90	21,27	133606,56
V13-2	96,20	49,93	29,53	20,82	49,94	63,43	42,93	20,85	138178,51
V13-3	93,60	49,70	29,30	21,04	49,20	63,41	42,51	20,94	135414,31
V13-4	95,50	49,69	29,24	20,48	49,54	64,76	44,15	20,74	138601,74
V13-5	105,20	49,46	29,04	21,03	49,96	63,84	43,48	20,42	138304,17
V13-6	103,20	49,84	28,80	20,65	49,37	63,61	42,88	20,40	134160,01
V13-7	91,20	49,01	28,42	20,45	48,69	63,93	43,08	21,05	131359,61
V13-8	91,00	49,12	29,24	20,34	48,93	63,33	42,67	20,90	133073,80
V13-9	100,60	49,82	29,09	20,68	49,70	63,49	42,34	20,83	135309,01
V13-10	100,10	49,26	28,82	21,24	49,40	63,59	42,89	20,88	135536,18

Fuente: Autor

5.1.4.2 Resultados

Una vez obtenidos los resultados del ensayo de densidad, que se aportan en la siguiente tabla, se obtiene un valor de densidad media de $0.00072022 \text{ g/mm}^3$ o 720.22 Kg/m^3 , con una desviación estándar o típica de $3.26 \times 10^{-5} \text{ g/mm}^3$ o 32.56 Kg/m^3 , y con un coeficiente de variación (se recuerda que es el cociente entre la variación estándar y la densidad media) de 0.045.

Tabla 5-3. Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie V13

Muestras	Densidad (g/mm^3)	Densidad (Kg/m^3)
V13-1	0,00073574	735,74
V13-2	0,00069620	696,20
V13-3	0,00069121	691,21
V13-4	0,00068902	689,02
V13-5	0,00076064	760,64
V13-6	0,00076923	769,23
V13-7	0,00069428	694,28
V13-8	0,00068383	683,83
V13-9	0,00074348	743,48
V13-10	0,00073855	738,55

Fuente: Autor

5.1.4 Determinación del contenido de humedad serie V13

5.1.4.1 Descripción de los ensayos

Para determinar el contenido de humedad de las probetas de la serie V13 se ha procedido, después de realizado el ensayo de cortante paralelo a la fibra, a pesar cada probeta en una balanza digital con aproximación de 0.01g,

registrándose los datos en una tabla antes de entrar al horno. Ingresaron al horno a una temperatura de 102,8° C. A las 48 horas de permanecer en el horno, una vez alcanzado su peso para masa seca, se pesaron cada una de las probetas, registrándose su peso final en la correspondiente tabla 5-4.

Figura 5-27 Ingreso al horno de las probetas V13



Fuente: Autor

5.1.4.2 Resultados

En la Tabla 5-4 se detallan los valores de contenido de humedad de cada una de las probetas de la serie V13. El contenido de Humedad promedio de la Serie V13 fue de 11%, con una desviación estándar de 1.36% y un coeficiente de variación del 0.12.

Tabla 5-4 Determinación del Contenido de Humedad serie V13.

Porcentaje Contenido Humedad Serie V13

Probeta Identificación	Peso Antes horno	Peso Final	Diferencia de Peso	Porcentaje Diferencial
Serie	g	g	g	%
V13-1	65.5	59.9	5.6	9%
V13-2	66.5	57.8	8.7	13%
V13-3	64.9	57.6	7.3	11%
V13-4	63.7	56.9	6.8	11%
V13-5	69.3	61.1	8.2	12%
V13-6	69.7	61.9	7.8	11%
V13-7	60.4	54.3	6.1	10%
V13-8	17.6	15.9	1.7	10%
V13-9	68	59.4	8.6	13%
V13-10	67.2	60.2	7	10%

Porcentaje Contenido Humedad Serie V13 **11%**

Fuente: Autor

5.1.4 Análisis de resultados serie V13

La forma de rotura de las muestras de esta serie es frágil y se formaliza según un plano paralelo al esfuerzo, previamente se obtienen unas deformaciones laterales locales producidas por la reacomodación de las fibras horizontales en la matriz de la parénquima.

Lo primero que hay que destacar es que la muestra V13-1 no se debe considerar por el criterio de exclusión de Chauvenet de datos anómalos, debido al registro de tensiones máximas.

Las muestras de mayor tensión máxima son las V13-8, la V13-3, la V13-10 y la V13-5 (9.54 N/mm², 9.35 N/mm², 9.35 N/mm² y 9.14 N/mm², respectivamente). La gran mayoría de muestras han roto por fallo de cizalladura de la parénquima, salvo

la muestra V13-8, que ha sido la única que ha fallado por el adhesivo. Todas han experimentado un tipo de rotura paralela al esfuerzo y frágil, cosa habitual en este tipo de ensayos y con este tipo de materiales.

Si se analizan los diagramas tensión-deformación de las muestras, se puede apreciar que en todas las muestras, salvo la V13-7, una vez alcanzada la tensión máxima se produce una pérdida de carga con un pequeño aumento de la deformación hasta la rotura. Por otro lado, podemos ver que las muestras 4, 5 y 6 poseen una deformación de rotura aproximadamente la mitad de las muestras 2, 3, 8, 9 y 10. Se puede apreciar cierta homogeneidad en lo que a tensión máxima se refiere, salvo las muestras 7 y 2. El valor promedio de la resistencia a cortante paralelo a las fibras de la serie V13 es de 8.39MPa, con una desviación típica de 1.37MPa y un coeficiente de variación de 0.16. El valor promedio de la deformación de rotura es de 0.075mm con una desviación típica de 0.024mm y un coeficiente de variación de 0.32. Toda esta información se resume en la siguiente tabla.

Tabla 5-5. Resumen de análisis de resultados

Código de Muestra	Diagrama Tensión-Deformación						Modo de Rotura					
	Deformación Longitudinal Unitara			Tensión Máxima			Parénquima			Adhesivo		
	Baja	Media	Elevada	Baja	Media	Elevada	Leve	Media	Total	Leve	Media	Total
V13-1												
V13-2		X			X				X			
V13-3		X				X		X				
V13-4	X					X			X			X
V13-5	X					X		X	X			
V13-6	X					X			X			
V13-7		X		X					X			
V13-8			X			X						X
V13-9			X			X			X			
V13-10		X				X			X			

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos en todo a lo que se refiere a los ensayos de resistencia a corte paralela a fibra y con la misma disposición de latillas son comparables a otros estudios ya realizados mediante ensayos con probetas características geométricas similares.

En un estudio realizado por López y Correal (López & Correal, 2009) en ensayos de corte paralelo a la fibra en 33 probetas elaboradas con PVA, reportaron 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.

5.2 CORTANTE PARALELO A LA FIBRA EN PROBETAS SERIE V12

5.2.1 Descripción de los ensayos

La serie V12 fue sometida a un esfuerzo cortante paralelo a la fibra. Se ensayaron 10 probetas, cada una de las cuales fueron marcadas y numeradas para su identificación.

Se realizaron las mediciones en todos los sentidos de cada una de las probetas. (Ver tabla 5-8).

Las pruebas se realizaron en una máquina universal de ensayos AG-X plus marca Shimadzu (Anexo 3 Certificado de Calibración), las probetas se colocaron en un dispositivo específico para este tipo de ensayos con una mordaza, para sujeción de la muestra como se indica en la figura 5-27.

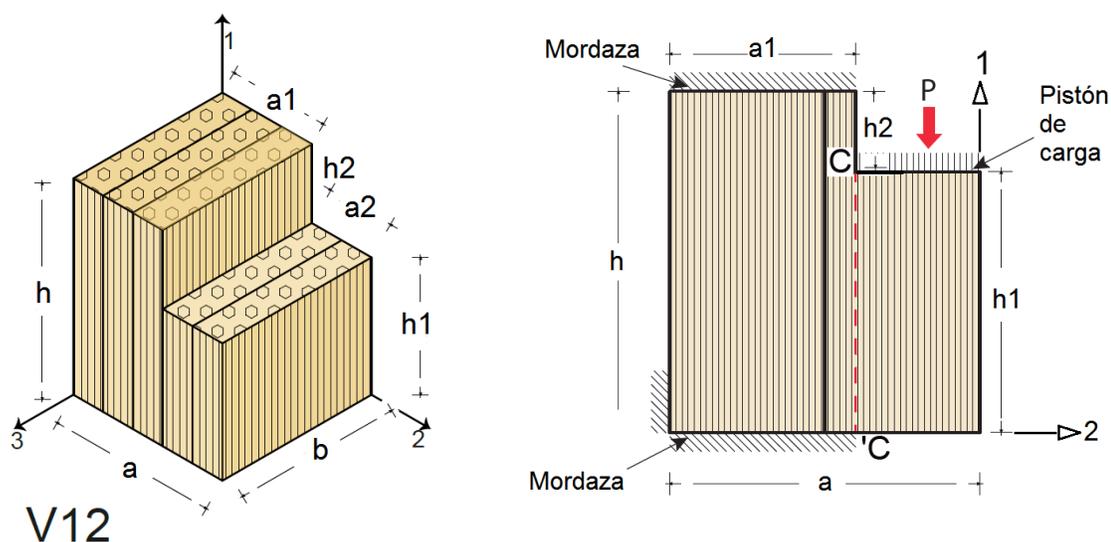
Figura 5-28. Ubicación de probeta V12 en la máquina Universal con un dispositivo para la sujeción.



Fuente: Autor

Las probetas V12 se ensayan aplicando un esfuerzo cortante paralelo a la fibra y contenido a un plano que es normal al eje 2. Dichas muestras se definen con las siguientes características geométricas, tres medidas relacionadas con el alto de la muestra (medida vertical), alto total (h), alto parcial inferior (h_1) y alto parcial superior (h_2), una medida que define el largo (b), que es la única medida que se mantiene constante en las muestras, y tres medidas que definen el ancho, ancho total (a), ancho parcial superior (a_1) y ancho parcial intermedio (a_2).

Figura 5-29. Probeta V12. Esquema ensayo de corte.



Fuente: Autor

Como en estos ensayos lo que se evalúa es la capacidad frente a esfuerzo cortante, se espera que cuando se alcance la rotura, ésta se produzca a través de una fisura sobre la línea C-C'.

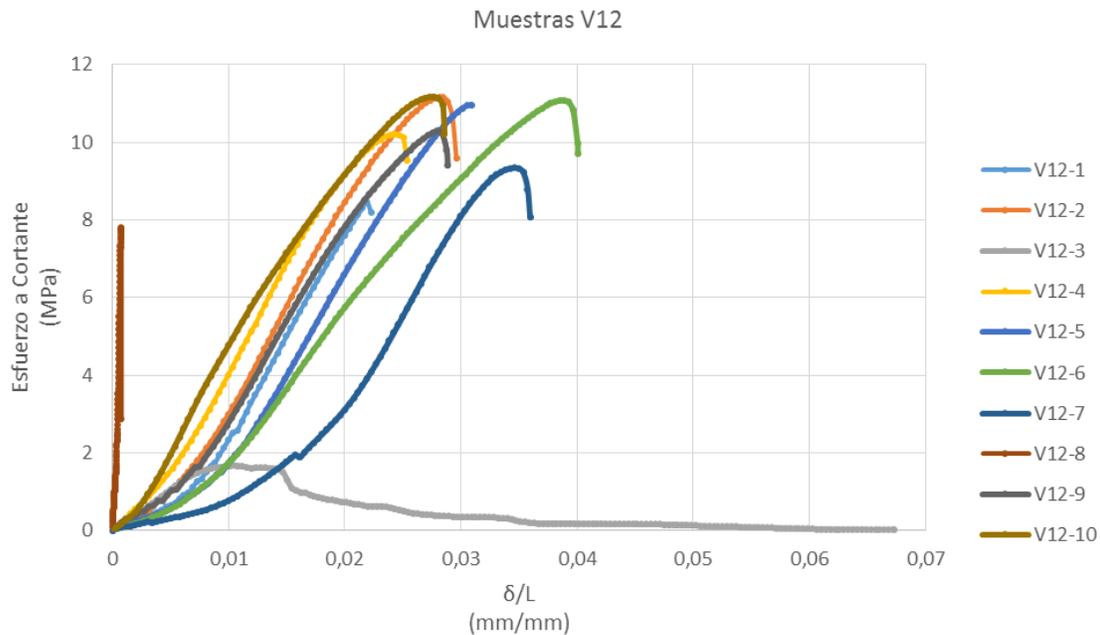
5.2.2 Cálculo y Resultados

Para obtener el esfuerzo de cortante que sufre cada probeta se hace uso de la Ecuación 5-3, la cual nos relaciona la tensión tangencial resultante (τ) como el cociente de la fuerza aplicada (P) respecto el área en la que se produce el esfuerzo cortante (A_v), o sea la paralela al esfuerzo.

$$\tau = \frac{P}{A_v} \quad \text{Ecuación 5-3}$$

Para poder comparar el comportamiento de las 10 muestras tipo V12, se realiza el mismo procedimiento que en las muestras ensayadas a compresión, por lo que se compara la relación de la tensión tangencial al área de referencia aplicada (τ) con la deformación longitudinal unitaria (δ/L), pero en este caso del área de referencia y considerando la deformación paralela al esfuerzo.

En la Figura 5-29, se representa dicha relación, situando en el eje vertical la tensión tangencial al área de referencia aplicada (τ) y en el eje horizontal la deformación longitudinal unitaria (δ/L) del área de referencia y según la dirección paralela a la fuerza aplicada, para diferentes niveles de carga. En este caso, la deformada registrada (δ) coincide con el desplazamiento del plato de carga.

Figura 5-30. Esfuerzo cortante vs δ/L probetas a cortante V12

Fuente: Autor

En la fase de carga y hasta alcanzar la carga máxima la mayoría de las muestras poseen un tramo elástico que se puede aproximar a una función lineal, las únicas muestras que tienen un comportamiento diferente son las muestras 3 y 8, ya que en el primer caso el tramo lineal es mucho más corto que el resto y en el segundo caso sólo existe este comportamiento hasta la tensión máxima y con una pendiente excesivamente alta para poder comparar comportamientos. Después de esta fase elástica se pasa a una pequeña fase plástica hasta alcanzar la tensión de rotura, en la que menos las muestras anteriormente citadas, el resto tienen comportamientos y valores de tensión de rotura similares. En lo que se refiere a los valores de tensión máxima, que es el valor que separa la fase de carga y de descarga, sucede lo mismo que en la tensión de rotura, ya que todas las muestras

menos la 3 y la 8, tienen valores comparables. Todas las muestras menos la 7 poseen una primera fase no muy relevante, en la que la muestra se está ajustando al esfuerzo que se le está aplicando, sólo esta muestra posee una fase más reseñable. En este gráfico queda patente que la dispersión de las curvas es bastante baja, salvo en las muestras 3 y 8, que poseen un comportamiento anómalo. Se puede apreciar que la fase de descarga de todas las muestras, menos la 3 y la 8, es muy similar, como la diferencia entre la deformación de la tensión máxima y la deformación de rotura es muy baja, se puede decir que el material tiene un comportamiento frágil.

Hay que resaltar que según el criterio de exclusión de Chauvenet, el valor de tensión máxima de la muestra 3 es atípico y se excluye y el valor de la deformación de rotura de la muestra 8 es atípico y también se excluye.

La resistencia a cortante (F_v) de cada probeta se obtuvo mediante la Ecuación

5-4, donde P_{max} es la máxima fuerza que se aplica y A_v es el área de cortante, que no es más que la sección paralela a P_{max} de cada probeta.

$$F_v = \frac{P_{max}}{A_v} \quad \text{Ecuación 5-4}$$

Tabla 5-6. Resistencia a cortante promedio de las muestras V12

Muestras V12			
Probeta	P_{max} (N)	A_v (mm ²)	F_v (Mpa)
V12-1	18001,25	2125,13	8,47
V12-2	23693,55	2120,23	11,17
V12-3	3577,98	2135,49	1,68
V12-4	20978,06	2054,22	10,21
V12-5	22728,78	2071,33	10,97
V12-6	23603,05	2128,51	11,09
V12-7	19846,91	2124,58	9,34
V12-8	16760,76	2148,72	7,80
V12-9	21206,80	2058,97	10,30
V12-10	23476,24	2099,87	11,18

Fuente: Autor

Según la anterior tabla la resistencia media a cortante paralela a la fibra contando las 10 muestras es de 9.22MPa con una desviación típica de 2.90MPa y con un coeficiente de variación de 0.315, pero si no se consideran los datos anómalos según el criterio de Chauvenet (sin tener en cuenta la muestra 3 y 8), la resistencia media a cortante paralela a la fibra contando las 10 muestras es de 10.34MPa con una desviación típica de 0.99MPa y con un coeficiente de variación de 0.096.

Tabla 5-7. Resistencia a cortante promedio de las muestras V12 y V13

Muestras V12				Muestras V13			
Probeta	P _{max} (N)	A _v (mm ²)	F _v (Mpa)	Probeta	Pmax (N)	A _v (mm ²)	F _v (Mpa)
V12-1	18001,25	2125,13	8,47	V13-1	35343,71	2112,40	16,73*
V12-2	23693,55	2120,23	11,17	V13-2	15130,05	2143,92	7,06
V12-3	3577,98	2135,49	1,68*	V13-3	19557,51	2091,49	9,35
V12-4	20978,06	2054,22	10,21	V13-4	18832,40	2187,19	8,61
V12-5	22728,78	2071,33	10,97	V13-5	19849,01	2172,26	9,14
V12-6	23603,05	2128,51	11,09	V13-6	18633,79	2116,99	8,80
V12-7	19846,91	2124,58	9,34	V13-7	11216,09	2097,57	5,35
V12-8	16760,76	2148,72	7,80*	V13-8	7409,46	2087,84	3,55
V12-9	21206,80	2058,97	10,30	V13-9	9290,88	2104,30	4,42
V12-10	23476,24	2099,87	11,18	V13-10	19806,14	2118,77	9,35

Los valores con asterisco (*), son los valores excluidos por ser considerados anómalos.

Fuente: Autor

5.2.3 Observaciones durante el ensayo

Para analizar los aspectos reseñables de las muestras que han acaecido durante los ensayos, es fundamental analizar la forma de rotura de las mismas y sus correspondientes diagramas carga-desplazamiento.

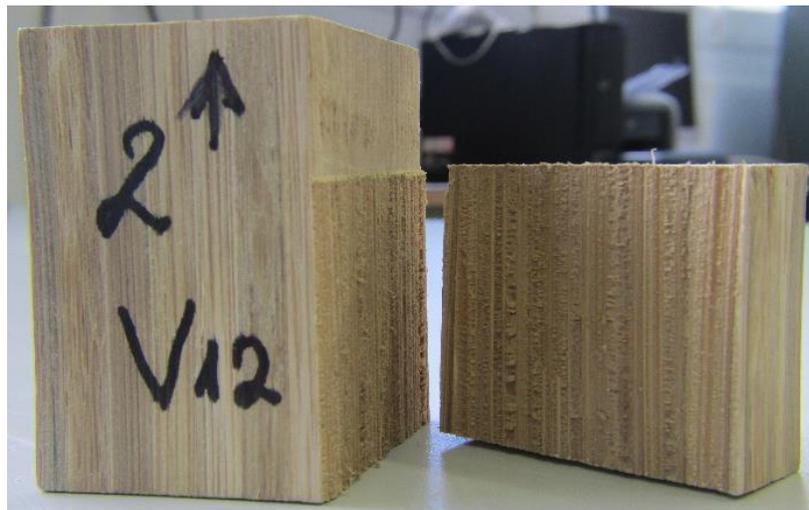
La forma de rotura que se ha registrado en todas las muestras es por el plano paralelo al esfuerzo aplicado, han fallado por la resistencia al corte de la parénquima interna de las latillas.

Figura 5-31. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 1 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-32. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 2 estado final



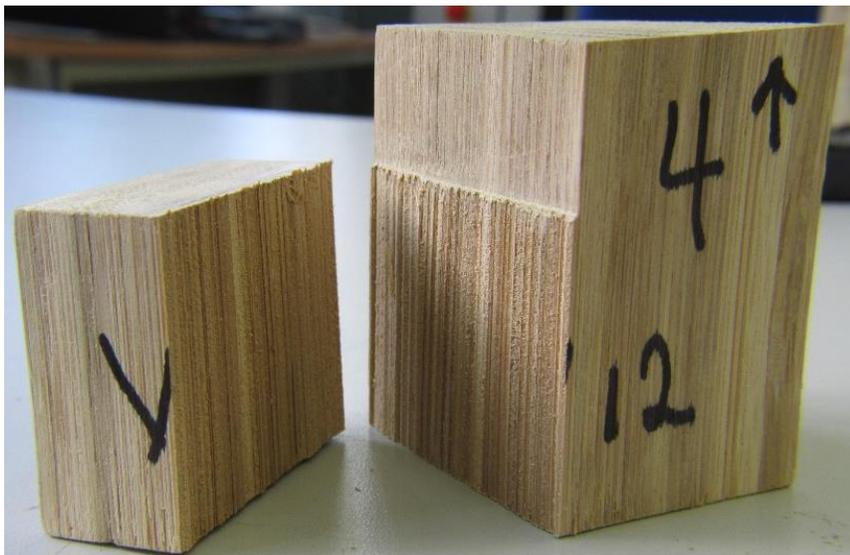
Fuente: Autor

Figura 5-33. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 3 estado final



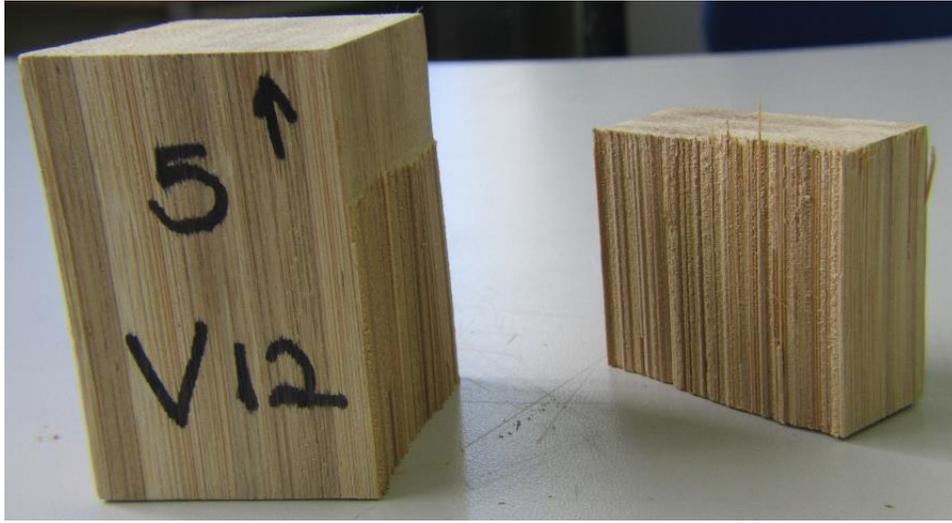
Fuente: Autor

Figura 5-34. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 4 estado final



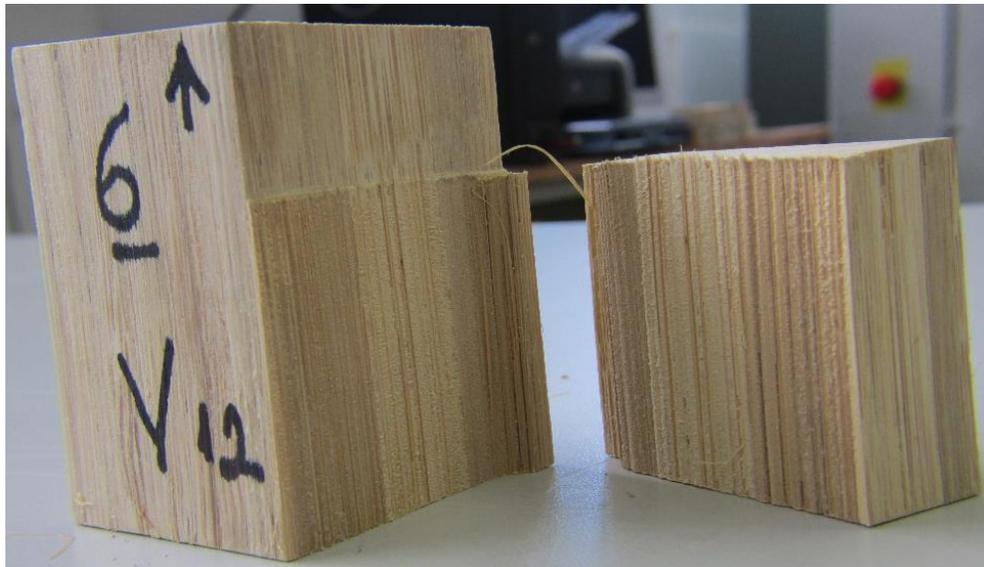
Fuente: Autor

Figura 5-35. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 5 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-36. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 6 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-37. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 7 estado final



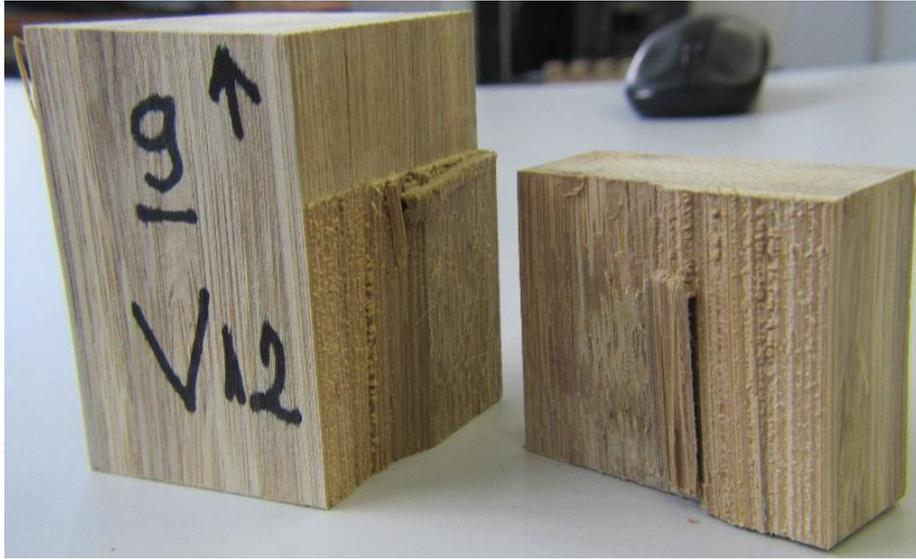
Fuente: Autor

Figura 5-38. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 8 estado final



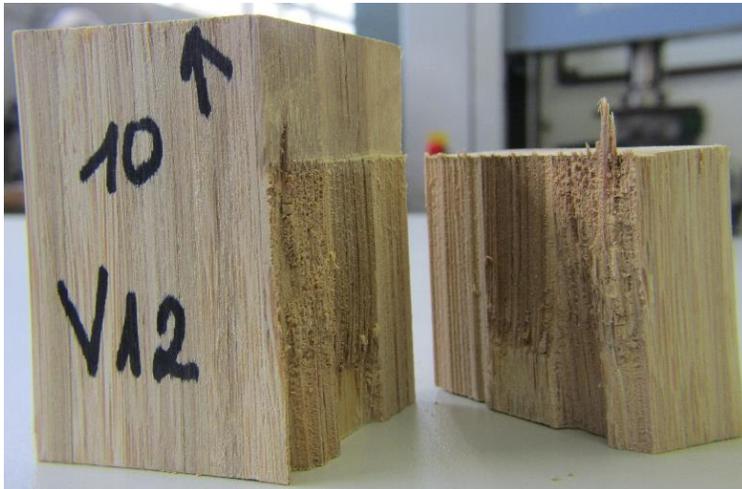
Fuente: Autor

Figura 5-39. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 9 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-40. Ensayo Cortante Paralelo a la Fibra probetas V12 – 10 estado final

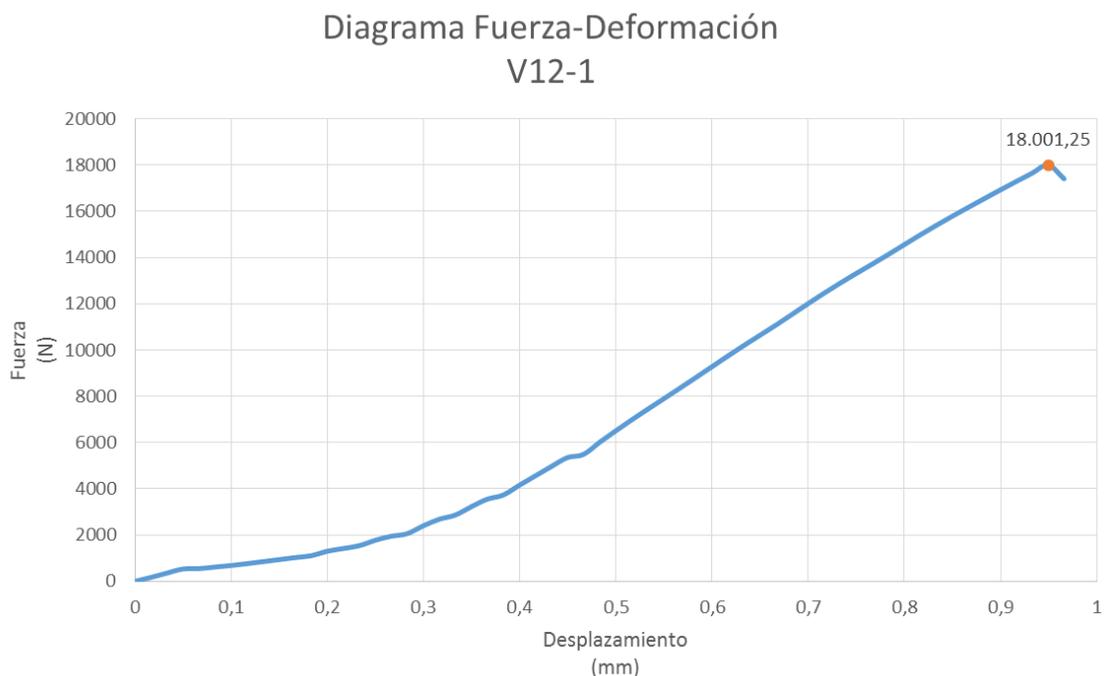


Fuente: Autor

Como ya se ha dicho, todas las muestras de la serie V12 rompen parcial o totalmente a través de un plano paralelo al esfuerzo y que coincide con la discontinuidad volumétrica de las muestras, éstas se rompen por fallo al corte de la parénquima.

