

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Comportamiento a flexión y compresión de laminados de madera de *Acacia mangium* Willd

Javier Andres Quintero Parra

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C., Colombia

2024

Comportamiento a flexión y compresión de laminados de madera de *Acacia mangium* Willd.

Javier Andrés Quintero Parra.

Trabajo Final presentado como requisito para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Estructuras.

Directora:

Ph.D. Caori Patricia Takeuchi Tam.

Programa curricular de
Maestría en Ingeniería – Estructuras.
Plan de estudios de Profundización.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C., Colombia
2024

A mi familia.

Declaración de obra original

Yo Javier Andres Quintero Parra declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Javier Andres Quintero Parra

Fecha: 29/04/2024

Tabla de contenido

	Pág.
Tabla de contenido.....	V
Lista de tablas	VIII
Lista de figuras.....	XII
Lista de Imágenes	XV
Listado de símbolos.....	XIX
	Resumen XXIII
	Abstract XXIV
1 Introducción.....	25
1.1 Justificación.....	26
1.2 Objetivos	29
1.2.1 Objetivo general.....	29
1.2.2 Objetivos específicos.....	29
1.3 Alcance	29
2 Marco teórico.....	30
2.1 Especie <i>Acacia mangium</i> Willd.....	30
2.2 Orientación del grano de la madera	33
2.3 Ley de Hooke y Módulo de elasticidad E	34
2.4 Deformación unitaria normal ϵ	35
2.5 Deformación angular en un plano.....	36
2.6 Flexión en vigas	37
1.2.3 Esfuerzos normales por flexión.....	38
1.2.4 Esfuerzos cortantes por flexión.....	41
1.2.5 Módulo de Elasticidad aparente E_{ap} en vigas de madera sometidas a flexión	42
1.2.6 Módulo de Elasticidad global E_{mg} o MOE en vigas de madera laminada sometidas a flexión.....	43
2.7 Compresión.....	44

1.2.7	Esfuerzo normal en compresión σ_c	44
1.2.8	Relación de esbeltez λ	45
1.2.9	Longitud efectiva L_e	45
1.2.10	Carga crítica de pandeo P_{cr}	46
1.2.11	Esfuerzo crítico: σ_{cr}	46
2.8	Estadística descriptiva	46
1.2.12	Medidas de localización	47
1.2.13	Medidas de variabilidad	47
1.2.14	Regresión lineal simple	49
3	Metodología	52
3.1	Proceso de obtención de MAMW y fabricación de probetas para caracterización de propiedades mecánicas de madera maciza	52
3.2	Procedimiento de fabricación y alistamiento de vigas largas de MLAMW	58
3.3	Procedimiento de fabricación y alistamiento de vigas cortas y probetas para compresión de MLAMW	64
3.4	Criterio de aceptación de datos	68
3.5	Determinación del contenido de humedad $W\%$ de MLAM y MLAMW	69
3.6	Determinación del peso específico $PECH = 12\%$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado	72
3.7	Determinación de la resistencia a la compresión paralela al grano $\sigma_c // max$ de la MAMW	73
3.8	Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano $\sigma_c \perp$ de la MAMW	75
3.9	Determinación de la resistencia a la tracción paralela al grano $\sigma_t // max$ de la MAMW	78
3.10	Determinación de la resistencia al cizallamiento paralelo al grano σ_{cz} de la MAMW	80
3.11	Determinación de la tracción perpendicular al grano RT	81
3.12	Comportamiento a flexión de vigas de MAMW Y MLAMW	83
1.2.15	Equipamiento N1 para ensayos de flexión NTC 5950	84
1.2.16	Equipamiento N2 para ensayos de flexión de MLAMW	87
1.2.17	Determinación del módulo de rotura MOR en vigas de MAMW y MLAMW	89
1.2.18	Determinación del módulo de elasticidad aparente E_{ap} en flexión para vigas de la MAMW y MLAMW	90
1.2.19	Determinación del módulo de elasticidad global en flexión MOE para vigas de MAMW y de MLAMW	91
1.2.20	Determinación del módulo de elasticidad en cortante G de la MAMW y MLAMW	92
3.13	Determinación de la resistencia al corte en vigas cortas de MLAMW	94
1.2.21	Determinación de la resistencia al cortante paralelo al grano σ_{czad} en la línea de pegado con adhesivos MUF	95
3.14	Determinación del módulo de elasticidad en compresión paralelo a la fibra para laminados MLAMW	97
3.15	Determinación de valores experimentales del esfuerzo axial máximo para tres grupos de probetas de MLAMW con respecto a seis relaciones de esbeltez diferentes	100
4	Determinación de propiedades físico-mecánicas de la MAMW	104
4.1	Peso específico $PECH = 12\%$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado	104

4.2	Resistencia a la compresión paralela al grano $\sigma_c // \max$	107
4.3	Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano $\sigma_c \perp$ de la MAMW	109
4.4	Determinación de la resistencia a la tracción paralela al grano $\sigma_t // \max$ de la MAMW	111
4.5	Determinación de la resistencia al cizallamiento σ_{cz} de la MAMW	112
4.6	Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular al grano RT	115
5	Comportamiento a flexión de la MAMW y la MLAMW	117
5.1	Módulo de Rotura MOR en vigas de MAMW	118
5.2	Módulo de elasticidad aparente E_{ap} en vigas de MAMW	120
5.3	Módulo de elasticidad global en flexión MOE en vigas de MAMW	124
5.4	Módulo de elasticidad en cortante G en probetas de MAMW	126
5.5	Contenido de humedad $W\%$ de probetas de MAMW para ensayos de flexión. 129	
5.6	Módulo de Rotura MOR en vigas prismáticas de MLAMW	130
5.7	Módulo de elasticidad aparente E_{ap} en vigas de MLAMW	132
5.8	Módulo de elasticidad global en flexión MOE en vigas de MLAMW	137
5.9	Módulo de elasticidad en cortante G en vigas prismáticas de MLAMW	139
5.10	Contenido de humedad $W\%$ de vigas de MLAMW sometidas a ensayos de flexión. 142	
5.11	Determinación del esfuerzo máximo de corte τ_{max} en vigas cortas de MLAMW. 143	
5.12	Determinación de la resistencia al cortante paralelo al grano σ_{czad} en la línea de pegado con adhesivo MUF	148
6	Comportamiento a compresión de columnas de MLAMW	150
6.1	Determinación del módulo de elasticidad $E_c // lam$ a compresión para probetas de MLAMW	150
6.2	Esfuerzo axial máximo para tres grupos de columnas con respecto a seis relaciones de esbeltez diferentes	154
7	Conclusiones	157
8	Bibliografía	162

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Ensayos para determinación de propiedades fisicomecánicas de la MAMW.....	57
Tabla 2. Especificaciones de vigas largas de MLAMW.	63
Tabla 3. Dimensiones y cantidad de vigas cortas de MLAMW	66
Tabla 4. Dimensiones y cantidad de columnas pequeñas de MLAMW subgrupo G4.	67
Tabla 5. Dimensiones y cantidad de columnas pequeñas de MLAMW subgrupo G5.	67
Tabla 6. Dimensiones y cantidad de columnas pequeñas de MLAMW subgrupo G6.	67
Tabla 7. Dimensiones de probetas y velocidad de aplicación de carga para ensayo de resistencia a la compresión perpendicular al grano.....	77
Tabla 8. Dimensiones de vigas para ensayo de flexión NTC 5950.....	85
Tabla 9. Dimensiones de vigas de MLAMW.....	88
Tabla 10. Dimensiones de vigas cortas de MLAMW.	94
Tabla 11. Área sometida a cortante y sus dimensiones para probetas con adhesivo MUF	96
Tabla 12. Dimensiones de probetas de MLAMW para cálculo del módulo de elasticidad a compresión paralelo al grano en laminados $E_c//lam$	98
Tabla 13. Dimensiones probetas a compresión de MLAMW del grupo G4 y velocidad de aplicación de carga.	101
Tabla 14. Dimensiones probetas a compresión de MLAMW del grupo G5 y velocidad de aplicación de carga.	102
Tabla 15. Dimensiones probetas a compresión de MLAMW del grupo G6 y velocidad de aplicación de carga.	102
Tabla 16. Datos para cálculo del peso específico PECH = 12% de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado.	105
Tabla 17. Peso específico PECH = 12% de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado.....	106
Tabla 18. Contenido de humedad W% de probetas para cálculo de PECH = 12% de MAMW secada en ambiente climatizado.....	107
Tabla 19. Datos para cálculo de la resistencia a la compresión paralela al grano $\sigma_c // max$	108
Tabla 20. Resistencia máxima a compresión paralela al grano $\sigma_c // max$ para MAMW de acuerdo con la NTC 784 (ICONTEC, 1974b).	108
Tabla 21. Contenido de humedad W% de las probetas de MAMW solicitadas a compresión paralela al grano.	108
Tabla 22. Datos para determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano $\sigma_c \perp$ de la MAMW.....	109
Tabla 23. Estadísticos descriptivos de los resultados de la resistencia a la compresión perpendicular al grano $\sigma_c \perp$ de la MAMW.	110

Tabla 24. Estadísticos descriptivos de los resultados de resistencia para una deformación del 1% $\sigma_C \pm 1\%$ en compresión perpendicular al grano de MAMW.....	110
Tabla 25. Contenido de humedad de las probetas de la MAMW solicitadas a compresión perpendicular al grano.....	110
Tabla 26. Datos para cálculo de resistencia a la tracción paralela al grano $\sigma_t // \max$ de la MAMW	111
Tabla 27. Resistencia máxima a la tracción paralela al grano $\sigma_t // \max$ para MAMW de acuerdo con la NTC 944 (ICONTEC, 1975).....	111
Tabla 28. .Contenido de humedad promedio de las probetas de MAMW solicitadas a tracción paralela al grano.....	112
Tabla 29. Datos para cálculo de la resistencia al cizallamiento σ_{cz} de la MAMW.	113
Tabla 30. Resistencia al cizallamiento σ_{cz} de la MAMW.....	113
Tabla 31. Resumen de parámetros estadísticos descriptivos para la resistencia al cizallamiento σ_{cz} de la MAMW.....	114
Tabla 32. Contenido de humedad promedio de las probetas de la MAMW solicitadas a cizallamiento	114
Tabla 33. Datos para cálculo de la resistencia a la tracción perpendicular al grano RT de la MAMW.	115
Tabla 34. Resistencia a la tracción perpendicular al grano RT de la MAMW.	115
Tabla 35. Parámetros estadísticos descriptivos para la resistencia a la tracción perpendicular al grano RT de la MAMW.	116
Tabla 36. Contenido de humedad para probetas de resistencia a la tracción perpendicular al grano RT de la MAMW.	116
Tabla 37. Dimensiones de probetas de flexión de la MAMW.....	118
Tabla 38. Fuerza y momento máximo ensayos de flexión de la MAMW.	119
Tabla 39. Módulo de rotura MOR de la MAMW.....	119
Tabla 40. Estadísticos descriptivos para MOR de la MAMW.	120
Tabla 41. Datos para cálculo del módulo de elasticidad aparente E_{ap} en probetas de MAMW.	121
Tabla 42. Módulo de elasticidad aparente E_{ap} probetas de MAMW.	122
Tabla 43. Estadísticos para módulo de elasticidad aparente E_{ap} en probetas de MAMW.	123
Tabla 44. Datos para cálculo del módulo de elasticidad global en flexión MOE para probetas de MAMW.....	124
Tabla 45. Valor promedio del módulo de elasticidad global en flexión MOE para probetas de MAMW.	125
Tabla 46. Estadísticos de módulo de elasticidad global en flexión MOE para probetas de MAMW.	125
Tabla 47. Valores de módulo de elasticidad en cortante G para probetas de MAMW. ...	128
Tabla 48. Estadística descriptiva para resultados de módulo de elasticidad en cortante G para probetas de MAMW.....	128
Tabla 49. Contenido de humedad $W\%$ para probetas de MAMW ensayadas a flexión..	129

Tabla 50. Estadísticos descriptivos para el contenido de humedad W% para las probetas de MAMW a flexión	129
Tabla 51. Datos promedio de grupos de vigas de MLAMW para la determinación del módulo de rotura MOR	130
Tabla 52. Módulo de rotura MOR para el grupo F1 de vigas de MLAMW.....	131
Tabla 53. Módulo de rotura MOR para los 5 grupos de MLAMW.	131
Tabla 54. Módulo de rotura MOR para vigas de MLAMW.	131
Tabla 55. Datos para cálculo del módulo de elasticidad aparente Eap para la viga F1-1 de MLAMW.	132
Tabla 56. Resumen de estadísticos de módulo de elasticidad aparente Eap para vigas prismáticas de MLAMW.	136
Tabla 57. Módulo de elasticidad aparente Eap general para vigas de MLAMW.....	136
Tabla 58. Datos para cálculo del módulo de elasticidad global en flexión MOE para viga F1-1.	138
Tabla 59. Resumen de estadísticos para módulo de elasticidad global en flexión MOE para vigas prismáticas de MLAMW.	139
Tabla 60. Módulo de elasticidad global en flexión MOE para vigas prismáticas de MLAMW.	139
Tabla 61. Listado de vigas de MLAMW instrumentadas con deformímetros triaxiales...	140
Tabla 62. Resumen de estadísticos para de módulo de elasticidad en cortante G para vigas de MLAMW.	141
Tabla 63. Módulo de elasticidad en cortante G para vigas prismáticas de MLAMW.	142
Tabla 64. Resumen de estadísticos descriptivos para el contenido de humedad W% de las vigas de MLAMW ensayadas a flexión.....	143
Tabla 65. Resumen de estadísticos descriptivos para el contenido de humedad W% para las vigas de MLAMW sometidas a ensayos de flexión.	143
Tabla 66. Datos para calcular el esfuerzo máximo de corte τ_{max} para las vigas cortas de MLAMW del grupo NTC-663-F5.....	145
Tabla 67. Resultados para determinación del modo de falla y esfuerzo cortante máximo τ_{max} para vigas cortas del grupo NTC-663-F5.	145
Tabla 68. Resumen de estadísticos descriptivos para esfuerzo máximo de corte τ_{max} en vigas cortas de MLAMW del grupo NTC-663-F5.	146
Tabla 69. Resumen esfuerzo máximo de corte τ_{max} para los 5 grupos de vigas cortas de MLAMW.	146
Tabla 70. Resultado promedio para esfuerzo máximo de corte τ_{max} para los 5 grupos de vigas cortas de MLAMW.	146
Tabla 71. Resultado promedio para esfuerzo máximo de corte τ_{max} para los 5 grupos de vigas cortas de MLAMW sin datos atípicos.	147
Tabla 72. Contenido de humedad para cada grupo de vigas cortas de MLAMW.	147
Tabla 73. Resumen de estadísticos descriptivos para el contenido de humedad W% para las probetas para calcular el esfuerzo máximo de corte τ_{max} en vigas cortas de MLAMW.	147
Tabla 74. Datos y resultados para la resistencia máxima de rotura a corte σ_{czad} aportada por el adhesivo MUF	148

Tabla 75. Resumen de estadísticos descriptivos para los resultados de la resistencia máxima de rotura a corte σ_{czad} aportada por el adhesivo MUF	149
Tabla 76. Contenido de humedad $W\%$ para las probetas de MLAMW para determinar la resistencia máxima de rotura a corte σ_{czad} aportada por el adhesivo MUF	149
Tabla 77. Resultados para módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_c // lam$ de las probetas de MLAMW.....	152
Tabla 78. Resumen de estadísticos descriptivos para módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_c // lam$ de las probetas de MLAMW.	152
Tabla 79. Contenido de humedad $W\%$ para probetas solicitadas de MLAMW a compresión paralelo al grano para la determinación de $E_c // lam$	153
Tabla 80. Resumen de estadísticos descriptivos para contenido de humedad $W\%$ de probetas de MLAMW a compresión paralelo al grano para la determinación de $E_c // lam$	154
Tabla 81. Definición del comportamiento a compresión en función de la relación de esbelte .(Munévar, Quintero et al., 2023).....	154
Tabla 82. Contenido de humedad $W\%$ promedio de las probetas de MLAMW para ensayos de compresión del grupo G4.	156
Tabla 83. Contenido de humedad $W\%$ promedio de las probetas de MLAMW para ensayos de compresión del grupo G5.	156
Tabla 84. Contenido de humedad $W\%$ promedio de las probetas de MLAMW para ensayos de compresión del grupo G6.	157
Tabla 85. Propiedades físico mecánicas de la MAMW utilizada para la fabricación de MLAMW.	157
Tabla 86. Comparación de densidades y Modulos de elasticidad promedio.	158

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Orientación del grano o de las fibras de la madera.	34
Figura 2. Relación esfuerzo normal vs. deformación longitudinal.	34
Figura 3. Barra sometida a carga axial P.	35
Figura 4. Esquema de deformímetro triaxial a 45°.	36
Figura 5. Sección transversal rectangular de viga.	37
Figura 6. Viga simplemente apoyada con dos cargas iguales en los tercios de la luz.	37
Figura 7. Diagrama de cargas y fuerzas internas: (a) Diagrama de carga, (b) Diagrama de cortante y (c) Diagrama de momento.	38
Figura 8. Esfuerzos normales en una viga: (a) Profundidad del eje neutro de una viga de sección transversal rectangular. (b) Vista lateral de la distribución de esfuerzos normales en la viga.	39
Figura 9. Deformación de viga en flexión pura.	39
Figura 10. Relación entre dirección de momento flexionante y dirección de esfuerzos normales.	40
Figura 11. Esfuerzos cortantes en viga de sección transversal. (a) Esfuerzos cortantes sobre elemento <i>fg</i> . (b) Esfuerzos cortantes de igual magnitud en caras perpendiculares del elemento <i>fg</i>	41
Figura 12. Distribución de esfuerzo cortante en viga de sección transversal. (a) Sección transversal rectangular. (b) Distribución parabólica de esfuerzos cortantes en altura <i>h</i>	42
Figura 13. Esquema de columna a compresión con extremos articulados. (a) Sección transversal de columna, (b) columna de madera sometida a compresión.	44
Figura 14. Ejemplo de diagrama de cajas. Datos de medición del contenido de nicotina de 40 cigarrillos.	48
Figura 15. Ejemplo de diagrama de cajas. Diagrama de cajas para los datos de medición del contenido de nicotina de 40 cigarrillos.	49
Figura 16. Recta de regresión lineal.	49
Figura 17. Localización de zonas reforestadas con la especie <i>Acacia mangium</i> Willd. ...	53
Figura 18. Dimensiones de madera para ensamble de elementos de MLAMW.	58
Figura 19. Esquema de variación de dimensiones de vigas largas de MLAMW.	63
Figura 20. Esquema de variación de dimensiones de vigas cortas de MLAMW.	66
Figura 21. Esquema de variación de dimensiones de columnas pequeñas de MLAMW.	68

Figura 22. Dimensiones de las probetas para la determinación del peso específico aparente PECH = 12% de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado. (a) Dimensiones de probetas, (b) Vista 3D probetas.	72
Figura 23. Esquema de procedimiento para medición de peso de probeta de MAMW. ..	73
Figura 24. Determinación de la resistencia a la compresión paralela al grano. (a) Dimensiones de probetas, (b) Esquema de procedimiento en laboratorio del ensayo de rotura por compresión axial.	74
Figura 25. Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano.	76
Figura 26. Dimensiones de las probetas para determinación de la resistencia a la tracción paralela a la fibra. (a) Dimensiones de probeta en 3D, (b) Vistas lateral y frontal.	79
Figura 27. Esquema de procedimiento para determinación de la resistencia a la tracción paralela al grano $\sigma_t // \max$	79
Figura 28. Dimensiones de las probetas para determinación de la resistencia al cizallamiento paralelo al grano.	80
Figura 29. Determinación de la resistencia al cizallamiento paralelo al grano σ_{cz} de la MAMW. Esquema de procedimiento.	81
Figura 30. Dimensiones de las probetas para determinación de la tracción perpendicular al grano RT	82
Figura 31. Ensayo de tracción perpendicular al grano. Esquema de procedimiento.	83
Figura 32. Vista 3D y dimensiones de probeta de MAMW para ensayo de flexión de 4 puntos.	84
Figura 33. Probeta de MAMW. (a) Sección transversal, (b) Sección longitudinal.....	84
Figura 34. Esquema de equipamiento N1 e instrumentación para ensayos de 4 puntos con vigas de MAMW y MLAMW con $L \leq 2$ m.....	85
Figura 35. Vista 3D y dimensiones de probeta de MLAMW para ensayo de flexión de 4 puntos.	87
Figura 36. Probeta de MLAMW. (a) Sección transversal, (b) Sección longitudinal.....	87
Figura 37. Esquema de e instrumentación en laboratorio para vigas con $L > 2$ m.	88
Figura 38. Vigas cortas de MLAMW.	94
Figura 39. Determinación del esfuerzo máximo cortante τ_{max} en vigas cortas de MLAMW. Esquema de procedimiento.	95
Figura 40. Probeta para determinación de la resistencia en la línea de pegado aportada por adhesivos MUF	96
Figura 41. Probeta para cálculo de módulo de elasticidad en compresión paralela a la fibra de la MLAMW. Dimensiones de probetas.....	97
Figura 42. Esquema de montaje en laboratorio del ensayo para determinación del módulo de elasticidad a compresión de la MLAMW.	98
Figura 43. Esquema de dimensiones de probetas a compresión MLAMW, ...	101
Figura 44. Esquema de equipamiento con apoyos articulados ($K=1$)	103
Figura 45. Diagrama de caja de peso específico PECH = 12% de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado.....	106
Figura 46. Diagrama de cajas para módulo de rotura MR en probetas de MAMW.	120

Figura 47. Gráfica de Carga contra Deflexión medida en el centro de la luz para vigas de MAMW.....	122
Figura 48. Diagrama de cajas para resultados de módulo de elasticidad aparente <i>E_{ap}</i> sin datos atípicos para probetas de MAMW.....	123
Figura 49. Esfuerzo cortante por flexión τ en función de la deformación angular γ_{xy} ..	127
Figura 50. Regresión lineal para determinación del módulo de elasticidad en cortante <i>G</i> para probetas de MAMW.	127
Figura 51. Curvas de carga contra deflexión en el centro de la luz para vigas de MLAMW NTC5950-F1.	133
Figura 52. Curvas de carga contra deflexión en el centro de la luz para vigas de MLAMW NTC-5950-F2.	134
Figura 53. Curvas de carga contra deflexión en el centro de la luz para vigas de MLAMW NTC-5950-F3.	134
Figura 54. Curvas de carga contra deflexión en el centro de la luz para vigas de MLAMW NTC-5950-F4.	135
Figura 55. Curvas de carga contra deflexión en el centro de la luz para vigas de MLAMW NTC-5950-F5.	135
Figura 56. Curva de regresión lineal para determinación del módulo de elasticidad en cortante <i>G</i> para la viga de MLAMW F1-1.....	141
Figura 57. Gráfica esfuerzo deformación a compresión paralelo al grano <i>E_c</i> // <i>lam</i> de las probetas de MLAMW.	151
Figura 58. Valores experimentales para comportamiento a compresión de probetas de MLAMW en función de la relación de esbeltez para los 3 grupos analizados.....	156

Lista de Imágenes

	Pág.
Imagen 1. Árbol de <i>Acacia mangium</i> Willd.	30
Imagen 2. Hoja de <i>Acacia mangium</i> Willd.	31
Imagen 3. Corteza del árbol de <i>Acacia mangium</i> Willd.	31
Imagen 4. Flor de la <i>Acacia mangium</i> Willd.	31
Imagen 5. Fruto de la <i>Acacia mangium</i> Willd.	31
Imagen 6. Estructura anatómica de sección transversal tronco de <i>Acacia mangium</i> Willd.	32
Imagen 7. Propiedades microscópicas. Vista paralela al grano aumento 1x.	32
Imagen 8. Propiedades microscópicas. Vista perpendicular al grano aumento 1x.	32
Imagen 9. Deformímetro triaxial a 45°.	36
Imagen 10. Factores de longitud efectiva en columnas ideales. Adaptado de: (Gere & Goodno, 2016), Mecánica de Materiales.	46
Imagen 11. trozas de MAMW.	54
Imagen 12. Máquina sin fin de trabajo industrial para deshile de MAMW.	54
Imagen 13. Castillo de madera genérico.	55
Imagen 14. Vista exterior de la cámara de secado.	55
Imagen 15. Sierra radial convencional.	56
Imagen 16. Máquina Canteadora	56
Imagen 17. Cepilladora de banco	56
Imagen 18. MAMW para fabricación de probetas para determinación de propiedades fisicomecánicas.	56
Imagen 19. MAMW cortada, canteada y cepillada.	58
Imagen 20. Castillos de madera clasificados por dimensiones para ensamble de elementos de MLAMW.	58
Imagen 21. Piezas de MAMW sobre mesa giratoria.	59
Imagen 22. Mini fresadora de espigas SFSH 009R BACKOUT.	59
Imagen 23. Vista frontal de madera despues del proceso de fresado en la línea de <i>finger joint</i>	60
Imagen 24. Vista lateral de madera despues del proceso de fresado en la línea de <i>finger joint</i>	60
Imagen 25. Encolado con PVA de piezas de MAMW fresadas.	60