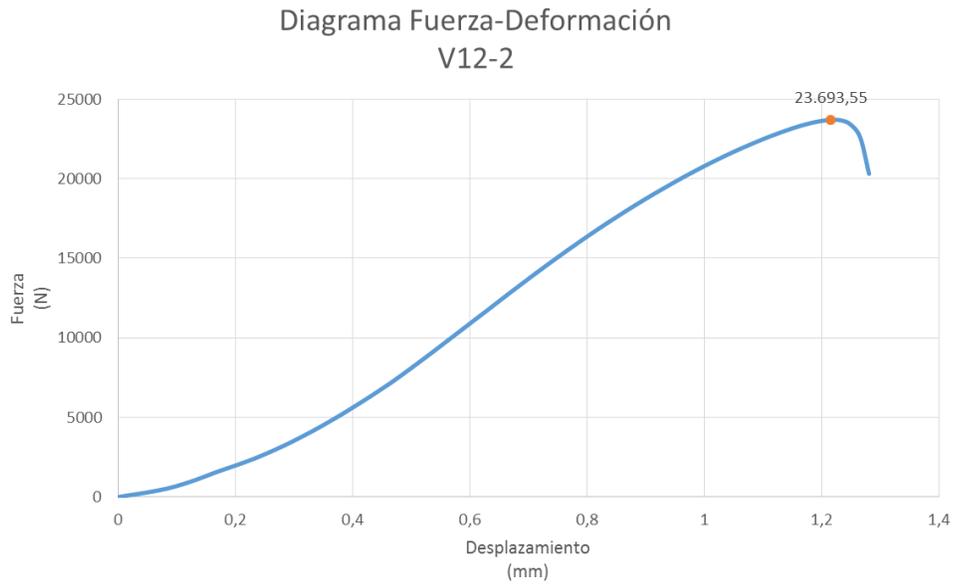
Los diagramas carga-desplazamiento que se han obtenido en los ensayos, son los siguientes:

Figura 5-41. Relación carga-desplazamiento, muestra V12-1



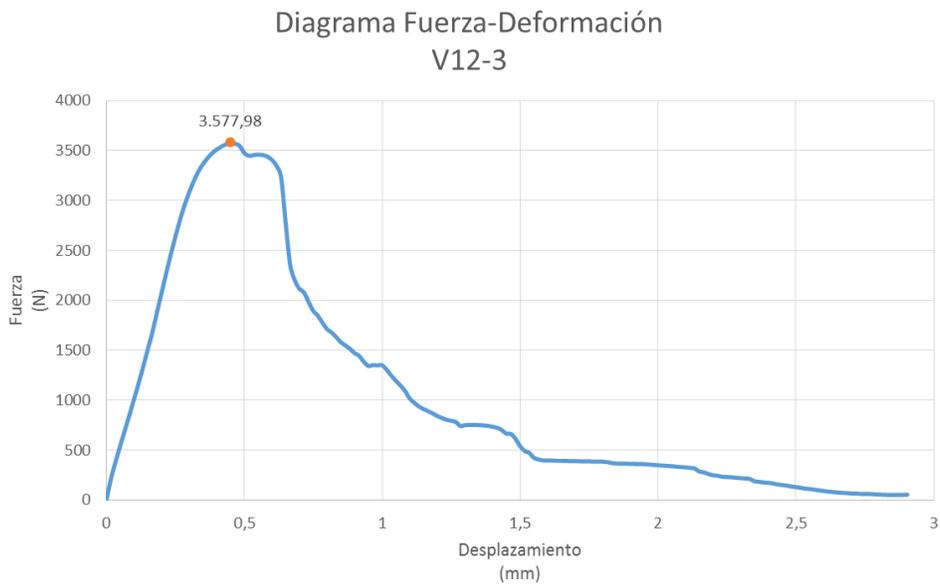
Fuente: Autor

Figura 5-42. Relación carga-desplazamiento, muestra V12-2



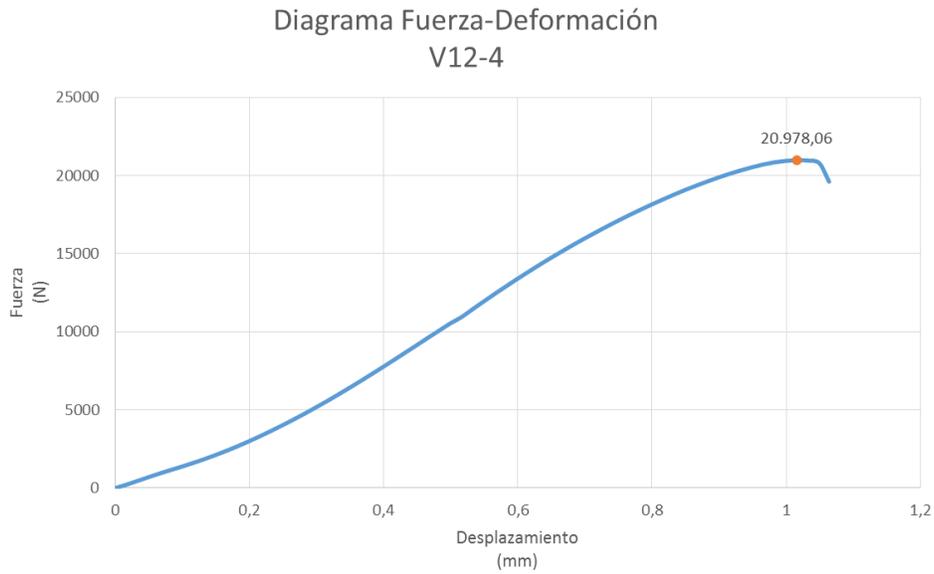
Fuente: Autor

Figura 5-43. Relación carga-desplazamiento, muestra V12-3



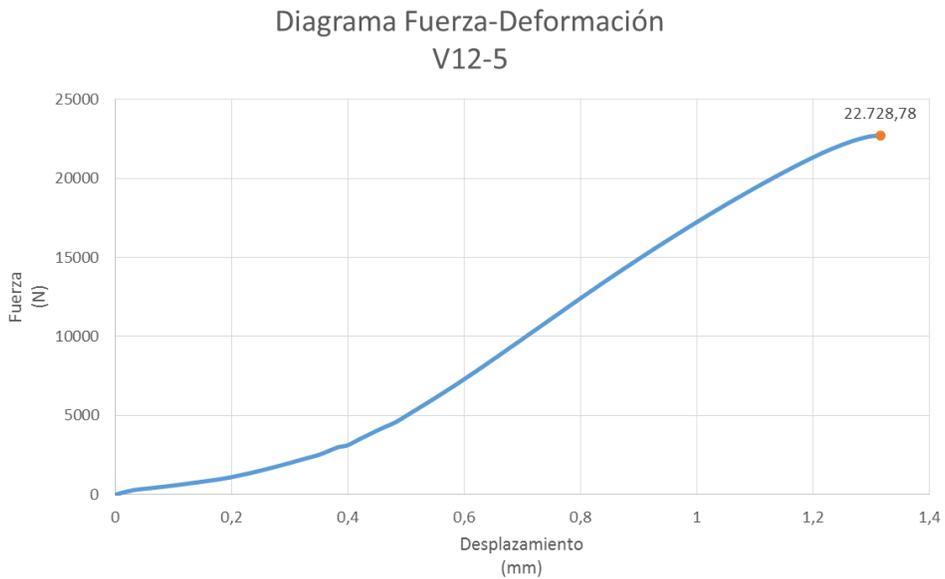
Fuente: Autor

Figura 5-44. Relación carga-desplazamiento, muestra V12-4



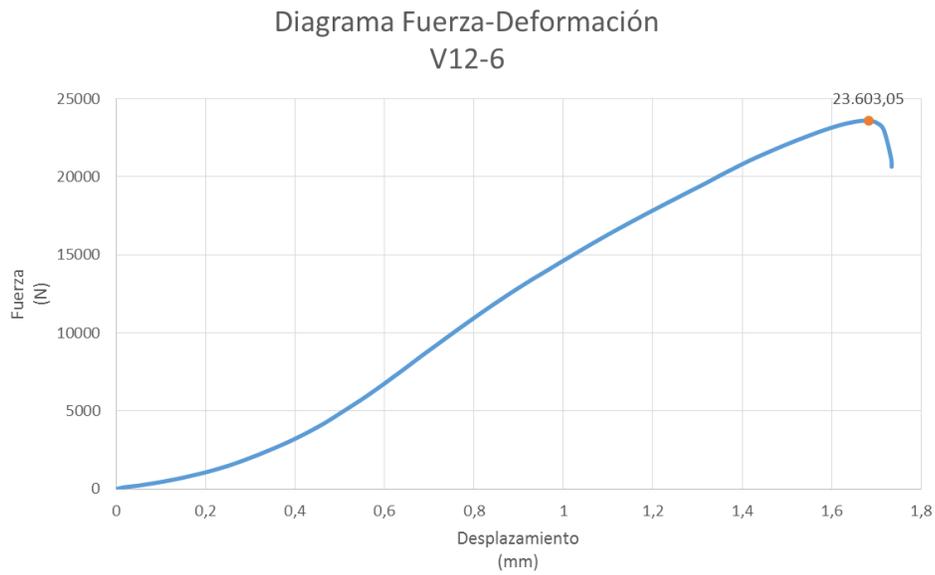
Fuente: Autor

Figura 5-45. Relación carga-desplazamiento, muestra V12-5



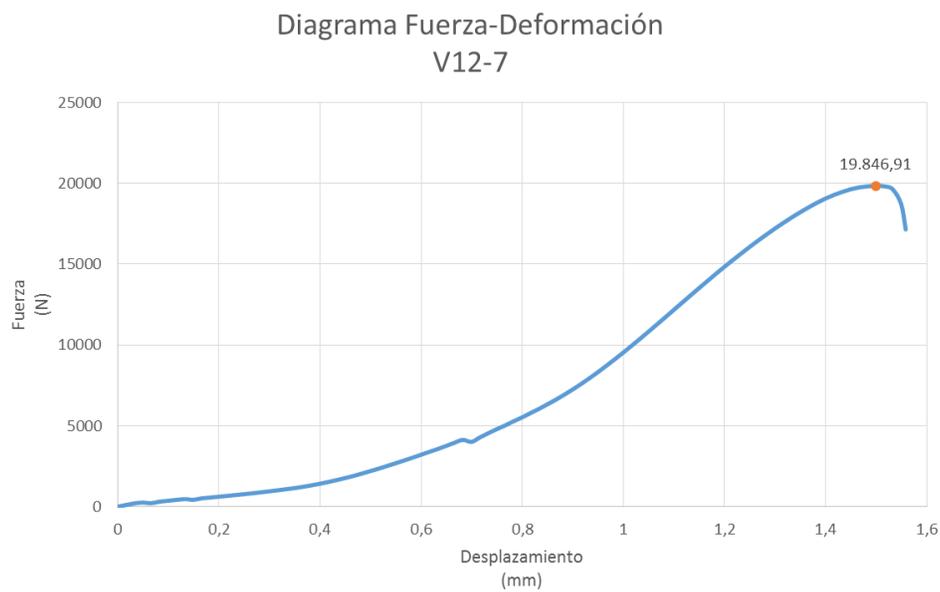
Fuente: Autor

Figura 5-46. Relación carga-desplazamiento, muestra V12-6



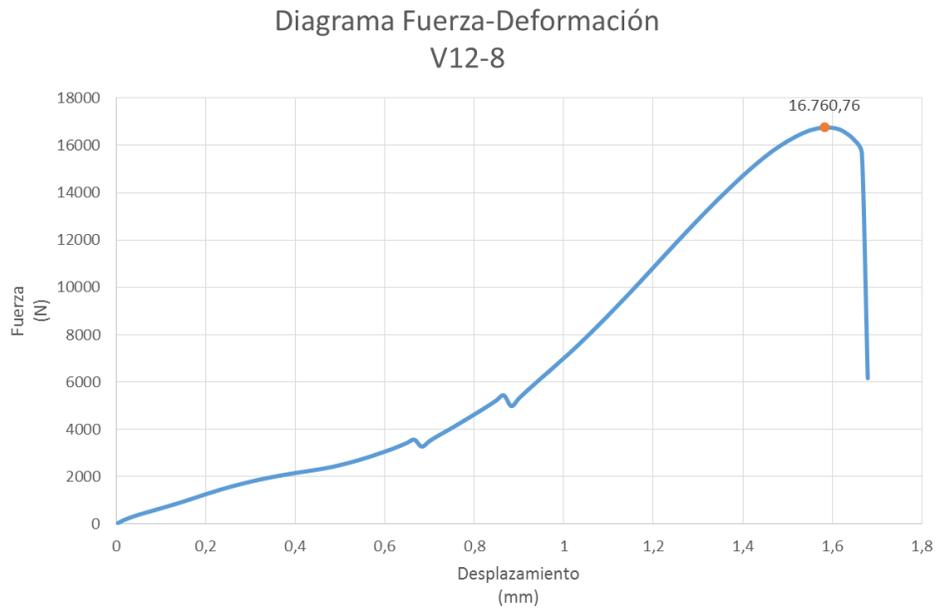
Fuente: Autor

Figura 5-47. Relación carga-desplazamiento, muestra V12-7



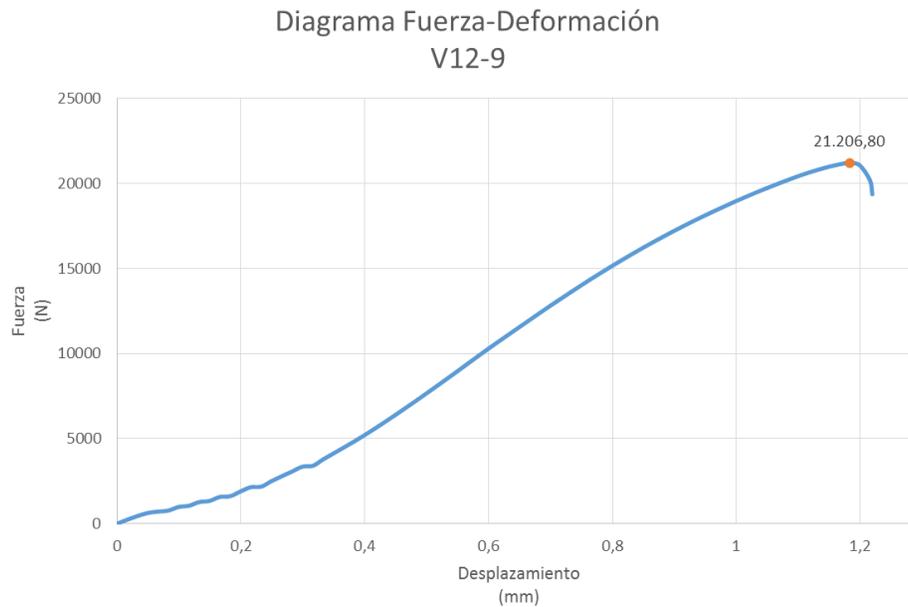
Fuente: Autor

Figura 5-48. Relación carga-desplazamiento, muestra V12-8



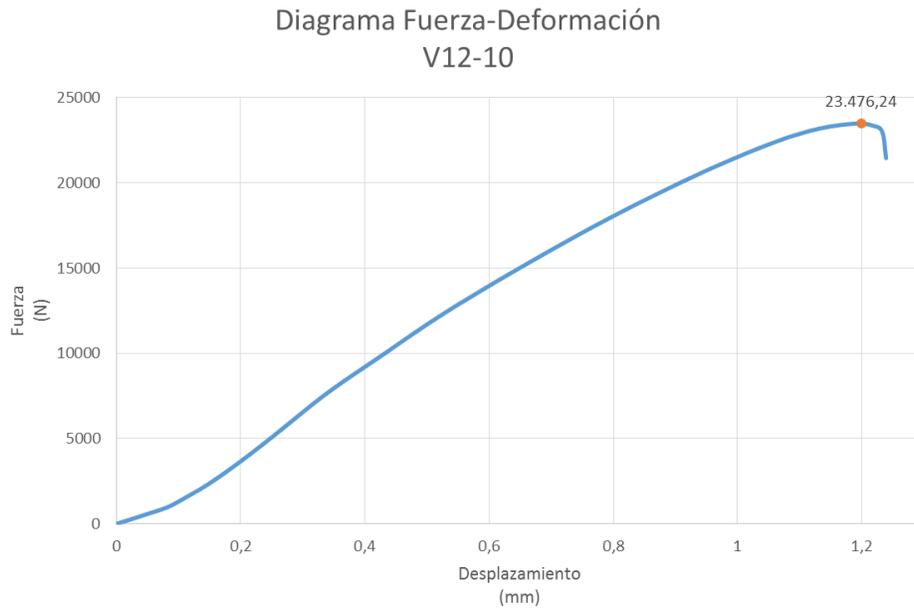
Fuente: Autor

Figura 5-49. Relación carga-desplazamiento, muestra V12-9



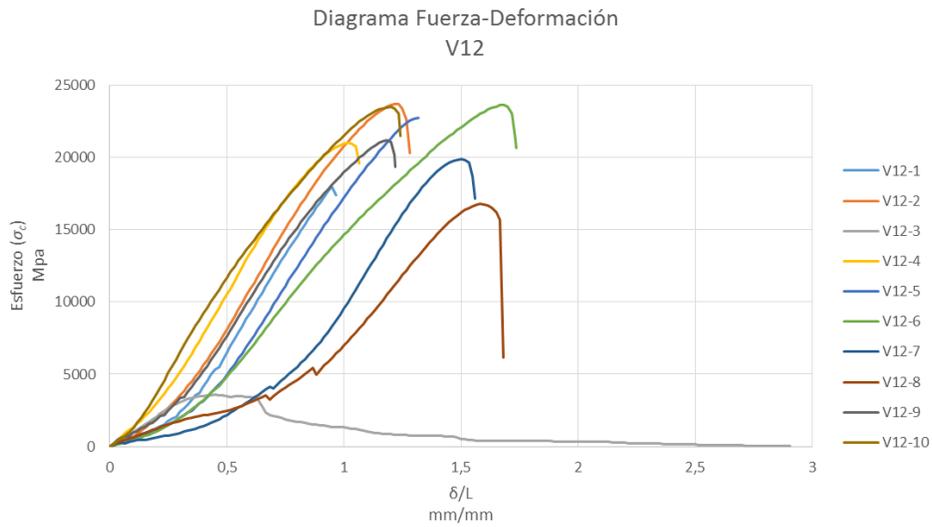
Fuente: Autor

Figura 5-50. Relación carga-desplazamiento, muestra V12-10



Fuente: Autor

Figura 5-51. Relación carga-desplazamiento, muestras tipo V12



Fuente: Autor

En lo que se refiere a los diagramas Fuerza-Desplazamiento podemos ver que todas las muestras V12 tienen un comportamiento similar, salvo las muestra 3. El resto de muestras tienen un comportamiento que se inicia con una fase que se puede obviar, de ajuste de la muestra para soportar la carga aplicada durante el ensayo, para posteriormente pasar a una fase que se puede aproximar a una función lineal, lo que se traduce en un comportamiento elástico hasta llegar a una fase en la que los gráficos describen una curva hasta la ruptura, previamente se pasa por la carga máxima que separa la fase de carga de descarga. Todas registran unos valores de fuerza y de deformación muy similares.

5.2.4 Determinación de la densidad serie V12

5.2.4.1 Descripción de los ensayos

La densidad es una magnitud intensiva que relaciona la masa de un cuerpo determinado y su volumen. Para obtener la densidad de las muestras de la serie V12, se procedió a obtener la geometría de cada una de las muestras midiendo el largo, el ancho y la profundidad, además de obtener su correspondiente masa, pesando cada probeta en una balanza digital con una precisión de 0.01g. Estos dos procedimientos se llevaron a cabo previos al ensayo de rotura por compresión paralela a las fibras.

Tabla 5-8. Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie V12

Muestras	Masa (g)	Ancho (a) (mm)	Ancho (a ₁) (mm)	Ancho (a ₂) (mm)	Largo (b) (mm)	Alto (h) (mm)	Alto (h ₁) (mm)	Alto (h ₂) (mm)	Volumen (mm ³)
V12-1	118,40	62,46	42,29	20,41	49,00	63,85	43,37	20,66	175684,51
V12-2	120,20	62,44	42,26	20,53	49,00	63,91	43,27	20,53	175869,32
V12-3	121,50	62,74	41,63	21,04	49,49	63,89	43,15	21,05	176561,35
V12-4	132,00	62,26	41,87	20,67	48,98	64,04	41,94	21,00	173793,51
V12-5	131,70	61,85	41,25	20,65	48,60	63,78	42,62	21,03	170635,96
V12-6	136,50	62,73	42,71	20,84	49,18	63,46	43,28	20,18	177654,48
V12-7	135,60	62,31	42,42	20,90	49,01	63,44	43,35	20,27	176295,82
V12-8	122,80	62,83	42,24	20,81	49,26	63,42	43,62	19,95	176675,57
V12-9	119,10	62,10	41,66	20,34	48,71	62,86	42,27	20,54	169438,68
V12-10	136,10	61,85	42,19	21,32	48,44	63,48	43,35	20,05	174502,35

Fuente: Autor

5.2.4.2 Resultados

Una vez obtenidos los resultados del ensayo de densidad, que se aportan en la siguiente tabla, se obtiene un valor de densidad media de 0.00072923 g/mm³ o 729.23 Kg/m³, con una desviación estándar o típica de 4.36x10⁻⁵ g/mm³ o 43.62 Kg/m³, y con un coeficiente de variación (se recuerda que es el cociente entre la variación estándar y la densidad media) de 0.0598.

Tabla 5-9. Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie V12

Muestras	Densidad (g/mm ³)	Densidad (Kg/m ³)
V12-1	0,00067394	673,94
V12-2	0,00068346	683,46
V12-3	0,00068815	688,15
V12-4	0,00075952	759,52
V12-5	0,00077182	771,82
V12-6	0,00076835	768,35
V12-7	0,00076916	769,16
V12-8	0,00069506	695,06
V12-9	0,00070291	702,91
V12-10	0,00077993	779,93

Fuente: Autor

5.2.5 Determinación del contenido de humedad serie V12

5.2.5.1 Descripción de los ensayos

Para determinar el contenido de humedad de las probetas de la serie V12 se ha procedido, después de realizado el ensayo de cortante paralelo a la fibra, a pesar cada probeta en una balanza digital con aproximación de 0.01g, registrándose los datos en una tabla antes de entrar al horno. Ingresaron al horno a una temperatura de 102,8° C. A las 48 horas de permanecer en el horno, una vez alcanzado su peso para masa seca, se pesaron cada una de las probetas, registrándose su peso final en la correspondiente tabla (Ver Tabla 5-10)

5.2.5.2 Resultados

En la Tabla 5-10 se detallan los valores de contenido de humedad de cada una de las probetas de la serie V12. El contenido de Humedad promedio de la Serie V12 fue de 11%, con una desviación estándar de 0.88% y un coeficiente de variación del 0.0796.

Tabla 5-10 Determinación del Contenido de Humedad serie V12.

Porcentaje Contenido Humedad Serie V12

Probeta Identificación	Peso Antes horno	Peso Final	Diferencia de Peso	Porcentaje Diferencial
Serie	g	g	g	%
V12-1	89.1	80.2	8.9	10%
V12-2	91.7	81.9	9.8	11%
V12-3	121.5	107.5	14	12%
V12-4	99	89.2	9.8	10%
V12-5	97.8	88.3	9.5	10%
V12-6	106	93.8	12.2	12%
V12-7	102.1	90.6	11.5	11%
V12-8	92.4	81.1	11.3	12%
V12-9	91.3	81.3	10	11%
V12-10	101.9	91.5	10.4	10%

Porcentaje Contenido Humedad Serie V12 **11%**

Fuente: Autor

5.2.6 Análisis de resultados serie V12

La forma de rotura de las muestras de esta serie es frágil y se formaliza según un plano paralelo al esfuerzo, previamente se obtienen unas deformaciones laterales locales producidas por la acomodación de las fibras horizontales en la matriz de la parénquima.

Lo primero que hay que destacar es que la muestra V12-3 y la V12-8 no se deben considerar por el criterio de exclusión de Chauvenet de datos anómalos, debido al registro de tensiones máximas y de deformaciones de rotura respectivamente.

Las muestras de mayor tensión máxima son las V12-10, la V12-2 y la V12-6 (11.18 N/mm², 11.17 N/mm² y 11.09 N/mm², respectivamente). Todas las muestras han roto por fallo de cizalladura de la parénquima, experimentando un tipo de rotura paralela al esfuerzo y frágil, cosa habitual en este tipo de ensayos y con este tipo de materiales.

Si se analizan los diagramas tensión-deformación de las muestras, se puede apreciar que en todas las muestras, salvo la V12-3 y la V12-8, una vez alcanzada la tensión máxima se produce una pérdida de carga con un pequeño aumento de la deformación hasta la rotura. Por otro lado, podemos ver que todas las muestras poseen una deformación de rotura similar. Se puede apreciar cierta homogeneidad en lo que a tensión máxima se refiere. El valor promedio de la resistencia a cortante paralelo a las fibras de la serie V12 es de 9.22MPa, con una desviación típica de 2.90MPa y un coeficiente de variación de 0.315. Si descartamos las muestras anómalas la resistencia media a cortante paralelo a las fibras es de 10.34MPa, con una desviación típica de 0.99MPa y un coeficiente de variación de 0.0958. Toda esta información se resume en la siguiente tabla.

Tabla 5-11. Resumen de análisis de resultados

Código de Muestra	Diagrama Tensión-Deformación						Modo de Rotura					
	Deformación Longitudinal Unitara			Tensión Máxima			Parénquima			Adhesivo		
	Baja	Media	Elevada	Baja	Media	Elevada	Leve	Media	Total	Leve	Media	Total
V12-1		X		X					X			
V12-2		X				X			X			
V12-3			X	X				X				
V12-4		X			X				X			
V12-5		X				X			X			
V12-6			X			X			X			
V12-7			X		X				X			
V12-8	X			X					X			
V12-9		X			X				X			
V12-10		X				X			X			

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos en todo a lo que se refiere a los ensayos de resistencia a corte paralela a fibra y con la misma disposición de latillas son comparables a otros estudios ya realizados mediante ensayos con probetas características geométricas similares.

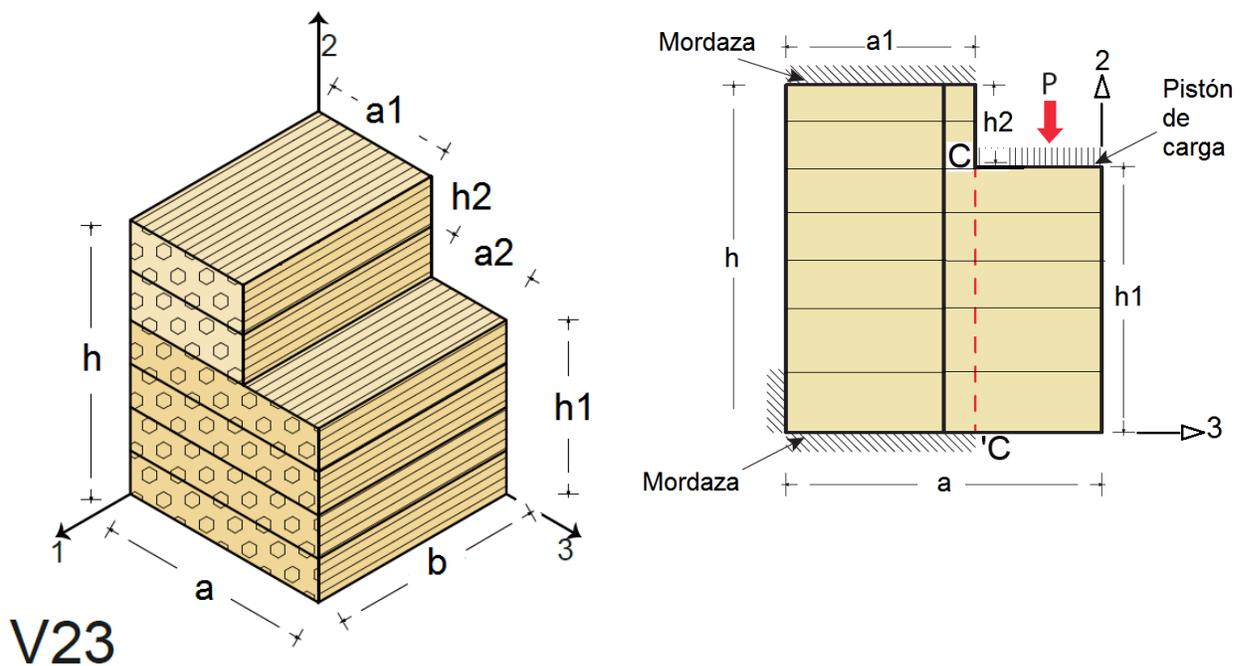
En un estudio realizado por López y Correal (López & Correal, 2009) en ensayos de corte paralelo a la fibra en 33 probetas elaboradas con PVA, reportaron un valor promedio de 9.4MPa con un coeficiente de variación de 0.13. Correal y colaboradores (Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014) reportan un valor de 9.5MPa con un coeficiente de variación de 0.14 en 20 ensayos de probetas elaborados con un 50% de urea 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.

7.1 CORTANTE PERPENDICULAR A LA FIBRA EN PROBETAS SERIE V23

Las muestras de las series V23 y V32 están solicitadas a esfuerzos cortantes, pero con la diferencia de que en este caso las fibras se disponen en posición perpendicular al esfuerzo.

A la serie V23 se le aplica la carga paralela al eje 2 y actúa sobre una superficie que es normal al eje 3, por lo que la carga es perpendicular a las fibras y al plano de las latillas. Eso significa que las tensiones tangenciales recorren zonas de alta y baja densidad de fibras de varias latillas.

Figura 5-52. Probeta V23. Esquema ensayo de corte.



Fuente: Autor

5.3.1 Descripción de los ensayos

La serie V23 fue sometida a un esfuerzo cortante perpendicular a las fibras de las probetas. Se ensayaron 10 probetas, cada una de las cuales fueron marcadas y numeradas para su identificación.

Se realizaron las mediciones en todos los sentidos de cada una de las probetas.

Las pruebas se realizaron en una máquina universal de ensayos AG-X plus (Anexo B1 Certificado de Calibración), las probetas se colocaron en un dispositivo específico para este tipo de ensayos con una mordaza, para sujeción de la muestra.

Dichas muestras se definen con las siguientes características geométricas, tres medidas relacionadas con el alto de la muestra (medida vertical), alto total (h), alto parcial inferior (h_1) y alto parcial superior (h_2), una medida que define el largo (b), que es la única medida que se mantiene constante en las muestras, y tres medidas que definen el ancho, ancho total (a), ancho parcial superior (a_1) y ancho parcial intermedio (a_2).

5.3.2 Cálculo y Resultados

Para obtener el esfuerzo de cortante que sufre cada probeta se hace uso de la Ecuación 5-5, la cual nos relaciona la tensión tangencial resultante (τ) como el cociente de la fuerza aplicada (P) respecto el área en la que se produce el esfuerzo cortante (A_v), o sea la paralela al esfuerzo.

$$\tau = \frac{P}{A_v} \quad \text{Ecuación 5-5}$$

Para poder comparar el comportamiento de las 10 muestras tipo V23 y V32, se realiza el mismo procedimiento que en las muestras ensayadas a compresión, por lo que se compara la relación de la tensión tangencial al área de referencia aplicada (τ) con la deformación longitudinal unitaria (δ/L), pero en este caso del área de referencia y considerando la deformación paralela al esfuerzo. En la Figura 5-52., se representa dicha relación, situando en el eje vertical la tensión tangencial al área de referencia aplicada (τ) y en el eje horizontal la deformación longitudinal unitaria (δ/L) del área de referencia y según la dirección paralela a la fuerza aplicada, para diferentes niveles de carga. En este caso, la deformada registrada (δ) coincide con el desplazamiento del plato de carga.

Figura 5-53. Esfuerzo cortante vs δ/L probetas a cortante V23



Fuente: Autor

En la fase de carga todas las muestras presentan un tramo que se puede considerar lineal, muestras como la 1, 2, 7, 9 y 10 tienen la pendiente de dicha recta con un valor similar entre sí, pero bastante más alto que el de las muestras 3, 4, 5, 6 y 8. Posteriormente aparece un tramo curvo en el que el material tiene un comportamiento plástico hasta la rotura. Adicionalmente, cabe destacar que en dicha fase plástica da lugar la tensión máxima, teniendo todas las muestras un valor similar. Analizando la rotura, podemos decir que las muestras 1, 2 y 7 experimentan una deformación de rotura alrededor de la mitad que el resto, esto significa que estas tres muestras tienen un comportamiento más frágil que el resto. Todos los diagramas se componen de una serie de saltos, éstos se producen en el momento que se van generando las diferentes fisuras que provocan pérdidas de resistencia, sin fallar completamente la muestra, estos saltos tienen comportamientos diferentes entre las diferentes muestras y si se trata de la fase de carga o de descarga, ya que la propagación de la fisura depende de la distribución de las fibras.

La resistencia a cortante (F_v) de cada probeta se obtuvo mediante la Ecuación 5-6., donde P_{max} es la máxima fuerza que se aplica y A_v es el área de cortante, que no es más que la sección paralela a P_{max} de cada probeta.

$$F_v = \frac{P_{max}}{A_v} \quad \text{Ecuación 5-6}$$

Tabla 5-12. Resistencia a cortante promedio de las muestras V23

Muestras V23			
Probeta	P _{max} (N)	A _v (mm ²)	F _v (Mpa)
V23-1	7871,48	2098,26	3,75
V23-2	9093,51	2117,22	4,30
V23-3	8896,24	2146,89	4,14
V23-4	8169,75	2091,53	3,91
V23-5	8324,25	2149,93	3,87
V23-6	8537,60	2111,47	4,04
V23-7	8417,43	2166,51	3,89
V23-8	6835,66	2135,83	3,20
V23-9	8654,19	2094,10	4,13
V23-10	10417,07	2094,29	4,97

Fuente: Autor

Según la anterior tabla la resistencia media a cortante perpendicular a la fibra contando las 10 muestras es de 4.02MPa con una desviación típica de 0.45MPa, con un coeficiente de variación (se recuerda que es el cociente entre la variación estándar y la tensión media) de 0.112.

Tabla 5-13. Resistencia a cortante promedio de las muestras V12, V13 y V23

Muestras V12				Muestras V13				Muestras V23			
Probeta	P _{max} (N)	A _v (mm ²)	F _v (Mpa)	Probeta	P _{max} (N)	A _v (mm ²)	F _v (Mpa)	Probeta	P _{max} (N)	A _v (mm ²)	F _v (Mpa)
V12-1	18001,25	2125,13	8,47	V13-1	35343,71	2112,40	16,73*	V23-1	7871,48	2098,26	3,75
V12-2	23693,55	2120,23	11,17	V13-2	15130,05	2143,92	7,06	V23-2	9093,51	2117,22	4,30
V12-3	3577,98	2135,49	1,68*	V13-3	19557,51	2091,49	9,35	V23-3	8896,24	2146,89	4,14
V12-4	20978,06	2054,22	10,21	V13-4	18832,40	2187,19	8,61	V23-4	8169,75	2091,53	3,91
V12-5	22728,78	2071,33	10,97	V13-5	19849,01	2172,26	9,14	V23-5	8324,25	2149,93	3,87
V12-6	23603,05	2128,51	11,09	V13-6	18633,79	2116,99	8,80	V23-6	8537,60	2111,47	4,04
V12-7	19846,91	2124,58	9,34	V13-7	11216,09	2097,57	5,35	V23-7	8417,43	2166,51	3,89
V12-8	16760,76	2148,72	7,80*	V13-8	7409,46	2087,84	3,55	V23-8	6835,66	2135,83	3,20
V12-9	21206,80	2058,97	10,30	V13-9	9290,88	2104,30	4,42	V23-9	8654,19	2094,10	4,13
V12-10	23476,24	2099,87	11,18	V13-10	19806,14	2118,77	9,35	V23-10	10417,07	2094,29	4,97

Fuente: Autor

Los valores con asterisco (*), son los valores excluidos por ser considerados anómalos.

5.3.3 Observaciones durante el ensayo

Para analizar los aspectos reseñables de las muestras que han acaecido durante los ensayos, es fundamental analizar la forma de rotura de las mismas y sus correspondientes diagramas carga-desplazamiento.

La forma de rotura que se ha registrado en todas las muestras es la de fisuras que se propagan por un plano diagonal, que se inicia en la unión del plano vertical y horizontal de la discontinuidad hasta el vértice opuesto. Esto se debe a que el material rompe por la parénquima a través de las fibras.

Figura 5-54 Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 1 estado final



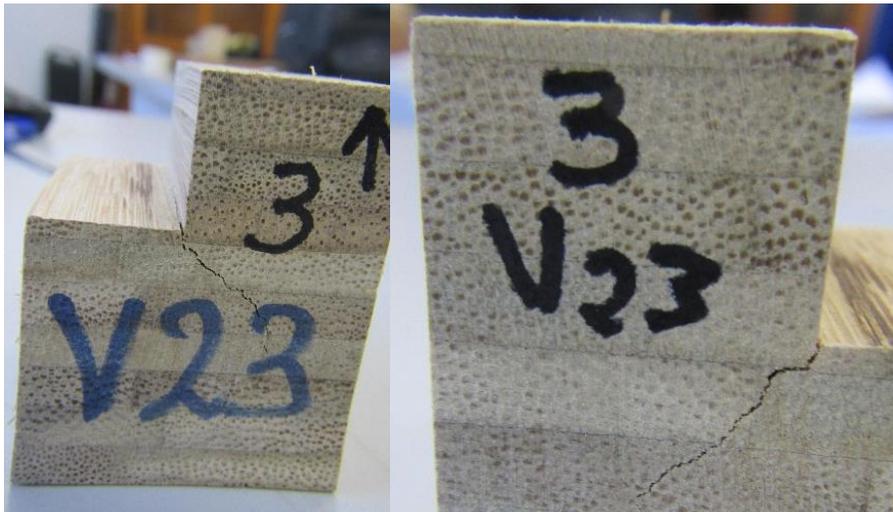
Fuente: Autor

Figura 5-55. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 2 estado final



Fuente: Autor

Figura 5.-56 Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 3 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-57 Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 4 estado final



Fuente : Autor

Figura 5-58 Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 5 estado final



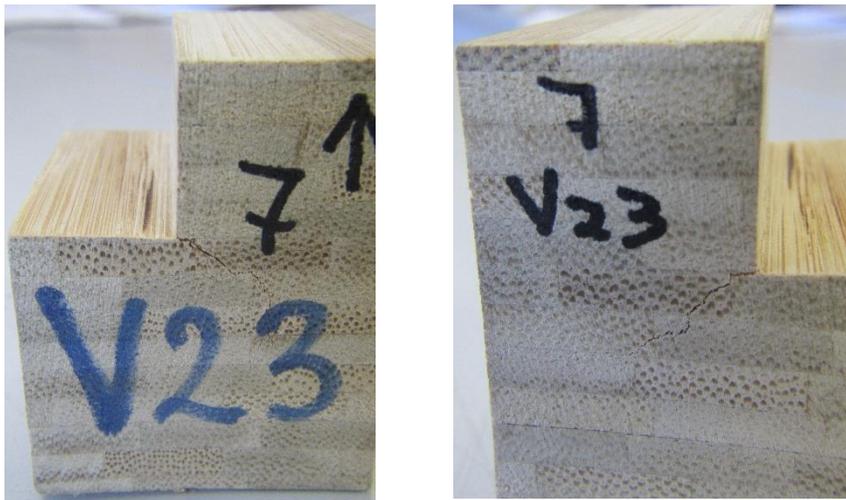
Fuente: Autor

Figura 5-59 Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 6 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-60. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 7 estado final



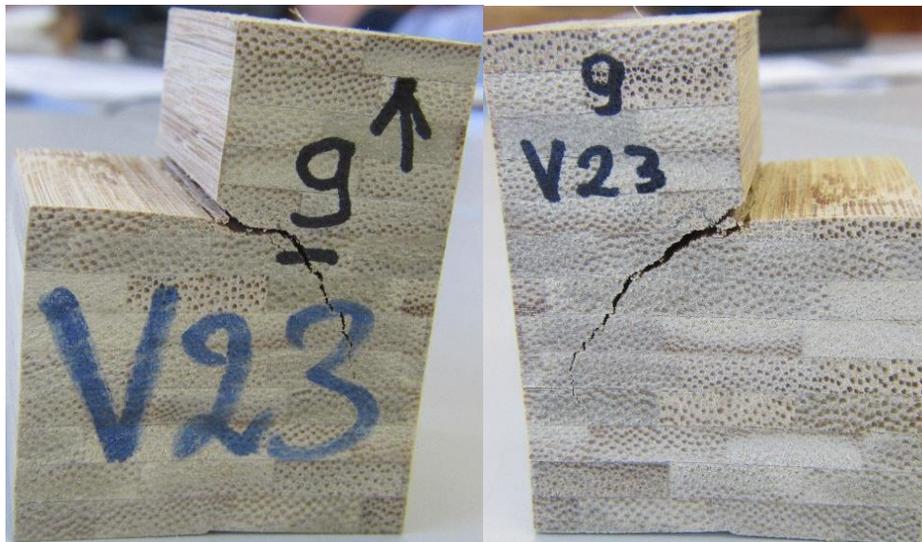
Fuente: Autor

Figura 5-61. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 8 estado final



Fuente: Autor

Figura 5-62. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 9 estado final



Fuente: Autor

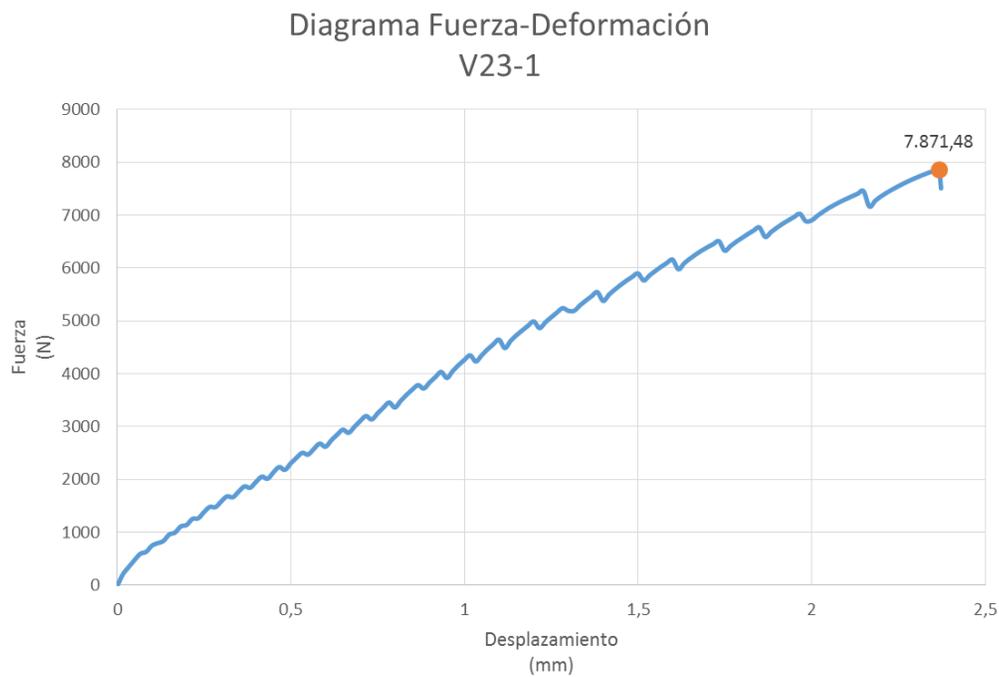
Figura 5-63. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra en probetas V23 – 10 estado final



Fuente: Autor

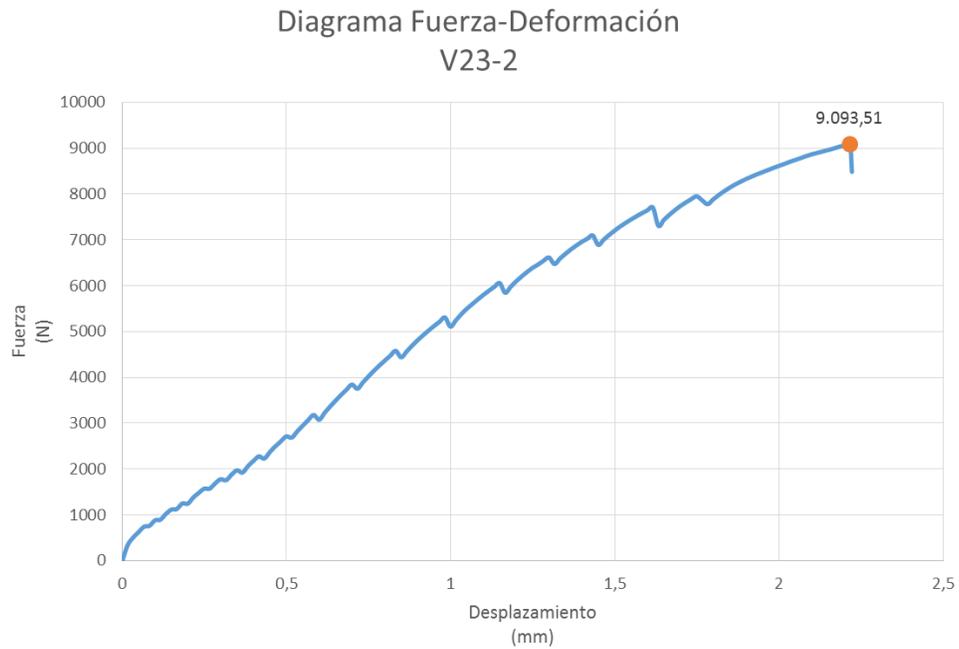
Los diagramas carga-desplazamiento que se han obtenido en los ensayos, son los siguientes:

Figura 5-64. Relación carga-desplazamiento, muestra V23-1



Fuente: Autor

Figura 5-65. Relación carga-desplazamiento, muestra V23-2



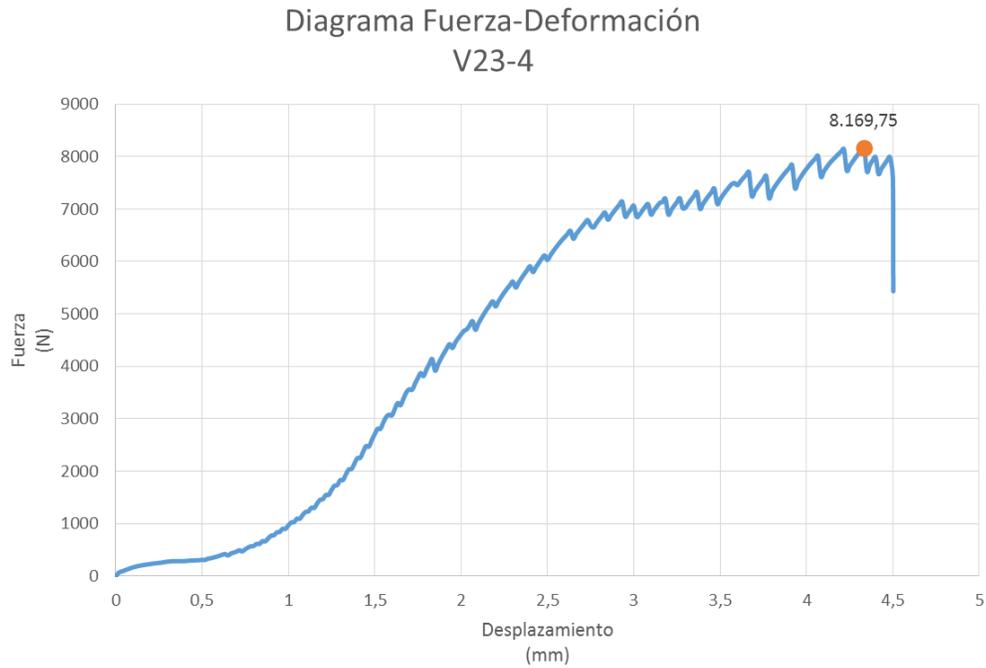
Fuente: Autor

Figura 5-66. Relación carga-desplazamiento, muestra V23-3



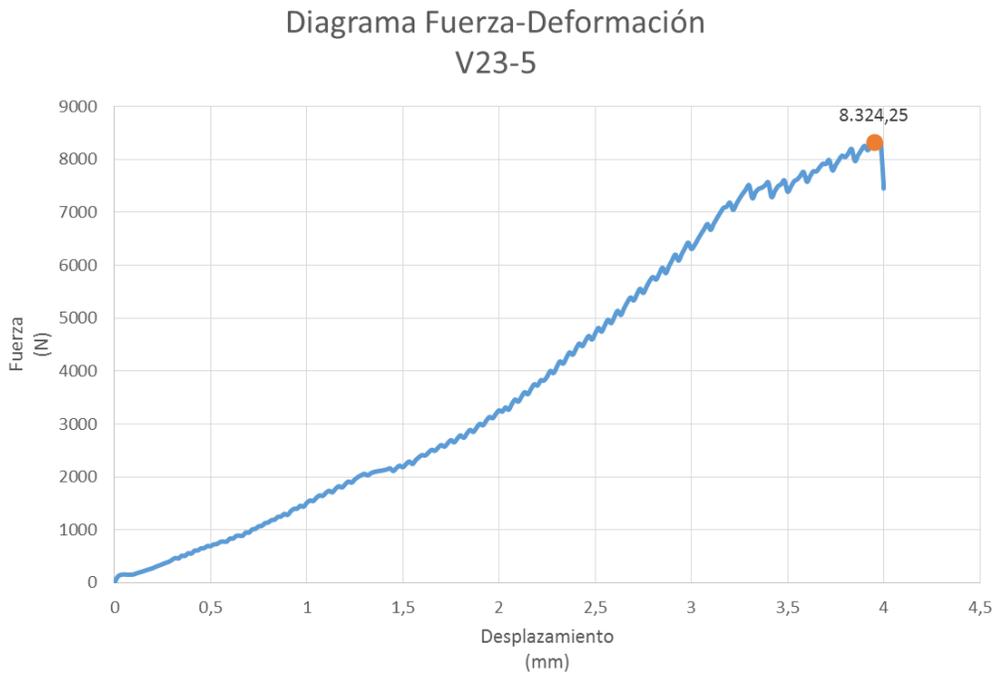
Fuente: Autor

Figura 5-67. Relación carga-desplazamiento, muestra V23-4



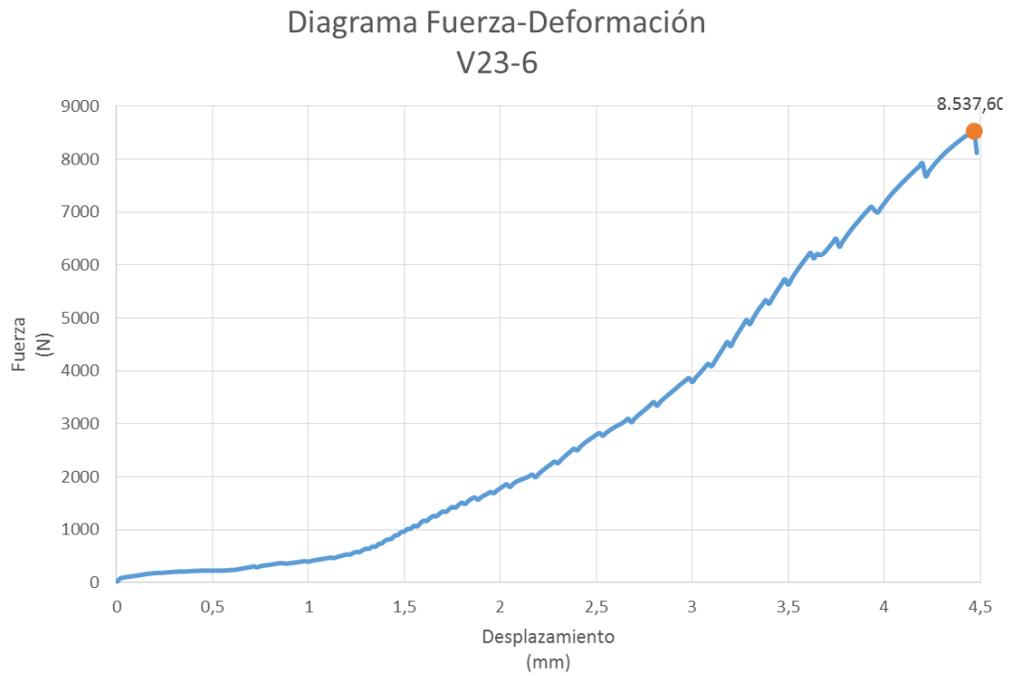
Fuente: Autor

Figura 5-68. Relación carga-desplazamiento, muestra V23-5



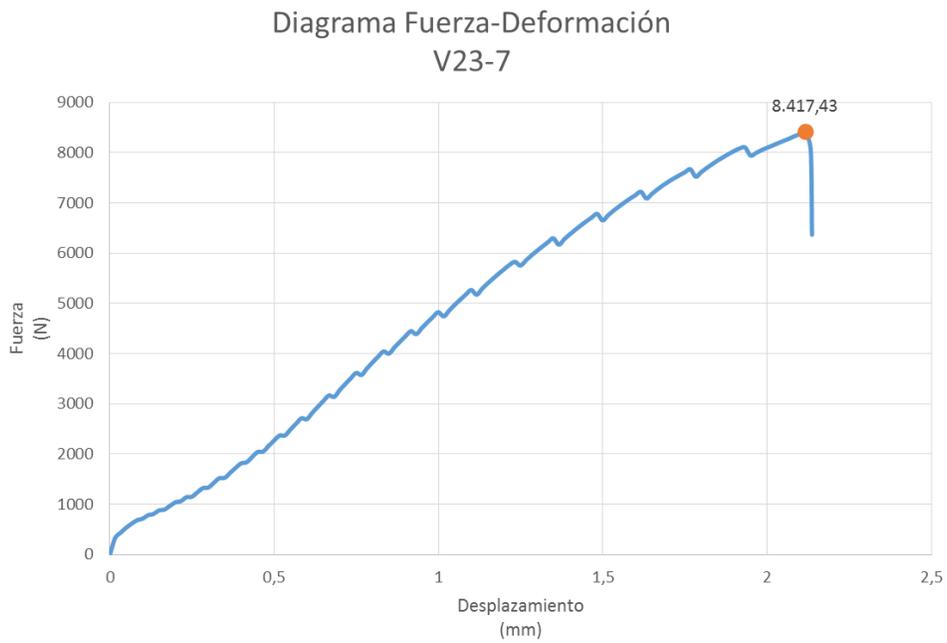
Fuente: Autor

Figura 5-69. Relación carga-desplazamiento, muestra V23-6



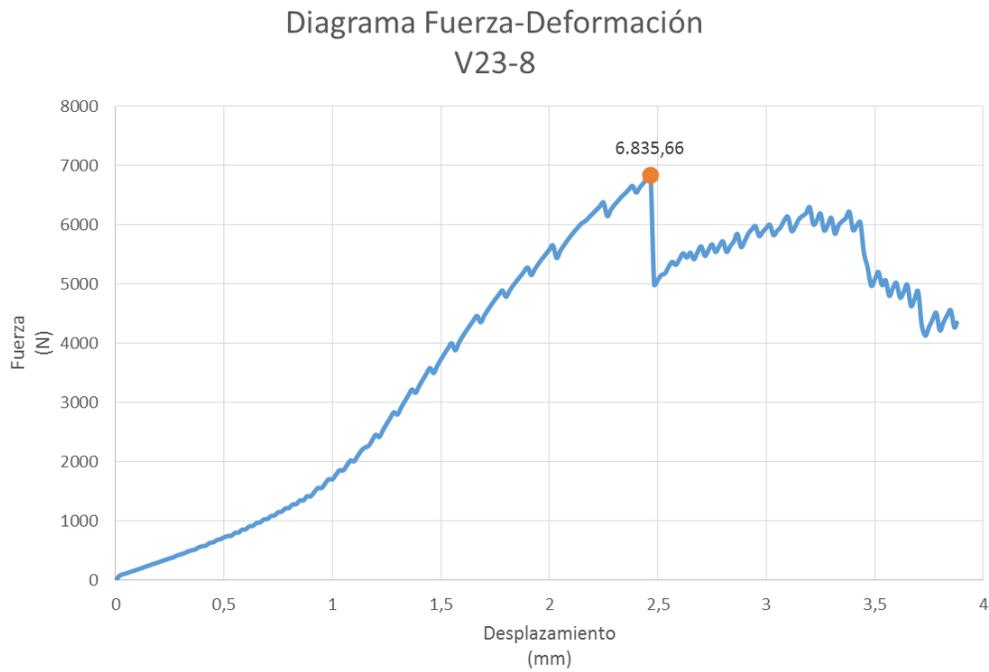
Fuente: Autor

Figura 5-70. Relación carga-desplazamiento, muestra V23-7



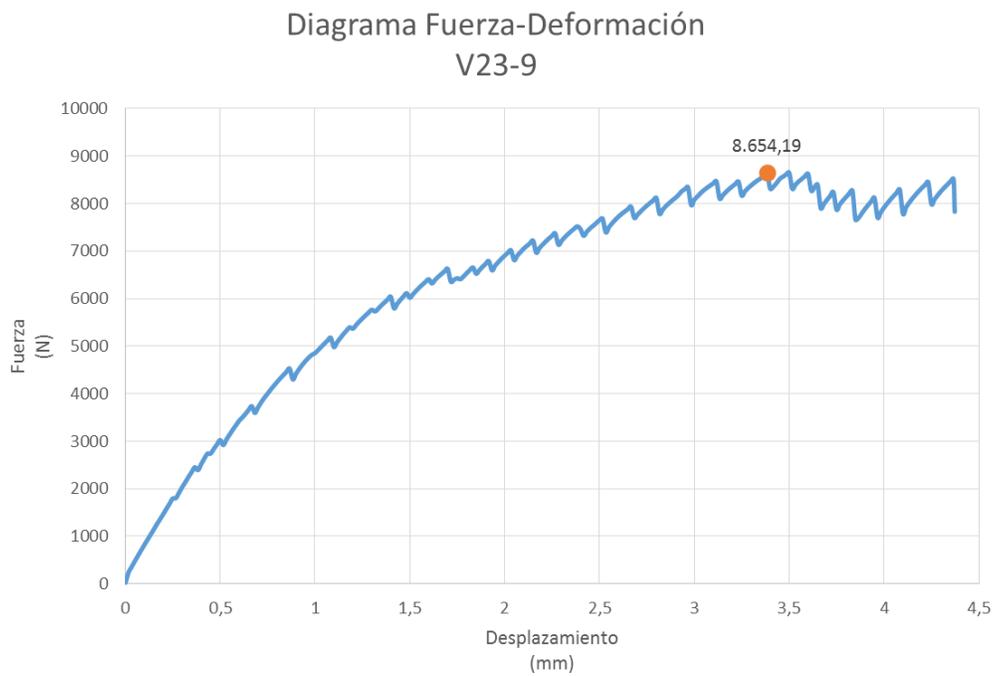
Fuente: Autor

Figura 5-71. Relación carga-desplazamiento, muestra V23-8



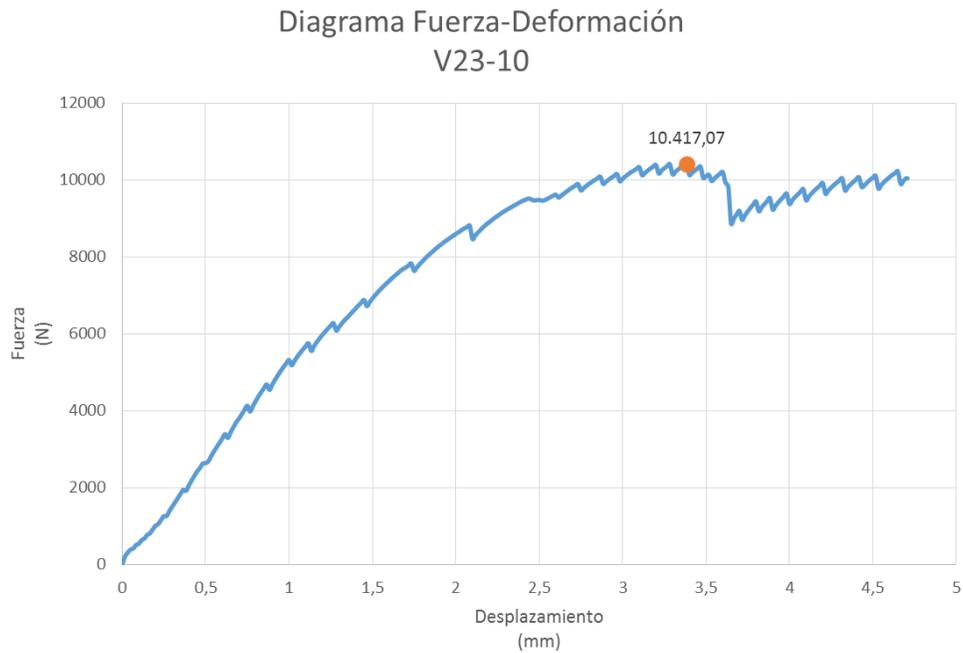
Fuente: Autor

Figura 5-72. Relación carga-desplazamiento, muestra V23-9



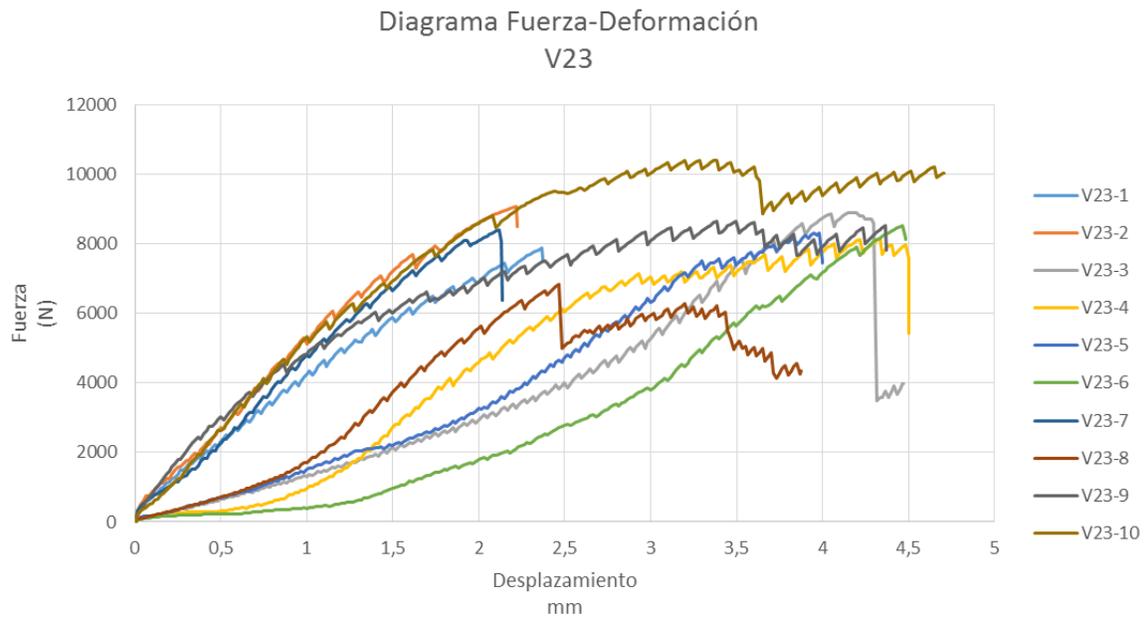
Fuente: Autor

Figura 5-73. Relación carga-desplazamiento, muestra V23-10



Fuente: Autor

Figura 5-74. Relación carga-desplazamiento, muestras tipo V23



Fuente: Autor

En lo que se refiere a los diagramas Fuerza-Desplazamiento podemos ver que todas las muestras V23 tienen un comportamiento similar. Todas las muestras tienen un comportamiento que se inicia con una fase que se puede obviar, de ajuste de la muestra para soportar la carga aplicada durante el ensayo, para posteriormente pasar a una fase que se puede aproximar a una función lineal, lo que se traduce en un comportamiento elástico hasta llegar a una fase en la que los gráficos describen una curva hasta la ruptura, previamente se pasa por la carga máxima que separa la fase de carga de descarga. Todas registran unos valores de fuerza y de deformación muy similares.

En la fase de carga todas las muestras presentan un tramo que se puede considerar lineal, muestras como la 1, 2, 7, 9 y 10 tienen la pendiente de dicha recta con un valor similar entre sí, pero bastante más alto que el de las muestras 3, 4, 5, 6 y 8. Posteriormente aparece un tramo curvo en el que el material tiene un comportamiento plástico hasta la rotura. Adicionalmente, cabe destacar que en dicha fase plástica da lugar la fuerza máxima, teniendo todas las muestras un valor similar, menos la muestra 8, que tiene una fuerza máxima menor. Analizando la rotura, podemos decir que las muestras 1, 2 y 7 experimentan una deformación de rotura alrededor de la mitad que el resto, esto significa que estas tres muestras tienen un comportamiento más frágil que el resto.

5.3.4 Determinación de la densidad serie V23

5.3.4.1 Descripción de los ensayos

La densidad es una magnitud intensiva que relaciona la masa de un cuerpo determinado y su volumen. Para obtener la densidad de las muestras de la serie V23, se procedió a obtener la geometría de cada una de las muestras midiendo el largo, el ancho y la profundidad, además de obtener su correspondiente masa, pesando cada probeta en una balanza digital con una precisión de 0.01g. Estos dos procedimientos se llevaron a cabo previos al ensayo de rotura por compresión paralela a las fibras.

Tabla 5-14. Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie V23

Muestras	Masa (g)	Ancho (a) (mm)	Ancho (a ₁) (mm)	Ancho (a ₂) (mm)	Largo (b) (mm)	Alto (h) (mm)	Alto (h ₁) (mm)	Alto (h ₂) (mm)	Volumen (mm ³)
V23-1	92,30	48,96	28,50	20,61	49,84	62,40	42,10	20,51	131880,68
V23-2	96,90	50,63	29,54	22,00	50,35	62,30	42,05	20,53	139240,00
V23-3	100,00	50,68	29,79	21,69	50,85	62,59	42,22	20,65	141378,66
V23-4	108,60	49,84	29,79	20,89	50,63	62,93	41,31	20,50	138607,25
V23-5	95,60	50,74	29,67	21,69	50,67	62,34	42,43	20,40	140352,58
V23-6	106,10	50,48	29,36	20,60	50,72	62,61	41,63	20,67	136731,36
V23-7	106,20	49,52	28,75	21,49	51,51	62,51	42,06	20,65	139130,15
V23-8	99,30	50,75	29,70	21,59	50,60	62,83	42,21	20,82	140534,66
V23-9	108,50	49,60	29,77	20,83	50,57	62,77	41,41	20,78	138118,46
V23-10	107,90	49,71	29,73	21,23	50,82	62,72	41,21	20,58	139224,13

Fuente: Autor

5.3.4.2 Resultados

Una vez obtenidos los resultados del ensayo de densidad, que se aportan en la siguiente tabla, se obtiene un valor de densidad media de 0.00073742 g/mm³ o 737.42 Kg/m³, con una desviación estándar o típica de 4.24x10⁻⁵ g/mm³ o 42.38 Kg/m³, y con un coeficiente de variación (se recuerda que es el cociente entre la variación estándar y la densidad media) de 0.0575.

Tabla 5-15. Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie V23

Muestras	Densidad (g/mm ³)	Densidad (Kg/m ³)
V23-1	0,00069988	699,88
V23-2	0,00069592	695,92
V23-3	0,00070732	707,32
V23-4	0,00078351	783,51
V23-5	0,00068114	681,14
V23-6	0,00077597	775,97
V23-7	0,00076331	763,31
V23-8	0,00070659	706,59
V23-9	0,00078556	785,56
V23-10	0,00077501	775,01

Fuente: Autor

5.3.5 Determinación del contenido de humedad serie V23

5.3.5.1 Descripción de los ensayos

Después de haber sometido cada probeta de la Serie V23 al ensayo de Cortante Perpendicular a la fibra en probetas, se procedió a pesar cada una de ellas en una balanza digital con aproximación de 0.01g, registrándose los datos en una tabla antes de entrar al horno. Ingresaron al horno a una temperatura de 102,8° C. A las 48 horas de permanecer en el horno, una vez alcanzado su peso para masa seca, se pesaron nuevamente cada probetas, registrándose su peso final en la correspondiente tabla (Ver Tabla 5-16)

5.3.5.2 Resultados

En la Tabla 5.3.1 se detallan los valores de contenido de humedad de cada una de las probetas de la serie V23. El contenido de Humedad promedio de la Serie V23 fue de 10%, con una desviación estándar de 0.71% y un coeficiente de variación del 0.071.

Tabla 5-16. Determinación del Contenido de Humedad serie V23.

Porcentaje Contenido Humedad Serie V23

Probeta Identificación	Peso Antes horno	Peso Final	Diferencia de Peso	Porcentaje Diferencial
Serie	g	g	g	%
V23-1	91.6	82.1	9.5	10%
V23-2	96.3	86.8	9.5	10%
V23-3	99.1	88.3	10.8	11%
V23-4	107.8	97	10.8	10%
V23-5	95	85.5	9.5	10%
V23-6	105.2	94.7	10.5	10%
V23-7	105.2	94.1	11.1	11%
V23-8	98.1	86.5	11.6	12%
V23-9	107.5	96.1	11.4	11%
V23-10	107.2	96.8	10.4	10%

Porcentaje Contenido Humedad Serie V23

10%

Fuente: Autor

5.3.6 Análisis de resultados serie V23

La forma de rotura de las muestras de esta serie es más dúctil que las series con las fibras paralelas a la carga (V12 y V13) y se formaliza según un plano diagonal que une la intersección del plano horizontal y vertical de la discontinuidad con su

vértice opuesto, en algunos casos la fisura es casi imperceptible y en otros posee una abertura destacable.