Imagen 26. Cierre de finger joint con maquina de lineas de empalme LSB 005 BACKOUT.	60
Imagen 27. Prensado longitudinal y transversal para cierre de finger joint.	61
Imagen 28. Tiras de MAMW fresadas, pegadas y prensadas de 6 m de longitud.	61
Imagen 29. Banco de prensado de MLAMW.	62
Imagen 30. Medición de temperatura de MLAMW.	62
Imagen 31. Vigas largas de MLAMW en planta de Chinauta Cundinamarca.	62
Imagen 32. Vigas largas de MLAMW en patio de laboratorio del I.E.I.	62
Imagen 33. Localización de falla en vigas largas de MLAMW e identificación de tramos para fabricación de vigas cortas de MLAMW y probetas para compresión de MLAMW ..	64
Imagen 34. Lote de MLAMW obtenida después del primer corte de los tercios centrales	65
Imagen 35. MLAMW obtenida después del segundo corte de imperfecciones remanentes para fabricación de vigas cortas y columnas cortas de MLAMW	65
Imagen 36. Grupo de laminados para corte de probetas a compresión de MLAMW	66
Imagen 37. probetas a compresión de MLAMW.....	66
Imagen 38. Medición de peso para determinación del contenido de humedad $W\%$ por el Método B de NTC 206-2	69
Imagen 39. Secado en horno para determinación del contenido de humedad $W\%$ por el Método B de NTC 206-2.	70
Imagen 40. Higrómetro digital	70
Imagen 41. Medición del contenido de humedad $W\%$ con higrómetro digital sobre probeta MLAMW G6T3-10	71
Imagen 42. Montaje de probeta NTC 784-4 en la máquina universal para ensayo de resistencia a la compresión axial o paralela al grano.	75
Imagen 43. Deflectómetro digital.....	77
Imagen 44. Determinación de la resistencia al cizallamiento paralelo al grano σ_{cz} de la MAMW. Equipamiento en laboratorio.....	81
Imagen 45. Ensayo de tracción perpendicular al grano. Procedimiento en laboratorio....	83
Imagen 46. Equipamiento e instrumentación en laboratorio para ensayos de flexión de 4 puntos con MAMW y MLAMW con $L \leq 2.0$ m.	86
Imagen 47. Equipo indicador de deformación tipo INSTRUMENTS DIVISION P-3500 ...	86
Imagen 48. equipo indicador de deformación tipo Micro-Measurements P3 Strain indicator and measurement	86
Imagen 49. Equipamiento e instrumentación en laboratorio para ensayos de flexión de 4 puntos con MLAMW con $L > 2.0$ m.	89
Imagen 50. Determinación del esfuerzo máximo cortante τ_{max} en vigas cortas de MLAMW Equipamiento en laboratorio.	95
Imagen 51. Probeta para cálculo de módulo de elasticidad en compresión paralela a la fibra de la MLAMW. Probeta ensayada.....	97
Imagen 52. Montaje de probeta NTC-784-M-7 en la máquina universal para ensayo de resistencia a la compresión axial o paralela al grano $\sigma_c // \text{max. lam}$ y módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_c // \text{lam}$. (a) Ejecución de ensayo sobre probeta NTC-784-M-7, (b) Detalle de instrumentación con extensómetro digital.	99
Imagen 53. Probetas a compresión. Grupo G5 y Grupo G4.	101

Imagen 54. Ensayo de compresión de la probeta G5T3-2.....	103
Imagen 55. Ensayo de compresión de la probeta G5T3-9.....	103

Listado de símbolos

Símbolo	Término	Unidad
A	Área de sección transversal	m^2
c	Distancia medida desde el eje neutro hasta la fibra	m
DB	Densidad básica	g/cm^3
E	Módulo de elasticidad	MPa
E_{ap}	Módulo de elasticidad aparente a flexión	MPa
E_{mg}	Módulo de elasticidad global a flexión	MPa
$E_{c//}$	Módulo de elasticidad a compresión axial o paralela al grano de la MAMW	daN/cm^2
$E_{c//lam}$	Módulo de elasticidad a compresión axial o paralela al grano de la MLAMW	daN/cm^2
I	Inercia	mm^4
K	Factor de longitud efectiva para columnas	-
L	Longitud	m
G	Módulo de elasticidad a cortante de la MLAMW	MPa
M	Momento	$kN \cdot m$
MAMW	Madera de <i>Acacia mangium</i> Willd	-
MLAMW	Madera laminada de <i>Acacia mangium</i> Willd	-
MOE	Módulo de elasticidad global en flexión	MPa
MOR	Módulo de rotura	MPa
MUF	Melamina urea formaldehído	

Símbolo	Término	Unidad
P_{max}	Carga máxima resistida por la probeta	daN
P_1	Carga resistida por la probeta en el límite proporcional	N
pa	Peso anhidro	g
P_{cr}	Carga crítica de pandeo	kN
PE	Peso específico aparente	$\frac{g}{cm^3}$
peb	Peso específico aparente básico	$\frac{g}{cm^3}$
$*peb$	Peso específico aparente básico modificado	$\frac{g}{cm^3}$
$PE_{CH=0}$	Peso específico en estado anhidro	$\frac{g}{cm^3}$
$PE_{CH=12\%}$	Peso específico de probeta seca en ambiente climatizado	$\frac{g}{cm^3}$
PSF	Punto de saturación de las fibras	%
PUR	Adhesivo de poliuretano	-
PVA	Acetato de polivinilo	-
r	Radio de giro	m
RT	Esfuerzo unitario máximo a la tracción perpendicular al grano	$\frac{N}{cm^2}$
S	Área de la sección transversal de la probeta	cm^2
$V_{CH=12\%}$	Volumen de probetas tratadas en ambiente climatizado	cm^3
VV	Volumen de madera en estado verde	cm^3
$W\%$	Contenido de humedad	%
δ_{max}	Deflexión máxima	cm
ε	Deformación unitaria longitudinal	%
λ	Relación de esbeltez	-
σ_c	Esfuerzo normal en compresión	MPa
σ_{cr}	Esfuerzo crítico	MPa
σ_{cz}	Resistencia al cizallamiento paralelo al grano	$\frac{kg}{cm^2}$
σ_{czad}	Resistencia al cizallamiento aportada por el adhesivo	$\frac{kg}{cm^2}$
$\sigma_{c//\lim. prop.}$	Resistencia en el límite proporcional por compresión axial	$\frac{daN}{cm^2}$
$\sigma_{c//max}$	Resistencia máxima a la rotura por compresión axial	$\frac{daN}{cm^2}$
$\sigma_{c//max.lam}$	Resistencia máxima a la rotura por compresión axial en laminados.	$\frac{daN}{cm^2}$

Símbolo	Término	Unidad
$\sigma_{c\perp}$	Resistencia a la compresión perpendicular al grano en el límite de proporcionalidad	daN/cm ²
$\sigma_{c\perp 1\%}$	Resistencia a la compresión perpendicular al grano para una deformación del 1% del espesor de la probeta	daN/cm ²
τ	Esfuerzo cortante	MPa

Agradecimientos

A La Universidad Nacional de Colombia, que en sus estamentos he encontrado personas valiosas que han aportado positivamente a mi desarrollo personal y profesional.

A la Ingeniera Caori Patricia Takeuchi, quien me brindó su apoyo y orientación durante mis estudios de posgrado.

Al Laboratorio de Estructuras del Instituto de Extensión e Investigación I.E.I. y a su personal, quienes acompañaron el desarrollo de los ensayos durante el proceso de investigación.

Al señor IVÁN ESTRADA y la empresa INVERSIONES ESTRADA GUTIÉRREZ S. en C., quienes aportaron la madera *Acacia mangium* Willd y el transporte de los materiales para el desarrollo del presente Trabajo Final de Maestría.

Resumen

Comportamiento a flexión y compresión de laminados de madera de *Acacia mangium* Willd.

El comportamiento a flexión y a compresión de elementos de madera laminada de *Acacia mangium* Willd, MLAMW, está determinado por factores como las dimensiones de los laminados, las propiedades del material, los procesos de ensamble de los elementos y las sollicitaciones de carga, entre otros.

Se realizaron ensayos de flexión de cuatro puntos para cinco grupos de vigas largas de MLAMW con variaciones en longitud y sección transversal rectangular, manteniendo una relación longitud (L) a altura(h), L/h, de 20.

Se realizaron ensayos de flexión de tres puntos con cinco grupos de vigas cortas (L/h de 4) de la MLAMW, con el fin de estimar el esfuerzo máximo de corte.

Los ensayos de compresión se realizaron con tres grupos de columnas, y por grupo, seis relaciones de esbeltez diferentes para determinar valores experimentales del esfuerzo axial máximo.

Para la MLAMW se encontró que el módulo de elasticidad longitudinal MOE es de 9028 MPa, el módulo de elasticidad en cortante G es igual a 532 MPa, la resistencia al cortante paralela al grano σ_{czad} de probetas de MLAMW en la línea de pegado con adhesivo MUF es de 4.45 MPa y el módulo de compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ de la MLAMW es de 14281 MPa

Palabras clave: Flexión, Compresión, Esfuerzo, Deformación unitaria. Madera Laminada *Acacia mangium* Willd

Abstract

Flexural and Compressive Behavior of *Acacia mangium* Willd Lumber Laminates.

The behavior of *Acacia mangium* Willd Lumber Laminates (In Spanish Madera Laminada de *Acacia mangium* Willd MLAMW) under flexion and compression loads is determined by factors such as the dimensions of the laminates, material properties, assembly processes, and load solicitations, among others.

Four-point bending tests were conducted with five groups of prismatic MLAMW large beams with variations in length and rectangular cross-sectional area, while maintaining a constant length height ratio of 20.

Three-point bending tests were carried out with five groups short laminates beam of length height ratio of 4 to estimate the maximum shear stress.

Compression tests were performed with three groups of columns, each group with six different slenderness ratios to determine experimental values of the maximum axial stress.

It was found that the MOE of the MLAMW was 9028 MPa, the shear modulus G was equal to 532 MPa, the bond layer shear resistance was 4.45 MPa and the parallel-to-grain compression modulus $E_{c//lam}$ was 14281 MPa.

Keywords: Bending, Compression, Stress, Strain, Laminates of *Acacia mangium* Willd

1 Introducción

La madera es un material de origen natural que se utiliza frecuentemente en el diseño y la construcción de edificaciones, por tal motivo, se debe garantizar la seguridad de las estructuras diseñadas y construidas con este material, dando cumplimiento a los requisitos de estabilidad y seguridad mínimos exigidos a estructuras diseñadas y construidas con este tipo de materiales (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010).

Los procedimientos de caracterización de las propiedades mecánicas de la madera en Colombia se desarrollaron principalmente con base en la adaptación de normativas extranjeras que sirven como punto de referencia para la estandarización de los procedimientos de caracterización de maderas, como en el caso de las normas UNE de Europa y ASTM de Estados Unidos, entre otras.

A partir de la creación de la Ley 400 de 1997 y del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-98 y con el apoyo de las Normas Técnicas Colombianas NTC, se clasifican las maderas de origen nacional para uso estructural.

El Título G de la NSR-10 cuenta con un listado de maderas clasificadas para uso estructural, no obstante, la madera de la especie *Acacia mangium* Willd aún no está incluida entre los Grupos Estructurales del Apéndice G-B del Título G- ESTRUCTURAS DE MADERA Y ESTRUCTURAS DE GUADUA de la NSR-10, por lo tanto, para diseñar y construir estructuras con madera de *Acacia mangium* Willd se deben analizar sus propiedades mecánicas de acuerdo con la metodología descrita en el Apéndice G-A del título G de la NSR-10 (AIS, 2010).

Debido a la localización geográfica de Colombia dentro de la subregión andina suramericana, el país cuenta con regiones de bosques tropicales y subtropicales dentro de su territorio nacional, por lo cual las especies maderables nacionales pertenecen en su mayoría a especies de madera tropical latifoliada.

Existen diferencias importantes entre las especies de coníferas y latifoliadas desde el punto de vista de la constitución anatómica, las cuales se evidencian en sus propiedades físicas y comportamiento mecánico (PDADT-REFORD, 1982).

Los elementos conformados con madera laminada y encolada conocidos en inglés como *glulam*, son miembros estructurales que son ensamblados mediante la unión de lamelas de madera con adhesivos, la dirección del grano de las lamelas está orientada paralelamente con la longitud del miembro, permitiendo la fabricación de elementos estructurales con dimensiones específicas en función de las cargas, de la sección transversal y del alineamiento longitudinal (APA, 2017).

Similar a las *glulam beams*, existen elementos laminados de madera conocidos como *Cross laminated timber* o CLT por sus siglas en inglés, usualmente son conformados con lamelas y tableros de madera pegados mediante la aplicación de adhesivos poliméricos y empalmadas cara a cara para la conformación de los elementos (Mohd Yusof et al., 2019).

Los adhesivos empleados para la elaboración de CLT se pueden clasificar en termoplásticos (EPI) y termoestables entre los cuales se encuentran el PRF (fenol resorcinol formaldehído), MUF (melamina urea formaldehído) y el PUR (Adhesivo de poliuretano) (Yela et al., 2013).

1.1 Justificación

La construcción de estructuras de madera en Colombia en algunos casos se realiza de manera informal sin cumplimiento de los requisitos mínimos exigidos por la normatividad vigente.

Es de interés dentro del campo del diseño y la construcción de estructuras en madera conocer el comportamiento a flexión y compresión de elementos de sección rectangular de madera laminada de *Acacia mangium* Willd, en adelante MLAMW, debido a que ya se están fabricando y utilizado en muros, escaleras, cubiertas y entrepisos.

El diseño y la construcción de estructuras con madera de *Acacia mangium* Willd, en adelante MAMW, en Colombia están limitados por factores como: desconocimiento de las

propiedades mecánicas de la especie cultivada en Colombia, procesos ineficientes para la fabricación de miembros estructurales, procesos constructivos poco eficientes y configuración estructural inadecuada, entre otros.

Autores como López Yela F, Polanco Tapia C y Bermúdez Escovar J, han mostrado que la MAMW tiene propiedades mecánicas de magnitud comparables con otras especies en términos de su resistencia a flexión, densidad, esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad (López Yela et al., 2013), lo cual acompañado de un dimensionamiento adecuado de los elementos estructurales laminados y la estimación precisa de esfuerzos aplicados, podría convertir a la madera laminada de la especie *Acacia mangium* Willd como un material de buena calidad para uso en la construcción de estructuras en Colombia.

La fabricación de miembros estructurales con madera laminada permite la obtención de materiales con dimensiones específicas, que, en la madera maciza, usualmente están limitadas debido a las características del tamaño natural de las piezas obtenidas de cada especie, también se eliminan algunas imperfecciones de la madera que pueden generar zonas de falla por concentración de esfuerzos.

La MAMW puede presentar defectos usuales como la presencia de nudos y la descomposición de la médula, por tal motivo, la configuración de elementos estructurales con madera laminada permite eliminar las zonas de baja resistencia en el material, por medio de cortes en las zonas afectadas y la unión de los materiales mediante el uso de adhesivos especializados para conformar miembros estructurales con mayores resistencias debido a la eliminación de las zonas de concentración de esfuerzos ocasionadas por las imperfecciones naturales del material (Arbeláez Alzate & Gómez Chica, 2011).

La *Acacia mangium* Willd es una especie que aún no se encuentra clasificada para uso estructural por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, por tal motivo, y considerando, además, las ventajas de la madera laminada, es de interés estudiar el comportamiento a flexión y a compresión de laminados de *Acacia mangium* Willd en términos de sus propiedades mecánicas con relación a sus dimensiones y configuración de miembros estructurales.

El cultivo de la especie *Acacia mangium* Willd tiene ventajas con respecto a otras especies cultivadas con el fin de obtención de materiales de construcción, debido al

aprovechamiento de los residuos generados de la práctica del cultivo y de la mejora de las propiedades del suelo en donde se cultiva (Reyes M. et al., 2018).

En la actualidad existe la tendencia hacia las prácticas de construcción sustentable y la utilización de la madera como material renovable que se caracteriza por su baja huella de carbono, bajo peso y rápida construcción (Shahnewaz et al., 2019).

Aunque el uso estructural de elementos tipo vigas de MAMW puede llegar a ser inviable bajo determinadas configuraciones de los elementos (Arbeláez Alzate & Gómez Chica, 2011), el uso estructural de los laminados de Acacia, MLAMW, para vigas y columnas en edificaciones es factible, con base en la determinación de sus propiedades mecánicas, el proceso constructivo de los laminados, el diseño estructural de los elementos estructurales y las cargas de servicio a las que puede estar sometida una estructura de ocupación normal durante su vida útil.

La determinación de la resistencia a flexión sobre vigas de MLAMW encoladas con diferentes tipos de adhesivos han reportado resultados considerados de buen comportamiento mecánico referentes a resistencia máxima, carga en el límite de proporcionalidad y módulo de elasticidad (López Yela et al., 2013).

La resistencia al pandeo es usualmente un factor crítico para el diseño de columnas (Nugroho & Bahtiar, 2021), por tal motivo, también se considera el comportamiento a compresión dentro del alcance de la presente investigación dada su pertinencia para el análisis de estructuras con sistemas estructurales conformados por pórticos de madera con diagonales de acuerdo con la tabla A.3-1 del Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente NSR-10.

Por los motivos anteriores, se estudió el comportamiento a flexión y compresión de elementos elaborados con MLAMW. Es importante resaltar que la madera MAMW que se utilizó en la investigación es proveniente de procesos de reforestación, por tanto, con un aprovechamiento de menor impacto ambiental.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Obtener parámetros mecánicos para madera laminada de *Acacia mangium* Willd (MLAMW) solicitada a flexión y compresión.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar propiedades físico-mecánicas de la madera de *Acacia mangium* Willd (MAMW) utilizada en la fabricación de los laminados.
- Determinar la variación del módulo de elasticidad (**MOE**), el módulo de rotura (**MOR**) y el módulo de corte (**G**) en vigas largas de madera laminada de *Acacia mangium* Willd para cinco longitudes diferentes con relación $L/h = 20 \pm 0.5$.
- Determinar el esfuerzo máximo de corte en vigas cortas para cinco longitudes diferentes con relación $L/h = 4 \pm 0.5$.
- Determinar el módulo de elasticidad en compresión paralelo a la fibra para laminados de *Acacia mangium* Willd.
- Determinar valores experimentales del esfuerzo axial máximo para tres grupos de columnas con respecto a seis relaciones de esbeltez diferentes.

1.3 Alcance

La investigación comprende el estudio del comportamiento a flexión y a compresión de elementos de MLAMW con base en resultados de pruebas de laboratorio.

2 Marco teórico

2.1 Especie *Acacia mangium* Willd

La especie *Acacia mangium* Willd o también conocida como mangium (Krisnawati et al., 2011) es nativa de algunas partes de Indonesia, Papua Nueva Guinea y Australia (Koutika & Richardson, 2019), es una de las especies de crecimiento rápido más usadas en Asia y en el Pacífico (Krisnawati et al., 2011) con fines de uso en agricultura, silvicultura, agrosilvicultura o agroforestería para mejorar la fertilidad de los suelos Australia (Koutika & Richardson, 2019).

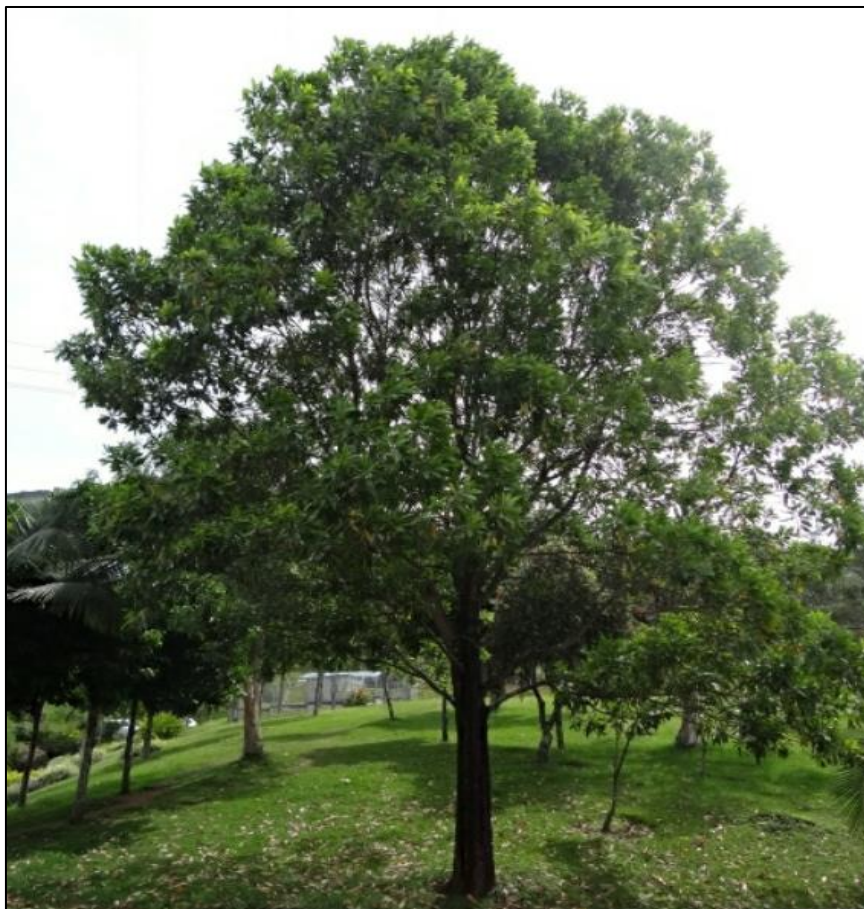


Imagen 1. Árbol de *Acacia mangium* Willd.

Adaptada de: (Arroyave et al., 2014), <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/216>



Imagen 2. Hoja de *Acacia mangium* Willd.
Adaptada de: (Arroyave et al., 2014),
<https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/216>



Imagen 3. Corteza del árbol de *Acacia mangium* Willd.
Adaptada de: (Arroyave et al., 2014),
<https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/216>



Imagen 4. Flor de la *Acacia mangium* Willd.
Adaptada de: (Arroyave et al., 2014),
<https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/216>



Imagen 5. Fruto de la *Acacia mangium* Willd.
Adaptada de: (Arroyave et al., 2014),
<https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/216>

El árbol de la *Acacia mangium* Willd pertenece a la familia Fabaceae, puede llegar a crecer hasta una altura máxima entre 20 m y 30 m (ver Imagen 1), su tronco puede llegar a medir entre 60 cm y 90 cm de diámetro sus hojas poseen persistencia perenne (Imagen 2), su inflorescencia se caracteriza por presentar abundantes flores pequeñas de color blanquecino en forma de espigas (ver Imagen 4), su fruto se conforma por vainas duras secas cuyo color varía entre café y verde, contiene semillas ovaladas dispuestas longitudinalmente en las vainas (ver Imagen 5). El árbol de *Acacia mangium* Willd puede llegar a vivir hasta 35 años. (Arroyave et al., 2014).



Imagen 6. Estructura anatómica de sección transversal tronco de *Acacia mangium* Willd.
Adaptado de (Arbocenter, 2022), <https://www.sementesarbocenter.com.br/sementes-de-acacia-mangium.html>

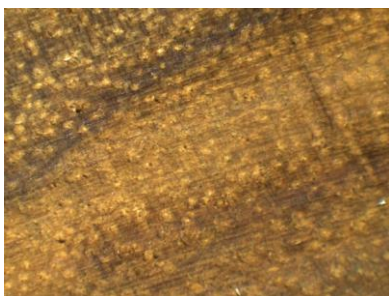


Imagen 7. Propiedades microscópicas. Vista paralela al grano aumento 1x

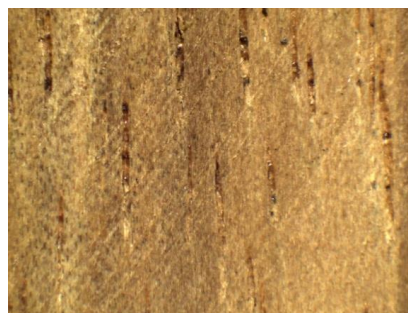


Imagen 8. Propiedades microscópicas. Vista perpendicular al grano aumento 1x

Las características macroscópicas de la MAMW (CAR Cundinamarca, 2014) muestran albura de color amarillo crema, duramen de color café, orientación del grano entre ondulado y recto; además, se pueden observar sus anillos de crecimiento y parénquima a simple vista. (Ver Imagen 6). Dentro de la estructura macroscópica de la madera se pueden listar los anillos de crecimiento, radios medulares y el parénquima longitudinal.

Entre las características microscópicas de la MAMW (CAR Cundinamarca, 2014) se observa que posee poros con presencia de gomas sin patrón de disposición y de forma ovalada (ver Imagen 7), presenta punteaduras intervasculares y radiovasculares areoladas (ver Imagen 8).

La especie *Acacia mangium* Willd pertenece a la familia *Leguminosae*, esta madera posee características favorables para uso estructural debido a su dureza y densidad específica que varía entre 0.50 g/cm^3 y 0.6 g/cm^3 (Yela et al., 2013).

La MAMW se puede clasificar dentro de las maderas latifoliadas, ya que presenta hojas compuestas perennes diferentes de las coníferas, y su estructura anatómica es heterogénea constituida por diferentes células leñosas (PDADT-REFORD, 1982).

La madera de la *Acacia mangium* Willd es utilizada en carpintería para la fabricación de muebles, tableros y chapas entre otras. (CAR Cundinamarca, 2014).

2.2 Orientación del grano de la madera

La madera es un material heterogéneo y anisotrópico (Feijoo Feijoo et al., 2018), razón por la cual sus propiedades mecánicas varían de acuerdo con la dirección del grano o de las fibras de la madera. Se le llama dirección del grano a la disposición o arreglo de las fibras que conforman la estructura del xilema o cuerpo leñoso de la madera.

Se pueden identificar tres direcciones principales con respecto a la orientación del grano: orientación longitudinal o paralela al grano, orientación radial o perpendicular al grano y orientación tangencial al grano (ver Figura 1). Las direcciones de corte mencionadas pueden considerarse ortogonales entre sí (PDADT-REFORD, 1982).

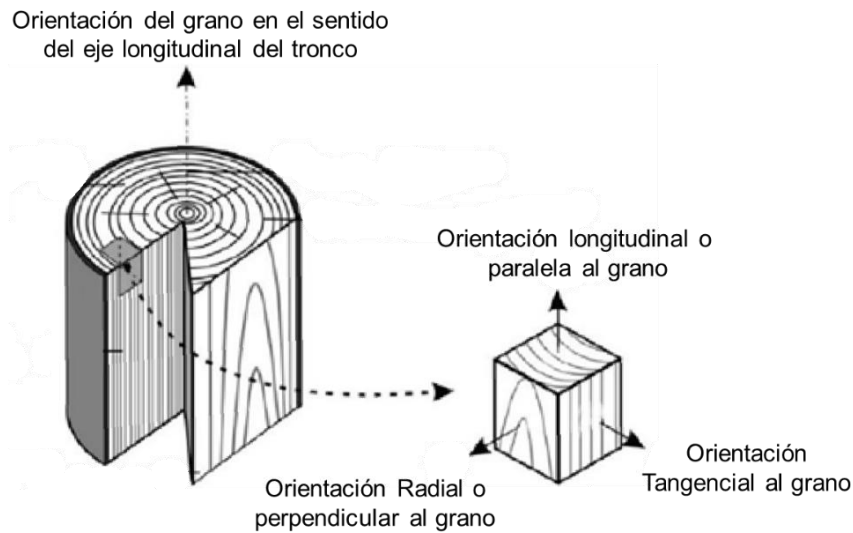


Figura 1. Orientación del grano o de las fibras de la madera.

Adaptado de: (Feijoo Feijoo et al., 2018), GUÍA PARA CORTES ANATÓMICOS DE LA MADERA.

2.3 Ley de Hooke y Módulo de elasticidad E

La ley de Hooke establece la relación lineal entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria longitudinal o normal (ver Figura 2), en el caso de una barra sometida a tracción, el esfuerzo σ se define como el producto entre una constante de proporcionalidad (módulo de elasticidad E y la deformación unitaria normal ε (Gere & Goodno, 2016).