Las muestras de mayor tensión máxima son las V23-10 y la V23-4 (4.57 N/mm² y 4.50 N/mm², respectivamente). Todas las muestras han roto por fallo de la parénquima, por eso se produce la fisura en diagonal, ya que ésta se abre camino a través de las fibras, cosa habitual en este tipo de ensayos y con este tipo de materiales.

Si se analizan los diagramas tensión-deformación de las muestras, se puede apreciar que en todas las muestras tienen un comportamiento similar, ya que todas empiezan con una fase inicial de carga que se compone de un tramo lineal y uno curvo hasta la tensión máxima, posteriormente sigue el tramo curvo pero en fase de descarga hasta la rotura. Si analizamos la pendiente del tramo lineal o tramo de comportamiento elástico, se puede observar que las muestras 1, 2, 7 y 10 poseen una pendiente reseñablemente mayor, lo que significa que necesitan una tensión casi 4 veces mayor para tener la misma deformación que el resto de las muestras. Por otro lado, podemos ver que las muestras 1, 2 y 7 tienen un comportamiento más frágil que el resto, ya que la deformación de rotura es casi la mitad que el resto. Se puede apreciar cierta heterogeneidad en lo que a tensión máxima se refiere, ya que la diferencia entre la muestra de mayor valor y la muestra de menor valor es de 1.77MPa, lo que supone un 36% menos de la tensión máxima más alta. El valor promedio de la resistencia a cortante perpendicular a las fibras de la serie V23 es de 4.02MPa, con una desviación típica de 0.45MPa y un coeficiente de variación de 0.112. Toda esta información se resume en la siguiente tabla.

Tabla 5-17. Resumen de análisis de resultados

Código de Muestra	Diagrama Tensión-Deformación						Modo de Rotura				
	Deformación Longitudinal Unitaria			Tensión Máxima			Parénquima			Número de Fisuras	
	Baja	Media	Elevada	Baja	Media	Elevada	Leve	Media	Grave	Una	Múltiples
V23-1	X				X				X	X	
V23-2	X					X			X	X	
V23-3			X			X		X		X	
V23-4			X		X			X		X	
V23-5		X			X		X			X	
V23-6			X			X	X			X	
V23-7	X				X		X			X	
V23-8		X			X				X	X	
V23-9			X			X			X	X	
V23-10			X			X		X	X		X

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos en todo a lo que se refiere a los ensayos de resistencia a corte perpendicular a fibra y con la misma disposición de latillas son comparables a otros estudios ya realizados mediante ensayos con probetas características geométricas similares.

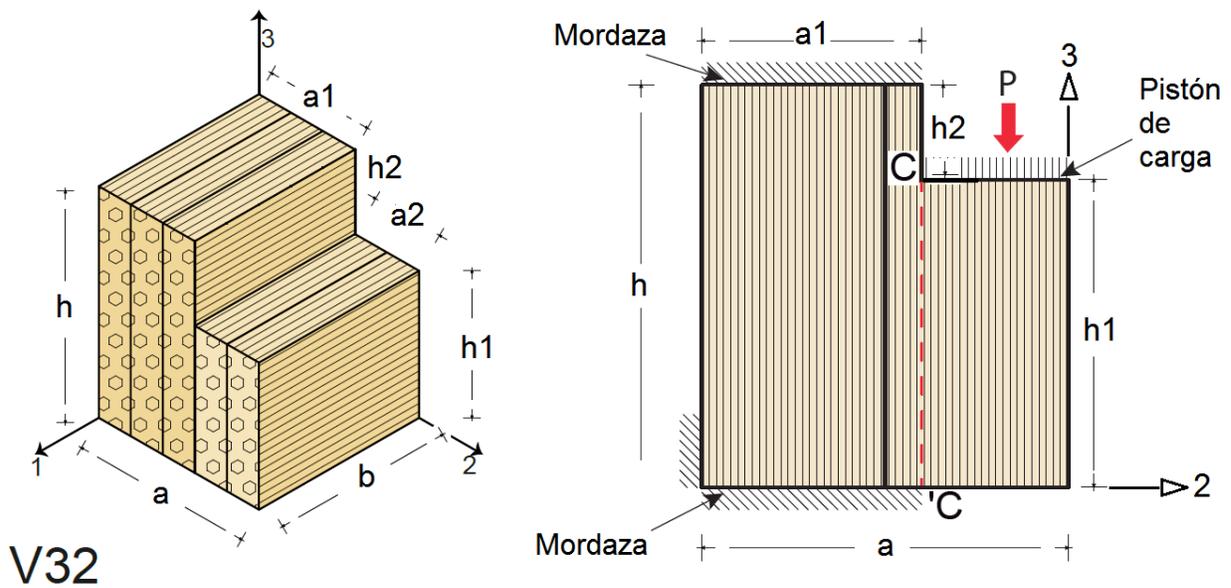
En un estudio realizado por López y Correal (López & Correal, 2009) en ensayos de corte paralelo a la fibra en 33 probetas elaboradas con PVA, reportaron un valor promedio de 9.4MPa con un coeficiente de variación de 0.13. Correal y colaboradores (Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014) reportan 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.

5.4 CORTANTE PERPENDICULAR A LA FIBRA EN PROBETAS SERIE V32

Las muestras de las series V23 y V32 están solicitadas a esfuerzos cortantes, pero con la diferencia de que en este caso las fibras se disponen en posición perpendicular al esfuerzo.

A la serie V32 se le aplica la carga paralela al eje 3 y actúa sobre una superficie que es normal al eje 2, por lo que la carga es perpendicular a las fibras y paralela a la dimensión intermedia de las latillas.

Figura 5-75. Probeta V32. Esquema ensayo de corte.



Fuente: Autor

5.4.1 Descripción de los ensayos

La serie V32 fue sometida a un esfuerzo cortante perpendicular a las fibras de las probetas. Se ensayaron 10 probetas, cada una de las cuales fueron marcadas y numeradas para su identificación.

Se realizaron las mediciones en todos los sentidos de cada una de las probetas. (Ver tabla 5-20).

Las pruebas se realizaron en una máquina universal de ensayos AG-X plus (Anexo B1 Certificado de Calibración), las probetas se colocaron en un dispositivo específico para este tipo de ensayos con una mordaza, para sujeción de la muestra.

Dichas muestras se definen con las siguientes características geométricas, tres medidas relacionadas con el alto de la muestra (medida vertical), alto total (h), alto parcial inferior (h_1) y alto parcial superior (h_2), una medida que define el largo (b), que es la única medida que se mantiene constante en las muestras, y tres medidas que definen el ancho, ancho total (a), ancho parcial superior (a_1) y ancho parcial intermedio (a_2).

5.4.2 Cálculo y Resultados

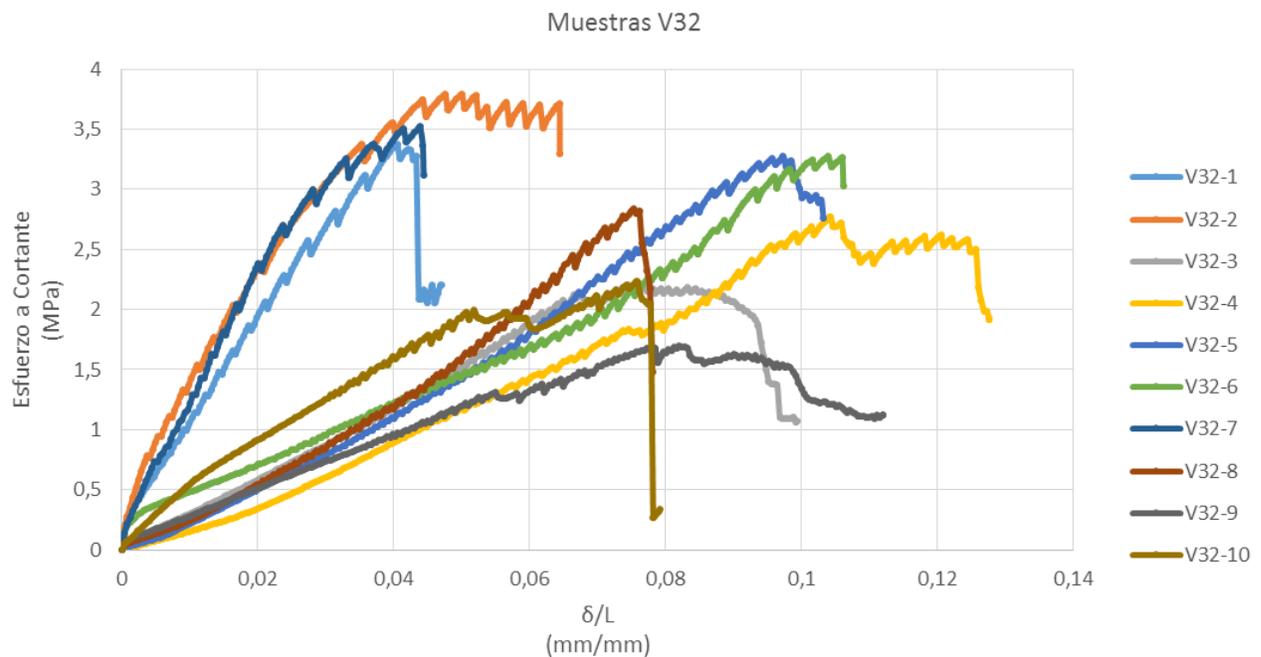
Para obtener el esfuerzo de cortante que sufre cada probeta se hace uso de la Ecuación 5-6, la cual nos relaciona la tensión tangencial resultante (τ) como el cociente de la fuerza aplicada (P) respecto el área en la que se produce el esfuerzo cortante (A_v), o sea la paralela al esfuerzo.

$$\tau = \frac{P}{A_v} \quad \text{Ecuación 5-7}$$

Para poder comparar el comportamiento de las 10 muestras tipo V23 y V32, se realiza el mismo procedimiento que en las muestras ensayadas a compresión, por lo que se compara la relación de la tensión tangencial al área de referencia

aplicada (τ) con la deformación longitudinal unitaria (δ/L), pero en este caso del área de referencia y considerando la deformación paralela al esfuerzo. En la Figura 5-75, se representa dicha relación, situando en el eje vertical la tensión tangencial al área de referencia aplicada (τ) y en el eje horizontal la deformación longitudinal unitaria (δ/L) del área de referencia y según la dirección paralela a la fuerza aplicada, para diferentes niveles de carga. En este caso, la deformada registrada (δ) coincide con el desplazamiento del plato de carga.

Figura 5-76. Esfuerzo cortante vs δ/L probetas a cortante V32



Fuente: Autor

En la fase de carga todas las muestras presentan un tramo que se puede considerar lineal, muestras como la 1, 2 y 7 tienen la pendiente de dicha recta con un valor similar entre sí, pero bastante más alto que el de las muestras 3, 4, 5, 6, 8, 9 y 10. Posteriormente aparece un tramo curvo en el que el material tiene un comportamiento plástico hasta la rotura. Adicionalmente, cabe destacar que en dicha fase plástica da lugar la tensión máxima, teniendo todas las muestras un valor similar, menos la muestra 9 que tiene un valor aproximadamente la mitad de la muestra con mayor valor. Analizando la rotura, podemos decir que las muestras 1, 2 y 7 experimentan una deformación de rotura alrededor de la mitad que el resto, esto significa que estas tres muestras tienen un comportamiento más frágil que el resto. Todos los diagramas se componen de una serie de saltos, éstos se producen en el momento que se van generando las diferentes fisuras que provocan pérdidas de resistencia, sin fallar completamente la muestra, estos saltos tienen comportamientos diferentes entre las diferentes muestras y si se trata de la fase de carga o de descarga, ya que la propagación de la fisura depende de la distribución de las fibras.

La resistencia a cortante (F_v) de cada probeta se obtuvo mediante la Ecuación 5-7, donde P_{max} es la máxima fuerza que se aplica y A_v es el área de cortante, que no es más que la sección paralela a P_{max} de cada probeta.

$$F_v = \frac{P_{max}}{A_v} \quad \text{Ecuación 5-8}$$

Tabla 5-18. Resistencia a cortante promedio de las muestras V32

Muestras V32			
Probeta	P _{max} (N)	A _v (mm ²)	F _v (Mpa)
V32-1	7146,71	2119,82	3,37
V32-2	7783,36	2053,13	3,79
V32-3	4704,79	2114,59	2,22
V32-4	5837,36	2103,34	2,78
V32-5	6951,82	2122,20	3,28
V32-6	6981,62	2132,05	3,27
V32-7	7334,78	2083,43	3,52
V32-8	6072,36	2141,84	2,84
V32-9	3569,44	2106,31	1,69
V32-10	4765,16	2130,36	2,24

Fuente: Autor

Según la anterior tabla la resistencia media a cortante perpendicular a la fibra contando las 10 muestras es de 2.90MPa con una desviación típica de 0.67MPa, con un coeficiente de variación (se recuerda que es el cociente entre la variación estándar y la tensión media) de 0.231.

Tabla 5-19. Resistencia a cortante promedio de las muestras V12, V13, V23 y V32

Muestras V12				Muestras V13				Muestras V23				Muestras V32			
Probeta	P _{max} (N)	A _v (mm ²)	F _v (Mpa)	Probeta	P _{max} (N)	A _v (mm ²)	F _v (Mpa)	Probeta	P _{max} (N)	A _v (mm ²)	F _v (Mpa)	Probeta	P _{max} (N)	A _v (mm ²)	F _v (Mpa)
V12-1	18001,25	2125,13	8,47	V13-1	35343,71	2112,40	16,73*	V23-1	7871,48	2098,26	3,75	V32-1	7146,71	2119,82	3,37
V12-2	23693,55	2120,23	11,17	V13-2	15130,05	2143,92	7,06	V23-2	9093,51	2117,22	4,30	V32-2	7783,36	2053,13	3,79
V12-3	3577,98	2135,49	1,68*	V13-3	19557,51	2091,49	9,35	V23-3	8896,24	2146,89	4,14	V32-3	4704,79	2114,59	2,22
V12-4	20978,06	2054,22	10,21	V13-4	18832,40	2187,19	8,61	V23-4	8169,75	2091,53	3,91	V32-4	5837,36	2103,34	2,78
V12-5	22728,78	2071,33	10,97	V13-5	19849,01	2172,26	9,14	V23-5	8324,25	2149,93	3,87	V32-5	6951,82	2122,20	3,28
V12-6	23603,05	2128,51	11,09	V13-6	18633,79	2116,99	8,80	V23-6	8537,60	2111,47	4,04	V32-6	6981,62	2132,05	3,27
V12-7	19846,91	2124,58	9,34	V13-7	11216,09	2097,57	5,35	V23-7	8417,43	2166,51	3,89	V32-7	7334,78	2083,43	3,52
V12-8	16760,76	2148,72	7,80*	V13-8	7409,46	2087,84	3,55	V23-8	6835,66	2135,83	3,20	V32-8	6072,36	2141,84	2,84
V12-9	21206,80	2058,97	10,30	V13-9	9290,88	2104,30	4,42	V23-9	8654,19	2094,10	4,13	V32-9	3569,44	2106,31	1,69
V12-10	23476,24	2099,87	11,18	V13-10	19806,14	2118,77	9,35	V23-10	10417,07	2094,29	4,97	V32-10	4765,16	2130,36	2,24

Los valores con asterisco (*), son los valores excluidos por ser considerados anómalos.

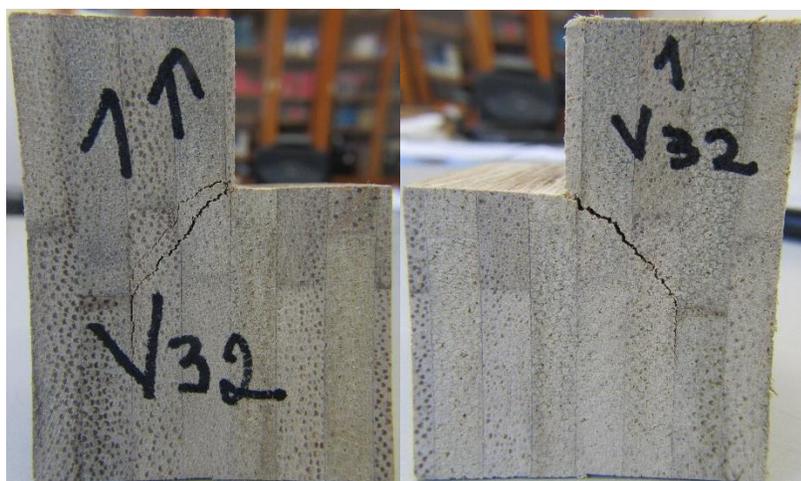
Fuente: Autor

5.4.3 Observaciones durante el ensayo

Para analizar los aspectos reseñables de las muestras que han acaecido durante los ensayos, es fundamental analizar la forma de rotura de las mismas y sus correspondientes diagramas carga-desplazamiento.

En esta serie se han registrado tres formas de rotura, la primera se genera con fisuras que se propagan por un plano diagonal, que se inicia en la unión del plano vertical y horizontal de la discontinuidad hasta el vértice opuesto. Esto se debe a que el material rompe por la parénquima a través de las fibras. La segunda se genera por unas fisuras verticales que coinciden en el plano vertical de unión entre las latillas, justo en la discontinuidad geométrica de la muestra. El último modo de rotura es una combinación de las dos anteriores.

Figura 5-77. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra Probeta V32-1. Estado final



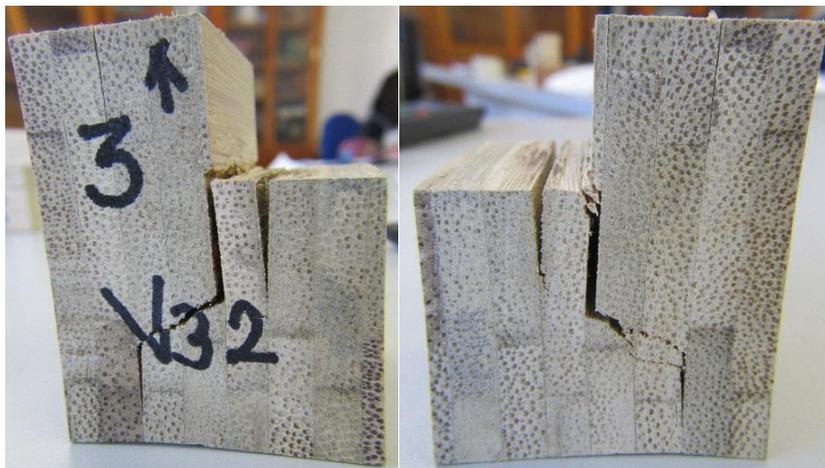
Fuente: Autor

Figura 5-78 Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra Probeta V32-2. Estado final



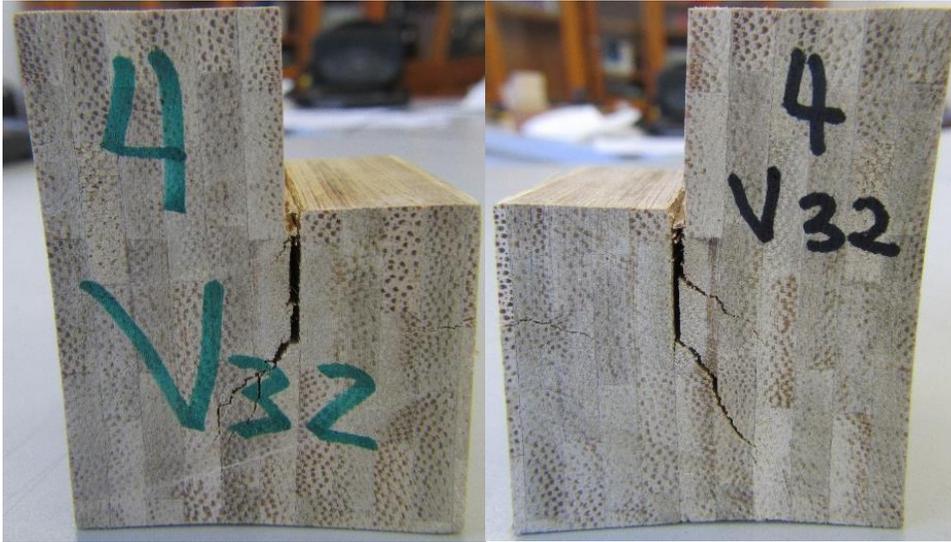
Fuente: Autor

Figura 5-79 Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra Probeta V32-3. Estado final



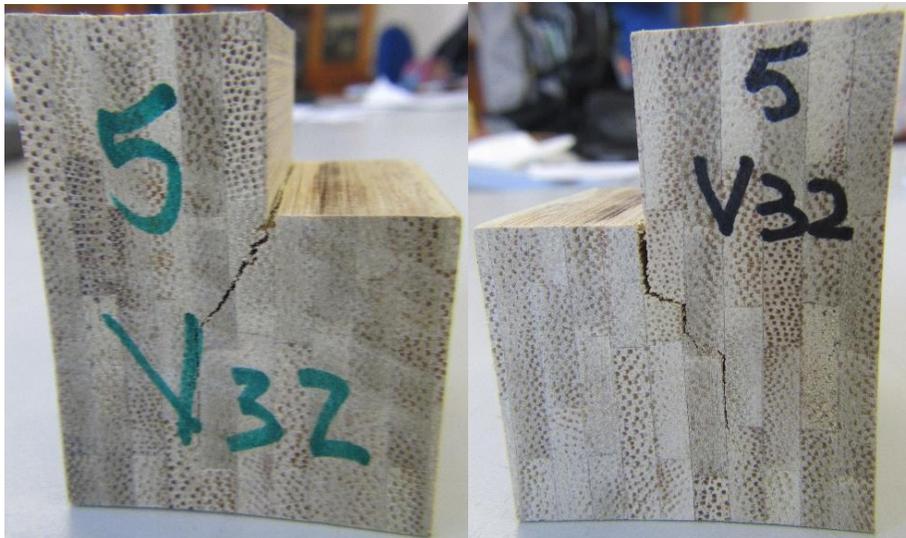
Fuente: Autor

Figura 5-80. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra Probeta V32-4. Estado final



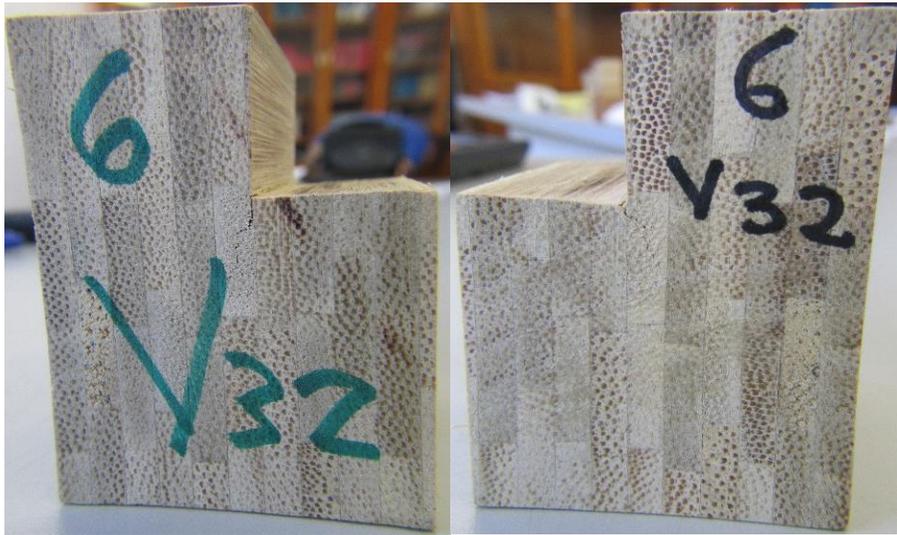
Fuente: Autor

Figura 5-81. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra Probeta V32-5. Estado final



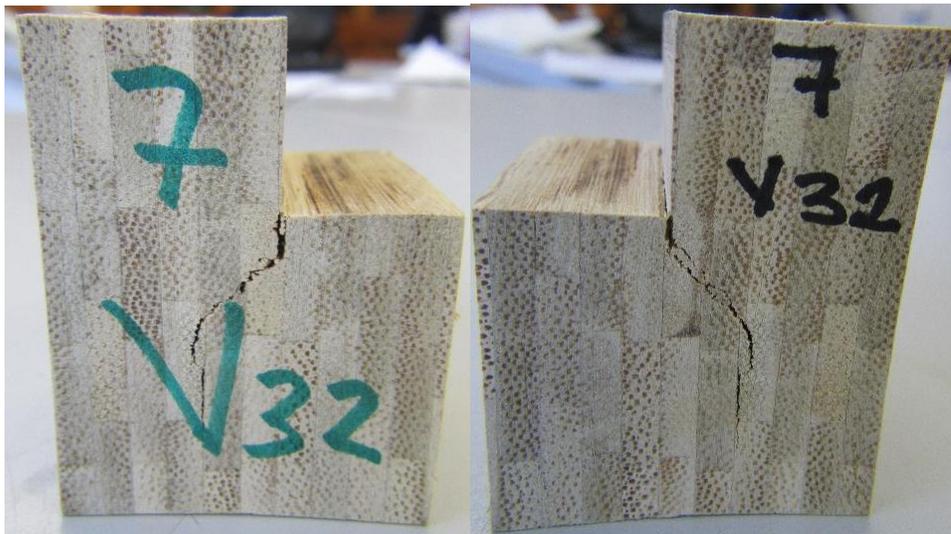
Fuente: Autor

Figura 5-82. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra Probeta V32 – 6. Estado final



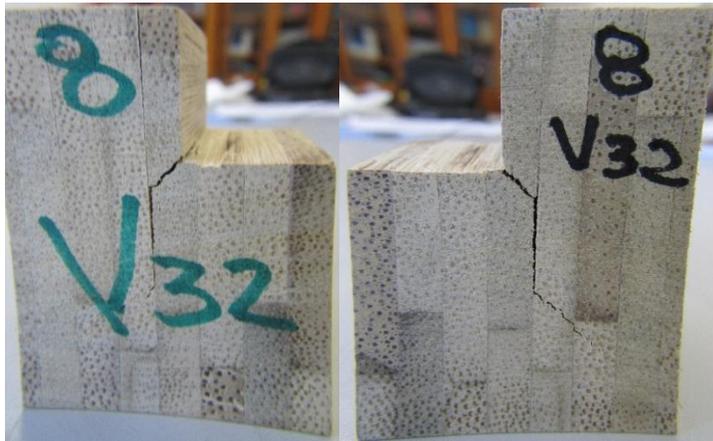
Fuente: Autor

Figura 5-83. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra Probetas V32-7. Estado final



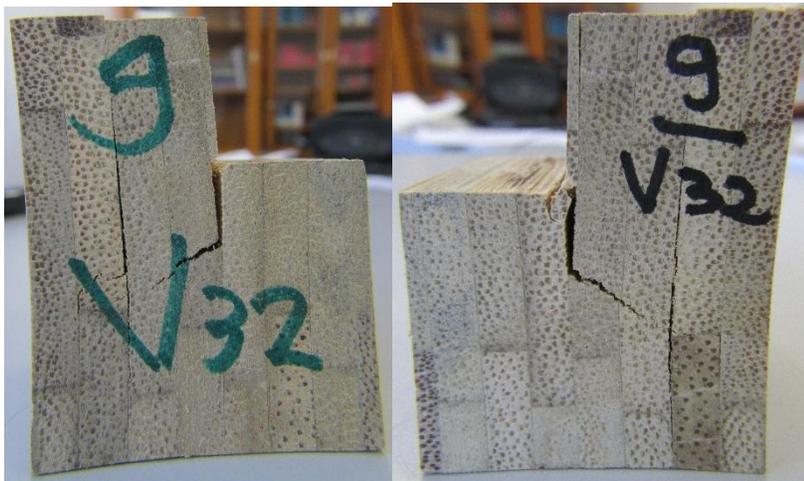
Fuente: Autor

Figura 5-84. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra Probeta V32-8. Estado final



Fuente: Autor

Figura 5-85. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra Probetas V32 – 9. Estado final



Fuente: Autor

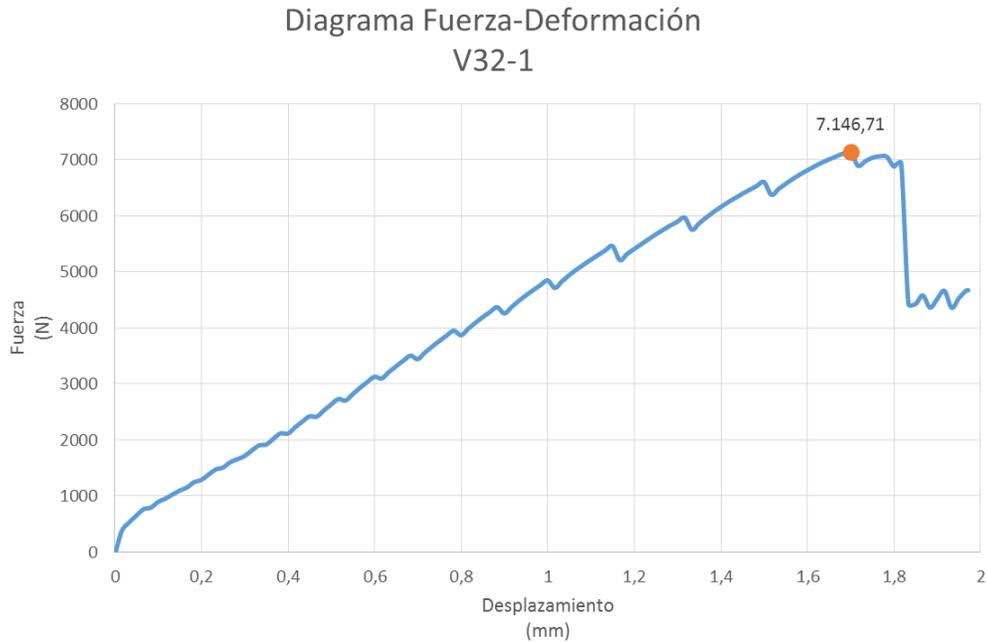
Figura 5-86. Ensayo Cortante Perpendicular a la Fibra Probetas V32-10. Estado final



Fuente: Autor

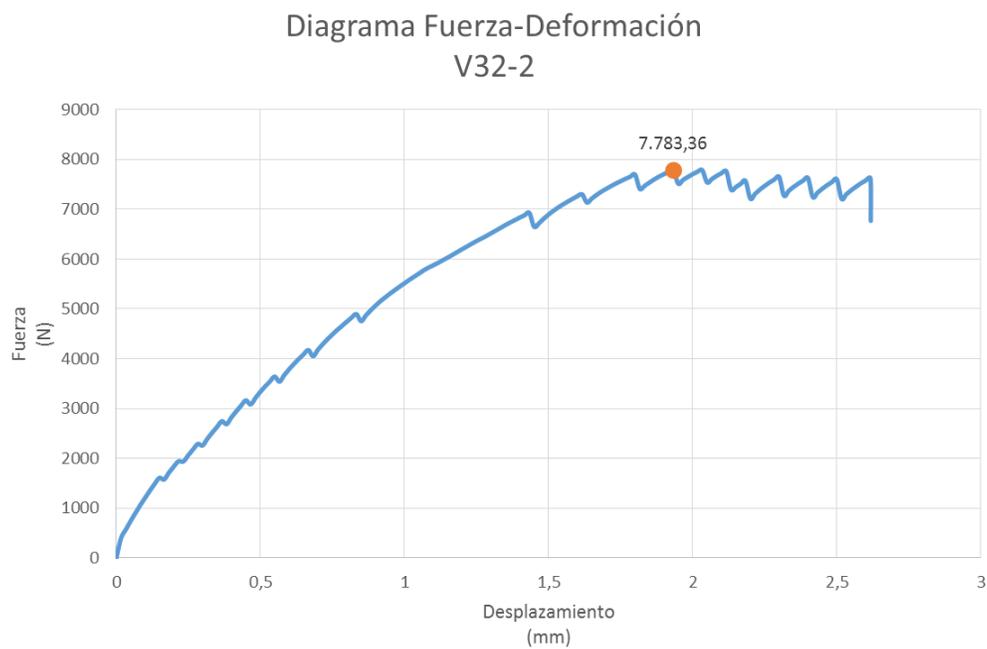
Los diagramas carga-desplazamiento que se han obtenido en los ensayos, son los siguientes:

Figura 5-87. Relación carga-desplazamiento, muestra V32-1



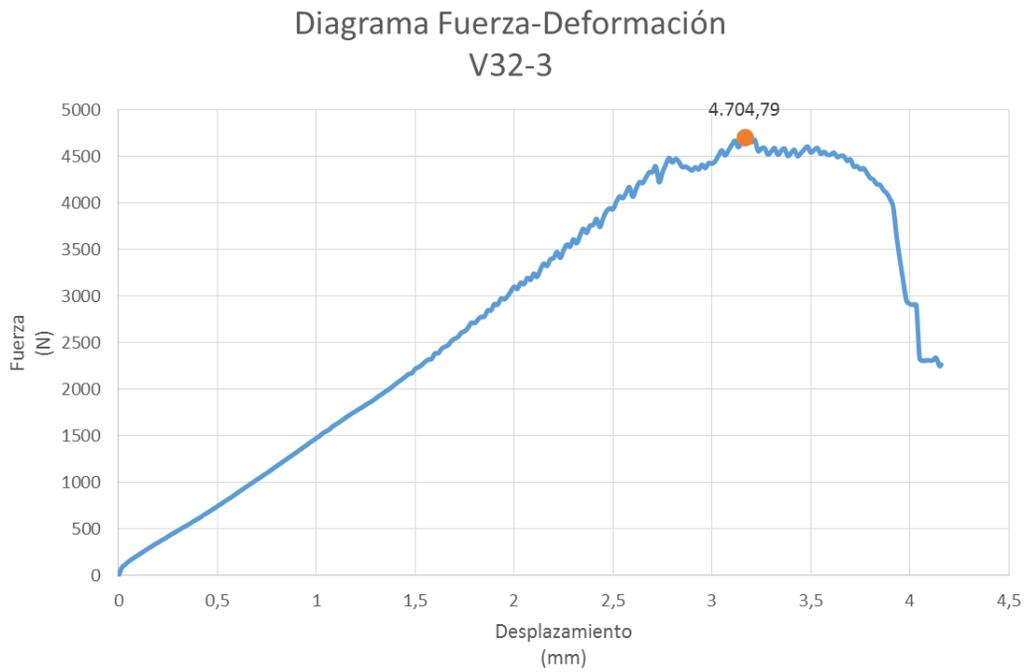
Fuente: Autor

Figura 5-88. Relación carga-desplazamiento, muestra V32-2



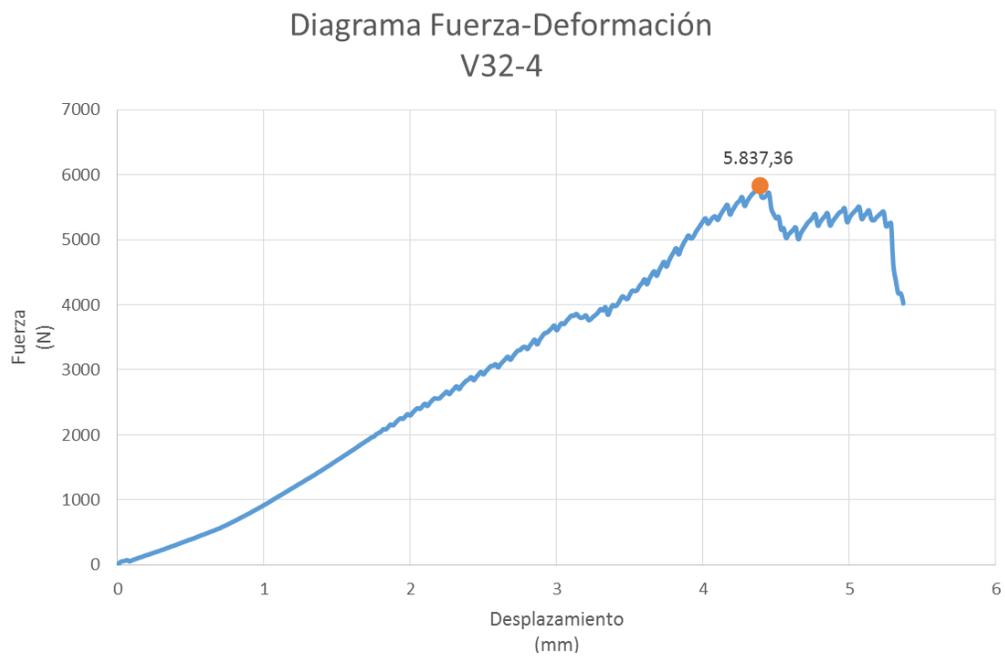
Fuente: Autor

Figura 5-89. Relación carga-desplazamiento, muestra V32-3



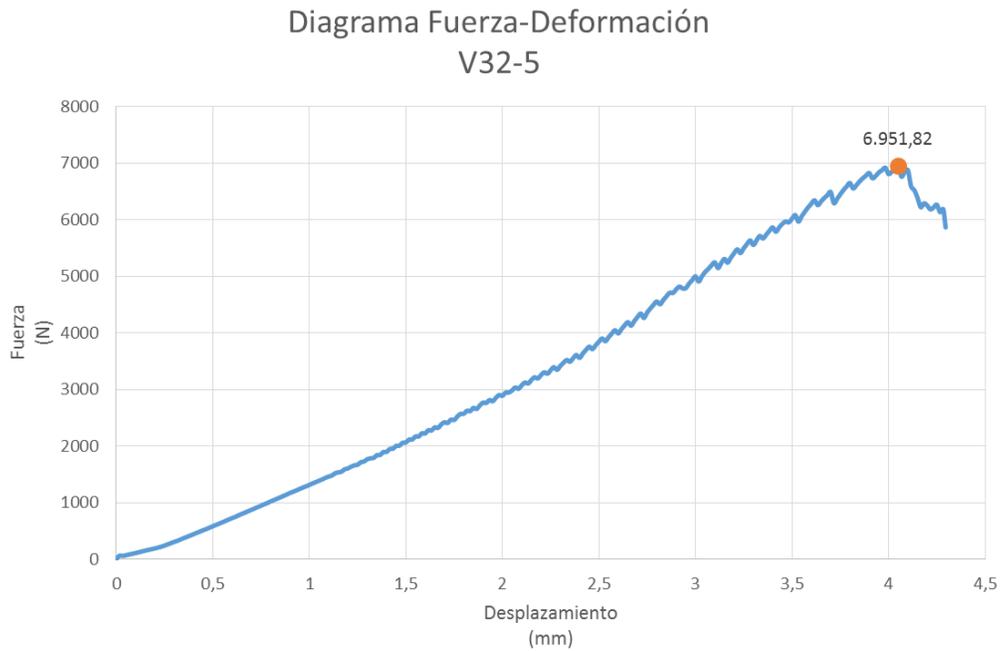
Fuente: Autor

Figura 5-90. Relación carga-desplazamiento, muestra V32-4



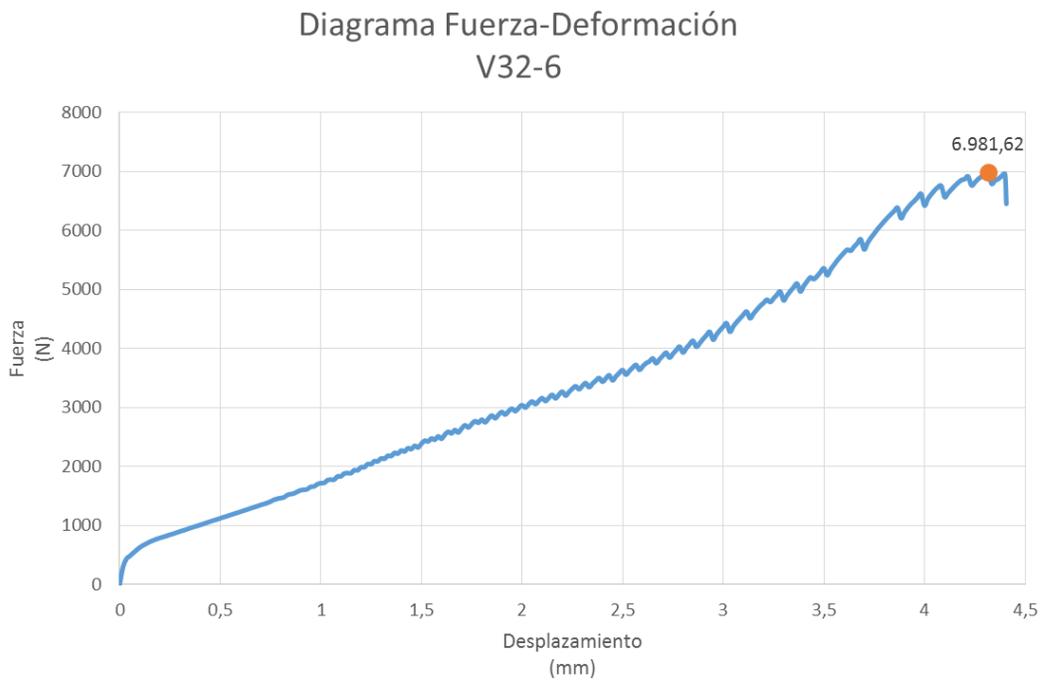
Fuente: Autor

Figura 5-91. Relación carga-desplazamiento, muestra V32-5



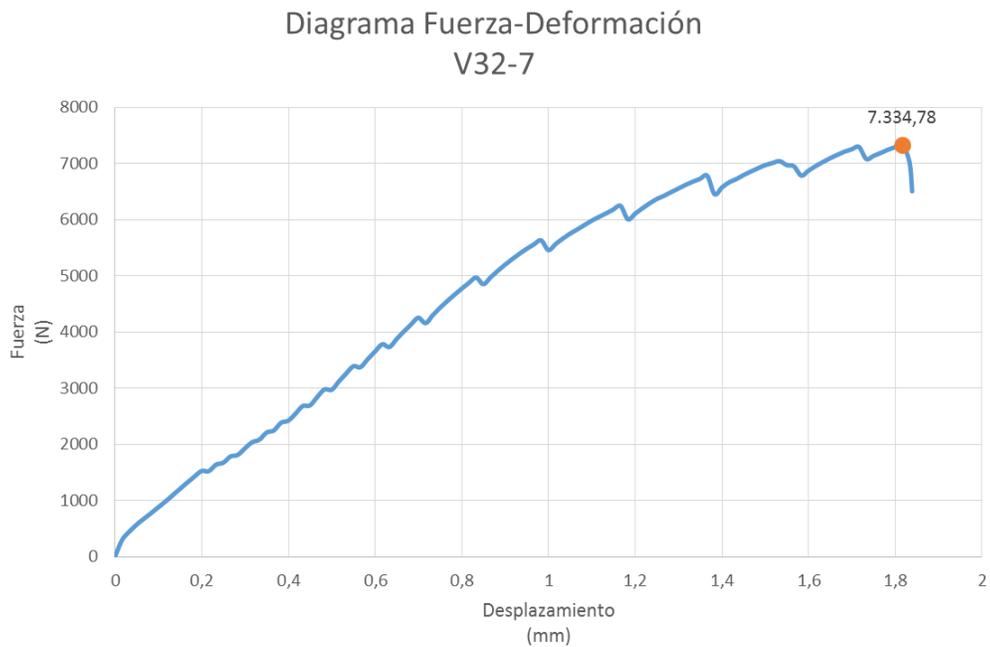
Fuente: Autor

Figura 5-92. Relación carga-desplazamiento, muestra V32-6



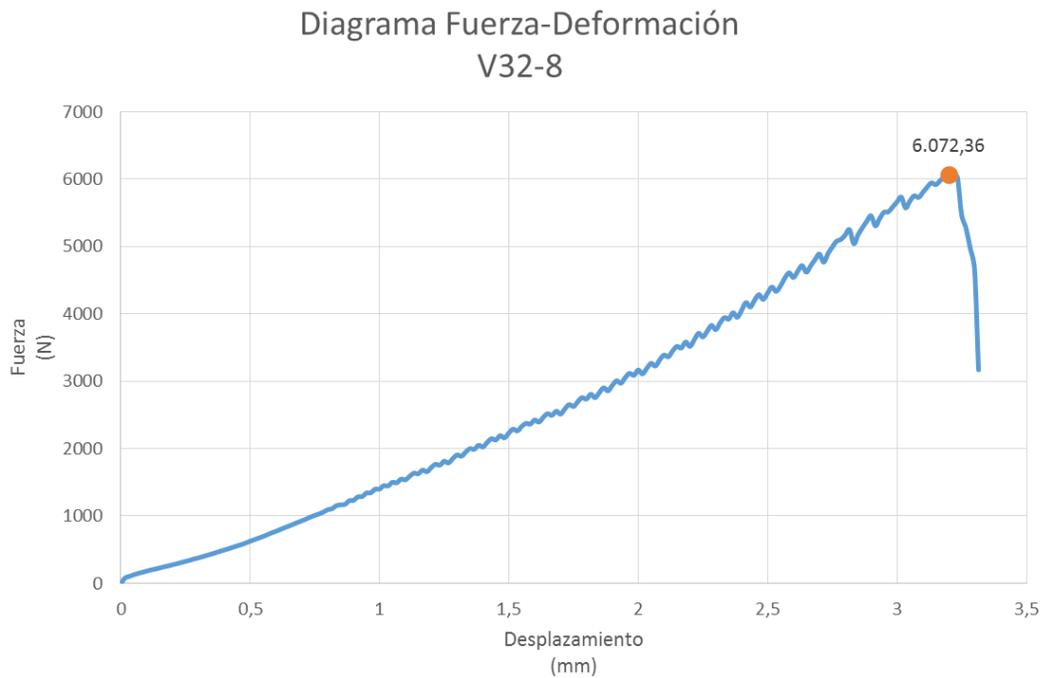
Fuente: Autor

Figura 5-93. Relación carga-desplazamiento, muestra V32-7



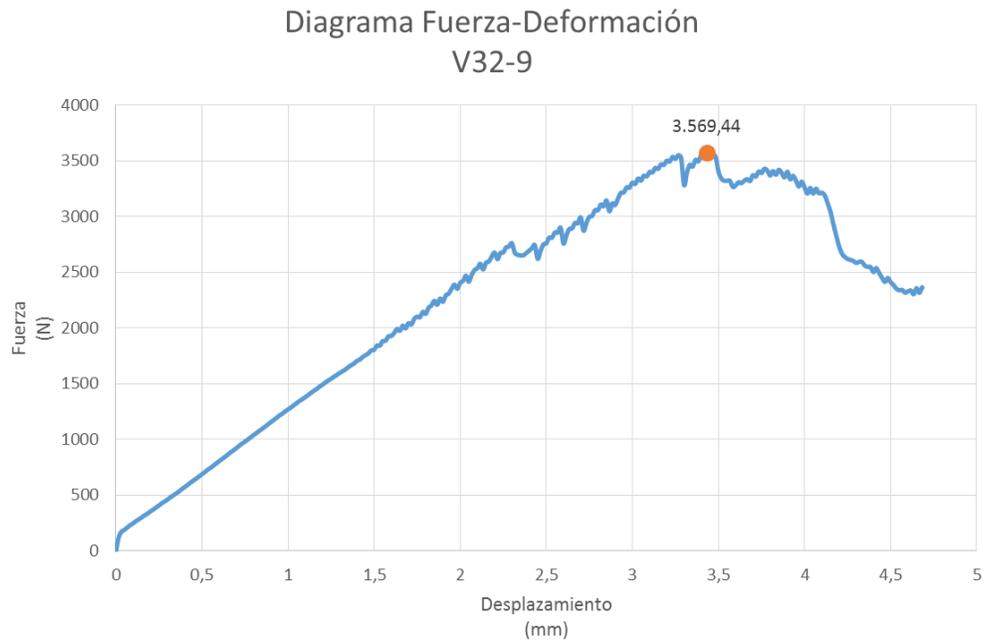
Fuente: Autor

Figura 5-94. Relación carga-desplazamiento, muestra V32-8



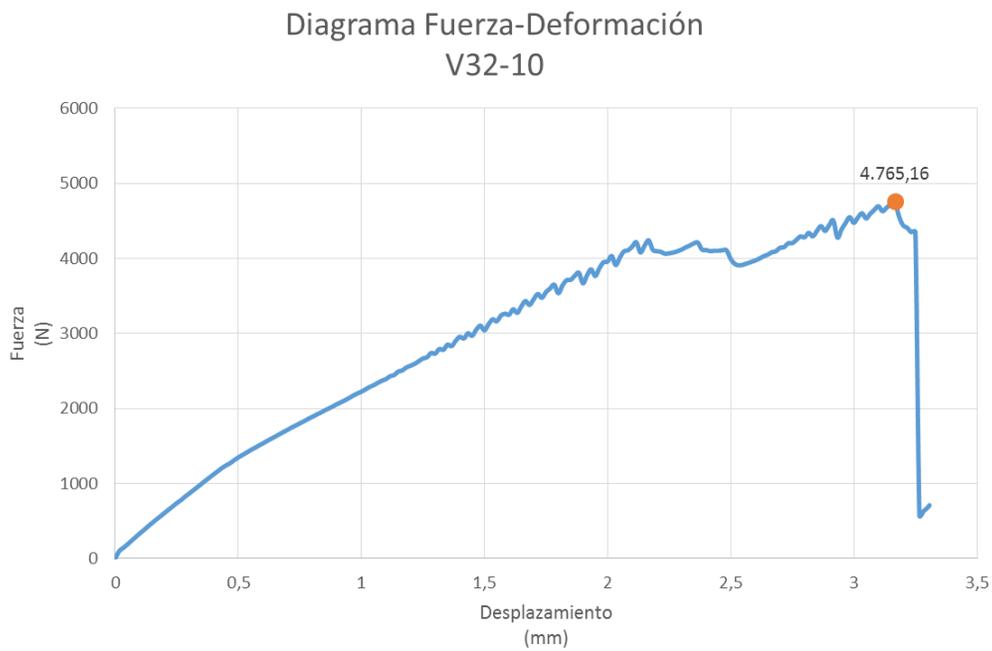
Fuente: Autor

Figura 5-95. Relación carga-desplazamiento, muestra V32-9



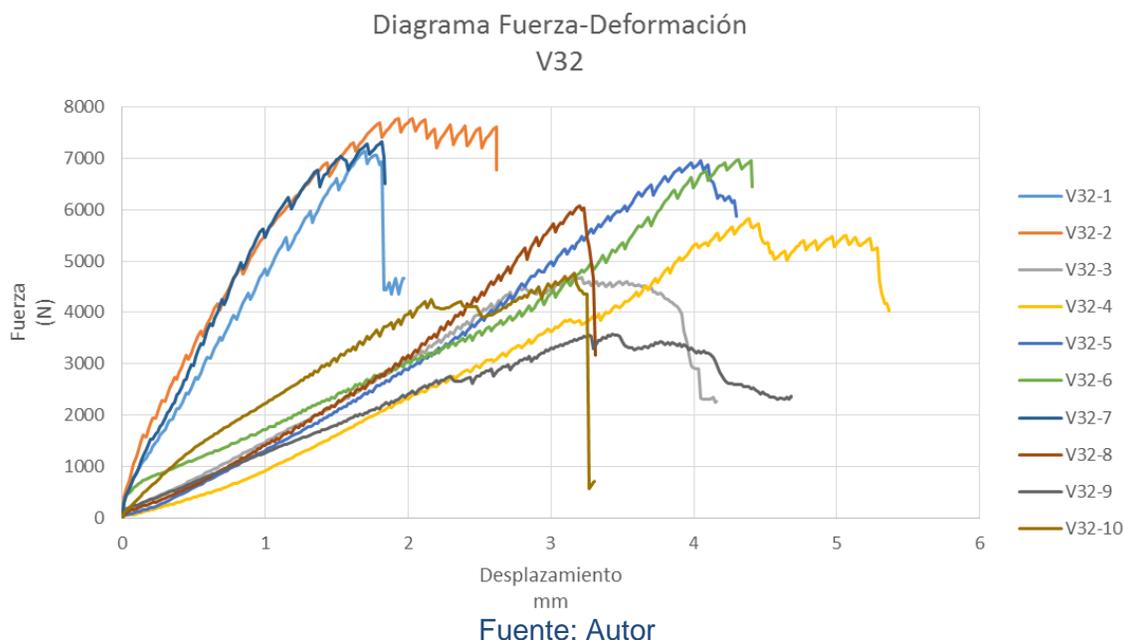
Fuente: Autor

Figura 5-96. Relación carga-desplazamiento, muestra V32-10



Fuente: Autor

Figura 5-97. Relación carga-desplazamiento, muestras tipo V32



En lo que se refiere a los diagramas Fuerza-Desplazamiento podemos ver que todas las muestras V32 tienen un comportamiento similar. Todas las muestras tienen un comportamiento que se inicia con una fase que se puede obviar, de ajuste de la muestra para soportar la carga aplicada durante el ensayo, para posteriormente pasar a una fase que se puede aproximar a una función lineal, lo que se traduce en un comportamiento elástico hasta llegar a una fase en la que los gráficos describen una curva hasta la ruptura, previamente se pasa por la carga máxima que separa la fase de carga de descarga.

En la fase de carga todas las muestras presentan un tramo que se puede considerar lineal, muestras como la 1, 2 y 7 tienen la pendiente de dicha recta con un valor similar entre sí, pero bastante más alto que el de las muestras 3, 4, 5, 6, 8, 9 y 10. Posteriormente aparece un tramo curvo en el que el material tiene un comportamiento plástico hasta la rotura. Adicionalmente, cabe destacar que en

dicha fase plástica da lugar la fuerza máxima, teniendo todas las muestras un valor similar, menos la muestra 9, que tiene una fuerza máxima menor. Analizando la rotura, podemos decir que las muestras 1 y 7 experimentan una deformación de rotura alrededor de la mitad que las muestras 3, 4, 5, 6 y 9, esto significa que estas tres muestras tienen un comportamiento más frágil que el resto. Las muestras 2, 8 y 10 poseen una deformación de rotura intermedia.

5.4.4 Determinación de la densidad serie V32

5.4.4.1 Descripción de los ensayos

La densidad es una magnitud intensiva que relaciona la masa de un cuerpo determinado y su volumen. Para obtener la densidad de las muestras de la serie V32, se procedió a obtener la geometría de cada una de las muestras midiendo el largo, el ancho y la profundidad, además de obtener su correspondiente masa, pesando cada probeta en una balanza digital con una precisión de 0.01g. Estos dos procedimientos se llevaron a cabo previos al ensayo de rotura por compresión paralela a las fibras.

Tabla 5-20. Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie V32

Muestras	Masa (g)	Ancho (a) (mm)	Ancho (a ₁) (mm)	Ancho (a ₂) (mm)	Largo (b) (mm)	Alto (h) (mm)	Alto (h ₁) (mm)	Alto (h ₂) (mm)	Volumen (mm ³)
V32-1	94,10	50,06	29,86	20,20	50,47	61,57	41,96	19,70	135566,06
V32-2	102,00	48,69	28,20	21,38	50,52	60,98	40,64	21,00	130771,99
V32-3	95,60	49,98	28,52	20,50	50,54	62,96	41,84	20,83	134099,76
V32-4	104,00	48,87	28,49	20,38	50,02	62,59	42,05	20,72	132061,21
V32-5	105,70	49,93	29,23	20,90	50,99	62,54	41,62	21,12	137566,03
V32-6	106,10	49,77	29,47	20,46	51,35	62,46	41,52	20,72	138141,53
V32-7	102,90	49,35	29,23	20,23	50,30	62,15	41,42	20,79	133524,93
V32-8	91,20	50,05	28,67	21,26	50,42	62,76	42,48	19,99	136257,73
V32-9	95,60	49,30	28,03	20,21	50,33	62,82	41,85	20,61	131191,84
V32-10	94,30	49,20	28,19	20,58	50,99	62,31	41,98	20,66	133617,63

Fuente: Autor

5.4.4.2 Resultados

Una vez obtenidos los resultados del ensayo de densidad, que se aportan en la siguiente tabla, se obtiene un valor de densidad media de $0.00073853 \text{ g/mm}^3$ o 737.42 Kg/m^3 , con una desviación estándar o típica de $4.15 \times 10^{-5} \text{ g/mm}^3$ o 41.50 Kg/m^3 , y con un coeficiente de variación (se recuerda que es el cociente entre la variación estándar y la densidad media) de 0.0562.

Tabla 5-21. Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie V32

Muestras	Densidad (g/mm^3)	Densidad (Kg/m^3)
V32-1	0,00069413	694,13
V32-2	0,00077998	779,98
V32-3	0,00071290	712,90
V32-4	0,00078751	787,51
V32-5	0,00076836	768,36
V32-6	0,00076805	768,05
V32-7	0,00077064	770,64
V32-8	0,00066932	669,32
V32-9	0,00072870	728,70
V32-10	0,00070575	705,75

Fuente: Autor

5.4.5 Determinación del contenido de humedad serie V32

5.4.5.1 Descripción de los ensayos

Después de haber sometido cada probeta de la Serie V32 al ensayo de Cortante Perpendicular a la fibra en probetas, se procedió a pesar cada una de ellas en una balanza digital con aproximación de 0.01g, registrándose los datos en una tabla antes de entrar al horno. Ingresaron al horno a una temperatura de $102,8^\circ \text{ C}$. A las 48 horas de permanecer en el horno, una vez alcanzado su peso para masa seca,

se pesaron nuevamente cada probetas, registrándose su peso final en la correspondiente tabla (Ver Tabla 5-22)

5.4.5.2 Resultados

En la Tabla 5-22 se detallan los valores de contenido de humedad de cada una de las probetas de la serie V32. El contenido de Humedad promedio de la Serie V32 fue de 11%, con una desviación estándar de 0.738% y un coeficiente de variación del 0.067.

Tabla 5-22. Determinación del Contenido de Humedad serie V32.

Porcentaje Contenido Humedad Serie v32

Probeta Identificación	Peso Antes horno	Peso Final	Diferencia de Peso	Porcentaje Diferencial
Serie	g	g	g	%
V32-1	93.5	82.7	10.8	12%
V32-2	64.3	58.1	6.2	10%
V32-3	95	84.1	10.9	11%
V32-4	103.8	92	11.8	11%
V32-5	105.6	94.1	11.5	11%
V32-6	106	94.8	11.2	11%
V32-7	102.8	92.9	9.9	10%
V32-8	91.1	80.9	10.2	11%
V32-9	95.5	84.4	11.1	12%
V32-10	94.3	84.4	9.9	10%

Porcentaje Contenido Humedad Serie v32

11%

Fuente: Autor

5.4.6 Análisis de resultados serie V32

La forma de rotura de las muestras de esta serie es más dúctil que las series con las fibras paralelas a la carga (V12 y V13) y se formaliza según tres patrones diferentes, el primero lo hace según un plano diagonal que une la intersección del plano horizontal y vertical de la discontinuidad con su vértice opuesto, en algunos casos la fisura es casi imperceptible y en otros posee una abertura destacable. El segundo lo hace según el plano vertical que pasa por la discontinuidad geométrica y el tercero por una combinación de los anteriores.

Las muestras de mayor tensión máxima son las V32-2 y V32-7 (3.79 N/mm^2 y 3.52 N/mm^2 , respectivamente).

Las muestras que han roto únicamente por un plano diagonal son la V32-6 y la V32-7, la muestra que ha roto sólo por el plano vertical de la discontinuidad geométrica es la V32-2, el resto de muestras rompen por el patrón de rotura que resulta de la combinación de los otros dos.

Si se analizan los diagramas tensión-deformación de las muestras, se puede apreciar que en todas las muestras tienen un comportamiento similar, ya que todas empiezan con una fase inicial de carga que se compone de un tramo lineal y uno curvo hasta la tensión máxima, posteriormente sigue el tramo curvo pero en fase de descarga hasta la rotura. Si analizamos la pendiente del tramo lineal o tramo de comportamiento elástico, se puede observar que las muestras 1, 2 y 7 poseen una pendiente reseñablemente mayor, lo que significa que necesitan una tensión más de 3 veces mayor para tener la misma deformación que el resto de las muestras. Por otro lado, podemos ver que las muestras 2 y 7 tienen un

comportamiento más frágil que el resto, ya que la deformación de rotura menos de la mitad que el resto. Se puede apreciar cierta heterogeneidad en lo que a tensión máxima se refiere, ya que la diferencia entre la muestra de mayor valor y la muestra de menor valor es de 2.10MPa, lo que significa un 55% de diferencia respecto la tensión máxima. El valor promedio de la resistencia a cortante perpendicular a las fibras de la serie V32 es de 2.90MPa, con una desviación típica de 0.67MPa y un coeficiente de variación de 0.231. Toda esta información se resume en la siguiente tabla.

Tabla 5-23. Resumen de análisis de resultados

Código de Muestra	Diagrama Tensión-Deformación						Modo de Rotura										
	Deformación Longitudinal			Tensión Máxima			Diagonal			Vertical			Mixto			Número de Fisuras	
	Baja	Media	Elevada	Baja	Media	Elevada	Leve	Media	Grave	Leve	Media	Grave	Leve	Media	Grave	Una	Múltiples
V32-1	X				X			X								X	
V32-2	X					X						X				X	
V32-3			X		X										X		X
V32-4			X		X									X			X
V32-5			X		X									X			
V32-6			X		X		X									X	
V32-7	X					X		X								X	
V32-8		X			X									X		X	
V32-9			X	X										X			X
V32-10		X			X								X			X	

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos en todo a lo que se refiere a los ensayos de resistencia a corte perpendicular a fibra y con la misma disposición de latillas son comparables a otros estudios ya realizados mediante ensayos con probetas características geométricas similares.

En un estudio realizado por López y Correal (López & Correal, 2009) en ensayos de corte paralelo a la fibra en 33 probetas elaboradas con PVA, reportaron 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

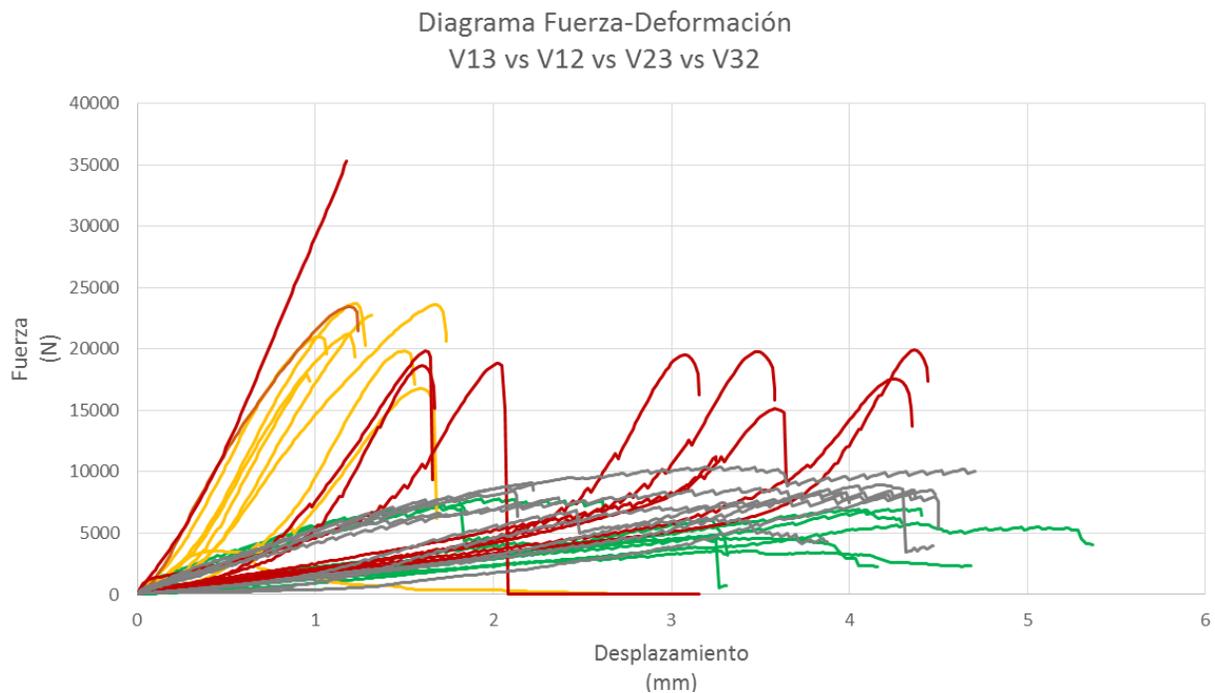
9.5MPa con un coeficiente de variación de 0.14 en 20 ensayos de probetas elaborados con un 50% de urea formaldehído y 50% de melanina formaldehído. Cortés y colaboradores (Cortes et al., 2010) encontraron un valor promedio de 5.1MPa y un coeficiente de variación de 0.44 en ensayos de cortante paralelo 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.

5.4 RESULTADO DE RESISTENCIA CORTANTE

Para poder realizar la comparativa de los resultados de las 4 series de cortante (V13, V12, V23 y V32), se van a realizar unos gráficos y tablas específicos para realizar la comparativa de las cuatro series.

Se va a empezar la comparativa con la relación carga-desplazamiento:

Figura 5-98. Relación carga-desplazamiento de las 10 muestras V13 (rojo), V12 (amarillo), V23 (gris) y V32 (verde)



Fuente: Autor

Tabla 5-24. Valores medios de los principales parámetros resistentes de las 4 series de ensayo a cortante

Valores Medios	Series de Muestras de Cortante			
	V13	V12	V23	V32
Carga Máxima (N)	17833,6	22669,7	8521,7	6114,7
Tensión Máxima (MPa)	8,4	10,75	4,1	2,9
Desplazamiento Máximo (mm)	3,2	1,3	3,7	3,6
Carga de Rotura (N)	17696,9	22013,1	7770,9	5317,7
Tensión de Rotura (MPa)	8,3	10,44	3,7	2,5

Fuente: Autor

De esta información podemos deducir que las muestras en las que las fibras se disponen de forma paralela al esfuerzo, registran mayores resistencias máximas y de rotura y menores deformaciones de rotura, por lo que parece claro que las muestras V12 y V13 poseen un comportamiento más favorable que las otras dos para resistir esfuerzos de cortante.

La serie V12 registra una carga y tensión máxima un 22% más alta que la serie V13, también registra una deformación máxima un 60% más baja, y una carga y tensión de rotura un 20% más alta que la V13.