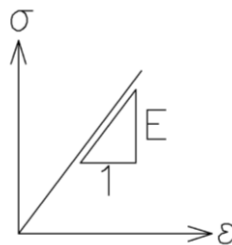


Figura 2. Relación esfuerzo normal vs. deformación longitudinal.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2.1)$$

Donde:

σ = Esfuerzo

E = Módulo de elasticidad

ε = Deformación unitaria normal

2.4 Deformación unitaria normal ε

La deformación unitaria normal ε se define como la división entre el cambio de longitud δ de una barra recta producido por una carga axial P dividido entre la longitud total inicial L_o (Figura 3) (Gere & Goodno, 2016):

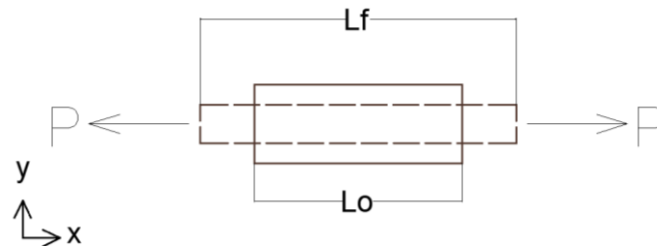


Figura 3. Barra sometida a carga axial P .

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_o} \quad (2.2)$$

Donde:

$\delta = (L_f - L_o)$ = alargamiento de la barra

ε = Deformación unitaria normal

L_o = Longitud inicial de la barra

2.5 Deformación angular en un plano

La medición de la deformación angular se puede realizar utilizando un deformímetro triaxial o roseta (ver Figura 4 e Imagen 9) y con base en la ecuación de transformación para deformación plana (2.3).

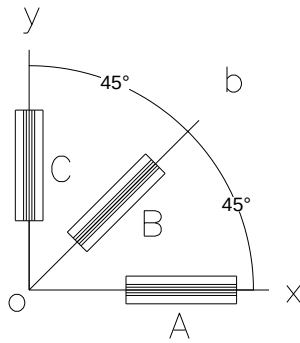


Figura 4. Esquema de deformímetro triaxial a 45°.

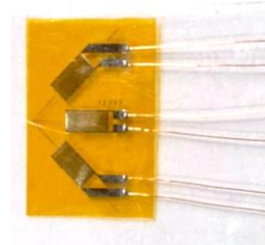


Imagen 9. Deformímetro triaxial a 45°.

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos(2\theta) + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin(2\theta) \quad (2.3)$$

Donde:

ε_x = Deformación en dirección x medida por el componente A de la roseta.

ε_y = Deformación en dirección y medida por el componente C de la roseta.

ε_b = Deformación en dirección b medida por el componente B de la roseta.

γ_{xy} = Deformación angular en el plano xy

$\theta = 45^\circ$

La deformación angular en el plano xy se puede definir en función de tres deformaciones longitudinales (Gere & Goodno, 2016)

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c \quad (2.4)$$

Donde:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_x$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_y$$

2.6 Flexión en vigas

Suponiendo una viga de sección rectangular (ver Figura 5) simplemente apoyada y sometida a cargas puntuales iguales en los tercios medios de la luz tal como se muestra en la Figura 6, y suponiendo que $6h = L/3$, se obtienen el diagrama de carga (ver Figura 7a), el diagrama de cortante (ver Figura 7b) y el diagrama de momento (ver Figura 7c):

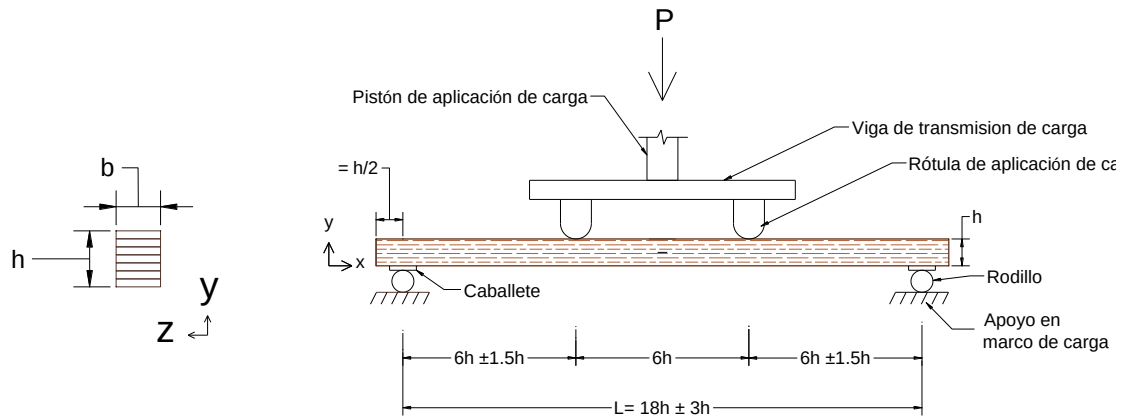


Figura 5. Sección transversal rectangular de viga.

Figura 6. Viga simplemente apoyada con dos cargas iguales en los tercios de la luz.

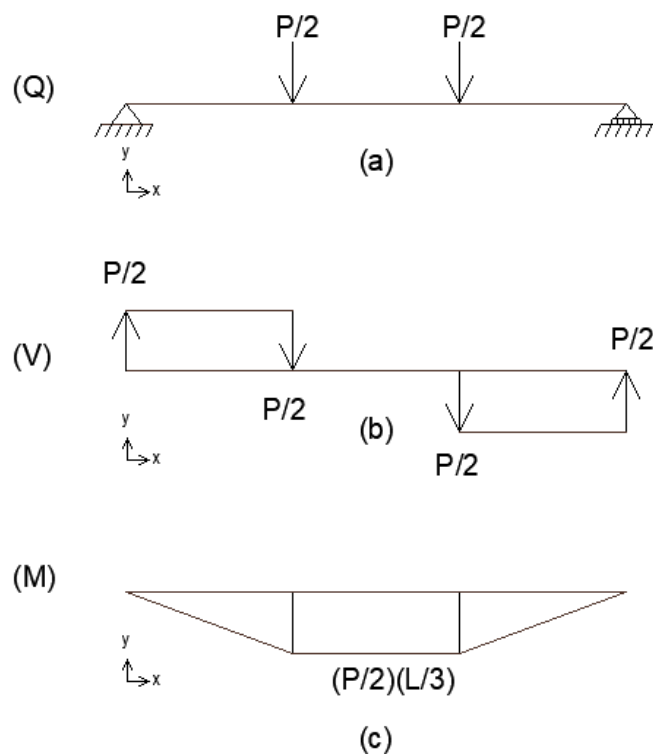


Figura 7. Diagrama de cargas y fuerzas internas: (a) Diagrama de carga, (b) Diagrama de cortante y (c) Diagrama de momento.

1.2.3 Esfuerzos normales por flexión

Suponiendo que no hay fuerza axial en la viga y que el material se encuentra en el rango elástico, el eje neutro de la viga estará localizado en el centroide de la sección transversal (ver Figura 8a).

Teniendo en cuenta la segunda ecuación de la estática (sumatoria de momentos con respecto a cualquier punto) se establece que el momento resultante de los esfuerzos normales en la sección transversal debe ser igual al momento flexionante (Gere & Goodno, 2016), ver (Figura 8b).

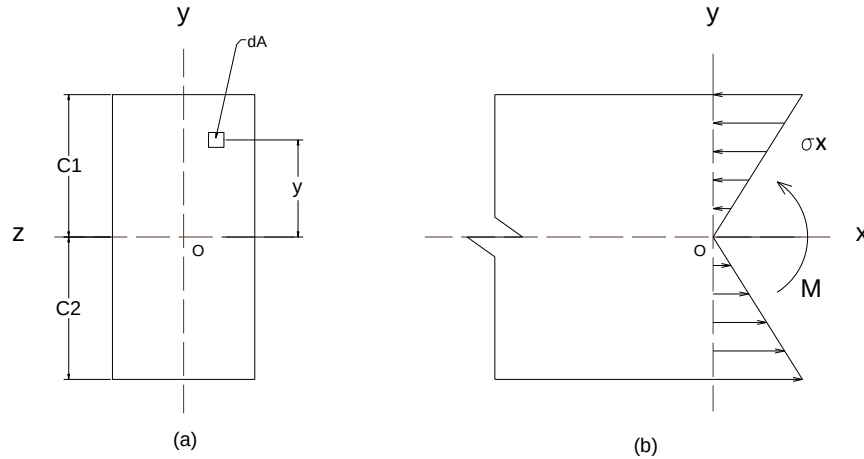


Figura 8. Esfuerzos normales en una viga: (a) Profundidad del eje neutro de una viga de sección transversal rectangular. (b) Vista lateral de la distribución de esfuerzos normales en la viga.

Por otra parte, se conoce que la relación deformación – curvatura para una viga en flexión pura (ver Figura 9) está definida por la ecuación (2.5) :

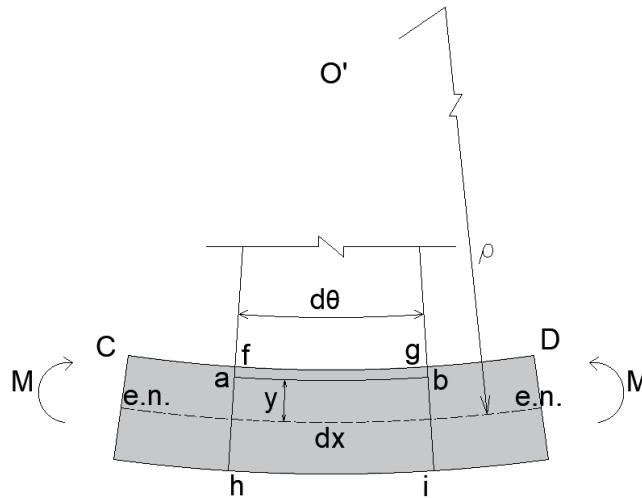


Figura 9. Deformación de viga en flexión pura.

$$\varepsilon_x = -\frac{y}{\rho} = -ky \quad (2.5)$$

La curvatura k es directamente proporcional al momento flexionante de acuerdo con la relación Momento – Curvatura que se muestra en la ecuación (2.6):

$$k = \frac{M}{EI} \quad (2.6)$$

Se pueden definir los esfuerzos por flexión con base en la ecuación (2.7), (Gere & Goodno, 2016):

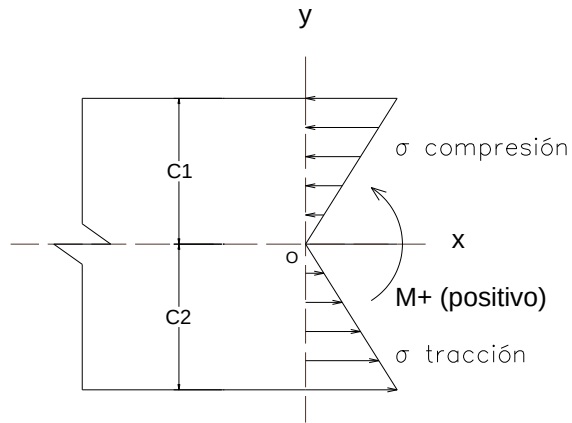


Figura 10. Relación entre dirección de momento flexionante y dirección de esfuerzos normales.

$$\sigma_f = \frac{M * c}{I} \quad (2.7)$$

Donde

σ_f = Esfuerzo por flexión

M = Momento

c = Distancia medida desde el eje neutro hasta la fibra extrema en compresión o en tracción

I = Inercia de la sección transversal.

El esfuerzo máximo por flexión se conoce también como Módulo de rotura

1.2.4 Esfuerzos cortantes por flexión

Continuando con el análisis de la viga mostrada en la Figura 6, se tiene que los esfuerzos cortantes actuantes sobre la sección transversal (ver Figura 11) son paralelos a la fuerza cortante y se encuentran distribuidos uniformemente en el ancho de la viga b y que varía a lo largo de la altura h (ver Figura 12b).

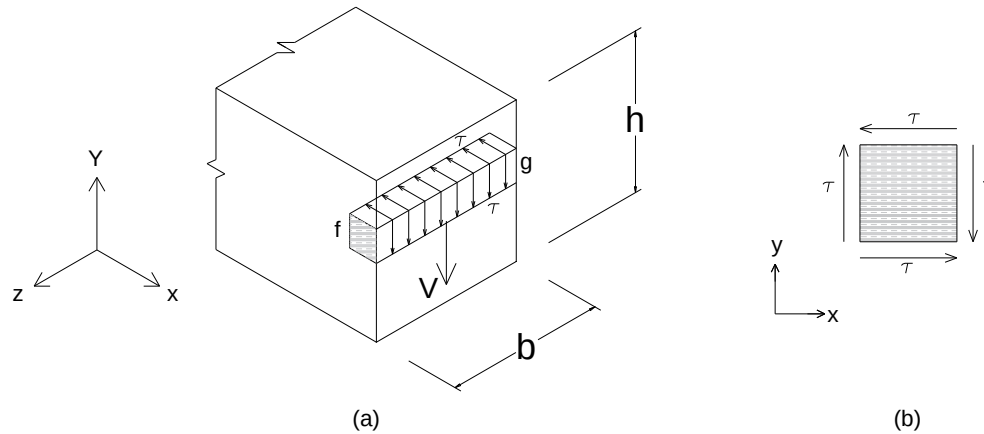


Figura 11. Esfuerzos cortantes en viga de sección transversal. (a) Esfuerzos cortantes sobre elemento fg . (b) Esfuerzos cortantes de igual magnitud en caras perpendiculares del elemento fg

Los esfuerzos cortantes por flexión se determinan con base en la ecuación (2.8), (Gere & Goodno, 2016):

$$\tau = \frac{V * Q}{I * b} \quad (2.8)$$

Donde

τ = Esfuerzo cortante por flexión.

V = Fuerza cortante

Q = Primer momento de área o momento estático.

I = Inercia

b = Base de la sección transversal

El primer momento de área o momento estático Q se define por la expresión (2.9) :

$$Q = \frac{b}{2} * \left(\frac{h^2}{4} - y_1^2 \right) \quad (2.9)$$

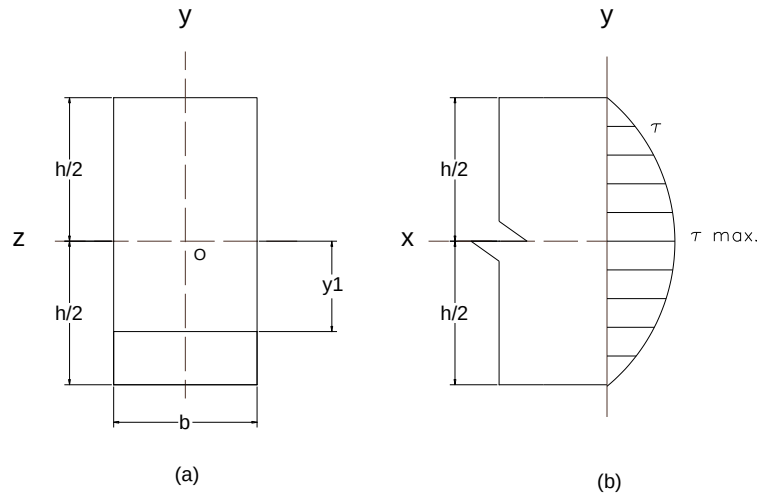


Figura 12. Distribución de esfuerzo cortante en viga de sección transversal. (a) Sección transversal rectangular. (b) Distribución parabólica de esfuerzos cortantes en altura h .

El esfuerzo cortante máximo τ_{max} localizado en $h/2$ está definido por la ecuación (2.10):

$$\tau_{max} = \frac{3 V_{max}}{2A} \quad (2.10)$$

1.2.5 Módulo de Elasticidad aparente

E_{ap} en vigas de madera sometidas a flexión

Suponiendo que se tiene la viga con las condiciones de apoyo y bajo el estado de cargas mostrada en la Figura 6, y con base en la NTC 5279 (ICONTEC, 2004), el módulo de

elasticidad aparente E_{ap} para la viga de sección rectangular de madera referenciada se define como se muestra en la expresión (2.11):

$$E_{ap} = \frac{P' a}{4bh^3 \Delta} * (3L^2 - 4a^2) \quad (2.11)$$

Donde:

P' = Carga en el límite proporcional

a = Distancia desde la reacción al punto de aplicación de carga más cercano

b = base de la sección transversal de la viga

h = altura de la sección transversal de la viga

Δ = Deflexión de la viga

L = Distancia entre apoyos

1.2.6 Módulo de Elasticidad global

E_{mg} o MOE en vigas de madera laminada sometidas a flexión

Suponiendo que se tiene la viga con las condiciones de apoyo y bajo el estado de cargas mostrada en la Figura 6, y con base en la NTC 5950 (ICONTEC, 2012), El módulo de elasticidad global E_{mg} para la viga referenciada se define como se muestra en la expresión (2.12):

$$E_{mg} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (2.12)$$

Donde:

$F_2 - F_1$ = Incremento de carga sobre la línea de regresión.

$w_2 - w_1$ = Incremento de deflexión correspondiente a $F_2 - F_1$

G = Módulo de elasticidad en cortante

a = Distancia desde la reacción al punto de aplicación de carga más cercano

b = base de la sección transversal de la viga

h = altura de la sección transversal de la viga

l = Distancia entre apoyos

La ecuación (2.12) para calcular el módulo de elasticidad global E_{mg} incluye la influencia de las deformaciones por cortante. En el desarrollo del presente trabajo, se designará el módulo de elasticidad global E_{mg} como el módulo de elasticidad **MOE** de las vigas largas de MLAMW.

2.7 Compresión

Suponiendo que se tiene una columna de longitud L sección transversal A bajo las condiciones de apoyo y de carga mostradas en la Figura 13, se definen los conceptos de esfuerzo normal en compresión, relación de esbeltez, longitud efectiva, carga crítica de pandeo y esfuerzo crítico.

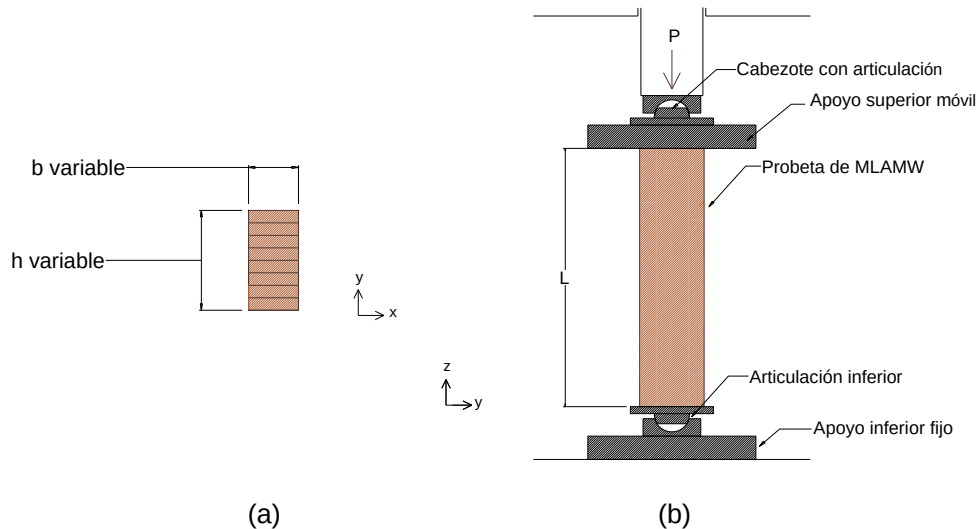


Figura 13. Esquema de columna a compresión con extremos articulados. (a) Sección transversal de columna, (b) columna de madera sometida a compresión.

1.2.7 Esfuerzo normal en compresión σ_c

El esfuerzo normal producido por la aplicación de carga axial en compresión sobre el área de la sección transversal normal al eje longitudinal de una columna se puede expresar como se muestra en la expresión (2.13):

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (2.13)$$

Donde

A = Área normal al eje de la columna

P = Carga axial en compresión perpendicular al área A .

σ_c = Esfuerzo normal en compresión.

1.2.8 Relación de esbeltez λ

La relación de esbeltez λ se define como la división entre la longitud de la columna y el radio de giro, ecuación (2.14)

$$\lambda = \frac{L}{r} \quad (2.14)$$

A su vez, el radio de giro r se define según la ecuación (2.15):

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2.15)$$

1.2.9 Longitud efectiva Le

La longitud efectiva Le de una columna es igual a la longitud de una columna equivalente con sus extremos articulados, se obtiene multiplicando la longitud de la columna original por el factor de longitud efectiva K .

K se define como una constante que depende de las condiciones de apoyo de las columnas y que multiplica a la longitud real de la columna con el fin de hacerla equivalente al caso fundamental de Euler en el cual se asume que la columna está simplemente apoyada y articulada en sus extremos.

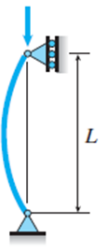
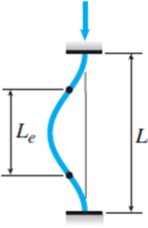
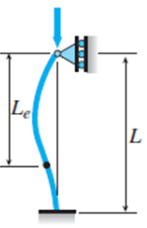
(a) Columna articulada-articulada	(b) Columna empotrada-libre	(c) Columna empotrada-empotrada	(d) Columna empotrada-articulada
			
$L_e = L$	$L_e = 2L$	$L_e = 0.5L$	$L_e = 0.699L$
$K = 1$	$K = 2$	$K = 0.5$	$K = 0.699$

Imagen 10. Factores de longitud efectiva en columnas ideales.

Adaptado de: (Gere & Goodno, 2016), Mecánica de Materiales.

1.2.10 Carga crítica de pandeo P_{cr}

La carga crítica de pandeo o carga de Euler P_{cr} para una columna con sus extremos articulados se define por la ecuación (2.16), donde $K=1$.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.16)$$

1.2.11 Esfuerzo crítico: σ_{cr}

El esfuerzo crítico σ_{cr} se calcula dividiendo la carga crítica de pandeo P_{cr} entre el área A de la sección transversal de la columna, ecuación (2.17):

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{AL^2} \quad (2.17)$$

2.8 Estadística descriptiva

La estadística descriptiva se emplea para el analizar, resumir y presentar los resultados de los ensayos de laboratorio con el objetivo de realizar inferencia estadística, análisis de

regresión lineal y análisis de varianza. Algunos de los conceptos empleados en el desarrollo del presente trabajo se describen a continuación.

1.2.12 Medidas de localización

Las medidas de localización se utilizan para determinar la posición central o de otro tipo de los datos de una muestra con valores cuantitativos, como lo son la media y la mediana.

- Media: es el promedio numérico, describe el valor sobre el cual se centra la distribución de probabilidad, ecuación (2.18) (Walpole et al., 2012).

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (2.18)$$

Donde

$\bar{x}$ = Media

x_i = Dato i

n = Número de datos

1.2.13 Medidas de variabilidad

Las medidas de variabilidad se emplean para el análisis de la dispersión o de la distribución de las observaciones con respecto a una medida de localización que usualmente es la media o promedio de los datos. Entre algunas de las medidas de variabilidad se encuentran el rango estadístico, la desviación estándar y la varianza. La distribución o dispersión de los datos también se puede representar gráficamente mediante el uso de histogramas de frecuencias y diagramas de cajas entre otros.

- Rango estadístico R

Se define como el intervalo comprendido entre un valor máximo y un valor mínimo de una muestra, ecuación (2.19) (Walpole et al., 2012).

$$R = X_{max} - X_{min} \quad (2.19)$$

- Desviación estándar muestral S

Se define como la raíz cuadrada positiva de la varianza muestral, utiliza unidades lineales, ecuación (2.20) (Walpole et al., 2012)

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.20)$$

- Diagrama de cajas

El diagrama de cajas está conformado por un cuadro en el cual se representa la mediana y su posición en el rango intercuartil de los datos presentados, el rango intercuartil comprende el percentil 25 y el percentil 75 (Walpole et al., 2012), adicionalmente, presenta los datos fuera del rango intercuartil o datos extremos. Un ejemplo de diagrama de cajas se elabora con los datos mostrados en la Figura 14 y su respectivo diagrama de cajas en la Figura 15 :

1.09	1.92	2.31	1.79	2.28	1.74	1.47	1.97
0.85	1.24	1.58	2.03	1.70	2.17	2.55	2.11
1.86	1.90	1.68	1.51	1.64	0.72	1.69	1.85
1.82	1.79	2.46	1.88	2.08	1.67	1.37	1.93
1.40	1.64	2.09	1.75	1.63	2.37	1.75	1.69

Figura 14. Ejemplo de diagrama de cajas. Datos de medición del contenido de nicotina de 40 cigarrillos.

Adaptado de: (Walpole et al., 2012), Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias

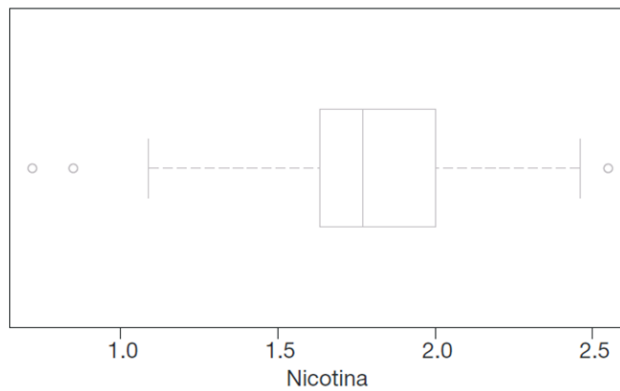


Figura 15. Ejemplo de diagrama de cajas. Diagrama de cajas para los datos de medición del contenido de nicotina de 40 cigarrillos.

Adaptado de: (Walpole et al., 2012), Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias

1.2.14 Regresión lineal simple

El modelo de regresión lineal simple está compuesto por un solo regresor x que tiene una relación lineal (ver Figura 16) con una respuesta y (Montgomery et al., 2006), la fórmula del modelo de regresión lineal simple se muestra en la ecuación (2.21).