Por lo que se puede decir que la serie V12 es más resistente en la rotura y en su máximo valor frente a cortante, pero al tener una deformación en rotura menor, el material es más frágil. Al mismo tiempo la V13 es un poco menos resistente pero más dúctil.

CAPITULO VI: FLEXIÓN EN LOS LAMINADOS DE BAMBÚ

DENDROCALAMUS ASPER (LBDA)

En el presente apartado se va a analizar el comportamiento frente a flexión de muestras de LBDA. Para realizar dicho análisis se ensayaron dos series de 10 probetas de sección cuadrada de 40mm x 40mm y una longitud de 300 mm aproximadamente. Dichas series se han nombrado como Fc11a y Fc11b, sus nombres cambian ya que las disposiciones de colocación de latillas son diferentes.

En la probeta Fc11a la disposición de las láminas para el ensayo a flexión está dispuesta en forma vertical, de esta manera la carga aplicada es paralela al plano de unión entre los tablero.

Las probetas Fc11b tienen colocadas las láminas en posición horizontal por lo tanto la carga aplicada actúa de forma perpendicular al plano de unión entre los tableros.

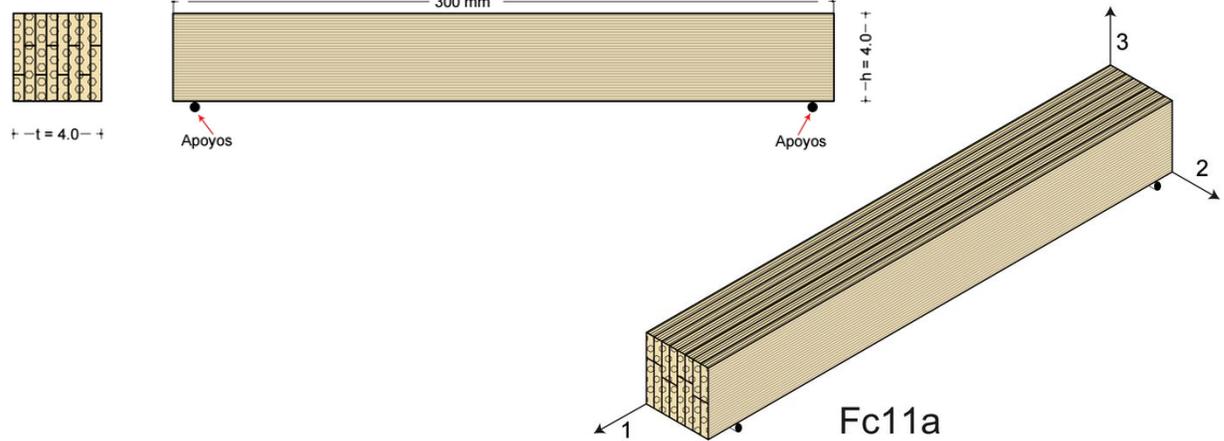
La simbología utilizada es para identificar de una manera rápida las muestras, ya que la letra “F” y los números “11”, significan que las muestras se han ensayado mediante flexión longitudinal, generando los esfuerzos de flexión normales paralelos al eje 1 y actuando en el plano perpendicular al eje 1. La letra “c” se utiliza para unificar criterios de nomenclatura con otros estudios, ya que en éstos se utilizaban dos tipos de muestras, unas cortas (“c”) y otras largas (“L”), cómo en caso concreto sólo se utilizan las de tipología corta, por eso todas llevan la letra

“c”. Por último, la letra “a” significa que las latillas se orientan con su dimensión intermedia en vertical y la “b” en posición horizontal.

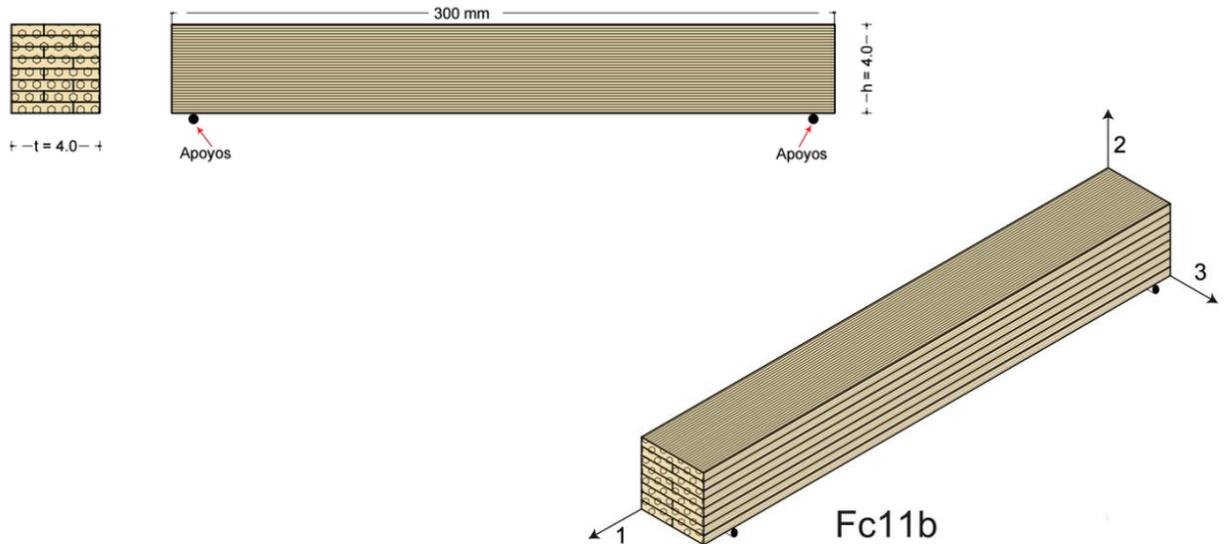
En la siguiente figura se pueden observar los diferentes tipos de probetas para realizar los ensayos a flexión y sus correspondientes dimensiones.

Figura 6-1 Tipos de probetas a Flexión: Fc11a y Fc11b

Fc11a



Fc11b



Fuente: Autor

6.1 FLEXION LONGITUDINAL EN PROBETAS SERIE Fc11a

Como ya se ha dicho, el conjunto de las 10 muestras de la tipología Fc11a son de sección cuadrada de 4 x 4 cm con una longitud de 30 cm. Estas muestras se ensayan con la dimensión intermedia de las latillas en posición vertical, por lo que la carga aplicada es paralela a la unión de dichas latillas y los esfuerzos normales generados y la distribución de fibras son prácticamente uniformes entre sus correspondientes secciones transversales. Se procuró en todos los ensayos, situar la mayor concentración de fibras por latilla en la parte inferior, ya que ahí es donde se producen las mayores tracciones en este tipo de ensayos.

Figura 6-2 Colocación de la probeta Fc11a para ensayo de flexión longitudinal.

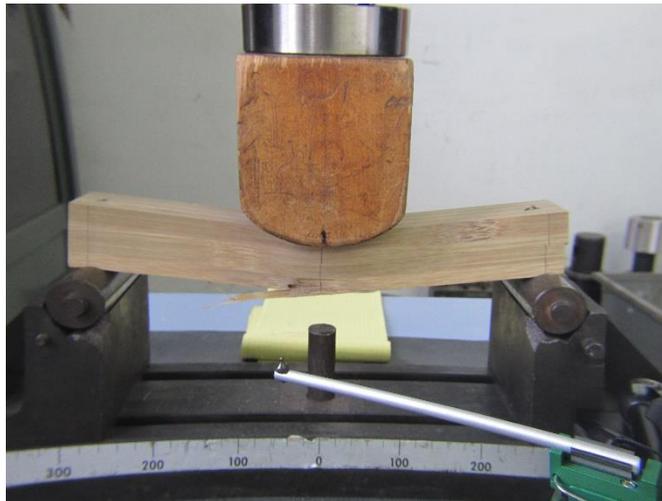


Fuente: Autor

6.1.1 Descripción de los ensayos

La serie Fc11a se ejecutaron 10 ensayos. Se colocaron los apoyos a 1 cm de distancia de los bordes izquierdo y derecho. Se ubicó un extensómetro.

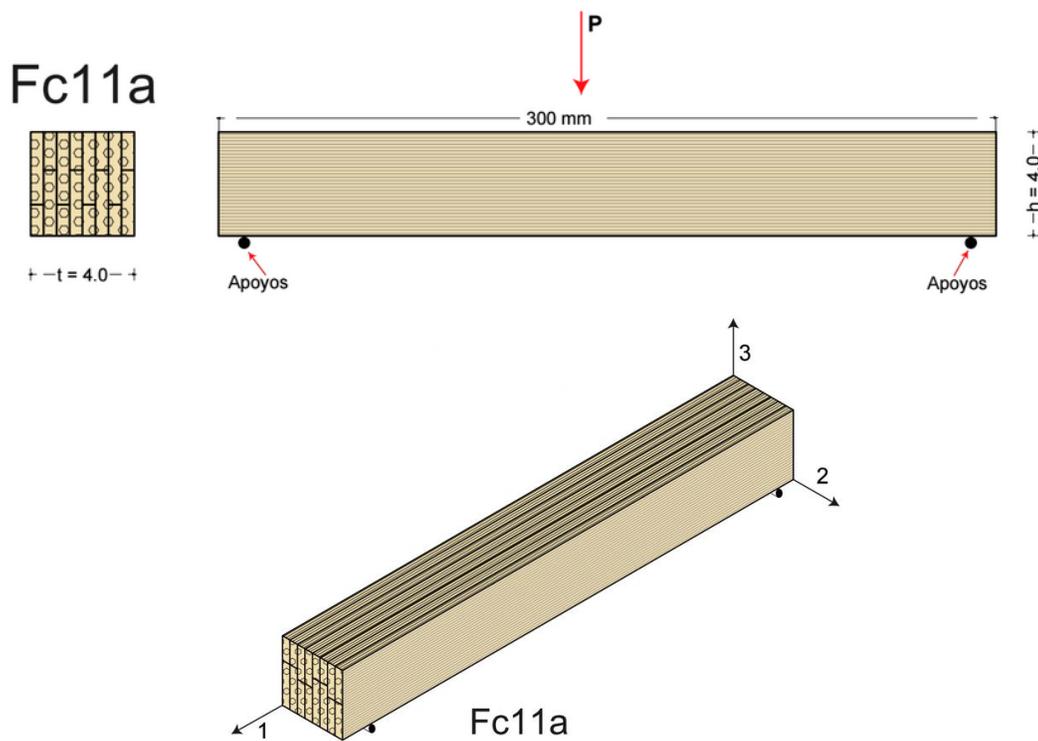
Figura 6-3 Montaje ensayo de flexión longitudinal.



Fuente: Autor

Se realizaron 10 ensayos con las probetas Fc11a, con una carga concentrada ubicada en el centro de cada probeta. (Ver figura 6.4)

Figura 6-4 Esquema del ensayo para flexión longitudinal en probetas Fc11a



Fc11a
Fuente: Autor

6.1.2 Cálculo y Resultados

Para obtener los esfuerzos normales provocados por la flexión longitudinal, se utilizó la Ley de Navier (Ecuación 6.1), como sólo tenemos aplicado el esfuerzo de flexión respecto el eje z, se utiliza la expresión simplificada (Ecuación 6.2):

$$\sigma = \frac{N}{A} - \frac{M_z}{I_z} y + \frac{M_y}{I_y} z \quad \text{Ecuación 6-1}$$

$$\sigma = -\frac{M_z}{I_z} y = -\frac{M_z}{w_z} \quad \text{Ecuación 6-2}$$

Si sustituimos el momento respecto al eje z por el valor registrado por la aplicación de una carga puntual en el centro-luz en una viga bi apoyada, y sustituimos el módulo resistente respecto el eje z (W_z) por la expresión en función de las características geométricas de la sección transversal, queda:

$$\sigma = -\frac{6Pa}{2bh^2} \quad \text{Ecuación 6-3}$$

Siendo P la carga aplicada por la prensa en centro-luz, a la distancia desde un apoyo al punto dónde estamos calculando la tensión, b la longitud horizontal de la sección transversal, y h la altura o dimensión en vertical de la muestra, cuando ésta en posición de ensayo.

Se debe recordar que como la sección transversal en la que se aplican los esfuerzos normales por flexión es cuadrada, la inercia respecto al eje z obedece a la siguiente ecuación:

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \quad \text{Ecuación 6-4}$$

Al mismo tiempo, debemos recordar que el momento máximo generado por una carga puntual (P) aplicada en centro de luz, y siendo (L) la longitud de la muestra, es:

$$M_{max} = \frac{PL}{4} \quad \text{Ecuación 6-5}$$

Si además, lo que se quiere obtener es la tensión máxima, ésta se produce en la parte inferior de la sección, por lo tanto $Y = h/2$, por lo que la expresión queda de la siguiente manera:

$$\sigma_{max} = \frac{12PL}{8bh^2} \quad \text{Ecuación 6-6}$$

Siendo h la dimensión vertical de la muestra según la posición de la misma en el ensayo y b la dimensión horizontal del plano perpendicular al eje 1.

A continuación se van a mostrar los diagramas tensión-deformación de todas las muestras con su correspondiente regresión lineal para obtener el módulo de elasticidad longitudinal a flexión. Se debe destacar el hecho de que no se obtuvo ningún registro de la muestra Fc11a-1, lo que conlleva su omisión en todos los análisis realizados.

6.1.3 Observaciones durante el ensayo

Para analizar los aspectos reseñables de las muestras que han acaecido durante los ensayos, es fundamental analizar la forma de rotura de las mismas y sus correspondientes diagramas carga-desplazamiento.

En lo que se refiere a las formas de rotura, aparecen dos tipos claramente diferenciados, en uno lo que falla es el adhesivo que une las diferentes latillas, lo que produce un deslizamiento relativo entre éstas. El otro tipo de rotura se caracteriza por la aparición de una fisura longitudinal y perimetral, provocada por una falla de tracción de la parénquima que se produce en las zonas de menor presencia de fibras. En ambos casos se aprecia aplastamientos localizados en la zona de apoyos y en la zona de aplicación de cargas.

Figura 6-5 Probeta Fc11a - 1 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-6 Probeta Fc11a - 2 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-7 Probeta Fc11a - 3 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-8 Probeta Fc11a - 4 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-9 Probeta Fc11a - 5 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-10 Probeta Fc11a - 6 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-11 Probeta Fc11a - 7 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final.



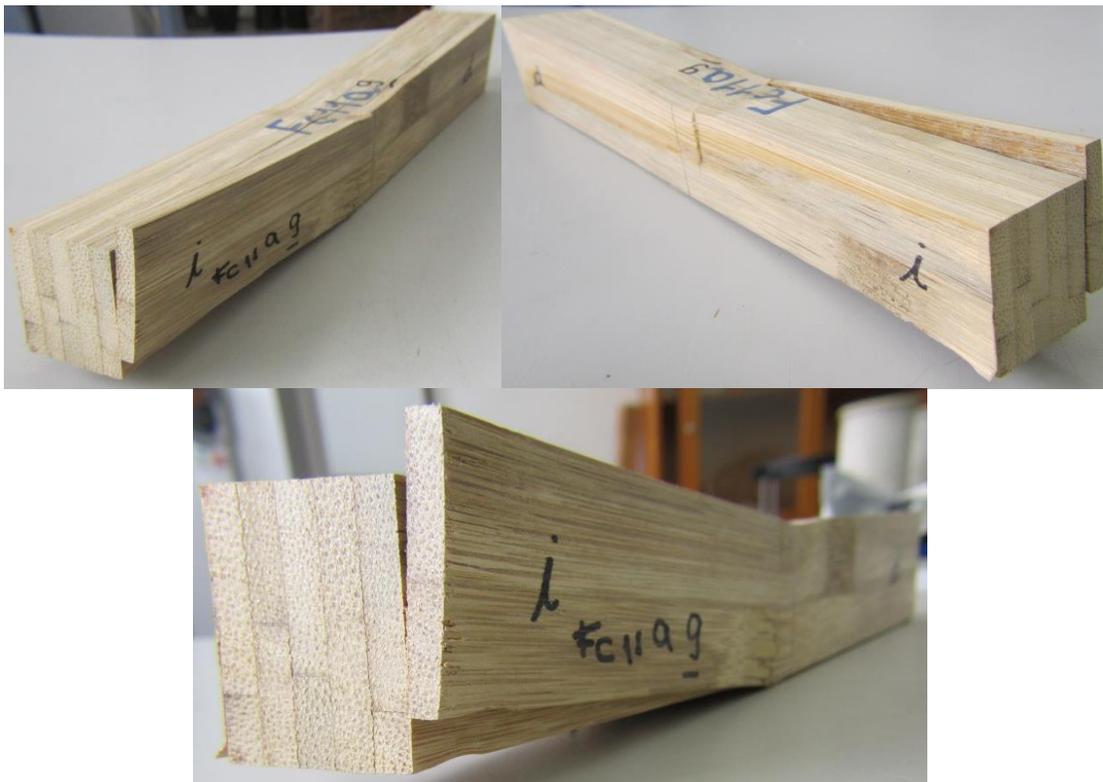
Fuente: Autor

Figura 6-12 Probeta Fc11a - 8 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final.



Fuente: Autor

Figura 6-13 Colocación de la probeta Fc11a - 9 para ensayo de flexión longitudinal.



Fuente: Autor

Figura 6-14 Colocación de la probeta Fc11a - 10 para ensayo de flexión longitudinal.

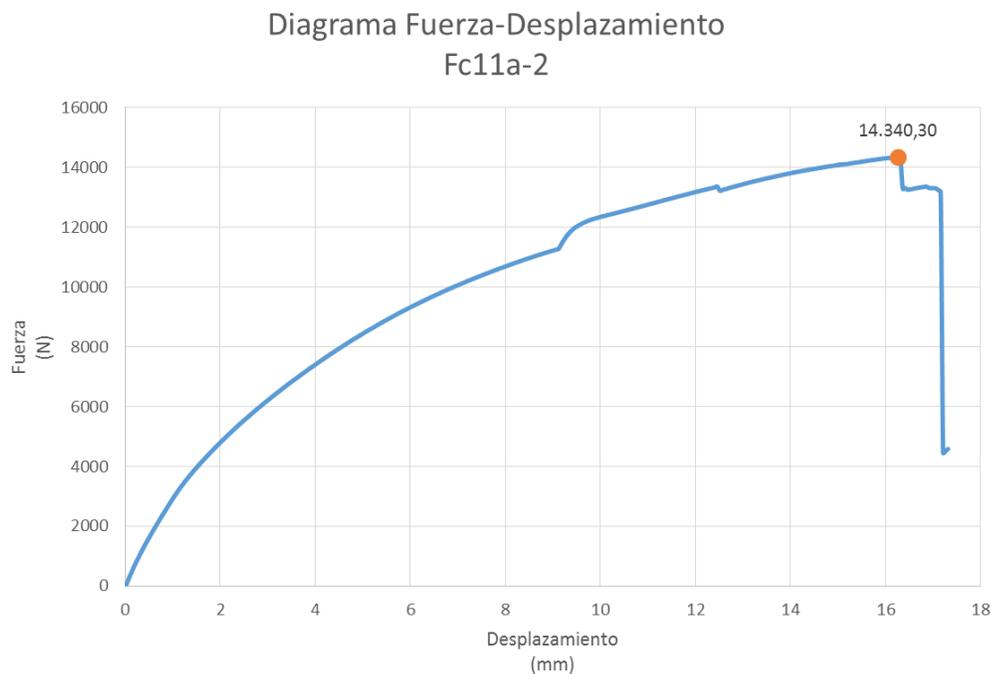


Fuente: Autor

Sólo existe una muestra que rompe por fallo del adhesivo entre las latillas y es la muestra 9, en este caso falla el adhesivo entre dos latillas exteriores y a través del plano vertical de unión. Las muestras 2, 3, 4, 5, 7, 8 y 10, sufren una rotura a través de una fisura perimetral, la cual tiene su máxima abertura en los extremos y la menor en el centro, la muestra 6 sufre esta rotura pero con una abertura de fisura muy pequeña, casi invisible. Las muestras 3, 4, 5, 8 y 10 desarrollan la fisura de rotura por la parte inferior de la muestra (zona de tracción), sin embargo, las muestras 2 y 7 sufren dicha rotura cerca del centro de gravedad (fibra neutra).

Los diagramas carga-desplazamiento que se han obtenido en los ensayos, son los siguientes:

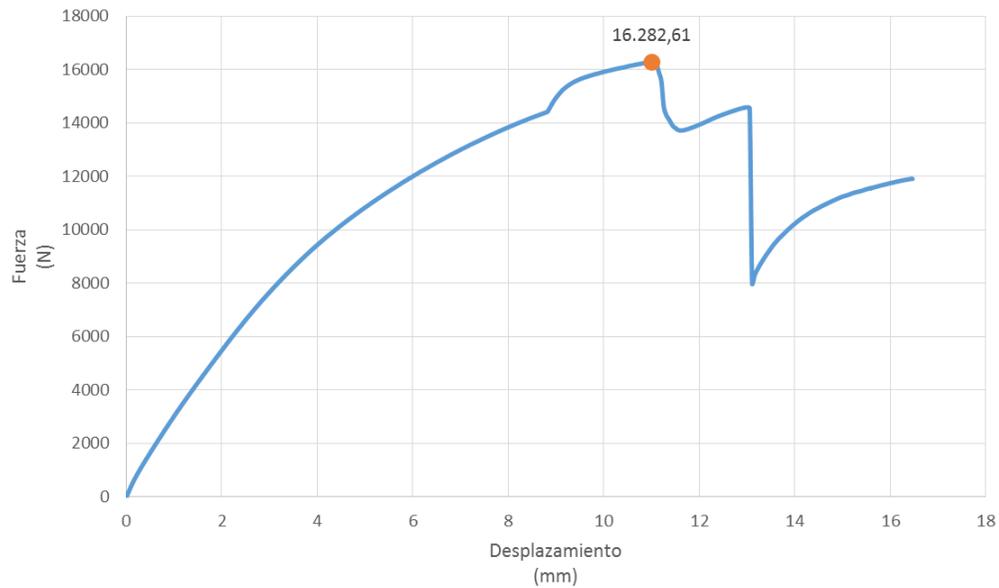
Figura 6-15. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-2