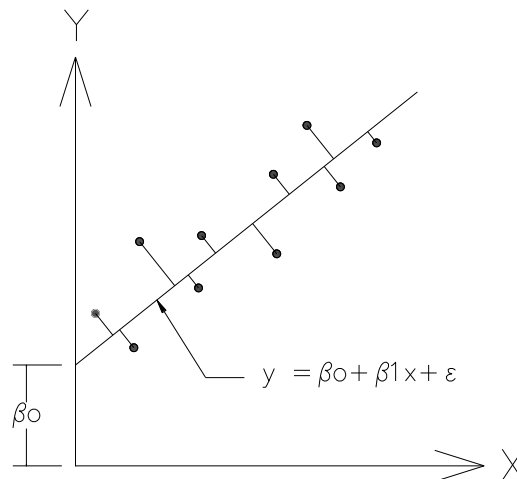


Figura 16. Recta de regresión lineal.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (2.21)$$

Donde:

β_0 = ordenada al origen o intercepto con el eje Y

β_1 = pendiente de la recta de regresión

ε = Componente de error aleatorio

La ordenada al origen se calcula con la expresión (2.22):

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (2.22)$$

La media $\bar{y}$ de la distribución de probabilidades de y para cada posible valor de x (Montgomery et al., 2006), se calcula con la ecuación (2.23) :

$$\bar{y} = \beta_0 + \beta_1 \bar{x} \quad (2.23)$$

La pendiente de la recta de regresión β_1 se calcula con la ecuación (2.24):

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)(\sum_{i=1}^n x_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \quad (2.24)$$

- Coeficiente de correlación de Pearson r

El coeficiente de correlación de Pearson r mide la fuerza de la relación lineal entre dos variables. El valor de r puede variar entre el intervalo (-1,1), en donde el signo indica la pendiente de la línea de regresión. Si $r = \pm 1$ se indica una relación lineal perfecta entre los puntos muestrales, si $r = 0$ los puntos muestrales no presentan relación lineal (Walpole et al., 2012). El coeficiente de correlación de Pearson se calcula con la ecuación (2.25):

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}} \quad (2.25)$$

Donde

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (2.26)$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.27)$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.28)-$$

3 Metodología

La determinación de algunas propiedades mecánicas de la MAMW y el comportamiento a flexión y a compresión de los elementos de MLAMW se realizó con base en procedimientos de caracterización de parámetros mecánicos para maderas normalizados y de amplio uso en el campo de la ingeniería en Colombia.

En el presente capítulo, se describe el proceso de fabricación de las probetas de MAMV y MLAMW desde la materia prima hasta la elaboración de las probetas. Posteriormente se describe los ensayos, las características de las probetas, la forma de registrar las mediciones y el procesamiento de los datos obtenidos, entre otros.

3.1 Proceso de obtención de MAMW y fabricación de probetas para caracterización de propiedades mecánicas de madera maciza

El procedimiento de obtención de la madera debe cumplir como mínimo con los requisitos contemplados en el Título 3 del Decreto 2398 de 27 de diciembre de 2019 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural en lo referente a plantaciones forestales con fines comerciales, dichos requisitos de Ley fueron gestionados por la empresa que donó el material para realizar este estudio² quienes manifestaron tener la documentación y permisos en regla previamente al inicio del proceso de obtención de las materias primas.

Para la obtención de la MAMW se desarrollaron las siguientes etapas cultivo, marcación para identificación y tala de individuos arbóreos (Garzón López, 2022), corte de trozas, transporte a planta de procesamiento, deshilado de trozas, proceso de secado, cepillado y canteado de lamelas, fresado y pegado en línea de finger joint y ensamble de laminados.

En la Figura 17 se presenta la localización de las zonas reforestadas para recuperación de suelos (Garzón López, 2022) con MAMW en cercanías al municipio de Tierralta en el departamento de Córdoba - Colombia.

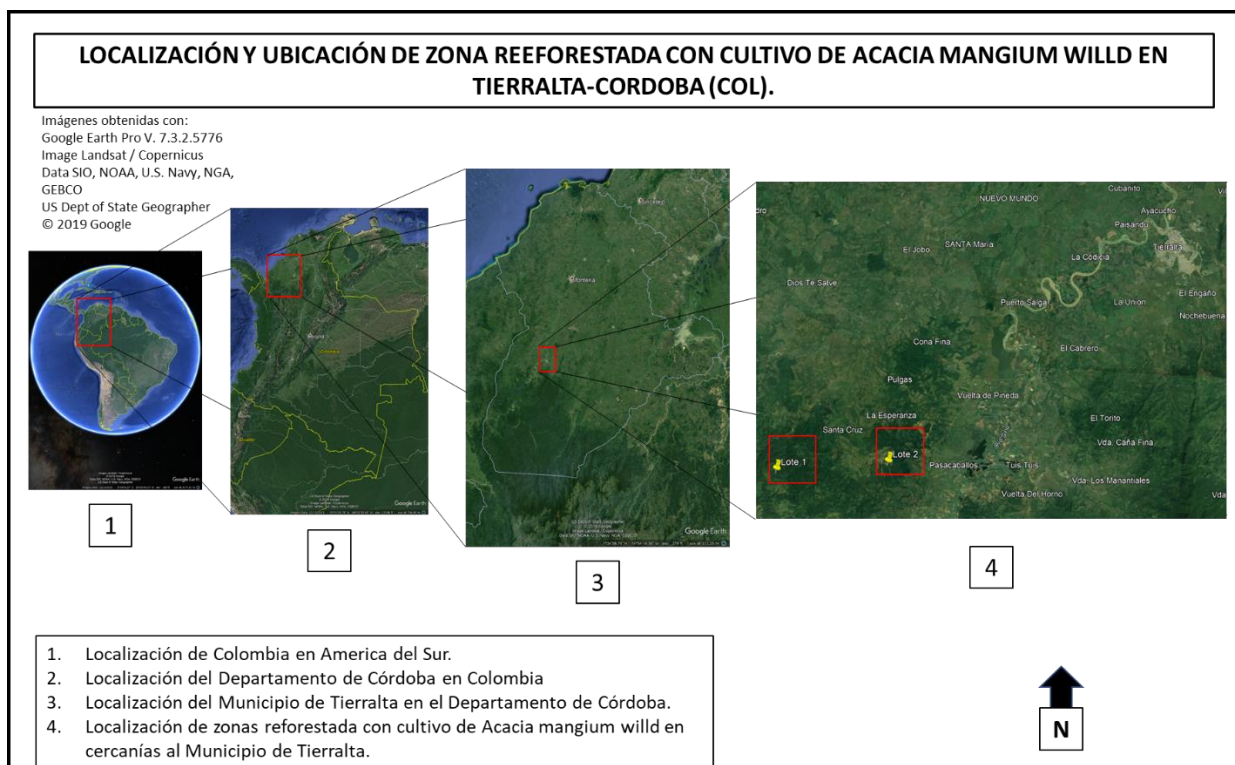


Figura 17. Localización de zonas reforestadas con la especie *Acacia mangium* Willd.

Los especímenes seleccionados de manera aleatoria se marcaron mediante una nomenclatura preestablecida para diferenciar los sujetos entre sí y verificar que cumplieran con las condiciones aceptables para el proceso de aprovechamiento (Garzón López, 2022).

Después de las etapas de selección, tala y corte de trozas (Garzón López, 2022), el material se transportó hasta la planta de procesamiento, localizada en el municipio de Chinauta, en el departamento de Cundinamarca – Colombia, allí se realizó el corte de las probetas de MAMW y el ensamble de los elementos de MLAMW.

Se recibió en la planta de procesamiento la MAMW en forma de bloques de diferentes dimensiones tanto de perfil como de largo, de acuerdo con lo mostrado en la Imagen 11.



Imagen 11. trozas de MAMW.



Imagen 12. Máquina sin fin de trabajo industrial para deshile de MAMW.

El primer corte sobre las trozas se realizó con la máquina de sierra sin fin de trabajo industrial con cinta de cinco pulgadas mostrada en la Imagen 12, con la cual se deshilaron los bloques predimensionados de acuerdo con el tamaño de las piezas a fabricar y en función del grosor y del ancho de las trozas. Normalmente para la MAMW se cortan piezas de una pulgada de ancho por cuatro pulgadas de grueso.

Posteriormente se realizó un proceso de pre selección visual con el objetivo de descartar elementos con daños o imperfecciones notorias, luego se introdujo el material a la cámara de secado para obtener un contenido de humedad lo más cercano posible a los estándares de calidad establecidos por la NTC 601 para maderas (ICONTEC, 2018).

El material se dispuso sobre estibas por grupos de 10 tablas ordenadas paralelamente entre sí y se distanciaron con un separador de dos centímetros hasta conformar castillos (ver Imagen 13) con dimensiones aproximadas de 1.20 m de alto y 25 hileras de tablas, durante el secado la madera debía permanecer dentro de la cámara por un tiempo que podía variar entre 8 y 10 días hasta alcanzar el contenido de humedad deseado.

El proceso de secado se controló utilizando una muestra testigo de MAMW instrumentada con un higrómetro para medir el cambio en el contenido de humedad, se realizaron mediciones desde el inicio del proceso de secado y seguidamente por intervalos de 36 horas hasta alcanzar el contenido de humedad deseado entre el 10% y el 12% de contenido de humedad.



Imagen 13. Castillo de madera genérico.



Imagen 14. Vista exterior de la cámara de secado.

La cámara de secado mostrada en la Imagen 14 consiste en una estructura metálica rectangular cerrada con tabiques internos paralelos a las paredes laterales del recinto, su funcionamiento se basa en la generación de un gradiente de temperatura a partir de la combustión de biomasa (leña) para calentar el exterior de elementos intercambiadores, la cámara cuenta con dos ventiladores localizados en su parte posterior e instalados en el techo y en la base del habitáculo con el fin de direccionar el flujo de aire caliente a través los espacios internos del recinto, de los tabiques y alrededor de los castillos de madera previamente dispuestos en su interior.

Durante el proceso no hubo interacción directa entre la MAMW con la leña o el fuego con el objetivo de garantizar un procedimiento limpio libre de ceniza y tizne.

Luego de obtener el contenido de humedad deseado, el material fue cortado con ayuda de una sierra radial convencional (ver Imagen 15) para obtener piezas más pequeñas, nuevamente se identificaron visualmente los segmentos de las tablas no aptos debido a la presencia de defectos y se realizó el corte correspondiente para obtener el material (ver Imagen 18) para la fabricación de las probetas para caracterización de algunas de las propiedades fisicomecánicas de la MAMW y el ensamble de los elementos de MLAMW.



Imagen 15. Sierra radial convencional.



Imagen 16. Máquina Canteadora



Imagen 17. Cepilladora de banco



Imagen 18. MAMW para fabricación de probetas para determinación de propiedades fisicomecánicas.

Obtenido el material para probetas de MAMW, se realizó el mecanizado de las probetas en la carpintería de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.

Para la obtención de propiedades fisicomecánicas de la MAMW se realizaron los ensayos presentados en la Tabla 1:

PARÁMETRO	NORMAS NTC	Cantidad de ensayos	Tipo de ensayo
Contenido de humedad	NTC 206-1 MADERAS. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD PARA ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS	1 por cada probeta ensayada	No Destructivo
Peso específico	NTC 290 MADERAS. DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO APARENTE	10	No Destructivo
Resistencia a flexión	NTC 663 MADERAS. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN	10	Destructivo
Compresión paralela al grano	NTC 784 MADERAS. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN AXIAL O PARALELA AL GRANO	10	Destructivo
Compresión perpendicular al grano	NTC 785 MADERAS. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PERPENDICULAR AL GRANO	10	Destructivo
Tracción paralela al grano	NTC 944 MADERAS. DETERMINACIÓN DE LA TRACCIÓN PARALELA AL GRANO	10	Destructivo
Cortante paralelo al grano	NTC 775 MADERAS. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO PARALELO AL GRANO	10	Destructivo
Tracción perpendicular al grano	NTC 961 MADERAS. DETERMINACIÓN DE LA TRACCION PERPENDICULAR AL GRANO	10	Destructivo

Tabla 1. Ensayos para determinación de propiedades fisicomecánicas de la MAMW.

3.2 Procedimiento de fabricación y alistamiento de vigas largas de MLAMW

Finalizado el proceso de secado de la MAMW se realizaron cortes con una sierra radial convencional, para obtener piezas con dimensiones que variaron entre los 20 cm hasta 1 m de longitud, de acuerdo con el rango de medidas de trabajo de la máquina de empalme. Las dimensiones no pueden ser inferiores a 20 cm, ni superiores a 1 m, conforme a la Figura 18:

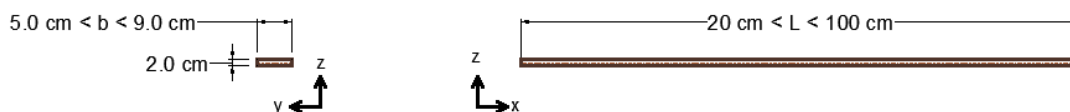


Figura 18. Dimensiones de madera para ensamble de elementos de MLAMW

En este punto, las piezas ya han pasado por un proceso de selección visual, no obstante, aún se pueden hallar piezas con daños e imperfecciones, motivo por el cual las piezas se ajustan con la máquina canteadora (ver Imagen 16) y el cepillo de banco (ver Imagen 17) para alinear un canto y posteriormente cortar el ancho.

Durante el proceso, las dimensiones iniciales de las piezas van disminuyendo debido a los cortes necesarios para obtener materiales con dimensiones constantes (ver Imagen 19).



Imagen 19. MAMW cortada, canteada y cepillada.



Imagen 20. Castillos de madera clasificados por dimensiones para ensamble de elementos de MLAMW.

Posteriormente, se agrupa la madera seleccionada de acuerdo a las medidas de ancho y espesor constante por grupos de 3 cm, 5 cm, 6 cm, 7 cm, 8 cm y 9 cm (ver Imagen 20), en función de las especificaciones de trabajo de la máquina que realiza el empate de las piezas o línea de *finger joint*.

La máquina utilizada para realizar la línea de *finger joint* se clasifica como una línea semiautomática de un solo cabezal de origen ruso, marca **БАКАУТ** o en inglés **BACKOUT**, el material se debe ingresar a la máquina con una secuencia organizada que depende de la longitud de las piezas y la alineación de las mismas, se pueden establecer etapas de trabajo con la línea de *finger joint* como etapa de fresado, encolado y cierre de junta.

Para el proceso de fresado se organizaron las maderas de longitudes entre 25 cm y 1 m sobre estibas, y se continuó acomodándolas sobre una bandeja giratoria por grupos de 25 piezas (Imagen 21). Luego se colocaron sobre la banda transportadora para realizar el corte de alineación requerido en los extremos de las piezas de madera previo al fresado.



Imagen 21. Piezas de MAMW sobre mesa giratoria.



Imagen 22. Mini fresadora de espigas SFSh 009R BACKOUT.

En el siguiente rodillo se realizó el proceso de fresado de las piezas de madera, el procedimiento se desarrolló en dos ciclos; en el primero se hizo el fresado con una mini fresadora de espigas (Imagen 22) en uno de los extremos de las maderas alineadas (Imagen 23 e Imagen 24); en el segundo ciclo, las piezas volvieron a su posición inicial, se

giran para buscar el extremo sin fresar la mesa, se alinean en el extremo opuesto, se cortan para alinear las piezas y seguidamente se adiciona el pegante o adhesivo.



Imagen 23. Vista frontal de madera después del proceso de fresado en la línea de *finger joint*.



Imagen 24. Vista lateral de madera después del proceso de fresado en la línea de *finger joint*.

Se utilizó Acetato de Polivinilo (**PVA**) (Imagen 25) para unir los extremos fresados de las piezas de madera para la conformación de lamelas de MLAMW.



Imagen 25. Encolado con PVA de piezas de MAMW fresadas.



Imagen 26. Cierre de finger joint con máquina de líneas de empalme LSB 005 BACKOUT.

Seguidamente, se alimentó otra banda transportadora donde se realizó el cierre de la junta de finger joint, se realizó un procedimiento de prensado con la máquina de línea de

empalme hasta una longitud específica con la cual se organizaron y encajaron las piezas de madera una tras otra

El prensado consiste en formar tiras de 6 m de longitud mediante la interacción entre el mecanismo de prensado de la máquina que brinda soporte lateral al elemento ensamblado y un pistón que comprime axialmente la tira de 6 m, con el objetivo de sellar las juntas empatando las tiras fresadas y encoladas (Imagen 26, Imagen 27 e Imagen 28).



Imagen 27. Prensado longitudinal y transversal para cierre de finger joint.



Imagen 28. Tiras de MAMW fresadas, pegadas y prensadas de 6 m de longitud.

Una vez terminado el proceso de empatado de lamelas se configura el material laminado, con la aplicación del adhesivo Melamina Urea formaldehído (**MUF**) el cual se aplica directamente sobre las superficies de contacto entre lamelas hasta tener el tamaño de la sección deseada, seguidamente se aplica presión sobre las caras encoladas en un banco de prensado manual por un intervalo de tiempo de 24 horas (Imagen 29 e Imagen 30).



Imagen 29. Banco de prensado de MLAMW.



Imagen 30. Medición de temperatura de MLAMW.

Al final del proceso se obtuvieron las vigas largas de MLAMW mostradas en la imagen 31 e imagen 32.



Imagen 31. Vigas largas de MLAMW en planta de Chinauta Cundinamarca.



Imagen 32. Vigas largas de MLAMW en patio de laboratorio del I.E.I.

La utilización de los adhesivos **PVA** para las conexiones de *finger joint* y **MUF** para unión de las lamelas hicieron parte de las especificaciones de producción particularmente estandarizadas por el fabricante de los laminados. La elección del tipo de adhesivo

depende de múltiples factores como la forma de aplicación y prensado, los tiempos de curado entre otros.

En la Tabla 2 se presentan las dimensiones definidas para cada grupo de vigas largas, la cantidad y la relación L/h y en la Figura 19 un esquema general de las vigas

VIGAS LARGAS - MLAMW					
Nombre Grupo	NTC-5950-F1	NTC-5950-F2	NTC-5950-F3	NTC-5950-F4	NTC-5950-F5
Cantidad	10	10	10	10	10
Base promedio (m)	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
Altura promedio (m)	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
Longitud promedio(m)	2.01	2.42	2.77	3.26	3.68
L/h	20.06	19.97	19.69	20.13	20.50

Tabla 2. Especificaciones de vigas largas de MLAMW.

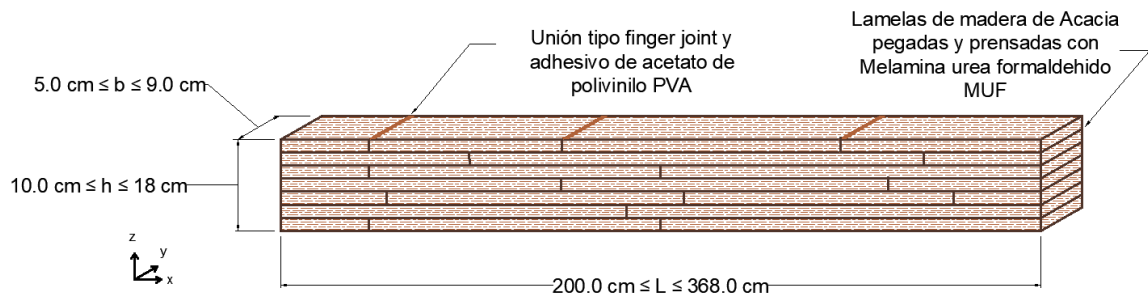


Figura 19. Esquema de variación de dimensiones de vigas largas de MLAMW.

3.3 Procedimiento de fabricación y alistamiento de vigas cortas y probetas para compresión de MLAMW

La fabricación de las vigas cortas y probetas para compresión MLAMW se realizó a partir del corte de los tercios extremos sin afectación de las vigas largas de MLAMW, bajo la hipótesis de que no existe daño en el material localizado en dichos tramos ya que en general las vigas largas fallan por flexión en el tercio medio. Adicionalmente, se verificó visualmente que las piezas de MLAMW a partir de donde se elaboraron las vigas cortas y las probetas a compresión estuvieran sanos y que la falla de las vigas largas se presentara efectivamente en el tercio central (ver Imagen 33)

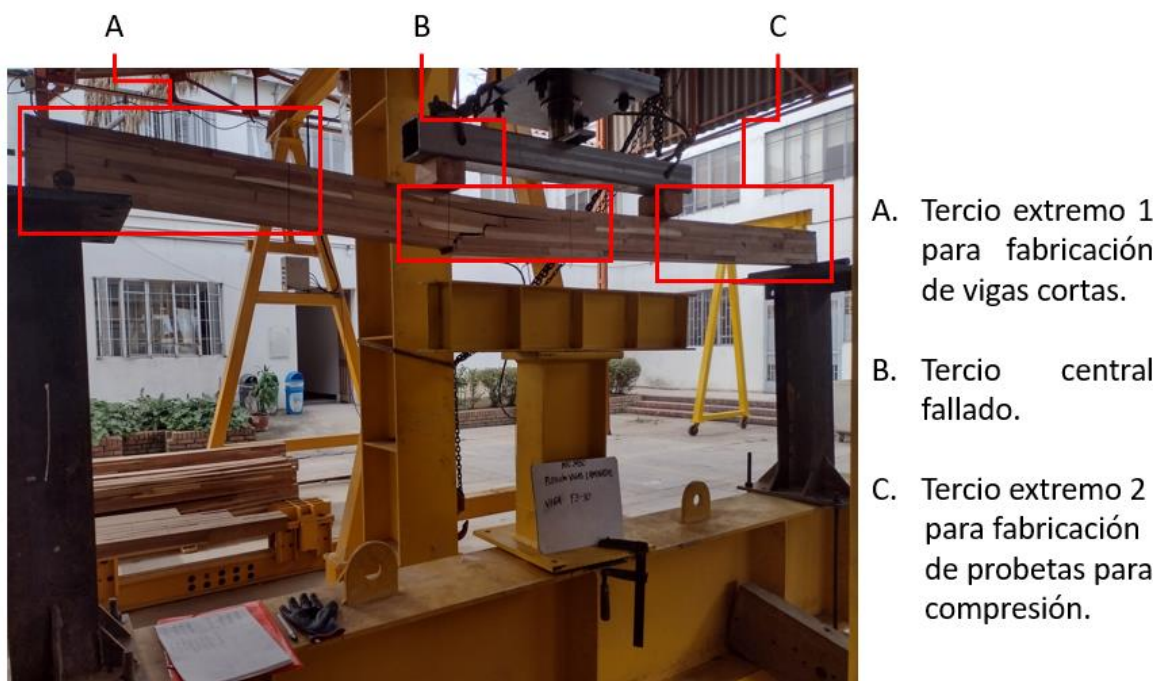


Imagen 33. Localización de falla en vigas largas de MLAMW e identificación de tramos para fabricación de vigas cortas de MLAMW y probetas para compresión de MLAMW

Después de identificar visualmente y demarcar las zonas centrales afectadas por las fallas, se realizó un primer proceso de corte para retirar los tramos afectados y poder manipular el material, seguidamente se inspeccionaron visualmente los laminados resultantes en la

zona de corte (Imagen 34) para verificar la integridad de los materiales con el objetivo de identificar posibles imperfecciones remanentes y cortar nuevamente dichas secciones en los casos necesarios, todos los cortes durante esta etapa del proceso se realizaron con una sierra radial convencional como la mostrada en la Imagen 15.

El total de materiales obtenidos (Imagen 35) se repartió por cantidades iguales para la elaboración de vigas cortas de MLAMW y de probetas a compresión de MLAMW respectivamente, el último proceso de corte se realizó para la obtención de probetas a compresión (Imagen 36 e Imagen 37) debido a las dimensiones deseadas para los ensayos.



Imagen 34. Lote de MLAMW obtenida después del primer corte de los tercios centrales



Imagen 35. MLAMW obtenida después del segundo corte de imperfecciones remanentes para fabricación de vigas cortas y columnas cortas de MLAMW



Imagen 36. Grupo de laminados para corte de probetas a compresión de MLAMW



Imagen 37. probetas a compresión de MLAMW

En total se obtuvieron 5 grupos de vigas cortas de MLAMW con una cantidad entre 10 y 16 unidades por grupo y con relaciones L/h cercanas a 4. El resumen de materiales obtenidos para vigas cortas se lista en la Tabla 3 y se muestra un esquema de las mismas en la Figura 20 :

VIGAS CORTAS - MLAMW					
Nombre Grupo	NTC-663-F1	NTC-663-F2	NTC-663-F3	NTC-663-F4	NTC-663-F5
Cantidad	16.00	16.00	16.00	15.00	10.00
Base promedio (m)	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
Altura promedio (m)	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
Longitud promedio(m)	0.40	0.48	0.56	0.64	0.72
L/h promedio	4.01	3.95	3.98	3.93	4.02

Tabla 3. Dimensiones y cantidad de vigas cortas de MLAMW

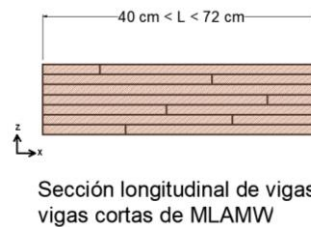
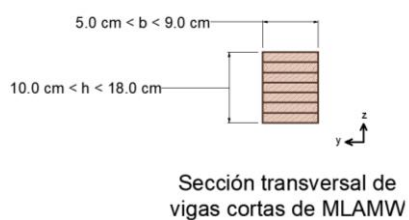


Figura 20. Esquema de variación de dimensiones de vigas cortas de MLAMW

Se obtuvieron 3 grupos de columnas pequeñas en función de las secciones transversales resultantes después de los cortes. Para cada subgrupo se variaron las longitudes de los elementos para obtener diferentes relaciones de esbeltez y poder analizar la variación de su comportamiento ante la carga axial. El listado de columnas pequeñas resultantes y sus especificaciones se listan en la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6, se muestra un esquema de las probetas para compresión en la Figura 21.

COLUMNAS CORTAS	G4							
Subgrupo	G4T1	G4T2	G4T3	G4T4	G4T5	G4T6	G4T7	G4T8
Cantidad	10	10	10	9	10	8	9	9
Base prom. (mm)	19.1	16.5	17.2	15.9	15.8	16.2	16.7	15.9
Altura prom. (mm)	78.2	78.7	78.1	78.8	78.9	78.5	78.6	78.2
Longitud prom. (mm)	639.7	478.5	318.3	238.8	157.3	88.4	75.5	65.0
Kl/r promedio	115.94	100.59	64.00	52.46	34.63	18.99	15.78	14.12

Tabla 4. Dimensiones y cantidad de columnas pequeñas de MLAMW subgrupo G4.

COLUMNAS CORTAS	G5							
Subgrupo	G5T1	G5T2	G5T3	G5T4	G5T5	G5T6	G5T7	G5T8
Cantidad	11	9	8	12	10	9	10	9
Base prom. (mm)	20.6	20.3	20.2	19.4	17.7	19.5	19.8	19.8
Altura prom. (mm)	84.7	87.3	87.1	87.1	87.3	86.8	86.9	86.6
Longitud prom. (mm)	717.3	540.1	357.0	268.4	178.2	127.2	77.1	55.4
Kl/r promedio	122.35	92.81	61.63	48.33	35.68	22.84	13.58	9.85

Tabla 5. Dimensiones y cantidad de columnas pequeñas de MLAMW subgrupo G5.

COLUMNAS CORTAS	G6					
Subgrupo	G6T1	G6T2	G6T3	G6T4	G6T5	G6T6
Cantidad	12	12	12	12	12	14
Base prom. (mm)	13.4	13.1	13.6	13.4	13.0	13.3
Altura prom. (mm)	67.1	67.4	67.3	67.4	67.2	67.4
Longitud prom. (mm)	558.6	419.2	275.9	206.5	133.3	101.3
Kl/r promedio	145.66	111.28	71.43	53.35	35.51	26.41

Tabla 6. Dimensiones y cantidad de columnas pequeñas de MLAMW subgrupo G6.

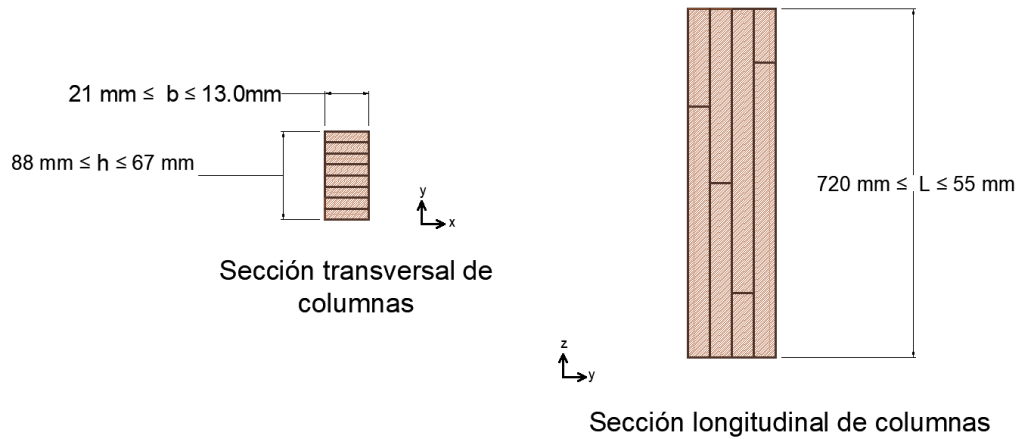


Figura 21. Esquema de variación de dimensiones de columnas pequeñas de MLAMW

3.4 Criterio de aceptación de datos

Los datos obtenidos durante el desarrollo del trabajo se aceptaron bajo la condición de que su magnitud se encontrara dentro del intervalo comprendido entre $(\bar{x} - S)$ y $(\bar{x} + S)$.

Donde:

$\bar{x}$ = Media o promedio aritmético.

S = Desviación estándar.

Después de la exclusión de datos atípicos se recalcularon los parámetros de estadística descriptiva para cada variable analizada.

3.5 Determinación del contenido de humedad $W\%$ de MLAM y MLAMW

El contenido de humedad $W\%$ de la madera es un parámetro fundamental debido a que de éste dependen factores como el punto de saturación de las fibras (**PSF**) y el contenido de humedad de equilibrio (PDADT-REFORD, 1982), por tal razón, se determinó el contenido de humedad $W\%$ para todas las probetas de cada ensayo realizado con MAMW y MLAMW.

La medición del contenido de humedad $W\%$ se realizó siguiendo dos procedimientos diferentes. El primer procedimiento se basó en el MÉTODO B de la norma NTC 206-2 MEDICIÓN DIRECTA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA MADERA Y MATERIALES A BASE DE MADERA (ICONTEC, 2018), dicho procedimiento se utilizó con las probetas de MAMW, en vigas largas de MLAMW y en vigas cortas de MLAMW.



Imagen 38. Medición de peso para determinación del contenido de humedad $W\%$ por el Método B de NTC 206-2



Imagen 39. Secado en horno para determinación del contenido de humedad $W\%$ por el Método B de NTC 206-2.

El segundo procedimiento se basó en la utilización de un higrómetro digital para medir el contenido de humedad en las columnas de MLAMW ilustrado en la Imagen 40.



Imagen 40. Higrómetro digital



Imagen 41. Medición del contenido de humedad $W\%$ con higrómetro digital sobre probeta MLAMW G6T3-10

El contenido de humedad $W\%$ con base en el MÉTODO B de la norma NTC 206-2 (ICONTEC, 2018) se determinó tomando una muestra representativa de cada material inmediatamente después de cada ensayo particular, luego se determinó la masa respectiva en la báscula digital y posteriormente cada muestra se introdujo en un horno con temperatura constante igual a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una lectura de masa constante en la báscula como se muestra en la Imagen 38. Las unidades de medición de la masa se registraron en gramos.

El contenido de humedad $W\%$ por este método se obtuvo a partir de la diferencia de la masa antes del secado m_1 y la masa después del secado m_2 , dividida entre la masa después del secado m_2 de acuerdo con la ecuación (3.1) (ICONTEC, 2018):

$$W\% = \left[\frac{(m_1 - m_2)}{m_2} \right] * 100\% \quad (3.1)$$

El contenido de humedad $W\%$ para los laminados a compresión se determinó mediante el uso de un higrómetro digital inmediatamente después de la ejecución de cada ensayo respectivo de acuerdo con lo mostrado en la Imagen 40. Para cada probeta se tomaron tres lecturas en diferentes zonas del elemento y se calculó un promedio aritmético el cual determinó el valor de $W\%$ para cada muestra y de acuerdo con la ecuación (3.2):

$$W\% = \left[\frac{(Lectura_1 + Lectura_2 + Lectura_3)}{3} \right] \quad (3.2)$$

Finalmente se realizó la comparación entre los valores promedio del contenido de humedad $W\%$ obtenidos por cada procedimiento y se establecieron las diferencias encontradas en función de los valores medios y coeficientes de variación.

3.6 Determinación del peso específico $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado

Se determinó el peso específico $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado con base en la norma NTC 290 MADERAS. DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO APARENTE (ICONTEC, 1974a) para un tamaño de muestra total de diez probetas. Las dimensiones de las probetas utilizadas en el ensayo se muestran en la Figura 22.

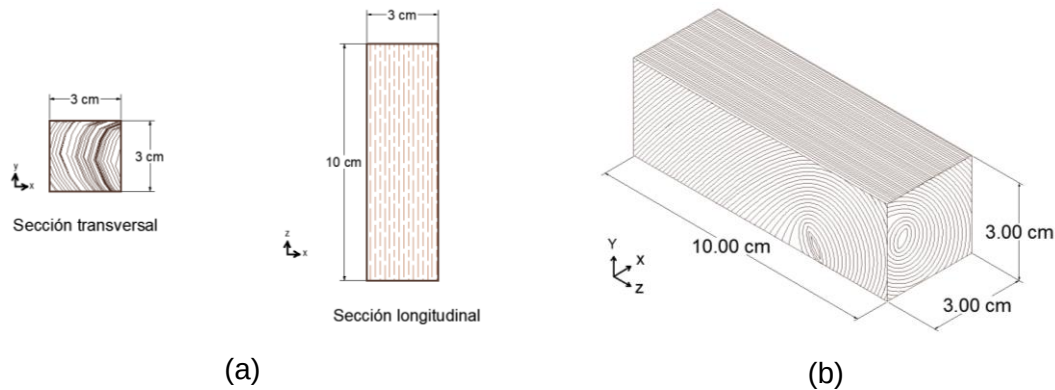


Figura 22. Dimensiones de las probetas para la determinación del peso específico aparente $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado. (a) Dimensiones de probetas, (b) Vista 3D probetas.

El peso específico $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado se determinó con la ecuación (3.3) (ICONTEC, 1974a). El peso $P_{CH=12\%}$ se determinó por medición directa en una báscula digital y el volumen $V_{CH=12\%}$ se obtuvo midiendo directamente cada arista con calibrador pie de rey para de cada probeta.

$$PE_{CH=12\%} = \frac{P_{CH=12\%}}{V_{CH=12\%}} \quad (3.3)$$

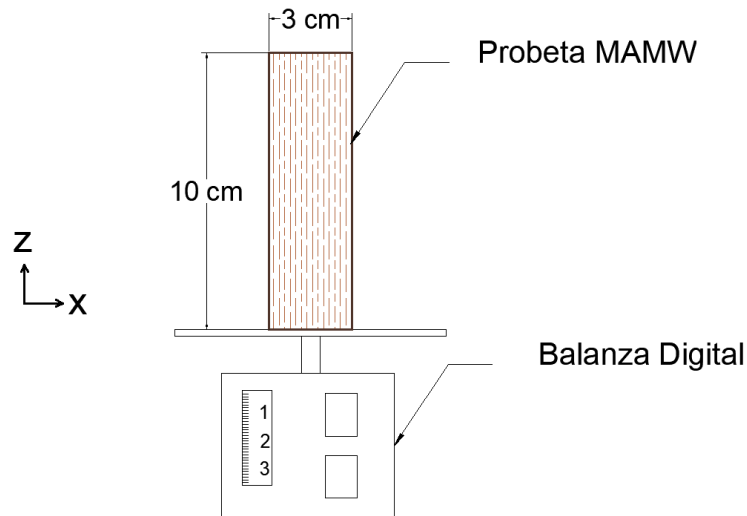


Figura 23. Esquema de procedimiento para medición de peso de probeta de MAMW.

3.7 Determinación de la resistencia a la compresión paralela al grano $\sigma_{c//max}$ de la MAMW

La determinación de la resistencia máxima a la rotura por compresión axial o paralela al grano $\sigma_{c//max}$ se realizó con base en el método establecido por la NTC 784 MADERAS. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION AXIAL O PARALELA AL GRANO (ICONTEC, 1974b). También se determinó la resistencia en el límite de proporcionalidad $\sigma_{c//lím. prop.}$.

El ensayo se realizó en 10 probetas con las dimensiones y el montaje en laboratorio mostrados en la Figura 24 y la Imagen 42 respectivamente.

Para los ensayos se utilizó una maquina universal marca Shimadzu

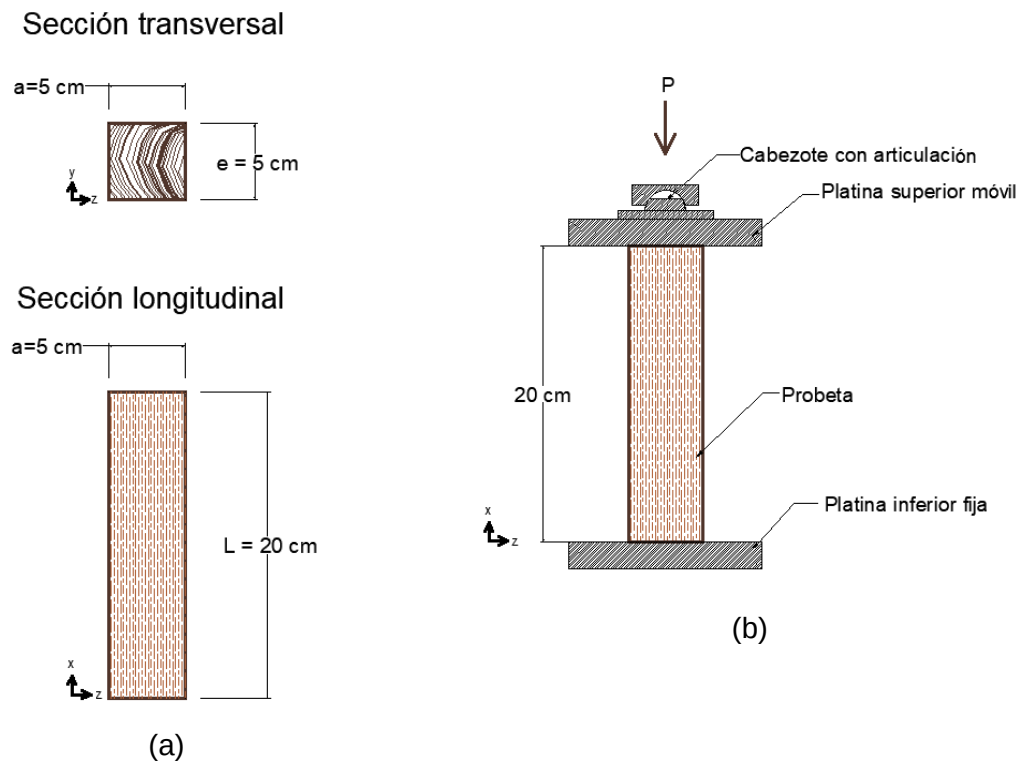


Figura 24. Determinación de la resistencia a la compresión paralela al grano. (a) Dimensiones de probetas, (b) Esquema de procedimiento en laboratorio del ensayo de rotura por compresión axial.

El procedimiento para determinar la resistencia máxima a la rotura por compresión axial $\sigma_{c//max}$ consiste en aplicar la carga a través del área de la sección transversal S de las probetas mediante la máquina universal, la carga se aplica de manera que se produzca un acortamiento axial de 0.6 mm por minuto (ICONTEC, 1974b).



Imagen 42. Montaje de probeta NTC 784-4 en la máquina universal para ensayo de resistencia a la compresión axial o paralela al grano.

Del ensayo se obtuvieron lecturas correspondientes a tiempo, carga axial aplicada y los respectivos desplazamientos del cabezal móvil de la máquina universal hasta el punto de falla, dichos datos quedaron registrados automáticamente en el equipo y fueron reportados en formato .csv.

La resistencia máxima a la compresión paralela al grano $\sigma_{c//max}$ determinada con el procedimiento descrito por la NTC 784 (ICONTEC, 1974b) se calculó con la ecuación (3.4):

$$\sigma_{c//max} = \frac{P_{max}}{S} \quad (3.4)$$

3.8 Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano $\sigma_{c\perp}$ de la MAMW

La determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano se realizó con base en la norma NTC 785 MADERAS “DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION PERPENDICULAR AL GRANO”.

El ensayo se realizó en 10 probetas con las dimensiones y el montaje en laboratorio esquematizado en la Figura 25.

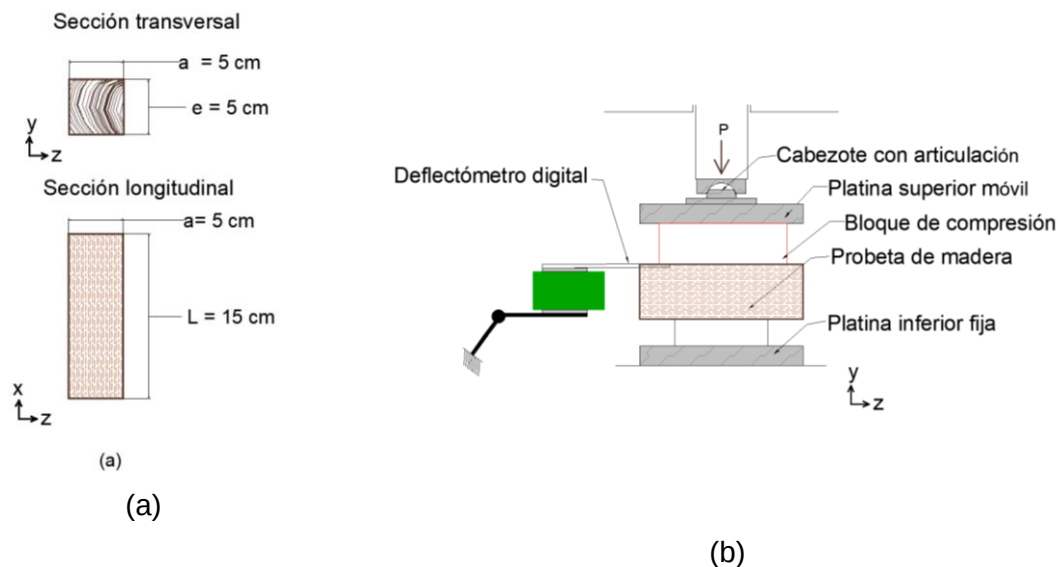


Figura 25. Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano.

(a) Dimensiones de probetas, (b) Esquema de procedimiento en laboratorio.

Para determinar la resistencia a la compresión perpendicular al grano se utilizó una probeta con las dimensiones especificadas en la NTC 785 y listadas en la Tabla 7, se dispuso la probeta sobre la platina inferior de la máquina universal marca Shimadzu y se instrumentó con un deflectómetro digital marca Epsilon, se aplicó la carga de manera perpendicular al grano utilizando un bloque de compresión que se localizó centrado sobre la probeta como se muestra en el esquema de la Figura 25.

Dimensiones de las probetas	
Cantidad	10.00
b (cm)	5.00
h (cm)	5.00
L (cm)	15.00
Velocidad (mm/min)	0.3

Tabla 7. Dimensiones de probetas y velocidad de aplicación de carga para ensayo de resistencia a la compresión perpendicular al grano.

La velocidad de aplicación de la carga fue de 0.3 mm/min hasta que se alcanzó una deformación unitaria longitudinal del 5% del ancho de la probeta. El ancho del bloque de compresión fue de 50.02 mm.

Se registraron los desplazamientos con un deflectómetro digital que se apoyó en la cara inferior del bloque (Figura 25b e Imagen 43) y los datos se registraron automáticamente con el computador del laboratorio.



Imagen 43. Deflectómetro digital.

El límite de proporcionalidad se calculó con la ecuación:

$$\sigma_{c\perp} = \frac{P_1}{S} \quad (3.5)$$

La resistencia a la compresión perpendicular al grano $\sigma_{c\perp}$ de la MAMW se calculó como la división entre la carga en el límite de proporcionalidad P_1 dividida entre el área impresa S sobre la probeta por el bloque de compresión.

El área S se calculó como el producto del ancho de la probeta a y el ancho del prisma recto a' .

$$S = a * a' \quad (3.6)$$

Se obtuvo también la resistencia para una deformación del 1% del espesor de la probeta $\sigma_{\epsilon 1\%}$ mediante la división de la carga en el 1% de deformación P entre el área impresa S sobre la probeta por el bloque de compresión.

$$\sigma_{C \pm 1\%} = \frac{P}{S} \quad (3.7)$$

3.9 Determinación de la resistencia a la tracción paralela al grano $\sigma_{t//max}$ de la MAMW

La resistencia a la tracción paralela al grano se determinó con base en la norma técnica NTC 944 MADERAS. “DETERMINACION DE LA TRACCION PARALELA AL GRANO”.

Las dimensiones de las probetas para la determinación de la tracción paralela al grano se muestran en la Figura 26. Se realizó la lectura y registro de las dimensiones de la sección transversal más pequeña de la probeta en donde se presenta la falla por tracción paralela al grano.

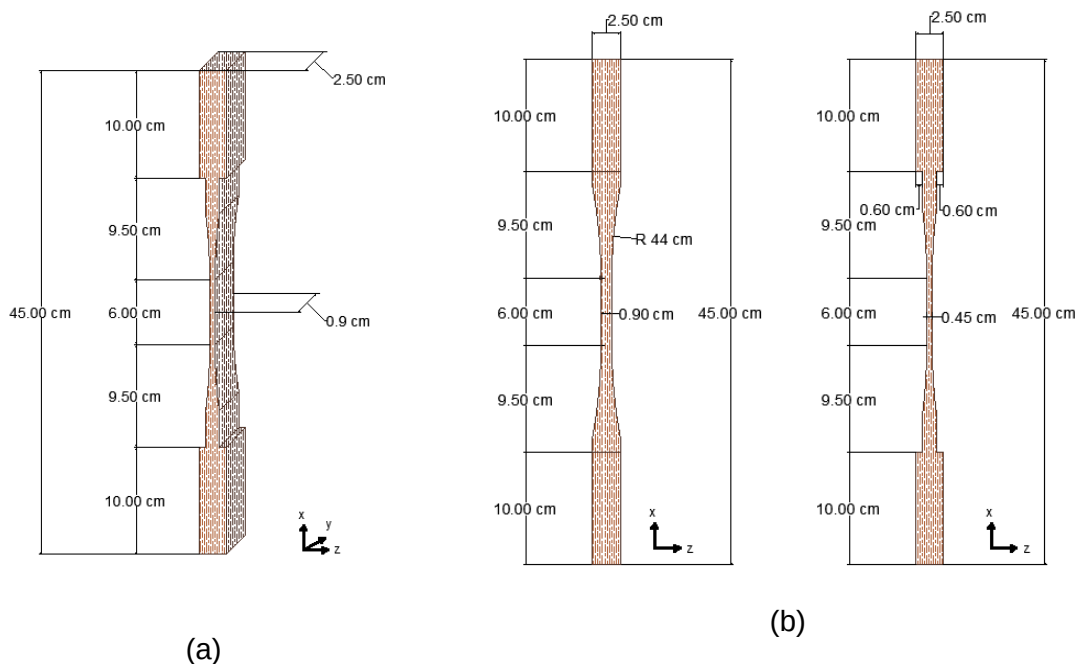


Figura 26. Dimensiones de las probetas para determinación de la resistencia a la tracción paralela a la fibra. (a) Dimensiones de probeta en 3D, (b) Vistas lateral y frontal.

El ensayo se desarrolló utilizando la máquina universal marca Shimadzu con la cual se aplicó la carga de tracción axial hasta la falla de la probeta de MAMW, la velocidad de aplicación de la carga fué de $1 \text{ mm/min} \pm 0.5 \text{ mm/min}$.

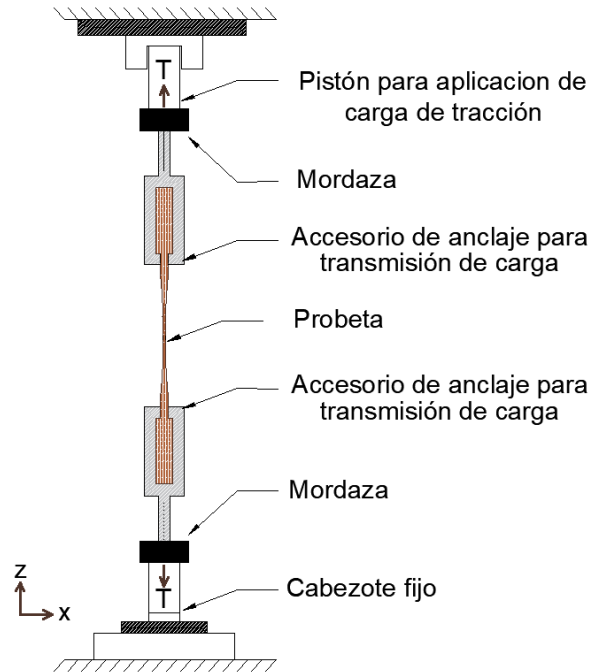


Figura 27. Esquema de procedimiento para determinación de la resistencia a la tracción paralela al grano $\sigma_{t//max}$.

La resistencia máxima a la tracción paralela al grano $\sigma_{t//max}$ determinada con el procedimiento descrito por la NTC 944 (ICONTEC, 1975) se calculó con la ecuación (3.8):

$$\sigma_{t//max} = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.8)$$

3.10 Determinación de la resistencia al cizallamiento paralelo al grano σ_{cz} de la MAMW

La resistencia al cizallamiento paralelo al grano se determina con base en la norma técnica NTC 775. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO PARALELO AL GRANO.

En la Figura 28 se presenta la probeta para la determinación de resistencia al cizallamiento paralelo al grano. NTC 775.

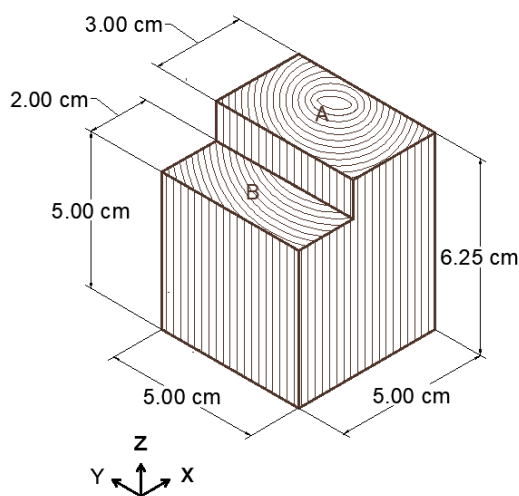


Figura 28. Dimensiones de las probetas para determinación de la resistencia al cizallamiento paralelo al grano.

La prueba se realizó utilizando la máquina universal marca Shimadzu aplicando la carga vertical hasta la falla a la probeta de MAMW localizada en un dispositivo de cizallamiento marca Tinius Olsen, con una velocidad de 0.6 mm/min.

Los datos de tiempo y carga aplicada fueron registrados automáticamente por el equipo. Ver Figura 29 e Imagen 44.

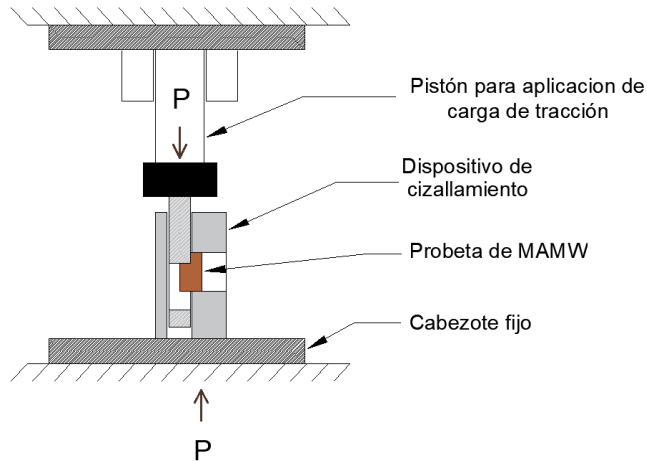


Figura 29. Determinación de la resistencia al cizallamiento paralelo al grano σ_{cz} de la MAMW. Esquema de procedimiento.



Imagen 44. Determinación de la resistencia al cizallamiento paralelo al grano σ_{cz} de la MAMW. Equipamiento en laboratorio.

La resistencia máxima de rotura por cizallamiento σ_{cz} se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_{cz} = \frac{P_{max}}{S} \quad (3.9)$$

Donde P_{max} corresponde a la carga máxima soportada por la probeta y S la superficie del plano en que se produce el cizallamiento.

3.11 Determinación de la tracción perpendicular al grano *RT*

La tracción perpendicular al grano *RT* se determina con base en la norma técnica NTC 961. DETERMINACIÓN DE LA TRACCIÓN PERPENDICULAR AL GRANO.

Para la ejecución del ensayo se utilizaron 10 probetas con la forma y dimensiones indicadas en la Figura 30 de acuerdo con la norma NTC 961.

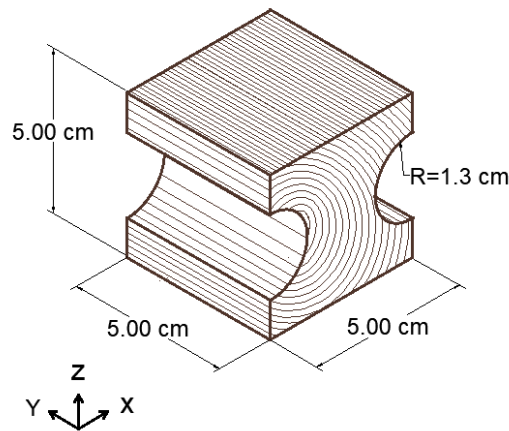


Figura 30. Dimensiones de las probetas para determinación de la tracción perpendicular al grano RT .