Fuente: Autor

Figura 6-16. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-3

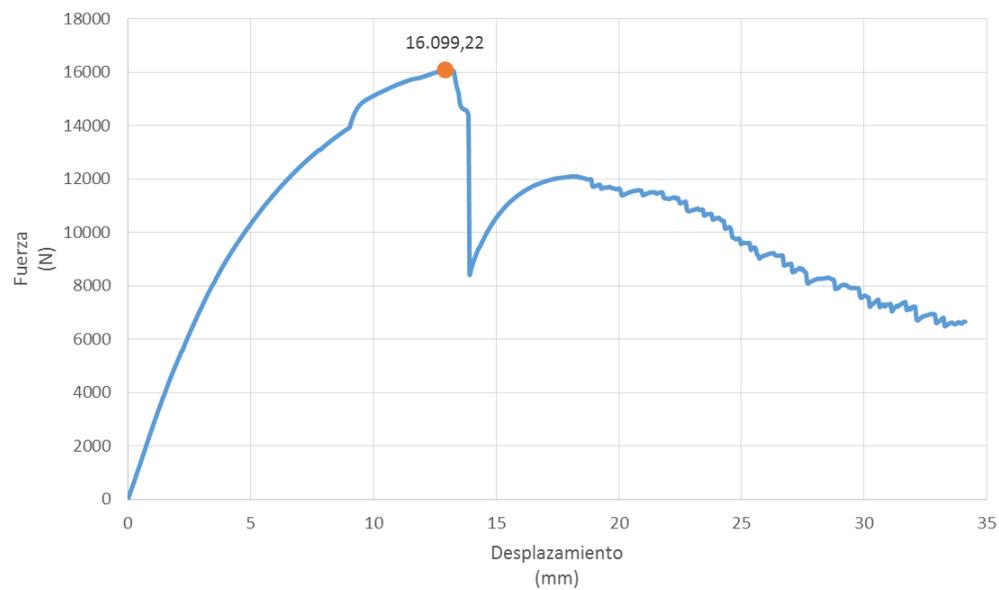
Diagrama Fuerza-Desplazamiento
Fc11a-3



Fuente: Autor

Figura 6-17. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-4

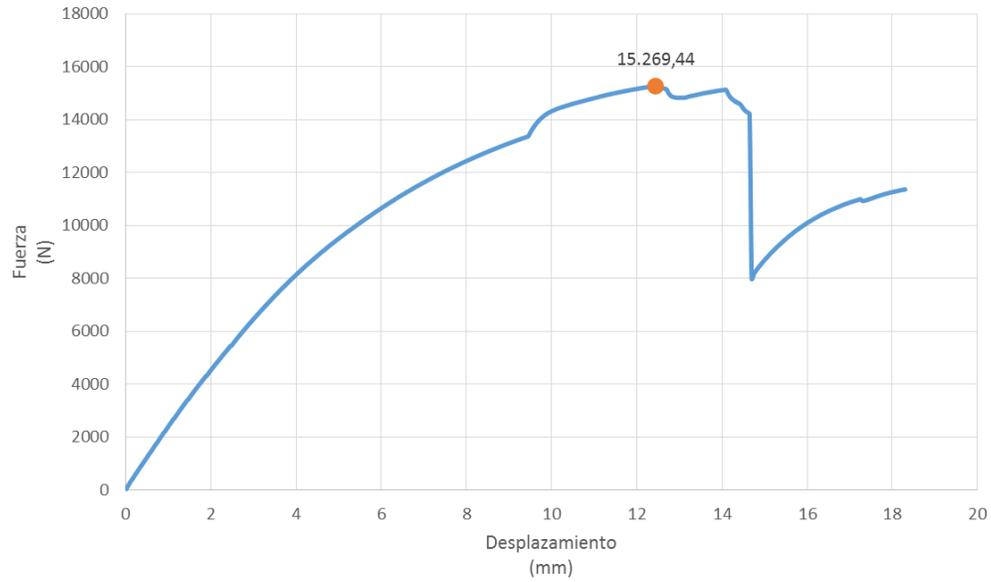
Diagrama Fuerza-Desplazamiento
Fc11a-4



Fuente: Autor

Figura 6-18. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-5

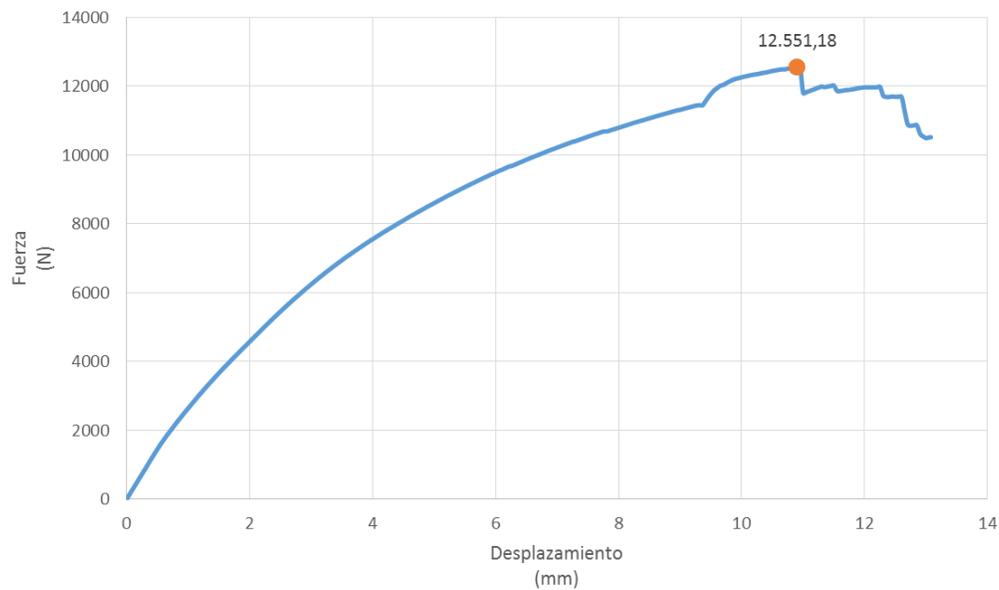
Diagrama Fuerza-Desplazamiento
Fc11a-5



Fuente: Autor

Figura 6-19. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-6

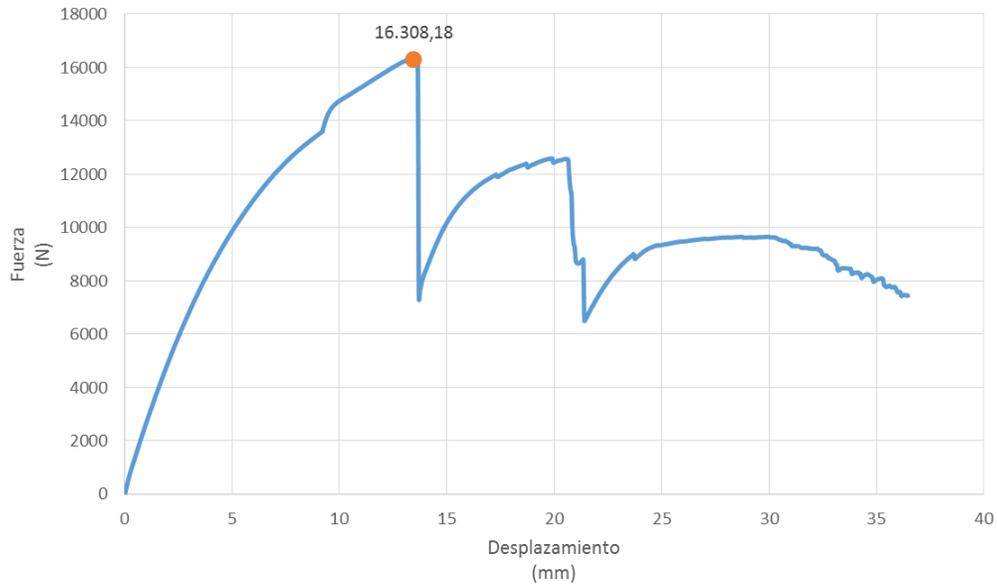
Diagrama Fuerza-Desplazamiento
Fc11a-6



Fuente: Autor

Figura 6-20. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-7

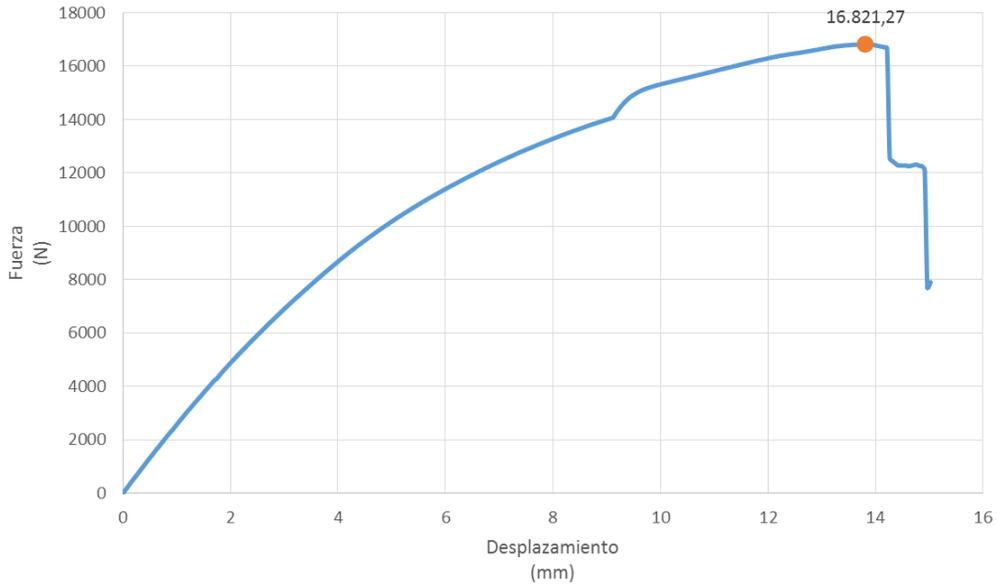
Diagrama Fuerza-Desplazamiento
Fc11a-7



Fuente: Autor

Figura 6-21. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-8

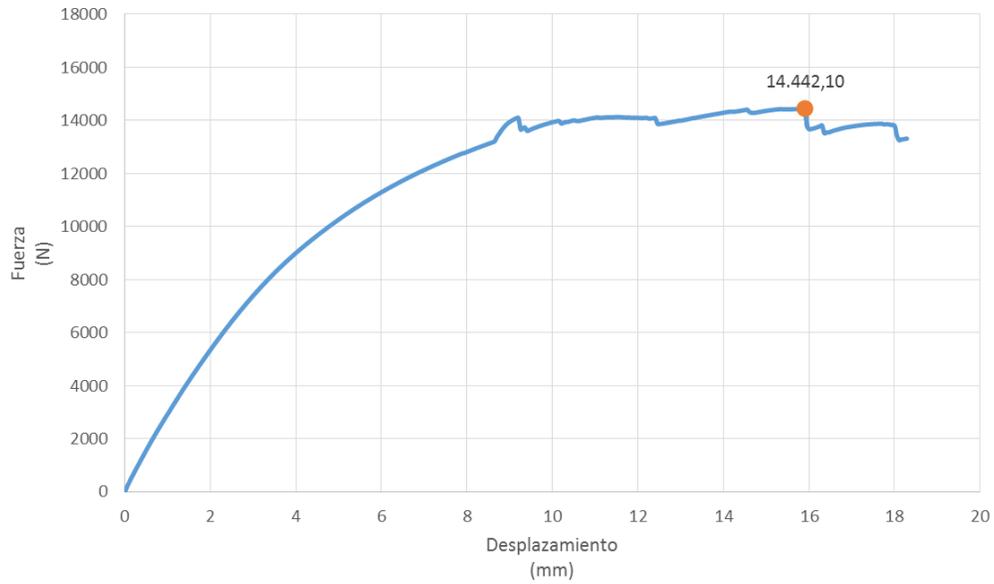
Diagrama Fuerza-Desplazamiento
Fc11a-8



Fuente: Autor

Figura 6-22. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-9

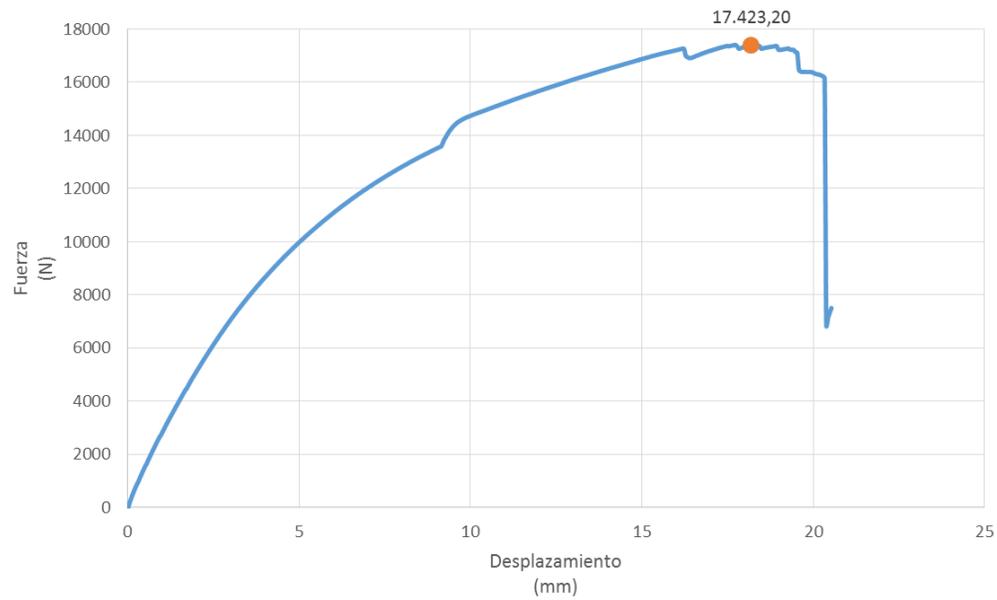
Diagrama Fuerza-Desplazamiento
Fc11a-9



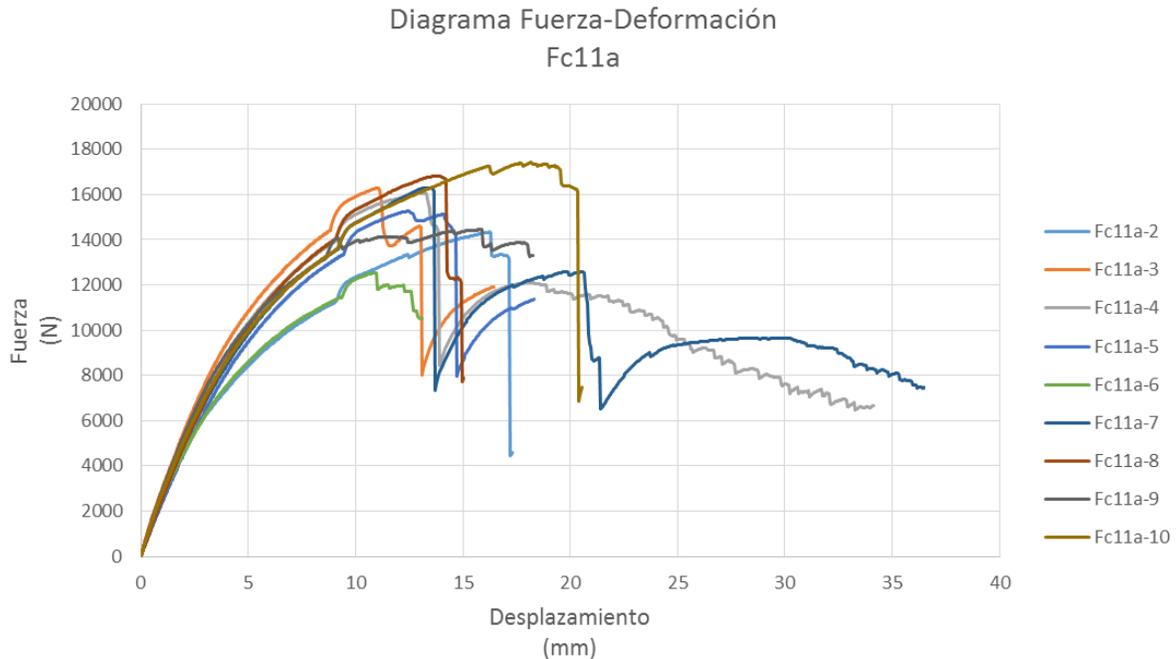
Fuente: Autor

Figura 6-23. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11a-10

Diagrama Fuerza-Desplazamiento
Fc11a-10



Fuente: Autor

Figura 6-24. Relación carga-desplazamiento de las 9 muestras Fc11a

Fuente: Autor

Los diagramas de fuerza-desplazamiento de todas las muestras tienen un comportamiento similar, ya que todas las muestras tienen una fase de carga que se inicia con un tramo lineal, donde el material se comporta elásticamente, para pasar a un tramo curvo hasta la carga máxima, posteriormente se observa en la fase de descarga unos saltos de fuerza sin prácticamente desplazamiento vertical, esto expresa gráficamente el hecho de que se presenta la primera fisura de rotura y su correspondiente pérdida de resistencia, pero a pesar de esto la muestra sigue resistiendo carga, el resto de saltos se deben a la extensión de la fisura y/o a la aparición de nuevas fisuras.

Las muestras 2 y 6 se diferencian del resto en el hecho de que poseen una fuerza máxima sensiblemente menor, pero además se registra una deformación mayor que el resto, la muestra 10 es la que registra la tensión máxima más alta. Por otro lado, las muestras 4 y 7 poseen una deformación de rotura visiblemente mayor al resto.

6.1.4 Determinación de la densidad serie Fc11a

6.1.4.1 Descripción de los ensayos

La densidad es una magnitud intensiva que relaciona la masa de un cuerpo determinado y su volumen. Para obtener la densidad de las muestras de la serie Fc11a, se procedió a obtener la geometría de cada una de las muestras mediante el promedio de las diversas medidas que se realizan en el largo, el ancho y la profundidad, además de obtener su correspondiente masa, pesando cada probeta en una balanza digital con una precisión de 0.01g. Estos dos procedimientos se llevaron a cabo previos al ensayo de rotura por compresión paralela a las fibras.

Tabla 6.1. Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie Fc11a

Muestras	Masa (g)	Ancho (a) (mm)	Largo (b) (mm)	Alto (h) (mm)	Volumen (mm ³)
Fc11a-2	373,40	39,88	300,12	40,23	481504,24
Fc11a-3	385,90	40,10	301,16	40,33	487045,89
Fc11a-4	373,70	39,77	301,12	40,05	479620,47
Fc11a-5	353,50	40,23	301,17	40,32	488519,91
Fc11a-6	324,10	40,03	301,10	40,32	485978,29
Fc11a-7	367,50	39,69	301,31	40,10	479555,66
Fc11a-8	373,90	40,10	301,20	40,13	484694,96
Fc11a-9	339,90	40,08	301,16	40,19	485113,11
Fc11a-10	356,30	38,88	299,74	39,02	454734,83

Fuente: Autor

6.1.4.2 Resultados

Una vez obtenidos los resultados del ensayo de densidad, que se aportan en la siguiente tabla, se obtiene un valor de densidad media de $0.00075105 \text{ g/mm}^3$ o 751.05 Kg/m^3 , con una desviación estándar o típica de $4.35 \times 10^{-5} \text{ g/mm}^3$ o 43.54 Kg/m^3 , y con un coeficiente de variación (se recuerda que es el cociente entre la variación estándar y la densidad media) de 0.058.

Tabla 6.2. Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie Fc11a

Muestras	Densidad (g/mm^3)	Densidad (Kg/m^3)
Fc11a-2	0,00077549	775,49
Fc11a-3	0,00079233	792,33
Fc11a-4	0,00077916	779,16
Fc11a-5	0,00072361	723,61
Fc11a-6	0,00066690	666,90
Fc11a-7	0,00076633	766,33
Fc11a-8	0,00077141	771,41
Fc11a-9	0,00070066	700,66
Fc11a-10	0,00078353	783,53

Fuente: Autor

6.1.5 Determinación del contenido de humedad serie Fc11a

6.1.5.1 Descripción de los ensayos

Para determinar el contenido de humedad de las probetas de la serie Fc11a después de realizado el ensayo de flexión se ha procedido a pesar cada probeta, en una balanza digital con aproximación de 0.01g, registrándose los datos en una tabla antes de entrar al horno. Ingresaron al horno a una temperatura de $102,8^\circ \text{ C}$.

A las 48 horas de permanecer en el horno se pesaron cada una de las probetas, registrándose su peso final para masa seca en la correspondiente tabla 6-3.

6.1.5.2 Resultados

En la Tabla 6-3 se detallan los valores de contenido de humedad de cada una de las probetas de la serie Fc11a. El contenido de Humedad promedio de la Serie Fc11a fue de 13%, con una desviación estándar de 0.67% y un coeficiente de variación del 0.051.

Tabla 6-3. Determinación del contenido de humedad serie Fc11a

Porcentaje Contenido Humedad Serie Fc11a				
Probeta Identificación	Peso Antes horno	Peso Final	Diferencia de Peso	Porcentaje Diferencial
Serie	G	g	g	%
Fc11a-1	386,6	335,5	51,1	13%
Fc11a-2	373,4	323	50,4	13%
Fc11a-3	385,9	339,7	46,2	12%
Fc11a-4	373,7	322,1	51,6	14%
Fc11a-5	353,5	306,2	47,3	13%
Fc11a-6	324,1	280,3	43,8	14%
Fc11a-7	367,5	321,1	46,4	13%
Fc11a-8	373,9	326,1	47,8	13%
Fc11a-9	339,9	300	39,9	12%
Fc11a-10	356,3	308,8	47,5	13%

Porcentaje Contenido Humedad Serie Fc11a **13%**

Fuente: Autor

6.1.6 Análisis de resultados serie Fc11a

Como ya se ha comentado, existen dos formas de rotura, una fallando el adhesivo que une las diferentes latillas, y otra mediante una fisura perimetral a la muestra.

Se puede decir que el diagrama carga-desplazamiento para las 9 muestras analizadas frente a esfuerzos de flexión son similares, ya que en una primera fase existe una zona de acomodamiento, para pasar a una fase elástica que sigue con la última fase plástica que pasa por la fuerza máxima hasta la rotura. Cabe reseñar que después de alcanzar la carga máxima, la probeta sigue resistiendo carga.

La muestra de mayor tensión máxima es la 10, con una tensión de 132.33 N/mm² y la de menor tensión es la 6, con una tensión de 87.13 N/mm². El valor promedio de la resistencia a flexión de la serie Fc11a es de 109.52MPa, con una desviación típica de 12.93MPa y un coeficiente de variación de 0.12. El valor promedio del máximo desplazamiento es de 21.06mm con una desviación típica de 8.35mm y un coeficiente de variación de 0.40.

Todos los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6-4. Tabla comparativa entre las probetas de la serie Fc11a

Código de Muestra	Diagrama Carga-Desplazamiento				Modo de Rotura					
	Desplazamiento		Carga Máxima		Fisura Perimetral					Adhesivo
	Medio	Elevado	Media	Elevada	Leve	Media	Fuerte	Inferior	Central	Total
Fc11a-2	X			X		X			X	
Fc11a-3	X			X			X	X		
Fc11a-4		X		X			X	X		
Fc11a-5	X			X			X	X		
Fc11a-6	X		X		X				X	
Fc11a-7		X		X			X		X	
Fc11a-8	X			X			X	X		
Fc11a-9	X			X						X
Fc11a-10	X			X		X		X		

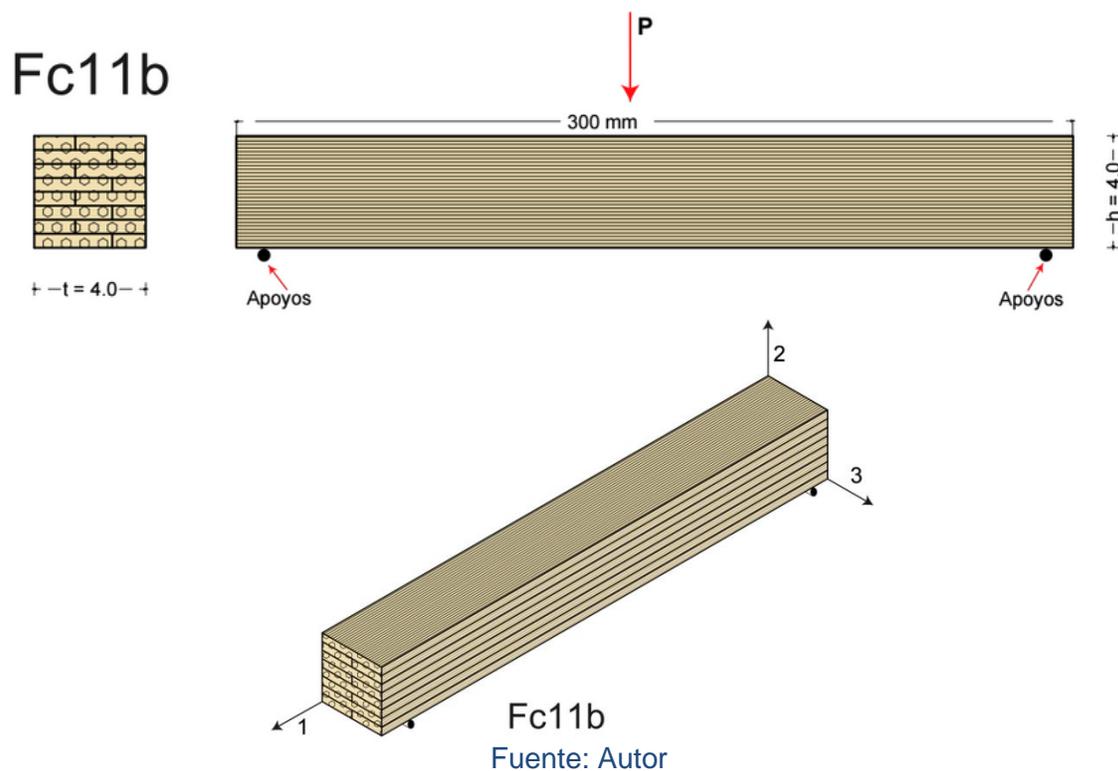
Fuente: Autor

6.2 FLEXIÓN LONGITUDINAL EN PROBETAS SERIE Fc11b

6.2.1 Descripción de los ensayos

Al igual que la otra serie de probetas que se ensayan a flexión, este conjunto de 10 muestras son de sección cuadrada de 4 x 4 cm con una longitud de 30 cm. Éstas se ensayan con las latillas en posición horizontal, lo que supone que la carga se aplica de forma perpendicular al plano de unión de las latillas, y los esfuerzos normales derivados del esfuerzo de flexión son paralelos a las fibras y a la mayor dimensión de las latillas. Hay que reseñar que el contenido de fibras por latilla tiene una distribución uniforme y que todas las latillas poseen un contenido de fibras similar, aunque las latillas que han presentado un mayor contenido de fibras se han dispuesto en la parte inferior de cada muestra.

Figura 6-25 Esquema del ensayo para flexión longitudinal en probetas Fc11b



6.2.2 Cálculo y Resultados

Para obtener los esfuerzos normales provocados por la flexión longitudinal, se utilizó la Ley de Navier (Ecuación 6-7), como sólo tenemos aplicado el esfuerzo de flexión respecto el eje z, se utiliza la expresión simplificada (Ecuación 6-8.):

$$\sigma = \frac{N}{A} - \frac{M_z}{I_z} y + \frac{M_y}{I_y} z \quad \text{Ecuación 6-7}$$

$$\sigma = -\frac{M_z}{I_z} y = -\frac{M_z}{W_z} \quad \text{Ecuación 6-8}$$

Si sustituimos el momento respecto al eje z por el valor registrado por la aplicación de una carga puntual en el centro-luz en una viga bi apoyada, y sustituimos el módulo resistente respecto el eje z (W_z) por la expresión en función de las características geométricas de la sección transversal, queda:

$$\sigma = -\frac{6Pa}{2bh^2} \quad \text{Ecuación 6-9}$$

Siendo P la carga aplicada por la prensa en centro-luz, a la distancia desde un apoyo al punto dónde estamos calculando la tensión, b la longitud horizontal de la sección transversal, y h la altura o dimensión en vertical de la muestra, cuando ésta en posición de ensayo.

Se debe recordar que como la sección transversal en la que se aplican los esfuerzos normales por flexión es cuadrada, la inercia respecto al eje z obedece a la siguiente ecuación:

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \quad \text{Ecuación 6-10}$$

Al mismo tiempo, debemos recordar que el momento máximo generado por una carga puntual (P) aplicada en centro de luz, y siendo (L) la longitud de la muestra, es:

$$M_{max} = \frac{PL}{4} \quad \text{Ecuación 6-11}$$

Si además, lo que se quiere obtener es la tensión máxima, ésta se produce en la parte inferior de la sección, por lo tanto $Y = h/2$, por lo que la expresión queda de la siguiente manera:

$$\sigma_{max} = \frac{12PL}{8bh^2} \quad \text{Ecuación 6-12}$$

Siendo h la dimensión vertical de la muestra según la posición de la misma en el ensayo y b la dimensión horizontal del plano perpendicular al eje 1.

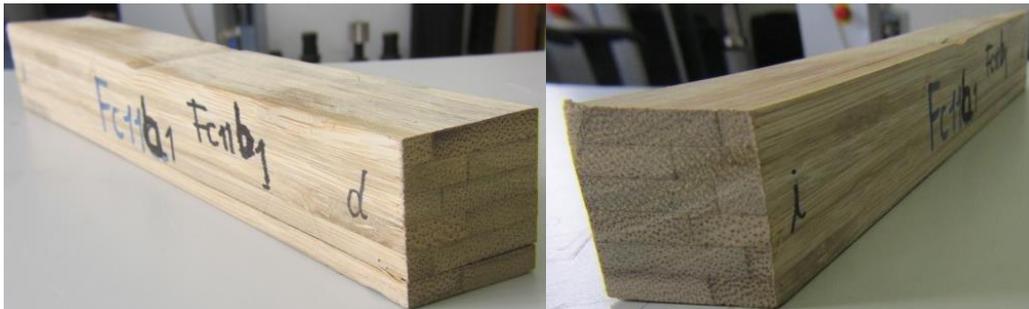
A continuación se van a mostrar los diagramas tensión-deformación de todas las muestras con su correspondiente regresión lineal para obtener el módulo de elasticidad longitudinal a flexión. Se debe destacar el hecho de que no se obtuvo ningún registro de la muestra Fc11b-1, lo que conlleva su omisión en todos los análisis realizados.

6.2.3 Observaciones durante el ensayo

Para analizar el comportamiento frente a flexión de las muestras, es fundamental analizar la forma de rotura de las mismas y sus correspondientes diagramas carga-desplazamiento.

En lo que se refiere a las formas de rotura, aparecen dos tipos claramente diferenciados, en uno lo que falla es el adhesivo que une las diferentes latillas, lo que produce una abertura vertical que varía desde su máximo ancho en los apoyos, a su mínimo, que se produce en la zona en la que se aplica la carga. El otro tipo de rotura se caracteriza por la aparición de una fisura longitudinal y perimetral, provocada por una falla de tracción de la parénquima que se produce en las zonas de menor presencia de fibras. En ambos casos se aprecia aplastamientos localizados en la zona de apoyos y en la zona de aplicación de cargas.

Figura 6-26. Probeta Fc11b - 1 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-27. Probeta Fc11b - 2 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-28. Probeta Fc11b - 3 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-29. Probeta Fc11b - 4 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-30. Probeta Fc11b - 5 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-31. Probeta Fc11b - 6 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-32. Probeta Fc11b - 7 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-33. Probeta Fc11b - 8 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-34. Probeta Fc11b - 9 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



Fuente: Autor

Figura 6-35. Probeta Fc11b - 10 para ensayo de flexión longitudinal. Estado Final



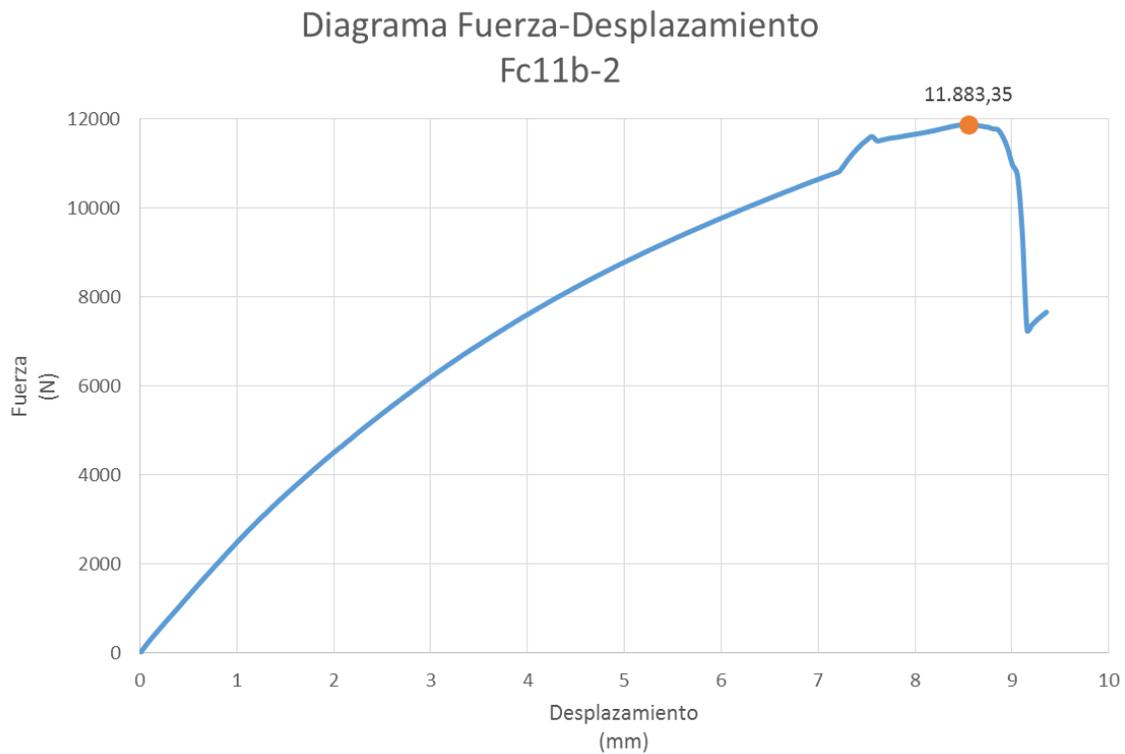
Fuente: Autor

Las muestras que rompen por fallo del adhesivo son la 2, la 4, la 8 y la 9. Las muestras 3, 5, 6, 7, y 10, sufren una rotura a través de una fisura perimetral, la cual tiene su máxima abertura en los extremos y la menor en el centro. Las muestras 3, 5, 6, 8 desarrollan la fisura de rotura por la parte inferior de la muestra (zona de tracción), sin embargo, las muestras 2, 9 y 10 sufren dicha rotura cerca

del centro de gravedad (fibra neutra). Las muestras 4 y 7, desarrollan múltiples fisuras, en el caso de la 4 se distribuyen desde la parte inferior de la sección hasta la superior, en el caso de la 7 aparecen dos fisuras en la parte inferior.

Los diagramas carga-desplazamiento que se han obtenido en los ensayos, son los siguientes:

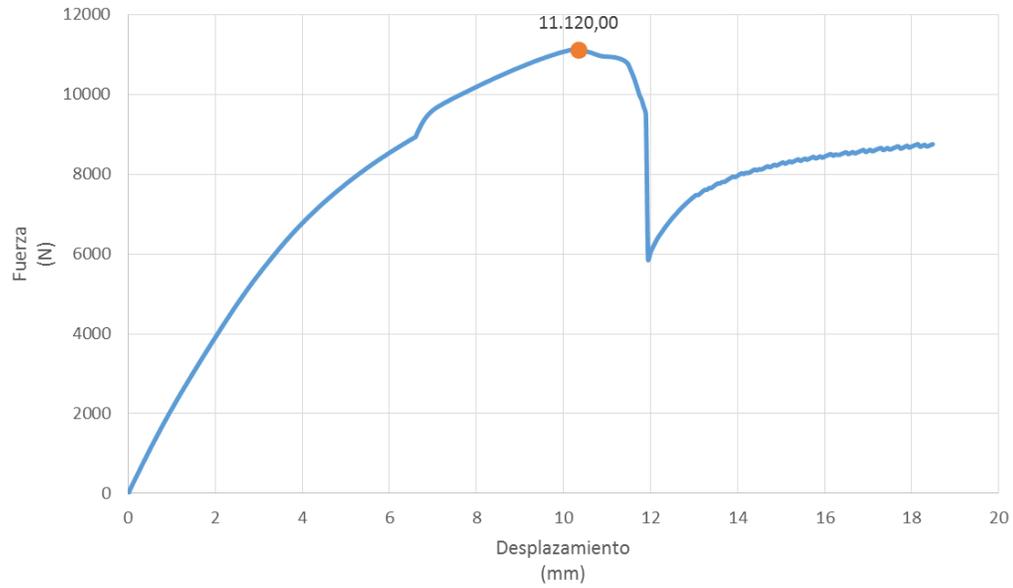
Figura 6-36. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-2



Fuente: Autor

Figura 6-37. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-3

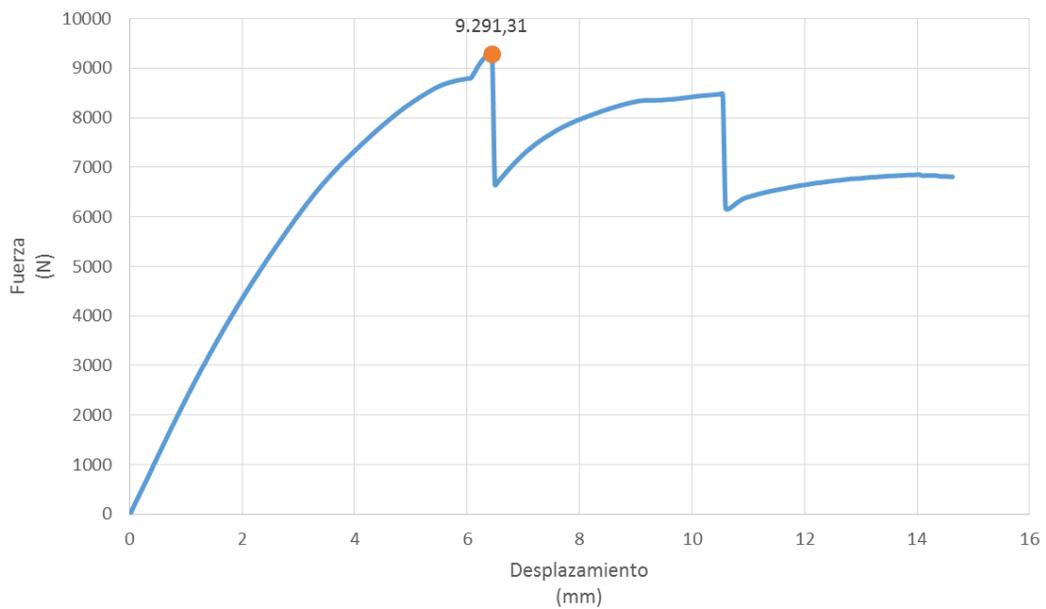
Diagrama Fuerza-Desplazamiento
Fc11b-3



Fuente: Autor

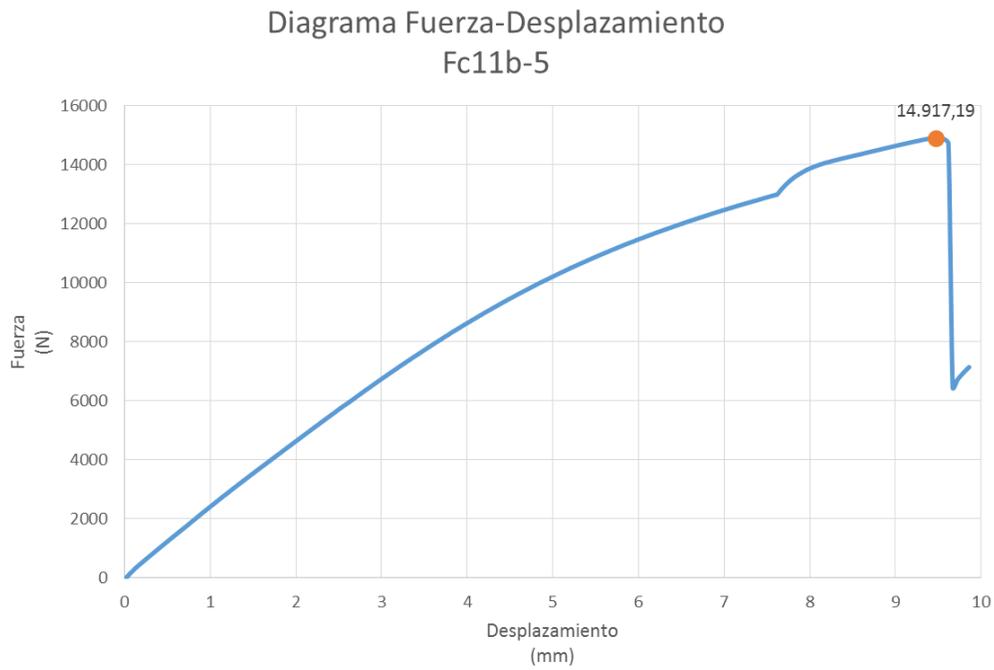
Figura 6-38. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-4