La prueba se realizó en una máquina universal marca Shimadzu con la cual se aplicó la carga de tracción vertical hasta la falla a las probetas de MAMW. La velocidad de aplicación de la carga fue de 2.5 mm/min.

Los datos de tiempo y carga aplicada fueron registrados en el equipo. Ver Figura 31 e Imagen 45.

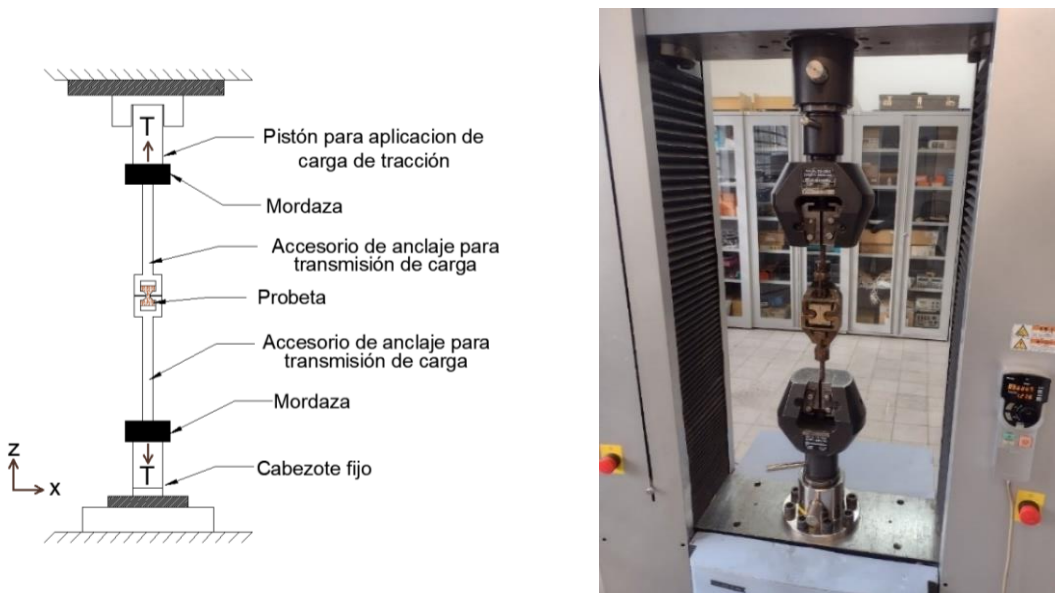


Figura 31. Ensayo de tracción perpendicular al grano. Esquema de procedimiento.

Imagen 45. Ensayo de tracción perpendicular al grano. Procedimiento en laboratorio.

La resistencia a la resistencia tracción perpendicular al grano ***RT*** se calculó mediante la siguiente ecuación.

$$RT = \frac{P}{A} \quad (3.10)$$

Donde P corresponde a la carga máxima soportada por la probeta, en N, y A el área de la sección mínima, en cm².

3.12 Comportamiento a flexión de vigas de MAMW Y MLAMW

El comportamiento a flexión de probetas de MAMW y MLAMW se estudió con base en el ensayo descrito en el numeral 10 de la NTC 5950 ESTRUCTURAS DE MADERA ASERRADA Y MADERA LAMINADA ENCOLADA PARA USO ESTRUCTURAL. DETERMINACIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS (ICONTEC, 2012).

El comportamiento a flexión se describió en términos de los parámetros mecánicos *MOR*, *MOE* y *G* calculados a partir de ensayos de flexión de cuatro puntos y sus lecturas correspondientes a carga aplicada, deflexión en el centro de la luz y deformaciones.

Se realizaron dos equipamientos diferentes para el mismo ensayo de flexión de 4 puntos definido por la NTC 5950, en función de las longitudes de las probetas y de los equipos del laboratorio.

1.2.15 Equipamiento N1 para ensayos de flexión NTC 5950

El equipamiento N1 ilustrado en la Figura 34 y en la Imagen 46 se implementó para las probetas de MAMW y para las vigas de MLAMW con longitud total menor a 2.0 m, la carga se aplicó con una máquina universal marca Shimadzu, las deflexiones se midieron con el deflectómetro digital marca Epsilon.

Las probetas para flexión de MAMW se ilustran en la Figura 32 y en la Figura 33.

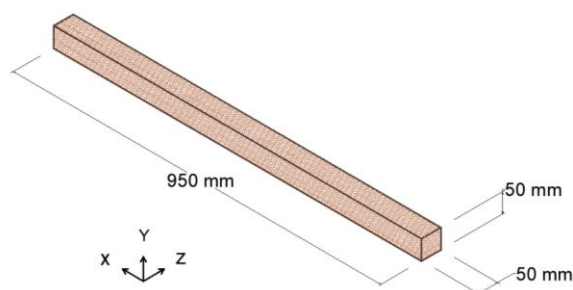


Figura 32. Vista 3D y dimensiones de probeta de MAMW para ensayo de flexión de 4 puntos.

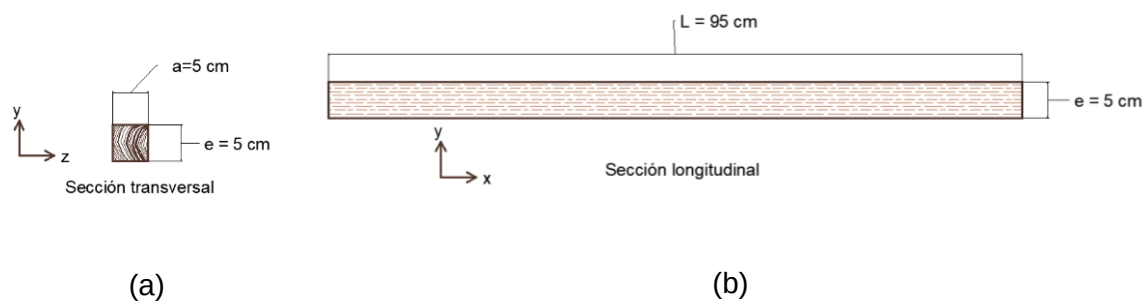


Figura 33. Probeta de MAMW. (a) Sección transversal, (b) Sección longitudinal.

Se marcaron las probetas, a lo largo del eje neutro teórico y perpendicularmente al mismo por tramos de longitud $L/6$, con el fin de localizar los puntos para instalación de galgas, ubicación de apoyos y punto de aplicación de la carga.

Las dimensiones de las probetas de MAMW para ensayos de flexión de 4 puntos se listan en la Tabla 8.

FLEXIÓN VIGAS - MAMW	
	Promedio
Cantidad	10
Base promedio (m)	0.05
Altura promedio (m)	0.05
Longitud total promedio(m)	0.95

Tabla 8. Dimensiones de vigas para ensayo de flexión NTC 5950.

La medición de las deflexiones con el equipamiento N1 se realizó con un deflectómetro digital marca Epsilon con precisión de 1×10^{-4} durante el intervalo de carga lineal, los datos fueron registrados con el equipo del laboratorio.

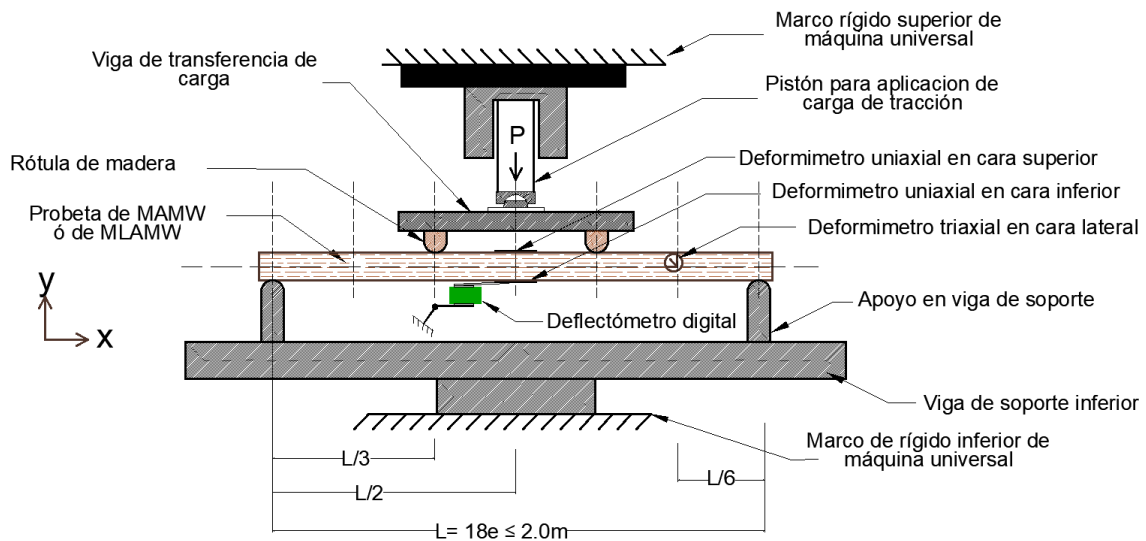


Figura 34. Esquema de equipamiento N1 e instrumentación para ensayos de 4 puntos con vigas de MAMW y MLAMW con $L \leq 2$ m.

Para el procedimiento N1 las probetas de MAMW fueron instrumentadas con deformímetros unidireccionales localizados en el centro de la luz y longitudinalmente sobre las caras superior e inferior.

Las deformaciones se registraron automáticamente conectando las galgas a un equipo indicador de deformación tipo INSTRUMENTS DIVISION P-3500 y se transmitieron al equipo de cómputo conectado a la máquina universal.

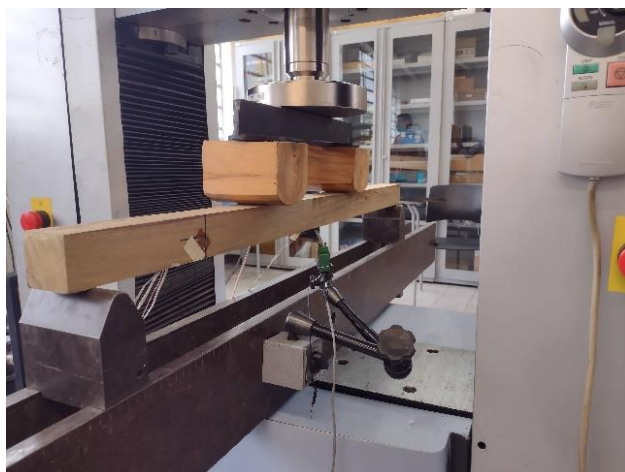


Imagen 46. Equipamiento e instrumentación en laboratorio para ensayos de flexión de 4 puntos con MAMW y MLAMW con $L \leq 2.0$ m.

Para el equipamiento N1 también se instalaron en algunas probetas, deformímetros triaxiales o rosetas localizadas en la cara lateral de las vigas de manera que el componente horizontal de los deformímetros coincidiera con el eje neutro teórico de la viga.

Las deformaciones en las caras verticales de las vigas se registraron automáticamente conectando las galgas a un equipo indicador de deformación tipo Micro-Measurements P3 Strain indicator and measurement y se transmitieron los datos al equipo de cómputo conectado a la máquina universal.



Imagen 47. Equipo indicador de deformación tipo INSTRUMENTS DIVISION P-3500



Imagen 48. equipo indicador de deformación tipo Micro-Measurements P3 Strain indicator and measurement

1.2.16 Equipamiento N2 para ensayos de flexión de MLAMW

El equipamiento N2 se implementó para las vigas de MLAMW con longitud mayor a 2.0 m (Figura 39 e Imagen 46), la carga se aplicó con un cilindro actuador ENERPAC RR5013 conectado a un compresor ENERPAC, Manómetro XZT y localizado en un marco de carga metálico.

Las probetas para flexión de MLAMW se ilustran en la Figura 35 y en la Figura 36.

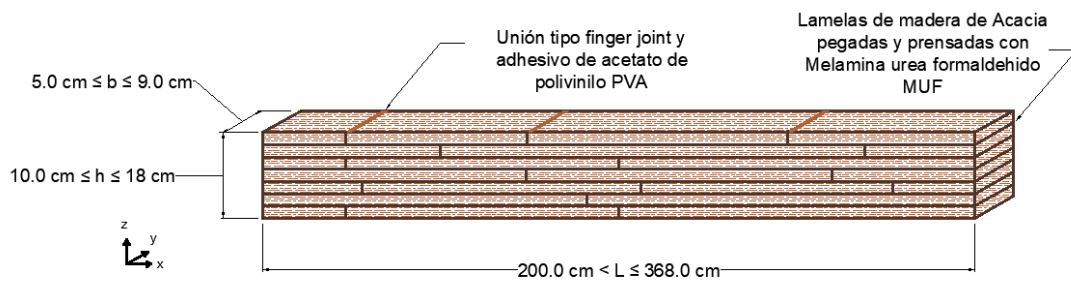


Figura 35. Vista 3D y dimensiones de probeta de MLAMW para ensayo de flexión de 4 puntos.

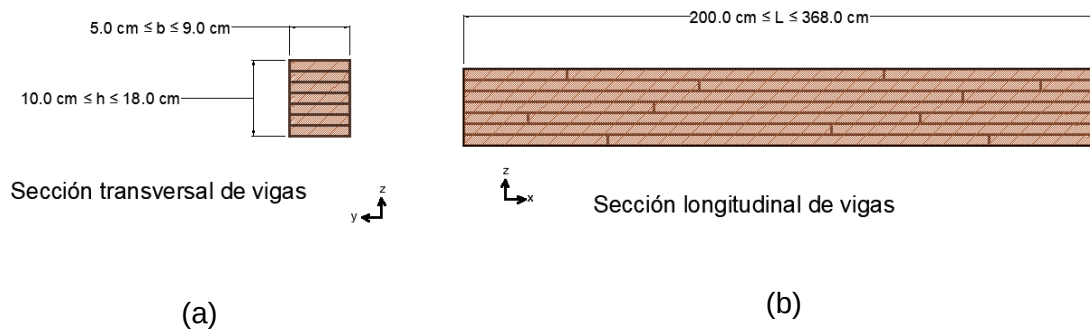


Figura 36. Probeta de MALMW. (a) Sección transversal, (b) Sección longitudinal.

Las dimensiones de las probetas de MLAMW para ensayos de flexión de 4 puntos se listan en la Tabla 9 :

VIGAS LARGAS - MLAMW					
Grupo	F1	F2	F3	F4	F5
Cantidad	10	10	10	10	10
Base prom. B (m)	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
Altura prom. h (m)	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
L total prom. (m)	2.01	2.42	2.77	3.26	3.68
[L/h] prom.	20.06	19.97	19.69	20.13	20.50

Tabla 9. Dimensiones de vigas de MLAMW.

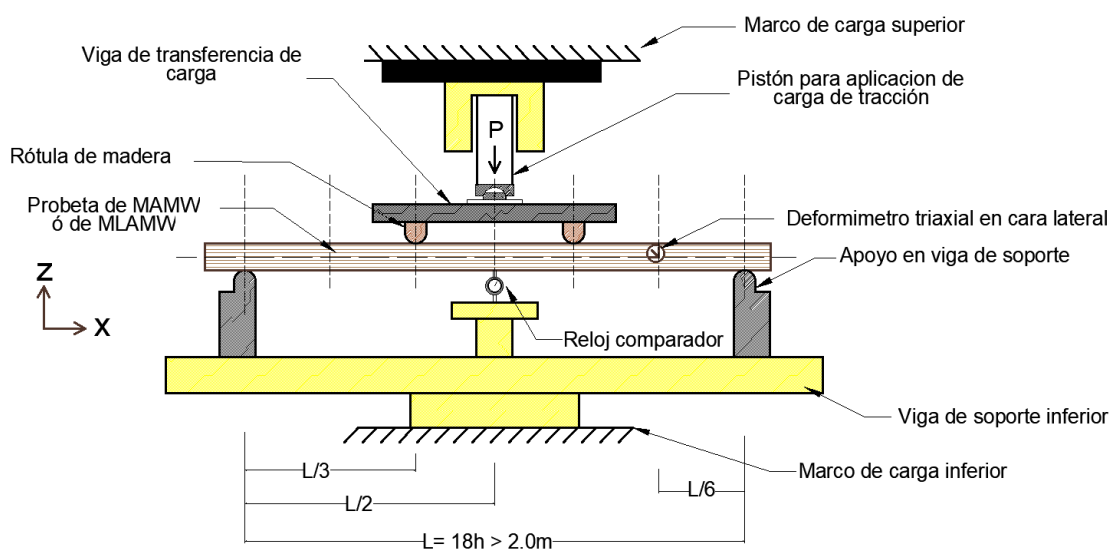


Figura 37. Esquema de e instrumentación en laboratorio para vigas con $L > 2$ m.

La medición de las deflexiones con el equipamiento N2 se realizó con un reloj comparador y durante el intervalo de carga lineal, los datos fueron registrados manualmente.

Para el equipamiento N2, únicamente se midieron deformaciones con rosetas o deformímetros triaxiales eléctricos conectados a un equipo indicador de deformación tipo Micro-Measurements P3 Strain indicator and measurement.



Imagen 49. Equipamiento e instrumentación en laboratorio para ensayos de flexión de 4 puntos con MLAMW con $L > 2.0$ m.

1.2.17 Determinación del módulo de rotura **MOR** en vigas de MAMW y MLAMW

Teniendo en cuenta los equipamientos N1 y N2 descritos en los numerales 1.2.15 y 1.2.16, el cálculo del módulo de rotura **MOR** se obtiene inicialmente calculando el M_{max} resistido en cada ensayo en función de la F_{max} definida en la ecuación (3.11):

$$F_{max} = \frac{F_{max.maq}}{2} + \frac{W_{vc}}{2} + \frac{W_{pp\ viga}}{2} \quad (3.11)$$

Donde

$F_{max.maq}$ = Fuerza máxima aplicada por la máquina universal o el cilindro actuador.

W_{vc} = Peso propio viga de transferencia de carga.

El momento máximo resistido por la viga M_{max} es definido por a la ecuación (3.12):

$$M_{max} = F_{max} * \frac{L}{3} \quad (3.12)$$

Donde

L = Longitud entre apoyos.

El Módulo de rotura **MOR** se calcula con la expresión (3.13) :

$$\mathbf{MOR} = \frac{M_{max} * c}{I} \quad (3.13)$$

Donde

MOR = Módulo de rotura.

M_{max} = Momento máximo.

c = Distancia medida desde el eje neutro hasta la fibra extrema en tracción e igual a $h/2$.

I = Momento de inercia de la sección transversal.

1.2.18 Determinación del módulo de elasticidad aparente E_{ap} en flexión para vigas de la MAMW y MLAMW

La determinación del módulo de elasticidad aparente E_{ap} en flexión para probetas de MAMW y vigas de MLAMW se realizó mediante la implementación de los equipamientos N1 y N2 descritos en los numerales 1.2.15 y 1.2.16 respectivamente, y con la definición dada por la ecuación (3.14) para el cálculo del módulo de elasticidad aparente E_{ap} .

$$E_{ap} = \frac{P' a}{4bh^3 \Delta} * (3L^2 - 4a^2) \quad (3.14)$$

Donde:

P' = Carga aplicada en el límite proporcional por la máquina.

a = Distancia desde la reacción al punto de aplicación de carga más cercano

b = base de la sección transversal de la viga

h = altura de la sección transversal de la viga

Δ = Deflexión de la viga

L = Distancia entre apoyos

La carga en el límite proporcional P' se obtiene del valor máximo de la curva de esfuerzo vs deformación en el rango lineal, donde Δ es igual la deflexión causada por P' y se calcula según la ecuación (3.15):

$$P' = \frac{F_{lim.prop.}}{2} \quad (3.15)$$

La deflexión Δ fué medida directamente con deflectómetro digital.

1.2.19 Determinación del módulo de elasticidad global en flexión *MOE* para vigas de MAMW y de MLAMW

El módulo de elasticidad global en flexión E_{mg} o *MOE* se calculó teniendo como referencia los equipamientos N1 y N2 descritos en los numerales 1.2.15 y 1.2.16 para las vigas de MAMW y para las vigas de MLAMW, de acuerdo con el procedimiento descrito en la NTC 5950.

Para el equipamiento N1 se registraron automáticamente por el equipo de cómputo los datos correspondientes a carga aplicada y deflexiones medidas con el deflectómetro digital

o manualmente para el equipamiento N2y los respectivos valores de deflexión en el centro de luz.

$$E_{mg} = MOE = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb h} \right)} \quad (3.16)$$

Donde:

$F_2 - F_1$	= Incremento de carga sobre la línea de regresión.
$w_2 - w_1$	= Incremento de deflexión correspondiente a $F_2 - F_1$
G	= Módulo de elasticidad en cortante (ver numeral 1.2.20)
a	= Distancia desde la reacción al punto de aplicación de carga más cercano
b	= base de la sección transversal de la viga
h	= altura de la sección transversal de la viga
l	= Distancia entre apoyos

El incremento de carga $F_2 - F_1$ se estima como la resta entre los valores correspondientes a $0.4 * F_{max}$ y a $0.1 * F_{max}$, con F_{max} está definida por la ecuación (3.11).

El módulo de elasticidad transversal o de cortante G , se obtiene de acuerdo con el procedimiento descrito en el numeral 1.2.20.

1.2.20 Determinación del módulo de elasticidad en cortante G de la MAMW y MLAMW

El módulo de elasticidad en cortante G se calculó teniendo como referencia los equipamientos N1 y N2 descritos en los numerales 1.2.15 y 1.2.16 respectivamente.

El módulo de elasticidad al corte G se determinó utilizando deformímetros triaxiales instalados en la mitad los tercios extremos de las vigas y a la mitad de altura de las vigas, en el tramo donde teóricamente la fuerza cortante V es constante.

Para la realización de los ensayos se utilizaron las probetas de MAMW mostradas en la Figura 33 y con las vigas de MLAMW listadas en la Tabla 9.

Las rosetas se instalaron de manera que el componente horizontal de las galgas coincidiera con el eje neutro teórico para vigas de sección rectangular. Se contó con un número limitado de galgas triaxiales para la realización de los ensayos.

El cálculo del módulo de elasticidad en cortante G se basó inicialmente en el procesamiento de las deformaciones medidas con las rosetas para calcular la deformación angular unitaria en el plano de la cara vertical de las vigas con la definición dada en el numeral 2.5 y en la expresión (3.17). Las lecturas de deformación se corrigieron con una constante de ajuste.

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c \quad (3.17)$$

Con base en las medidas de la viga y las cargas aplicadas se obtuvo el diagrama de cortante de la viga mostrado en la Figura 7 y se determinó la fuerza cortante máxima V_{max} igual a F_{max} , con F_{max} definida en (3.11).

Una vez determinado V_{max} , se calculó el esfuerzo cortante máximo τ_{max} definido con la ecuación (2.10).

Seguidamente se realizó un ajuste de regresión lineal simple con los datos correspondientes a esfuerzo cortante vs. deformación unitaria angular.

La pendiente de la curva de regresión lineal entre el esfuerzo cortante y la deformación angular unitaria corresponde teóricamente con la magnitud del módulo de elasticidad en cortante G .

3.13 Determinación de la resistencia al corte en vigas cortas de MLAMW

La resistencia al cortante en vigas cortas se determinó con base el ensayo de flexión definido en la norma ASTM D-198 (ASTM, 2015) y en la observación del modo de falla en las probetas para verificar que el mecanismo de falla hubiese sido por cortante.

Las probetas utilizadas para el ensayo se muestran en la Figura 38 :

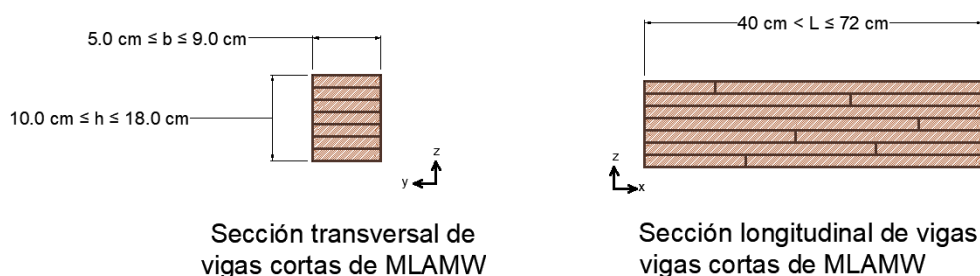


Figura 38. Vigas cortas de MLAMW.

Las dimensiones de las vigas cortas de MLAMW se muestran en la Tabla 10 :

VIGAS CORTAS - MLAMW					
Grupo	NTC-663-F1	NTC-663-F2	NTC-663-F3	NTC-663-F4	NTC-663-F5
Cantidad	16.00	16.00	16.00	15.00	10.00
Base promedio (m)	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
Altura promedio (m)	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
Longitud total promedio(m)	0.40	0.48	0.56	0.64	0.72
Relación promedio [L/h]	4.02	3.96	3.97	3.95	4.02

Tabla 10. Dimensiones de vigas cortas de MLAMW.

El esquema de procedimiento y el equipamiento en laboratorio se muestran en la Figura 39 e Imagen 50, se utilizó la maquina universal Shimadzu para la aplicación de la carga en la mitad de la luz de cada viga corta hasta la falla de cada laminado.

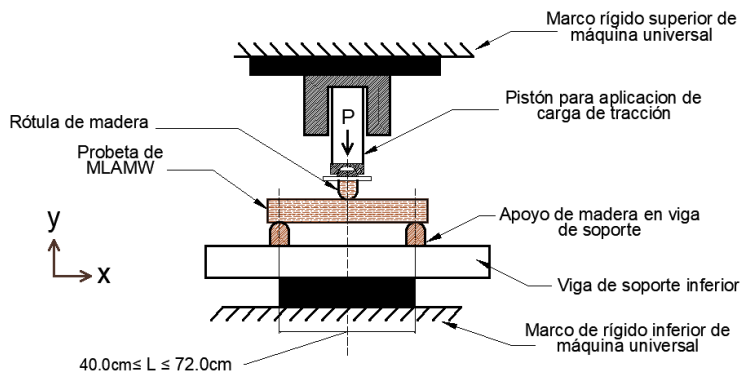


Figura 39. Determinación del esfuerzo máximo cortante τ_{max} en vigas cortas de MLAMW. Esquema de procedimiento.



Imagen 50. Determinación del esfuerzo máximo cortante τ_{max} en vigas cortas de MLAMW Equipamiento en laboratorio.

El modo de falla por cortante se definió como aquel que produce un desplazamiento relativo entre las lamelas de los laminados.

Después de verificado el mecanismo de falla por cortante, se calculó el esfuerzo cortante máximo promedio para cada uno de los grupos de vigas cortas y se comparó con la resistencia al cortante paralelo al grano σ_{czad} calculada con la metodología mostrada en el numeral 1.2.21.

1.2.21 Determinación de la resistencia al cortante paralelo al grano σ_{czad} en la línea de pegado con adhesivos *MUF*

Se tomó como base para la realización de este ensayo la norma NTC 775 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO PARALELO AL GRANO, debido a que el procedimiento descrito en esta norma permite aplicar la carga de manera que se somete a esfuerzos cortantes el área en contacto entre lamelas prensadas y unidas por adhesivo *MUF*.

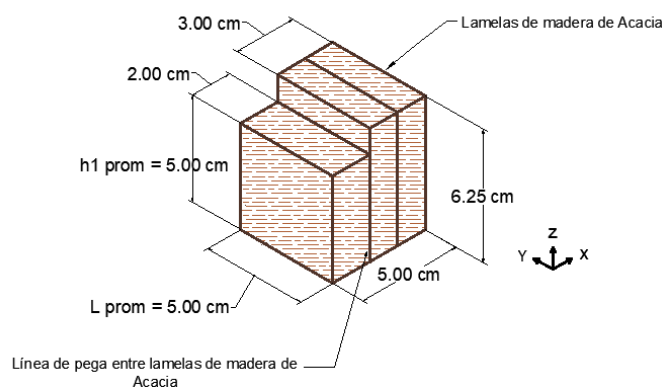


Figura 40. Probeta para determinación de la resistencia en la línea de pegado aportada por adhesivos **MUF**.

El área sometida a cortante de las probetas pegadas con adhesivo **MUF** y sus dimensiones se especifican en la Tabla 11 :

Probeta	Dimensiones (mm)		S
	L prom (mm)	h1 prom (mm)	(mm ²)
1	50.21	51.30	2575.43
2	50.32	51.55	2594.16
3	50.26	53.20	2673.66
4	50.12	51.13	2562.64
5	50.17	51.22	2569.70
6	50.10	50.98	2554.10
7	65.53	51.25	3358.46
8	50.27	51.01	2564.28
9	50.20	52.46	2633.32
10	50.28	51.61	2595.12

Tabla 11. Área sometida a cortante y sus dimensiones para probetas con adhesivo **MUF**.

El esquema de procedimiento y el equipamiento en laboratorio es el mostrado en la Figura 39.

3.14 Determinación del módulo de elasticidad en compresión paralelo a la fibra para laminados MLAMW

La determinación del módulo de elasticidad a compresión axial o paralela al grano $E_{c//lam}$ de la MLAMW se realizó con base en el método establecido por la NTC 784 MADERAS. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION AXIAL O PARALELA AL GRANO (ICONTEC, 1974b). Se determinaron la resistencia en el límite de proporcionalidad $\sigma_{c//lim. prop.}$ y el módulo de elasticidad en compresión axial o paralela al grano $E_{c//lam}$.

El ensayo se realizó utilizando probetas en la ilustradas en la Figura 41 y mostradas en la Imagen 51, utilizando el montaje en laboratorio esquematizado en la Figura 42 y mostrado en la Imagen 52. La carga axial se aplicó con la maquina universal Shimadzu, las probetas se instrumentaron con el extensómetro digital marca Epsilon con precisión de 0.01mm.

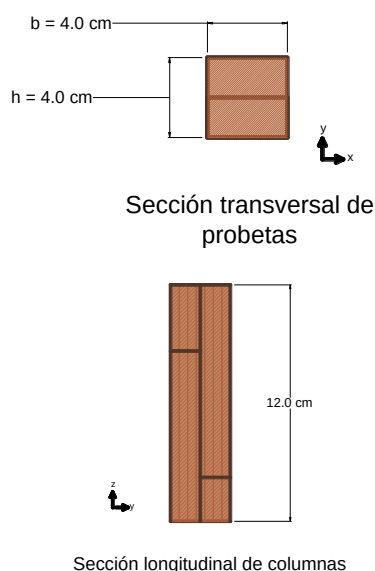


Figura 41. Probeta para cálculo de módulo de elasticidad en compresión paralelo a la fibra de la MLAMW. Dimensiones de probetas.

Imagen 51. Probeta para cálculo de módulo de elasticidad en compresión paralelo a la fibra de la MLAMW. Probeta ensayada.

Las dimensiones de las probetas ensayadas se listan en la Tabla 12.

Tipo	b prom (mm)	h prom (mm)	L prom (mm)
NTC_784M _ 2	41.0	39.4	121.2
NTC_784M _ 3	41.2	38.4	121.2
NTC_784M _ 5	38.2	41.4	121.2
NTC_784M _ 6	38.6	39.0	121.3
NTC_784M _ 7	38.9	40.1	121.2
NTC_784M _ 8	39.8	38.1	120.9
NTC_784M _ 10	40.3	38.6	121.2
NTC_784M _ 11	38.6	41.3	121.1
NTC_784M _ 12	38.2	41.7	121.1
NTC_784M _ 15	38.6	40.1	121.1

Tabla 12. Dimensiones de probetas de MLAMW para cálculo del módulo de elasticidad a compresión paralelo al grano en laminados $E_{c//lam}$.

El procedimiento para determinar $E_{c//lam}$ consistió en aplicar la carga de manera que se produjo un acortamiento axial de 0.6 mm por minuto a través del área de la sección transversal S de las probetas. (ICONTEC, 1974b).

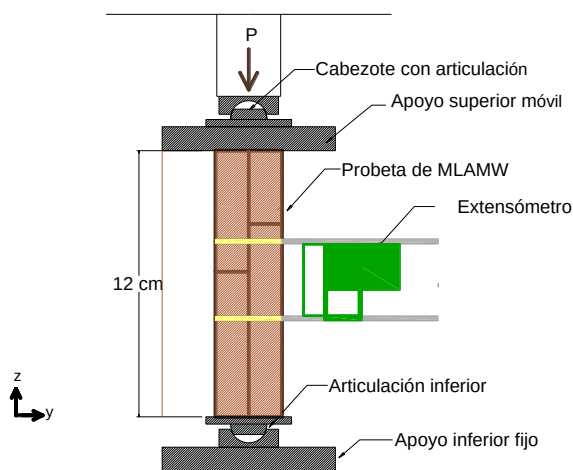


Figura 42. Esquema de montaje en laboratorio del ensayo para determinación del módulo de elasticidad a compresión de la MLAMW.

La velocidad de la aplicación de la carga se determinó con base en la NTC 5950 (ICONTEC, 2012) y se calculó con base en la altura de las columnas con la siguiente expresión:

$$v = 0.00005 * l \quad (3.18)$$

Donde:

v = velocidad de aplicación de la carga axial, en mm/s

l = longitud de la columna, en mm



(a)



(b)

Imagen 52. Montaje de probeta NTC-784-M-7 en la máquina universal para ensayo de resistencia a la compresión axial o paralela al grano $\sigma_{c//max.lam}$ y módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$. (a) Ejecución de ensayo sobre probeta NTC-784-M-7, (b) Detalle de instrumentación con extensómetro digital.

Del ensayo se obtuvieron lecturas correspondientes a tiempo, carga axial aplicada y los respectivos desplazamientos del cabezal móvil de la máquina universal hasta la falla, dichos datos quedaron registrados y fueron reportados por el equipo digitalmente en formato .csv.

El módulo de elasticidad en compresión paralela al grano $E_{c//}$ se calculó con la ecuación (3.19), se ajustó una regresión lineal para encontrar el acortamiento d correspondiente al punto P_1 . La distancia L se estimó como la longitud inicial de control de 50 mm. S corresponde a la sección transversal de las probetas. El extensómetro se mantuvo adosado a las probetas hasta que se alcanzó la carga máxima, ya que el modo de falla

registrado fue de tipo aplastamiento local de las fibras de manera no súbita, lo que no suponía un riesgo para el instrumento.

$$E_{c//lam} = \frac{P_1 * L}{S * d} \quad (3.19)$$

3.15 Determinación de valores experimentales del esfuerzo axial máximo para tres grupos de probetas de MLAMW con respecto a seis relaciones de esbeltez diferentes

Los esfuerzos axiales máximos se realizaron con 3 grupos de probetas de dimensiones variables de acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 43 y la Imagen 53.

Las dimensiones y cantidades de probetas de los 3 grupos de columnas para ensayos de compresión de MLAMW se listan en la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15.

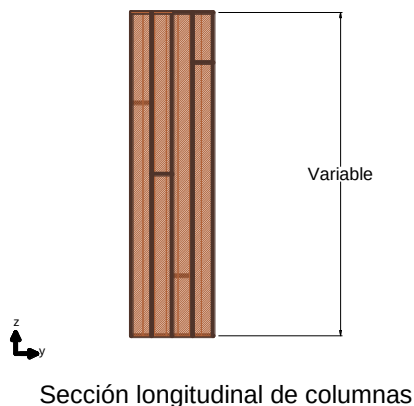
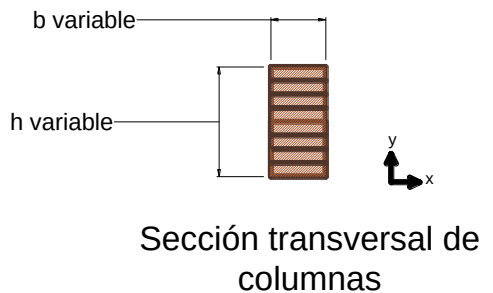


Figura 43. Esquema de dimensiones de probetas a compresión MLAMW,

Imagen 53. Probetas a compresión. Grupo G5 y Grupo G4.

El procedimiento de ejecución de los ensayos se ilustra en la Figura 44 y se muestra en la Imagen 54 e Imagen 55.

La velocidad de la aplicación de la carga se determinó con base en la NTC 5950 (ICONTEC, 2012), la velocidad se calculó con base en la altura de las columnas con la siguiente expresión:

$$v = 0.00005 * l \quad (3.20)$$

Donde:

v = Velocidad de aplicación de la carga axial, en mm/s

l = Longitud de la columna, en mm

Las velocidades de compresión para los grupos se muestran en la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15.

PROBETAS A COMPRESIÓN GRUPO 4 - MLAMW								
Grupo	G4							
Subgrupo	G4T1	G4T2	G4T3	G4T4	G4T5	G4T6	G4T7	G4T8
Cantidad	10	10	10	9	10	8	9	9
Base prom. b(mm)	19.1	16.5	17.2	15.9	15.8	16.2	16.7	15.9
Altura prom. h (mm)	78.2	78.7	78.1	78.8	78.9	78.5	78.6	78.2
L prom. (mm)	639.7	478.5	318.3	238.8	157.3	88.4	75.5	65.0
Velocidad de carga (mm/s)	0.032	0.024	0.016	0.012	0.008	0.004	0.004	0.003

Tabla 13. Dimensiones probetas a compresión de MLAMW del grupo G4 y velocidad de aplicación de carga.

PROBETAS A COMPRESIÓN GRUPO 5 - MLAMW								
Grupo	G5							
Subgrupo	G5T1	G5T2	G5T3	G5T4	G5T5	G5T6	G5T7	G5T8
Cantidad	11	9	8	12	10	9	10	9
Base prom. b(mm)	20.6	20.3	20.2	19.4	17.7	19.5	19.8	19.8
Altura prom. h (mm)	84.7	87.3	87.1	87.1	87.3	86.8	86.9	86.6
L prom. (mm)	717.3	540.1	357.0	268.4	178.2	127.2	77.1	55.4
Velocidad de carga (mm/s)	0.036	0.027	0.018	0.013	0.009	0.006	0.004	0.003

Tabla 14. Dimensiones probetas a compresión de MLAMW del grupo G5 y velocidad de aplicación de carga.

PROBETAS A COMPRESIÓN GRUPO 6 - MLAMW						
Grupo	G6					
Subgrupo	G6T1	G6T2	G6T3	G6T4	G6T5	G6T6
Cantidad	12	12	12	12	12	14
Base prom. b(mm)	13.4	13.1	13.6	13.4	13.0	13.3
Altura prom. h (mm)	67.1	67.4	67.3	67.4	67.2	67.4
L prom. (mm)	558.6	419.2	275.9	206.5	133.3	101.3
Velocidad de carga (mm/s)	0.028	0.021	0.014	0.010	0.007	0.005

Tabla 15. Dimensiones probetas a compresión de MLAMW del grupo G6 y velocidad de aplicación de carga.

Los apoyos de las probetas a compresión se asumieron articulados, ya que el cabezote de la máquina universal correspondiente al apoyo superior móvil cuenta con una articulación y en el apoyo inferior fijo se colocó una rótula (Figura 44), con la finalidad de obtener un factor de longitud efectiva $K = 1$.

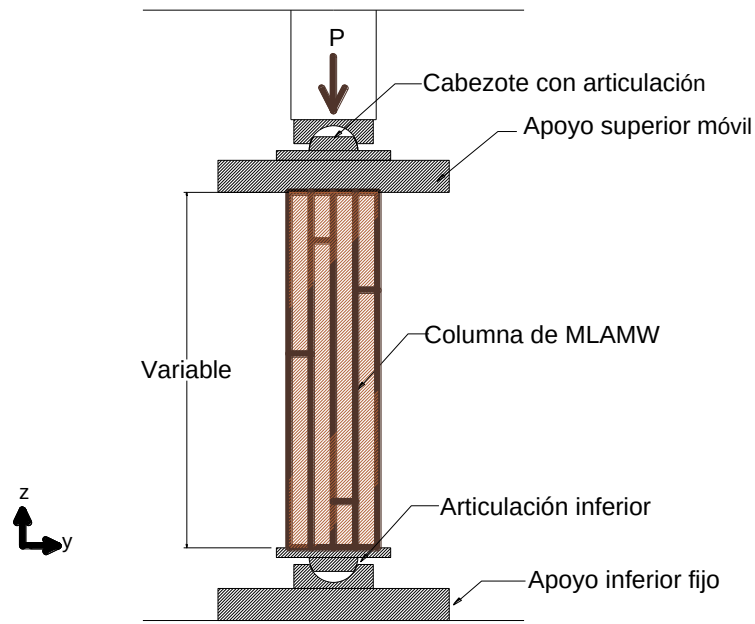


Figura 44. Esquema de equipamiento con apoyos articulados ($K=1$)



Imagen 54. Ensayo de compresión de la probeta G5T3-2.



Imagen 55. Ensayo de compresión de la probeta G5T3-9.

El esfuerzo normal en compresión σ_c para los 3 grupos se determinó con la ecuación (2.13).

Las curvas de esfuerzo máximo experimental se ajustaron para 3 rangos de relación de esbeltez correspondientes a columnas cortas, columnas intermedias y columnas largas.

4 Determinación de propiedades físico-mecánicas de la MAMW

La determinación de propiedades físico mecánicas de la MAMW utilizada en la elaboración de las probetas se realizó para los parámetros de peso específico aparente $PE_{CH=12\%}$, resistencia a la compresión paralela al grano $\sigma_{c//max}$, resistencia a la compresión perpendicular al grano $\sigma_{c\perp}$, resistencia a la tracción paralela al grano $\sigma_{t//max}$, resistencia al cizallamiento paralelo al grano σ_{cz} , resistencia a la tracción perpendicular al grano RT y contenido de humedad $W\%$.

El contenido de humedad se realizó para cada una de las probetas de MAMW y MLAMW de acuerdo con la metodología descrita en 3.5.

4.1 Peso específico $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado.

Con base en la metodología mostrada en el numeral 3.6, el peso específico $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado se determinó con los datos que se muestran en la Tabla 16.

Probeta	Dimensión (mm)	promedio (mm)	V CH=12% (mm ³)	P CH=12% (g)
1	b	30.48	92.82	65.50
	h	30.53		
	L	99.74		
2	b	30.28	90.76	53.80
	h	30.50		
	L	98.27		
3	b	30.40	96.16	75.00
	h	30.79		
	L	102.72		
4	b	30.31	91.77	44.10
	h	30.60		
	L	98.96		
5	b	30.41	92.21	55.80
	h	30.66		
	L	98.92		
6	b	30.60	94.29	73.10
	h	30.38		
	L	101.41		
7	b	30.60	92.95	61.60
	h	30.52		
	L	99.55		
8	b	30.49	92.77	65.20
	h	30.55		
	L	99.58		
9	b	30.49	92.91	60.80
	h	30.61		
	L	99.54		
10	b	30.66	93.55	45.00
	h	30.56		
	L	99.82		

Tabla 16. Datos para cálculo del peso específico $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado.

Se realizaron los cálculos y se organizaron los resultados para remover los posibles datos atípicos, finalmente se reportó el valor correspondientes al peso específico $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado en la Tabla 17.

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	Min	Max	Rango	Percentil
6	0.65	0.05	0.07	0.59	0.71	0.11	0.60

Tabla 17. Peso específico $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado.

El valor promedio para el peso específico aparente $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado fue de 0.65 g/cm³ o 650 kg/m³.

El 95 % de los resultados para el peso específico aparente $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado fue superior a 0.60 g/cm³ o 600 kg/m³.

Se realizó el diagrama de cajas para presentar gráficamente la dispersión de los resultados obtenidos para el peso específico aparente $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado (Figura 45).

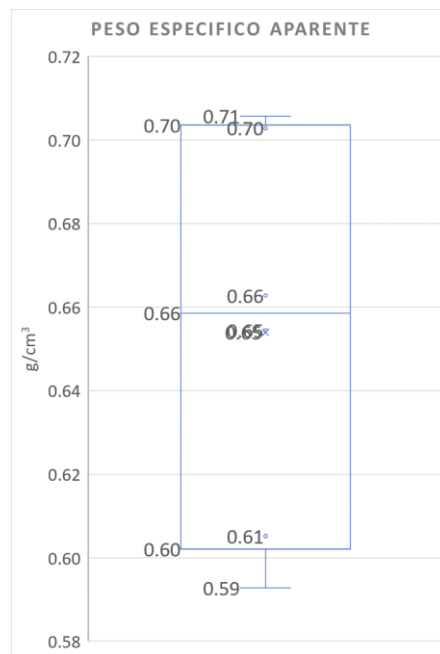


Figura 45. Diagrama de caja de peso específico $PE_{CH=12\%}$ de probetas de MAMW secadas en ambiente climatizado.

El valor promedio del contenido de humedad $W\%$ de las probetas para determinación del de peso específico aparente $PE_{CH=12\%}$ se muestra en la Tabla 18.

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	S ²	Min	Max	Rango	Percentil
6	W %	%	0.04	%	%	%	%	%
	13.16	0.50		0.25	12.50	13.79	1.29	12.56

Tabla 18. Contenido de humedad $W\%$ de probetas para cálculo de $PE_{CH=12\%}$ de MAMW secada en ambiente climatizado.

El valor promedio para el contenido de humedad $W\%$ de probetas para cálculo de $PE_{CH=12\%}$ de MAMW secada en ambiente climatizado fue del 13.16%

El contenido de humedad $W\%$ se determinó de acuerdo con el procedimiento descrito por la NTC 206-1.

4.2 Resistencia a la compresión paralela al grano

$$\sigma_{c//max}$$

La resistencia a la compresión paralela al grano $\sigma_{c//max}$ se determinó con base en la NTC 784 (ICONTEC, 1974b) y la metodología descrita en el numeral 3.7.

Los datos obtenidos para determinar la resistencia a la compresión paralela al grano $\sigma_{c//max}$ se listan en la Tabla 19:

Probetas	P max (daN)	S (cm ²)
NTC_784 _1	14933.16	25.81
NTC_784 _2	13180.32	24.23
NTC_784 _3	15471.17	26.49
NTC_784 _4	13534.58	25.65
NTC_784 _5	11572.47	25.88
NTC_784 _6	11691.14	25.27
NTC_784 _7	13135.02	25.16
NTC_784 _8	15300.18	25.12
NTC_784 _9	15650.70	26.28
NTC_784 _10	9205.30	26.62

Tabla 19. Datos para cálculo de la resistencia a la compresión paralela al grano $\sigma_{c//max}$

Los resultados obtenidos para resistencia a la compresión paralela al grano $\sigma_{c//max}$ se listan en la Tabla 20:

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	Min	Max	Rango	Percentil
8	532.68	54.97	0.10	447.18	595.44	148.25	454.60

Tabla 20. Resistencia máxima a compresión paralela al grano $\sigma_{c//max}$ para MAMW de acuerdo con la NTC 784 (ICONTEC, 1974b).

El valor promedio para resistencia a la compresión paralela al grano $\sigma_{c//max}$ fue de 532.68 daN/cm² o 53.27 MPa.

El 95 % de los resultados para resistencia a la compresión paralela al grano $\sigma_{c//max}$ fue superior a 454.60 daN/cm² o 45.46 MPa.

El resumen de estadísticos descriptivos para el contenido de humedad $W\%$ de las probetas de MAMW solicitadas a compresión paralela al grano se muestra en la Tabla 21.

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	S ²	Min	Max	Rango	Percentil
8	W %	%	0.10	%	%	%	%	%
	10.76	1.095		1.12	8.8	12.08	3.20	9.04

Tabla 21. Contenido de humedad $W\%$ de las probetas de MAMW solicitadas a compresión paralela al grano.

El contenido promedio de humedad $W\%$ de las probetas de MAMW solicitadas a compresión paralela al grano fue de 10.76%.

El contenido promedio de humedad $W\%$ es considerablemente menor posiblemente por condiciones ambientales de almacenamiento de la madera previamente a la ejecución de los ensayos.

El contenido de humedad se determinó de acuerdo con la NTC 206-1.

4.3 Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano $\sigma_{C\perp}$ de la MAMW

La resistencia a la compresión perpendicular al grano $\sigma_{C\perp}$ de la MAMW se determinó con la metodología mostrada en el numeral 3.8 y con los datos mostrados en la Tabla 22.

Obtenidos los datos de carga se estimó la carga en el límite proporcional P_1 como el 60% de la carga máxima P_{max} registrada.

Probeta	S (cm ²)	P max (daN)	P ₁ (daN)	P (daN)
NTC_785_1	25.74	2384.54	1430.72	2384.49
NTC_785_2	25.66	4890.52	2934.31	4776.58
NTC_785_3	25.31	4795.32	2877.19	4661.78
NTC_785_4	25.04	5587.47	3352.48	5411.59
NTC_785_5	25.78	6083.08	3649.85	5822.18
NTC_785_6	25.63	2389.61	1433.77	2389.61
NTC_785_7	25.20	5446.05	3267.63	5373.45
NTC_785_8	25.08	3882.67	2329.60	3827.10
NTC_785_9	25.59	2558.85	1535.31	2548.96
NTC_785_10	25.43	2923.35	1754.01	2918.59

Tabla 22. Datos para determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano $\sigma_{C\perp}$ de la MAMW.

Se descartaron los datos atípicos y se calcularon los parámetros estadísticos descriptivos para la resistencia a la compresión perpendicular al grano $\sigma_{c\perp}$ de la MAMW; los datos se muestran en la Tabla 23.

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	Min	Max	Rango	Percentil 5%
5	10.39	2.35	0.23	6.90	12.97	6.07	7.20

Tabla 23. Estadísticos descriptivos de los resultados de la resistencia a la compresión perpendicular al grano $\sigma_{c\perp}$ de la MAMW.

La resistencia promedio a la compresión perpendicular al grano $\sigma_{c\perp}$ de la MAMW obtenida fue de 10.39 MPa con un coeficiente de variación del 23%.

El 95% de los resultados para la compresión perpendicular al grano $\sigma_{c\perp}$ de la MAMW fue superior a 7.20 MPa.

Se calcularon los parámetros estadísticos descriptivos para la resistencia para una deformación del 1% $\sigma_{c\perp 1\%}$ en compresión perpendicular al grano, los datos se muestran en la Tabla 24.

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	Min	Max	Rango	Percentil 5%
5	0.170	0.038	0.22	0.115	0.213	0.099	0.120

Tabla 24. Estadísticos descriptivos de los resultados de resistencia para una deformación del 1% $\sigma_{c\perp 1\%}$ en compresión perpendicular al grano de MAMW.

La resistencia promedio para una deformación del 1% $\sigma_{c\perp 1\%}$ en compresión perpendicular al grano fue de 0.17 MPa.

El 95% de los resultados para una deformación del 1% $\sigma_{c\perp 1\%}$ en compresión perpendicular al grano fue 0.12 MPa.

El contenido de humedad $W\%$ de las probetas solicitadas a compresión perpendicular al grano $\sigma_{c\perp}$ se resume en la Tabla 25:

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	S ²	Min	Max	Rango	Percentil
5	W %	%	0.06	%	%	%	%	%
	12.290	0.754		0.5678	11.057	13.434	2.377	11.176

Tabla 25. Contenido de humedad de las probetas de la MAMW solicitadas a compresión perpendicular al grano.

El contenido de humedad $W\%$ promedio de las probetas solicitadas a compresión perpendicular al grano $\sigma_{c\perp}$ fue de 12.29%.

El contenido de humedad se realizó de acuerdo con la NTC206-1.

4.4 Determinación de la resistencia a la tracción paralela al grano $\sigma_{t//max}$ de la MAMW

La resistencia a la tracción paralela al grano $\sigma_{t//max}$ o también **EM** (esfuerzo unitario máximo) de la MAMW se determinó con base en la NTC 944 (ICONTEC, 1975) descrito en el numeral 3.9.

Los datos obtenidos para determinar la resistencia a la tracción paralela al grano $\sigma_{t//max}$ se listan en la Tabla 26:

Probeta	A (cm ²)	P max (N)
NTC 785_1	0.57	10444.34
NTC 785_2	0.38	1857.44
NTC 785_3	0.49	178.78
NTC 785_4	0.51	1689.20
NTC 785_5	0.65	7361.59
NTC 785_6	0.66	2232.17
NTC 785_7	0.31	3963.01
NTC 785_8	-	-
NTC 785_9	0.60	4024.64
NTC 785_10	0.63	13528.08
NTC 785_11	0.51	5843.35

Tabla 26. Datos para cálculo de resistencia a la tracción paralela al grano $\sigma_{t//max}$ de la MAMW

Se descartaron los valores de la probeta 8 por presentar defectos de maquinado. Se eliminaron los datos atípicos y los resultados obtenidos de los ensayos se listan en la Tabla 27:

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	Min	Max	Rango	Percentil 5%
7	77.03	40.77	0.53	33.12	126.79	93.68	37.80

Tabla 27. Resistencia máxima a la tracción paralela al grano $\sigma_{t//max}$ para MAMW de acuerdo con la NTC 944 (ICONTEC, 1975).

La resistencia promedio a la tracción paralela al grano $\sigma_{t//max}$ fue de 77.03 MPa.

El 95% de los resultados para la resistencia promedio a la tracción paralela al grano $\sigma_{t//max}$ fue superior a 37.80 MPa.

En las probetas de tracción paralela a la fibra el área resistente es reducida y muy localizada lo que se refleja en un coeficiente de variación muy grande

El contenido de humedad $W\%$ de las probetas solicitadas a tracción paralela al grano $\sigma_{t//max}$ para MAMW se muestra en la Tabla 28:

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	S ²	Min	Max	Rango	Percentil 5%
7	W %	%	0.02	%	%	%	%	%
	13.26	0.30		0.09	12.73	13.64	0.91	12.78

Tabla 28. .Contenido de humedad promedio de las probetas de MAMW solicitadas a tracción paralela al grano.