Diagrama Fuerza-Desplazamiento
Fc11b-4



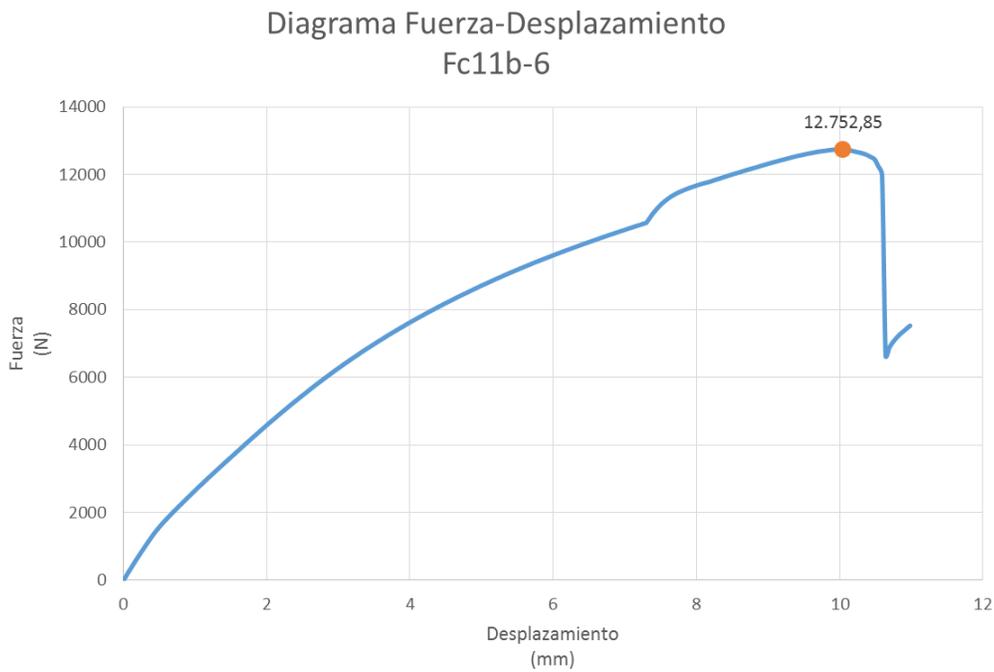
Fuente: Autor

Figura 6-39. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-5



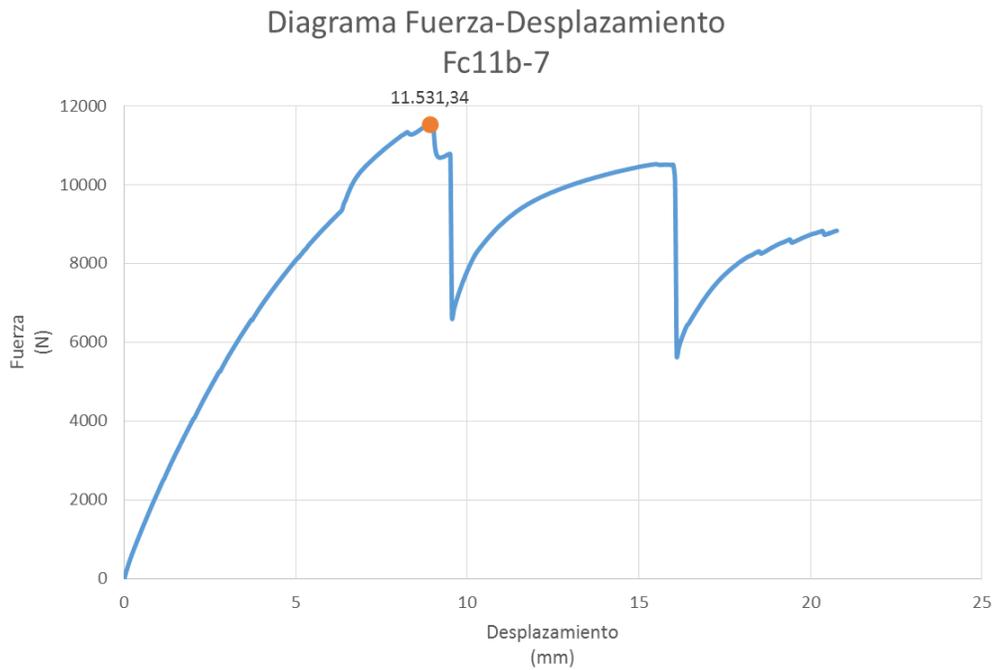
Fuente: Autor

Figura 6-40. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-6



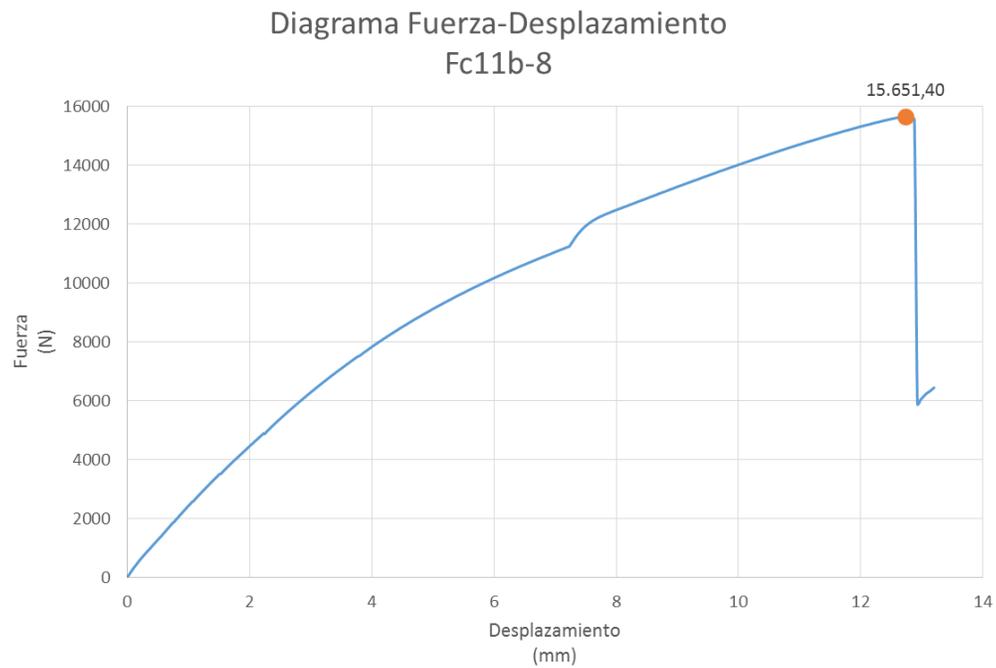
Fuente: Autor

Figura 6-41. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-7



Fuente: Autor

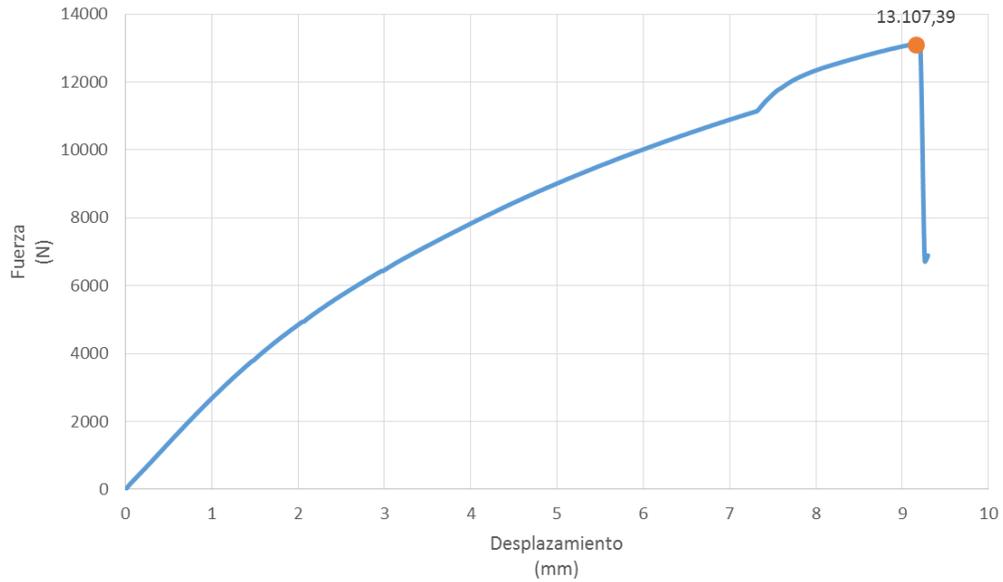
Figura 6-42. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-8



Fuente: Autor

Figura 6-43. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-9

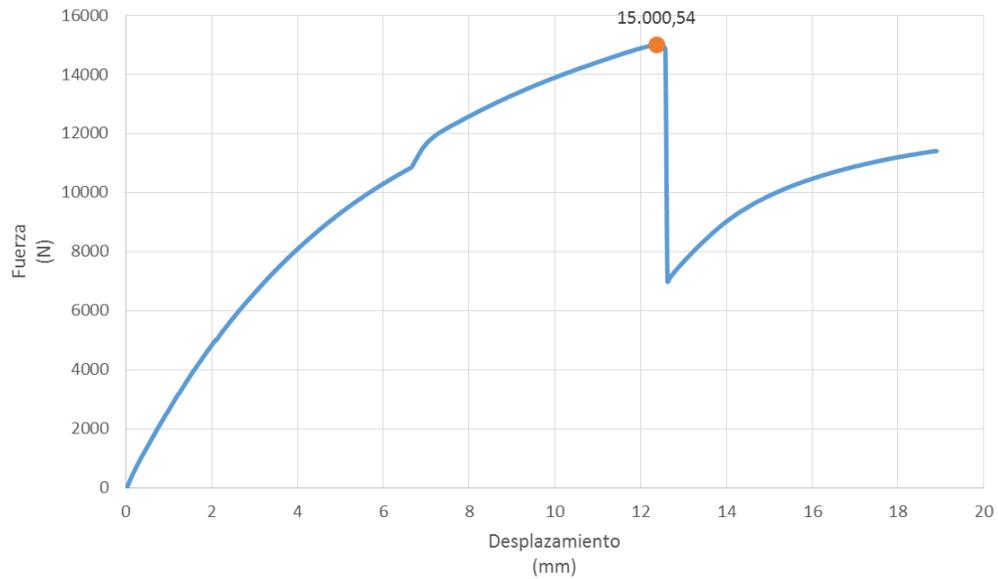
Diagrama Fuerza-Desplazamiento
Fc11b-9



Fuente: Autor

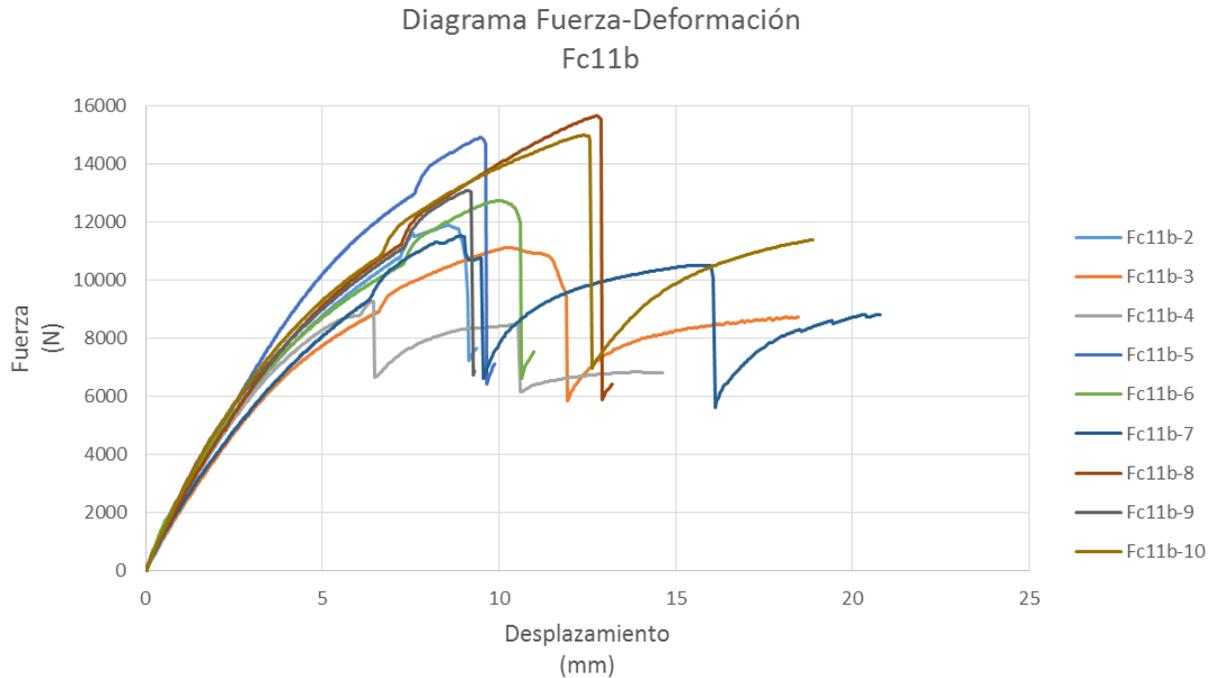
Figura 6-44. Relación carga-desplazamiento, muestra Fc11b-10

Diagrama Fuerza-Desplazamiento
Fc11b-10



Fuente: Autor

Figura 6-45. Relación carga-desplazamiento de las 9 muestras Fc11b



Fuente: Autor

Los diagramas de fuerza-desplazamiento de todas las muestras tienen un comportamiento similar, ya que todas las muestras tienen una fase de carga que se inicia con un tramo lineal, donde el material se comporta elásticamente, para pasar a un tramo curvo hasta la carga máxima, posteriormente se observa en la fase de descarga unos saltos de fuerza sin prácticamente desplazamiento vertical, esto expresa gráficamente el hecho de que se presenta la primera fisura de rotura y su correspondiente pérdida de resistencia, pero a pesar de esto la muestra sigue resistiendo carga, el resto de saltos se deben a la extensión de la fisura y/o a la aparición de nuevas fisuras.

La muestra 4 se diferencia del resto en el hecho de que posee una fuerza máxima sensiblemente menor, registrando una deformación media, las muestras 5, 8 y 10, son las que registran las mayores tensiones máximas. Por otro lado, las muestras 3, 7 y 10 poseen las mayores deformaciones de rotura.

6.2.4 Determinación de la densidad serie Fc11b

6.2.4.1 Descripción de los ensayos

La densidad es una magnitud intensiva que relaciona la masa de un cuerpo determinado y su volumen. Para obtener la densidad de las muestras de la serie Fc11b, se procedió a obtener la geometría de cada una de las muestras mediante el promedio de las diversas medidas que se realizan en el largo, el ancho y la profundidad, además de obtener su correspondiente masa, pesando cada probeta en una balanza digital con una precisión de 0.01g. Estos dos procedimientos se llevaron a cabo previos al ensayo de rotura por compresión paralela a las fibras.

Tabla 6-5. Resumen de datos necesarios para el ensayo de densidad, serie Fc11b

Muestras	Masa (g)	Ancho (a) (mm)	Largo (b) (mm)	Alto (h) (mm)	Volumen (mm ³)
Fc11b-2	401,60	40,16	301,12	40,06	484414,44
Fc11b-3	315,80	40,40	301,24	39,85	485026,34
Fc11b-4	343,50	40,24	301,12	39,88	483198,68
Fc11b-5	354,80	40,07	301,05	40,03	482860,73
Fc11b-6	365,90	40,25	301,14	40,23	487647,43
Fc11b-7	366,90	40,06	301,12	39,60	477605,38
Fc11b-8	357,70	40,02	301,36	40,18	484587,96
Fc11b-9	388,10	40,34	301,00	39,98	485390,04
Fc11b-10	392,70	40,34	301,08	40,04	486271,89

Fuente: Autor

6.2.4.2 Resultados

Una vez obtenidos los resultados del ensayo de densidad, que se aportan en la siguiente tabla, se obtiene un valor de densidad media de $0.00075441 \text{ g/mm}^3$ o 754.41 Kg/m^3 , con una desviación estándar o típica de $5.46 \times 10^{-5} \text{ g/mm}^3$ o 54.61 Kg/m^3 , y con un coeficiente de variación (se recuerda que es el cociente entre la variación estándar y la densidad media) de 0.072.

Tabla 6-6. Resultados del ensayo de densidad de las 10 muestras de la serie Fc11b

Muestras	Densidad (g/mm^3)	Densidad (Kg/m^3)
Fc11b-2	0,00082904	829,04
Fc11b-3	0,00065110	651,10
Fc11b-4	0,00071089	710,89
Fc11b-5	0,00073479	734,79
Fc11b-6	0,00075034	750,34
Fc11b-7	0,00076821	768,21
Fc11b-8	0,00073815	738,15
Fc11b-9	0,00079956	799,56
Fc11b-10	0,00080757	807,57

Fuente: Autor

6.2.5 Determinación del contenido de humedad serie Fc11b

6.2.5.1 Descripción de los ensayos

Para determinar el contenido de humedad de las probetas de la serie Fc11a después de realizado el ensayo de flexión se ha procedido a pesar cada probeta, en una balanza digital con aproximación de 0.01g, registrándose los datos en una tabla antes de entrar al horno. Ingresaron al horno a una temperatura de $103,8^\circ \text{ C}$.

A las 48 horas de permanecer en el horno se pesaron cada una de las probetas, registrándose su peso final para masa seca en la correspondiente tabla (Ver Tabla 6-7)

6.2.5.2 Resultados

En la Tabla 6-7 se detallan los valores de contenido de humedad de cada una de las probetas de la serie Fc11b. El contenido de Humedad promedio de la Serie Fc11b fue de 11%, con una desviación estándar de 0.699% y un coeficiente de variación del 0.064.

Tabla 6-7. Determinación del contenido de humedad de la serie Fc11b

Porcentaje Contenido Humedad Serie Fc11b

Probeta Identificación	Peso Antes horno	Peso Final	Diferencia de Peso	Porcentaje Diferencial
Serie	g	g	g	%
Fc11b-1	357,8	316,2	41,6	12%
Fc11b-2	401,6	355,4	46,2	12%
Fc11b-3	315,8	277,5	38,3	12%
Fc11b-4	343,5	305,6	37,9	11%
Fc11b-5	354,8	320,7	34,1	10%
Fc11b-6	365,9	321,5	44,4	12%
Fc11b-7	366,9	325,5	41,4	11%
Fc11b-8	357,7	315,7	42	12%
Fc11b-9	388,1	342,6	45,5	12%
Fc11b-10	392,7	346,8	45,9	12%

Porcentaje Contenido Humedad Serie Fc11b **11%**

Fuente: Autor

6.2.6 Análisis de resultados serie Fc11b

Como ya se ha comentado, existen dos formas de rotura, una fallando el adhesivo que une las diferentes latillas, y otra mediante una fisura perimetral a la muestra.

Se puede decir que el diagrama carga-desplazamiento para las 9 muestras analizadas frente a esfuerzos de flexión son similares, ya que en una primera fase existe una zona de acomodamiento, para pasar a una fase elástica que sigue con la última fase plástica que pasa por la fuerza máxima hasta la rotura. Cabe reseñar que después de alcanzar la carga máxima, la probeta sigue resistiendo carga.

La muestra de mayor tensión máxima es la 8, con una tensión de 109.51 N/mm² y la de menor tensión es la 4, con una tensión de 65.58 N/mm². El valor promedio de la resistencia a flexión de la serie Fc11b es de 89.95MPa, con una desviación típica de 14.38MPa y un coeficiente de variación de 0.16. El valor promedio del máximo desplazamiento es de 12.59mm con una desviación típica de 4.64mm y un coeficiente de variación de 0.37.

Todos los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6-8. Tabla comparativa entre las probetas de la serie Fc11a

Código de Muestra	Diagrama Carga-Desplazamiento				Modo de Rotura						
	Desplazamiento		Carga Máxima		Fisura Perimetral					Adhesivo	
	Medio	Elevado	Media	Elevada	Leve	Media	Fuerte	Inferior	Central		Superior
Fc11b-2	X		X				X		X		X
Fc11b-3		X	X				X	X			
Fc11b-4	X		X			X	X	X	X	X	X
Fc11b-5	X			X			X	X			
Fc11b-6	X		X				X	X			
Fc11b-7		X	X			X	X	X	X		
Fc11b-8	X			X			X	X			X
Fc11b-9	X		X				X		X		X
Fc11b-10		X		X			X		X		

Fuente: Autor

6.3 RESULTADOS DE RESISTENCIA FLEXION

Para poder realizar la comparativa de los resultados de las 2 series de flexión (Fc11a y Fc11b), se van a realizar unos gráficos y tablas específicos para realizar la comparativa de las dos series.

Se va a empezar la comparativa con la relación carga-desplazamiento:

Figura 6-46. Relación carga-desplazamiento de las 9 muestras Fc11a (rojo) y las 9 muestras Fc11b (azul)

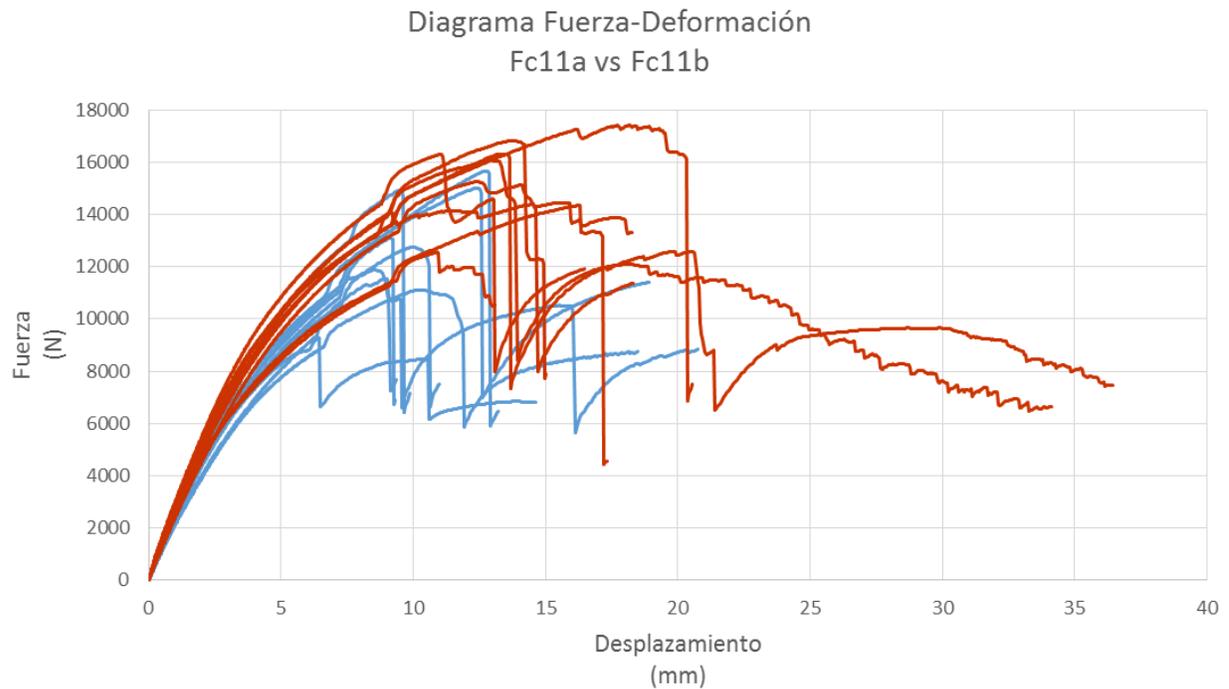


Tabla 6-9. Valores medios de los principales parámetros resistentes de las 2 series de ensayo a flexión

Valores Medios	Series de Muestras de Flexión	
	Fc11a	Fc11b
Carga Máxima (N)	15504,17	12806,15
Tensión Máxima (MPa)	109,52	89,95
Desplazamiento Máximo (mm)	21,06	12,59
Carga de Rotura (N)	1533,46	1236,46
Tensión de Rotura (MPa)	106,6	85,17

Fuente: Autor

De esta información podemos deducir que las muestras en las que se dispone las latillas con la dimensión intermedia en vertical (serie Fc11a), registran valores más favorables que la serie Fc11b, ya que la serie Fc11a resiste un 17.4% más de carga máxima, un 17.9% más de tensión máxima, posee un 40.2% más de deformación de rotura, resiste una carga de rotura un 19.4% superior y una tensión de rotura 20.1% superior.

Por lo que se puede decir que la serie Fc11a es más resistente en la rotura y en su máximo valor frente a flexión, y además, al tener una deformación en rotura mayor, el material es más dúctil. Características muy interesantes para cualquier material estructural.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

El bambú *dendrocalamus asper* es un material natural anisotrópico y compuesto, ya que está compuesto por dos fases, las fibras y la matriz de parénquima, siendo las fibras la fase que le otorga la resistencia al material, como éstas son elementos unidireccionales en las que una dimensión prevalece frente a las otras dos, el comportamiento mecánico sobre la dirección predominante es muy diferente al de las otras dos, ya que el material muestra mejores características mecánicas (rigidez y resistencia) en la dirección de las fibras.

Aunque el material objeto de estudio realmente es el laminado de esta variedad de bambú, o lo que es lo mismo el laminado de bambú *dendrocalamus asper* (LBDA), las características antes mencionadas se mantienen, con la problemática añadida de que las uniones de las diferentes láminas mediante adhesivos, añaden más parámetros a analizar para realizar la caracterización físico-mecánica del material. Por lo que el material analizado es un material compuesto y manufacturado, que a partir de múltiples láminas (latillas) pegadas y prensadas entre sí formalizan el material final, conservando éste la misma orientación de fibras que las latillas.

En los ensayos que se realizaron a las muestras de LBDA, se analizó la resistencia a compresión, a corte y a flexión, y en algunos casos el fallo de la

muestra se produjo por la superficie de unión de las latillas, esto significa que en esos casos el adhesivo utilizado y la forma de aplicarlo no garantizan una adherencia total entre ellas.

La dispersión de los resultados de los ensayos para caracterizar mecánicamente el material es similar a otros estudios realizados de laminados de bambú de otras especies, y menor a la obtenida en los resultados obtenidos de los mismos ensayos pero realizados a los materiales o piezas constituyentes, es decir, a láminas aisladas de bambú o a rollizos de bambú. Esto indica que la manipulación o transformación realizada para realizar el laminado de bambú, mejora el comportamiento estructural del material, ya que homogeniza las características físicas y mecánicas de material, lo que nos permite entender y predecir su comportamiento de una manera más fiable.

La densidad media de todas las muestras de LBDA es de 0,0007382 g/mm³ o 738.30 kg/m³ y un coeficiente de variación de 0.054.

El valor promedio de la resistencia a compresión paralela a las fibras del LBDA es de 53.17 MPa con un coeficiente de variación de 0.118. El valor promedio de la resistencia a compresión perpendicular a las fibras y a la superficie mayor de las latillas del LBDA es de 16.13 MPa con un coeficiente de variación de 0.080.

El valor promedio del módulo de elasticidad a compresión paralela a fibra es de 19219.9 MPa con un coeficiente de variación de 0.196. El valor promedio del módulo de elasticidad a compresión perpendicular a las fibras y a la superficie mayor de las latillas del LBDA es de 326 MPa con un coeficiente de variación de

0.448. El valor promedio del módulo de elasticidad a compresión perpendicular a las fibras y paralelo a la superficie mayor de las latillas del LBDA es de 530 MPa con un coeficiente de variación de 0.231.

En lo que respecta a la respuesta estructural del material frente al esfuerzo cortante, se puede decir que tiene una mayor resistencia cuando las fibras se disponen paralelas al esfuerzo, ya que el valor promedio de la resistencia a cortante paralela a las fibras, en el caso de V13 del LBDA es de 6.56 MPa con un coeficiente de variación de 0.349, en el caso de V12 el valor promedio es de 10.34 MPa con un coeficiente de variación de 0.096. En ambos casos la rotura que prevalece es por el plano paralelo al esfuerzo y que pasa por la discontinuidad geométrica de la muestra, esto se debe al fallo de la parénquima por el esfuerzo rasante que debe soportar. En el caso de las muestras con las fibras perpendiculares a las fibras, las muestras V23 registran un valor promedio de 4.02 MPa con un coeficiente de variación de 0.112, en el caso de V32 el valor promedio es de 2.90 MPa con un coeficiente de variación de 0.231. En ambos casos la rotura que prevalece es mediante fisuras diagonales que unen la discontinuidad geométrica con el vértice opuesto de la muestra, esto se debe al fallo de la parénquima por el esfuerzo cortante que debe soportar, en el caso de las muestras V32, en muchas de ellas se combina la rotura por rasante.

El valor promedio de la resistencia a flexión cuando la longitud intermedia de las latillas se dispone de forma paralela a la fuerza que genera los esfuerzos de flexión es de 109.52 MPa con un coeficiente de variación de 0.118. Por otro lado, el valor promedio de la resistencia a flexión cuando la longitud intermedia de las

latillas se dispone de forma perpendicular a la fuerza que genera los esfuerzos de flexión es de 89.95 MPa con un coeficiente de variación de 0.160.

Se ha podido observar que la configuración de las muestras es un factor a tener en cuenta para analizar el comportamiento del LBDA, ya que en todos los tipos de ensayos realizados (compresión, cortante y flexión) se han registrado valores con grandes diferencias en algunos casos y con diferencias reseñables en otros, sólo con el cambio de la disposición de las latillas o con el cambio de dirección de las fibras.

7.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar la caracterización mecánica del LBDA para ensayos a tracción, extrayendo la información necesaria para definir parámetros como la resistencia máxima y de rotura de tracción, módulo de elasticidad.

Estudiar mediante ensayos de compresión y tracción la relación entre las deformaciones de las diferentes direcciones (coeficiente de Poisson).

Profundizar en la tecnología y comportamiento resistente del adhesivo que se puede utilizar, realizando los mismos ensayos para diferentes adhesivos o para diferentes procedimientos de pegado.

Implementar ensayos que nos permitan determinar la adherencia entre la parénquima y las fibras. Además de ensayos que nos ayuden a caracterizar el comportamiento del material frente a esfuerzos de rasante.

Realizar ensayos de contenido de fibras, que nos permitan un conocimiento más profundo del material.

Profundizar en los ensayos de flexión para recabar más información y para valorar muestras con diferentes longitudes, para que se pueda determinar el módulo de elasticidad y valorar la interacción del esfuerzo de flexión con el de cortante.

Determinar el comportamiento frente tensiones tangenciales, determinando el módulo de cizalladura o módulo de elasticidad transversal.

Ampliar el campo de estudio en los ensayos de cortante y realizar los ensayos con las configuraciones de las muestras que no se han evaluado.

Realizar estudios del comportamiento del material considerando la aparición de los nudos en la formalización de las latillas.

Analizar el material frente el efecto de pandeo, mediante ensayos de compresión con muestras de diferentes alturas, con diferentes disposiciones de fibras y latillas, entre otros factores.

Investigar el comportamiento del material frente a la acción del fuego.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, P. J. (2014). La Bio-construcción como una alternativa en la búsqueda de la sostenibilidad: el caso del bambú. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 14(1).
- Acuña, D., & Pantoja, N. (2005). Resistencia al corte paralelo a la fibra de la *Guadua angustifolia*.
- 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.
- Alfaro, M. (2010). Estudio de ubicación de lugares y personas que poseen caña *Guadua* y bambú gigante en el noroccidente de la provincia de Pichincha. Quito: Gobierno de la Provincia de Pichincha e INBAR.
- 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.
- Añazco M., Rojas S. (2015). Estudio de la Cadena desde la producción al consumo del bambú en Ecuador con énfasis en la especie *guadua angustifolia*.
- Barreto, W. M. (2003). *Evaluación de guadua laminada pegada aplicada a propuesta de reticulado plano*.
- Carvajal, W., Ortegón, W., & Romero, C. (1981). Elementos estructurales en bambú. Bogotá.
- 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*
- 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) Caori Takeuchi. In *12th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (IC NOCMAT 2010)*.

- 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. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.056
- 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.
- García Pazmiño, C. G. (2013). Estudio de comportamiento de demanda para el uso de caña guadua y bambú gigante en Ecuador (Doctoral dissertation, SANGOLQUÍ/ESPE/2013).
- González-Vallejo, P., Marrero, M., Solís-Guzmán, J. (2015) The ecological footprint of dwelling construction in Spain. *Ecological Indicators*
- Gib, C. (2005). El bambú: su importancia en la ecología y la conservación de las especies nativas. In Primer congreso mexicano del bambú (Vol. 8, No. 9).
- ISO, I. S. (2004). ISO 22157 Determination of physical and mechanical properties of bamboo, (December).
- Jaramillo A., Librelotto L., Larco M. (2016). Inventario del ciclo de vida del proceso de producción de bambú rollizo tratado de la especie dendrocalamus asper en el Noroccidente de Pichincha. *Revista Eídos* 8ava. Edición. Recuperado de <https://app.ute.edu.ec/Portal/Revista.aspx?idPortal=15&idCategoria=1144&idSeccion=1031&idArticulo=85>
- Herrera, R. (2014). El bambú un material alternativo sustentable. Recuperado de: <http://www.lanacion.com.ar/1470589-el-bambu-un-material-alternativo-sustentable>
- INBAR (2013). El bambú, una alternativa innovador para la diversificaicón y generación de ingresos locales rurales: promoviendo la gestión de conocimiento sobre bambú en Ecuador, Colombia y Perú. Quito, Ecuador
- Li, H., Zhang, Q., Huang, D., & Deeks, A. J. (2013). Compressive performance of laminated bamboo. *Composites Part B: Engineering*, 54(May), 319–328. doi:10.1016/j.compositesb.2013.05.035
- Londoño, X. (2006). Botánica y diversidad genética de la guadúa y otros bambúes de América. III Simposio Latinoamericano de Bambú. Bmabú, comunidad y desarrollo. Guayquil, Ecuador.
- López, L. F. (2008). Estudio exploratorio del potencial estructural de laminados de guadua. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Macías, J. (2017). Programa de gestión ambiental para la central del bambú Andoas (CENBA) del Gobierno Autónomo Descentralizado Provincia de Pichincha. Universidad Tecnológica de Pereira

- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). (2011). REDD+ en Ecuador. Una oportunidad para mitigar el Cambio Climático y contribuir a la Gestión Sostenible de los Bosques. Quito.
- Morán, J. (2001). Usos tradicionales y actuales del bambú en América Latina, con énfasis en Colombia y Ecuador. ECUABAMBU, INBAR, PNUD, Escuela Politécnica Nacional. Guayaquil.
- Morán, J. (2005). Usos del bambú en el mundo con énfasis en América. Primer Congreso Mexicano del Bambú. Red internacional del Bambú y Ratán (INBAR) México.
- Neuman AL., Izquierdo M., Rodríguez, P. (2005). Investigación e impacto ambiental de los edificios. La energía. Recuperado de:
<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/477>
- Nugroto, N., & Ando, N. (2001). Development of structural composite products made from bamboo. The fundamental properties of laminated bamboo lumber
- 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
- 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.
- 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 y Fernández (2010). Materiales de construcción: criterios de sostenibilidad y desarrollo. VIII Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción. Lima, Perú. Recuperado de:
a.upm.es/11669/2/Materiales_de_construccion.Criterios_de_sostenibilidad_y_desarrollo.pdf
- Sinha, A., Way, D., & Mlasko, S. (2014). Structural performance of glued laminated bamboo beams. Journal of Structural Engineering (United States)
- Takeuchi, C. (2014). Caracterización Mecánica del bambú guadua laminado para uso estructural. Tesis Doctoral Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, E., Luna, P., & Takeuchi, C. (2014). Determination of the Delamination Percentage of Compacted
- Torres, L. A. (2005). Modelo anisótropo de elementos finitos para el análisis mecánico del bambú y su verificación experimental. Universidad del Valle.

- Torres, R. (2014). Producción de bambú, mina de oro verde. Tierra Fértil. Recuperado de: <http://www.tierrafertil.com.mx/produccion-de-bambu-mina-de-oro-verde/>
- Universidad Nacional de Colombia. (2012). Informe Final Proyecto de Investigación “Diseño y construcción de vivienda con elementos estructurales en guadua laminada prensada pegada.”
- 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.
- Weaver, W., & Johnston, P. (1984). *Finite Elements for Structural Analysis*. New Jersey: Prentice Hall.
- Yeh, M.-C., & Lin, Y.-L. (2011). Finger joint performance of structural laminated bamboo member. *Journal of Wood Science*, 58(2), 120–127. doi:10.1007/s10086-011-1233-7
- 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.