El contenido de humedad $W\%$ promedio de las probetas de MAMW solicitadas a tracción paralela al grano fué de 13.26%. El contenido de humedad se realizó con base en la NTC206-1.

4.5 Determinación de la resistencia al cizallamiento σ_{cz} de la MAMW

Los datos para el cálculo de la resistencia al cizallamiento σ_{cz} de la MAMW se halló con los datos mostrados en la Tabla 29

Determinación de propiedades físico-mecánicas de la MAMW

Probeta	S (cm ²)	P max (kg)
NTC 775 _ 1	28.08	1853.90
NTC 775 _ 2	29.49	1715.59
NTC 775 _ 3	28.69	1026.88
NTC 775 _ 4	27.77	2400.39
NTC 775 _ 5	28.80	3222.21
NTC 775 _ 6	29.04	2327.78
NTC 775 _ 7	28.19	2416.04
NTC 775 _ 8	28.06	2167.13
NTC 775 _ 9	28.86	2313.50
NTC 775 _ 10	28.79	2512.65

Tabla 29. Datos para cálculo de la resistencia al cizallamiento σ_{cz} de la MAMW.

Los resultados para para la resistencia al cizallamiento σ_{cz} de la MAMW se muestran en la Tabla 30:

Probeta	σ_z (MPa)
NTC 775 _ 1	6.48
NTC 775 _ 2	5.71
NTC 775 _ 3	3.51
NTC 775 _ 4	8.48
NTC 775 _ 5	10.98
NTC 775 _ 6	7.86
NTC 775 _ 7	8.41
NTC 775 _ 8	7.58
NTC 775 _ 9	7.86
NTC 775 _ 10	8.56

Tabla 30. Resistencia al cizallamiento σ_{cz} de la MAMW.

Después de descartar los datos atípicos, los resultados para los parámetros estadísticos descriptivos se muestran en la Tabla 31:

Cantidad	$\bar{x}$ σ_z (MPa)	S MPa	CV	Min MPa	Max MPa	Rango MPa	Percentil 5% MPa
8	7.62	1.02	0.13	5.71	8.56	2.85	5.85

Tabla 31. Resumen de parámetros estadísticos descriptivos para la resistencia al cizallamiento σ_{cz} de la MAMW.

El valor promedio de la resistencia al cizallamiento σ_{cz} de la MAMW fue de 7.62 MPa.

El 95% de los resultados la resistencia al cizallamiento σ_{cz} de la MAMW fue superior a 5.85 MPa.

El contenido de humedad $W\%$ de las probetas de MAMW solicitadas a cizallamiento σ_{cz} se muestra en la Tabla 32:

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	S^2	Min	Max	Rango	Percentil 5%
8	$W\%$	$W\%$	0.12	$W\%^2$	$W\%$	$W\%$	$W\%$	$W\%$
	9.10	1.08		1.16	7.33	10.33	3.00	7.48

Tabla 32. Contenido de humedad promedio de las probetas de la MAMW solicitadas a cizallamiento .

El contenido de humedad $W\%$ promedio de las probetas de MAMW solicitadas al cizallamiento fué de 9.10%.

El contenido promedio de humedad $W\%$ es considerablemente menor posiblemente por condiciones ambientales de almacenamiento de la madera previamente a la ejecución de los ensayos.

El contenido de humedad se realizó de acuerdo con la NTC 206-1.

4.6 Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular al grano *RT*

La determinación de la resistencia a la tracción perpendicular al grano *RT* se determinó con la metodología mostrada en el numeral 3.11.

Los datos para el cálculo de la resistencia a la tracción perpendicular al grano *RT* se muestran en la Tabla 33:

Probeta	Área (cm ²)	Pmax (N)
NTC_961_1	8.36	1925.07
NTC_961_2	8.98	4272.85
NTC_961_3	8.57	2343.83
NTC_961_4	8.21	3113.30
NTC_961_5	8.61	2545.11
NTC_961_6	7.16	2924.65
NTC_961_7	7.71	1091.03
NTC_961_8	8.08	2699.17
NTC_961_9	7.63	343.47
NTC_961_10	8.10	1079.64

Tabla 33. Datos para cálculo de la resistencia a la tracción perpendicular al grano *RT* de la MAMW.

Los resultados para la resistencia a la tracción perpendicular al grano *RT* de la MAMW se muestran en la Tabla 34:

Probeta	RT (MPa)
NTC_961_1	2.30
NTC_961_2	4.76
NTC_961_3	2.73
NTC_961_4	3.79
NTC_961_5	2.95
NTC_961_6	4.08
NTC_961_7	1.42
NTC_961_8	3.34
NTC_961_9	0.45
NTC_961_10	1.33

Tabla 34. Resistencia a la tracción perpendicular al grano *RT* de la MAMW.

Después de remover los datos atípicos los resultados para los parámetros estadísticos descriptivos, para la resistencia a la tracción perpendicular al grano **RT** de la MAMW, se muestran en la Tabla 35.

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	S ²	Min	Max	Rango	Percentil 5%
6	RT (MPa)	MPa	0.30	MPa ²	MPa	MPa	MPa	MPa
	2.76	0.83		0.69	1.42	3.79	2.38	1.53

Tabla 35. Parámetros estadísticos descriptivos para la resistencia a la tracción perpendicular al grano **RT** de la MAMW.

El valor promedio para la resistencia a la tracción perpendicular al grano **RT** de la MAMW fue de 2.76 MPa.

El 95 % de los resultados para la resistencia a la tracción perpendicular al grano **RT** de la MAMW fue superior a 1.53 MPa.

El CV relativamente alto posiblemente se debe a las dimensiones de las probetas en la zona de menor sección, debido a la dificultad del proceso de maquinado de las piezas para garantizar dimensiones iguales en la totalidad de las probetas.

El contenido de humedad **W%** de las probetas de la MAMW solicitadas a tracción perpendicular al grano se muestra en la Tabla 36:

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	S ²	Min	Max	Rango	Percentil 5%
6	W%	%	0.05	% ²	%	%	%	%
	13.22	0.65		0.42	12.48	14.26	1.78	12.57

Tabla 36. Contenido de humedad para probetas de resistencia a la tracción perpendicular al grano **RT** de la MAMW.

El contenido de humedad **W%** promedio de las probetas de MAMW solicitadas a tracción perpendicular al grano fue de 13.22%.

5 Comportamiento a flexión de la MAMW y la MLAMW

El comportamiento a flexión se describió en función de parámetros mecánicos que determinan la respuesta de los materiales ante solicitaciones por flexión, tales como el módulo de rotura MOR , módulo de elasticidad en flexión global (E_{mg} o MOE), módulo de elasticidad aparente E_{ap} y módulo de elasticidad en cortante G para las probetas de MAMW y las vigas de MLAMW

La descripción del comportamiento a flexión de probetas de MAMW y vigas de MLAMW comenzó por la medición de sus dimensiones para lo cual se realizaron 3 lecturas por cada dimensión y para cada probeta o viga; seguidamente se calculó el promedio aritmético correspondiente a las dimensiones para los análisis.

Se organizaron los datos de fuerza aplicada, deflexiones verticales en el centro de la luz, deformaciones unitarias en hojas de cálculo para realizar los análisis de datos.

La fuerza total aplicada a cada viga se estimó como la suma del peso propio de la probeta o viga y el peso propio de la viga de transferencia de carga.

Posteriormente, se procedió con el ajuste de regresiones lineales entre las variables analizadas para calcular los parámetros mecánicos de interés en el comportamiento a flexión de las probetas de MAMW y MLAMW.

5.1 Módulo de Rotura *MOR* en vigas de MAMW

El cálculo del módulo de rotura *MOR* se realizó con la metodología mostrada en el numeral 1.2.17, con las probetas de MAMW detalladas en la Figura 33 y con las dimensiones mostradas en la Tabla 37:

Probeta	Promedios		
	Longitud (m)	base (m)	altura (m)
NTC5950-1	0.95	0.05	0.05
NTC5950-2	0.95	0.05	0.05
NTC5950-3	0.95	0.05	0.05
NTC5950-4	0.95	0.05	0.05
NTC5950-5	0.95	0.05	0.05
NTC5950-6	0.95	0.05	0.05
NTC5950-7	0.95	0.05	0.05
NTC5950-8	0.95	0.05	0.05
NTC5950-9	0.95	0.05	0.05
NTC5950-10	0.95	0.05	0.05

Tabla 37. Dimensiones de probetas de flexión de la MAMW

Se determinó la carga máxima registrada para cada ensayo y se calculó el momento máximo actuante. Los resultados para cada probeta se muestran en la Tabla 38:

Comportamiento a flexión de la MAMW y la MLAMW

Probeta	F max kN	M max kN*m
NTC5950-1	12.68	1.90
NTC5950-2	14.74	2.22
NTC5950-3	7.46	1.12
NTC5950-4	13.76	2.06
NTC5950-5	11.87	1.78
NTC5950-6	13.49	2.02
NTC5950-7	12.61	1.89
NTC5950-8	15.41	2.31
NTC5950-9	13.61	2.04
NTC5950-9	13.61	2.04

Tabla 38. Fuerza y momento máximo ensayos de flexión de la MAMW.

Los resultados para el módulo de rotura **MOR** se muestran en la Tabla 39:

Probeta	MOR MPa
NTC5950-1	87.13
NTC5950-2	102.93
NTC5950-3	52.41
NTC5950-4	95.45
NTC5950-5	80.00
NTC5950-6	86.23
NTC5950-7	80.38
NTC5950-8	98.61
NTC5950-9	90.86
NTC5950-9	90.86

Tabla 39. Módulo de rotura **MOR** de la MAMW.

Se listaron los resultados para identificación y remoción de los datos atípicos de acuerdo con el numeral 3.4; el resumen de estadísticos descriptivos para módulo de rotura **MOR** de la MAMW se muestra en la Tabla 40:

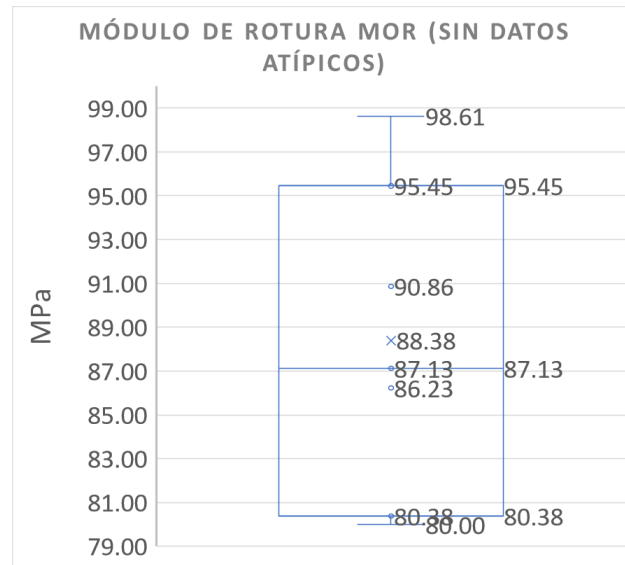
Cantidad	$\bar{x}$ MOR (MPa)	S MPa	CV	Min MPa	Max MPa	Rango MPa	Percentil 5% MPa
7	88.38	7.08	0.08	80.00	98.61	18.62	80.38

Tabla 40. Estadísticos descriptivos para **MOR** de la MAMW.

El valor promedio del módulo de rotura **MOR** obtenido fue de 88.38 MPa.

El 95% de los resultados del módulo de rotura **MOR** fueron superiores a 80.93 MPa.

Se realizó un diagrama de cajas para presentar gráficamente la dispersión de los valores obtenidos (Figura 46):

Figura 46. Diagrama de cajas para módulo de rotura **MR** en probetas de MAMW.

5.2 Módulo de elasticidad aparente E_{ap} en vigas de MAMW

El módulo de elasticidad aparente E_{ap} se calculó de acuerdo con la metodología descrita en el numeral 1.2.18 y con la definición dada por la ecuación (5.1), se reemplazaron los datos correspondientes a la carga máxima en el límite de proporcionalidad P' , deflexión

máxima en el centro de la luz en el límite de proporcionalidad Δ y las dimensiones propias de la viga, altura h , ancho b y de las distancias, a y L definidas por las condiciones de equipamiento N1 descrito en el numeral 1.2.15.

$$E_{ap} = \frac{P' a}{4bh^3 \Delta} * (3L^2 - 4a^2) \quad (5.1)$$

La carga en el límite proporcional P' se determinó de acuerdo con la ecuación (3.15), los demás parámetros involucrados en el cálculo se definieron en el numeral 1.2.18.

Los datos para calcular el módulo de elasticidad aparente E_{ap} para las probetas de MAMW se muestran en la Tabla 41:

Probeta	Promedios			a m	P' , kN	Δ mm
	L (m)	b (m)	h (m)			
NTC5950-1	0.95	0.05	0.05	0.30	5109.89	11.91
NTC5950-2	0.95	0.05	0.05	0.30	7621.19	12.00
NTC5950-3	0.95	0.05	0.05	0.30	3767.55	11.73
NTC5950-4	0.95	0.05	0.05	0.30	6266.73	11.54
NTC5950-5	0.95	0.05	0.05	0.30	5438.38	11.74
NTC5950-6	0.95	0.05	0.05	0.30	5117.28	11.93
NTC5950-7	0.95	0.05	0.05	0.30	6431.09	11.59
NTC5950-8	0.95	0.05	0.05	0.30	7364.61	11.84
NTC5950-9	0.95	0.05	0.05	0.30	5856.95	11.73
NTC5950-10	0.95	0.05	0.05	0.30	-	-

Tabla 41. Datos para cálculo del módulo de elasticidad aparente E_{ap} en probetas de MAMW.

Se descartaron los datos de la probeta NTC-5950-10, debido a que presentó falla atípica por debajo de los valores esperados.

En la Figura 47 se muestran las curvas de Carga aplicada contra deflexión en el centro de la luz para 9 grupos de vigas de MAMW:

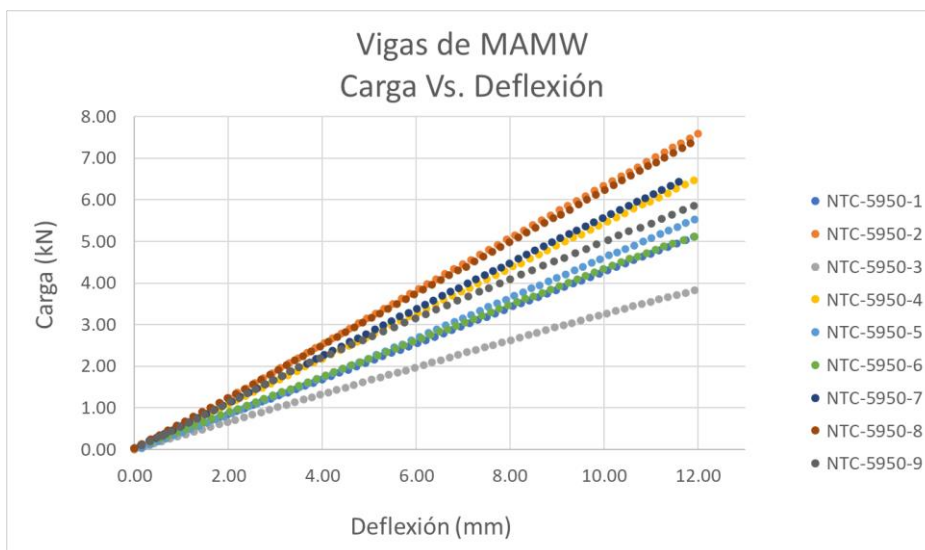


Figura 47. Gráfica de Carga contra Deflexión medida en el centro de la luz para vigas de MAMW.

Los resultados del módulo de elasticidad aparente E_{ap} en probetas de MAMW se muestran en la Tabla 42:

Probeta	E_{ap} MPa
NTC5950-1	10112.90
NTC5950-2	15405.20
NTC5950-3	7819.91
NTC5950-4	12973.71
NTC5950-5	10582.72
NTC5950-6	9078.77
NTC5950-7	11650.23
NTC5950-8	13106.98
NTC5950-9	12252.91

Tabla 42. Módulo de elasticidad aparente E_{ap} probetas de MAMW.

Los datos se organizaron para identificar y descartar los datos atípicos; una vez retirados estos valores, se recalcularon los parámetros estadísticos descriptivos para los resultados

del módulo de elasticidad aparente E_{ap} en probetas de MAMW y se listaron en la Tabla 43:

Cantidad	$\bar{x}$ E ap (MPa)	S MPa	CV	Min MPa	Max MPa	Rango MPa	Percentil 5% MPa
6	11779.91	1236.07	0.10	10112.90	13106.98	2994.08	10465.26

Tabla 43. Estadísticos para módulo de elasticidad aparente E_{ap} en probetas de MAMW.

Se realizaron diagramas de cajas para presentar los datos obtenidos del análisis (Figura 48).

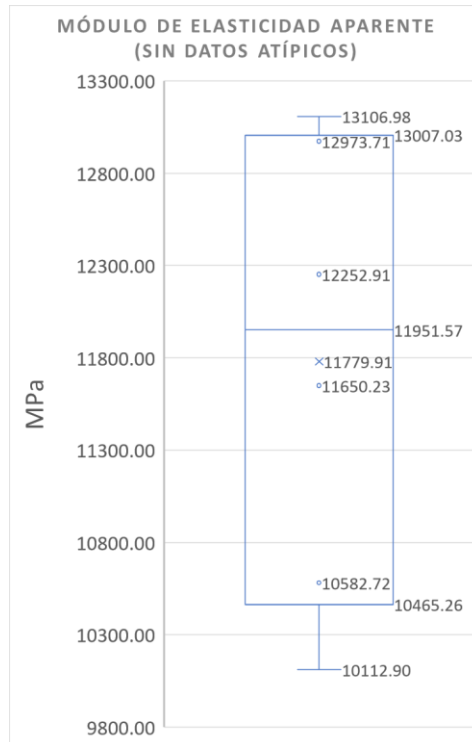


Figura 48. Diagrama de cajas para resultados de módulo de elasticidad aparente E_{ap} sin datos atípicos para probetas de MAMW.

El valor promedio obtenido para el módulo de elasticidad aparente E_{ap} para probetas de MAMW fué de 11779.91 MPa.

El 95 % de los resultados para el módulo de elasticidad aparente E_{ap} para probetas de MAMW fue superior a 10465.26 MPa

5.3 Módulo de elasticidad global en flexión *MOE* en vigas de MAMW

El módulo de elasticidad global en flexión *MOE* o E_{mg} para probetas de MAMW se determinó con base en la metodología descrita en el numeral 1.2.19 y con la ecuación (5.2) definida por la NTC 5950 (ICONTEC, 2012).

$$E_{mg} = MOE = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb h} \right)} \quad (5.2)$$

Se realizaron los cálculos con los parámetros de la ecuación (5.2) definidos en el numeral 1.2.19 correspondientes a las dimensiones propias de las probetas, el incremento de cargas en el límite proporcional sobre la línea de regresión, el incremento de deflexión máxima en el centro de la luz en el límite de proporcionalidad y el módulo de elasticidad en cortante o módulo de rigidez G , el cual se determinó en el numeral 5.4.

Se descartó la probeta NTC5950-10 debido a que el equipo no registró la carga aplicada.

Los datos para el cálculo del módulo de elasticidad global en flexión *MOE* para probetas de MAMW se listan en la Tabla 44:

Probeta	Promedios			a m	F_{Max} kN	$F_2 - F_1$ N	$w_2 - w_1$ mm	G MPa
	L (m)	b (m)	h (m)					
NTC5950-1	0.95	0.05	0.05	0.30	12.68	3805.25	8.89	382.76
NTC5950-2	0.95	0.05	0.05	0.30	14.74	4420.51	6.95	1035.40
NTC5950-3	0.95	0.05	0.05	0.30	7.46	2239.01	6.94	1687.27
NTC5950-4	0.95	0.05	0.05	0.30	13.76	4128.61	7.61	980.24
NTC5950-5	0.95	0.05	0.05	0.30	11.87	3560.67	7.59	-
NTC5950-6	0.95	0.05	0.05	0.30	13.49	4047.00	9.39	2651.68
NTC5950-7	0.95	0.05	0.05	0.30	12.61	3784.36	6.80	256.20
NTC5950-8	0.95	0.05	0.05	0.30	15.41	4624.12	7.44	355.51
NTC5950-9	0.95	0.05	0.05	0.30	13.61	4082.83	7.95	898.27
NTC5950-10	0.95	0.05	0.05	0.30	-	-	-	-

Tabla 44. Datos para cálculo del módulo de elasticidad global en flexión *MOE* para probetas de MAMW.

Se realizó una regresión lineal simple con los datos de Fuerza (x) y Deflexión (y) para estimar las deflexiones correspondientes a F_1 y F_2 de la ecuación (5.2).

Se interpolaron los valores de deflexión para las cargas aplicadas del 10 % y del 40% de la carga máxima registrada en el límite proporcional para cada ensayo.

Los resultados del cálculo del módulo de elasticidad global en flexión **MOE** para probetas de MAMW se muestran en la Tabla 45:

Probeta	MOE MPa
NTC5950-1	10112.90
NTC5950-2	15421.19
NTC5950-3	7856.87
NTC5950-4	12960.17
NTC5950-5	10715.63
NTC5950-6	9099.31
NTC5950-7	11678.20
NTC5950-8	13096.41
NTC5950-9	11556.92

Tabla 45. Valor promedio del módulo de elasticidad global en flexión **MOE** para probetas de MAMW.

Los resultados se organizaron para identificar y remover posibles datos atípicos, una vez retirados los valores extremos se recalcularon los parámetros estadísticos descriptivos para los resultados del módulo de elasticidad global en flexión **MOE** en probetas de MAMW y se listaron en la Tabla 46:

Cantidad	$\bar{x}$ MOE (MPa)	S MPa	CV	Min MPa	Max MPa	Rango MPa	Percentil 5% MPa
6	11686.71	1187.08	0.10	10112.90	13096.41	2983.51	10262.08

Tabla 46. Estadísticos de módulo de elasticidad global en flexión **MOE** para probetas de MAMW.

El valor promedio obtenido para el módulo de elasticidad global en flexión **MOE** para probetas de MAMW fué de 11686.71MPa.

El 95 % de los resultados para el módulo de elasticidad global en flexión **MOE** para probetas de MAMW fue superior a 10262.08 MPa.

5.4 Módulo de elasticidad en cortante G en probetas de MAMW.

El módulo de elasticidad en cortante G de probetas de MAMW se determinó con base en la metodología descrita en el numeral 1.2.20, con la definición de deformación angular en el plano dada por la ecuación (2.4) y con el cálculo de los esfuerzos cortantes por flexión máximos en $h/2$ de acuerdo con la expresión (2.10).

El módulo de elasticidad en cortante G de probetas de MAMW se calculó a partir de las lecturas de las deformaciones obtenidas con las rosetas o deformímetros triaxiales y los esfuerzos cortantes por flexión generados por la aplicación de las cargas puntuales en los tercios centrales de la luz.

Los datos para el cálculo del módulo de elasticidad en cortante G de probetas de MAMW se presentan en el Anexo 9.

Se organizaron los datos y se graficaron los resultados referentes a esfuerzo cortante por flexión τ y deformación angular γ_{xy} para mostrar la dispersión de los datos obtenidos e identificar y remover posibles datos atípicos (Figura 49).

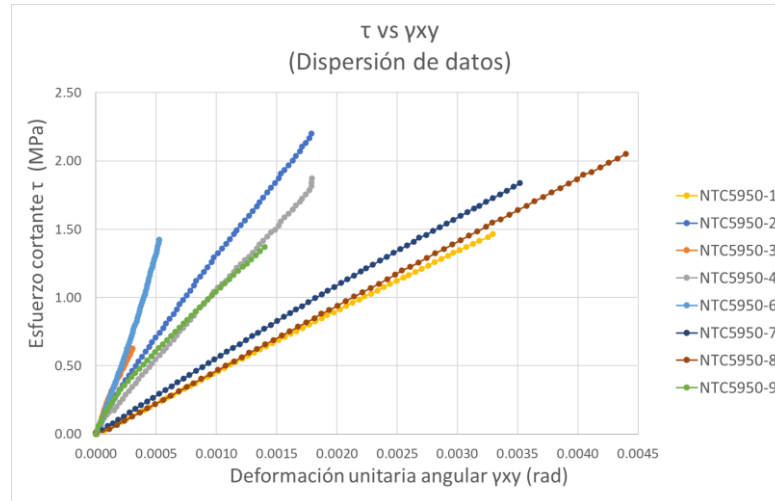


Figura 49. Esfuerzo cortante por flexión τ en función de la deformación angular γ_{xy}

Se removieron los datos atípicos y se ajustaron las curvas de regresión lineal con los datos corregidos para determinar el módulo de elasticidad en cortante G de cada probeta de MAMW.

Las curvas de regresión lineal se muestran en la Figura 50:

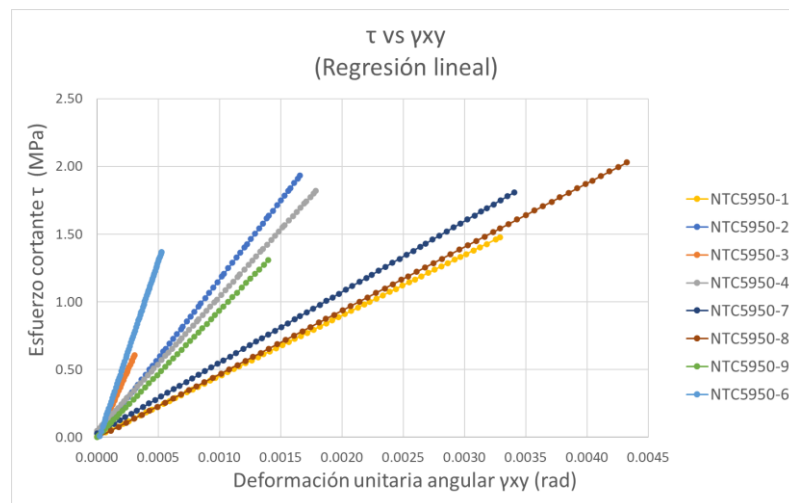


Figura 50. Regresión lineal para determinación del módulo de elasticidad en cortante G para probetas de MAMW.

Los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad en cortante G de las probetas de MAMW se muestran en la Tabla 47:

Probeta	<i>G</i> MPa
NTC5950-1	447.6
NTC5950-2	1165.5
NTC5950-3	2043.2
NTC5950-4	991.5
NTC5950-5	-
NTC5950-6	2692.7
NTC5950-7	522.6
NTC5950-8	470.3
NTC5950-9	935.2

Tabla 47. Valores de módulo de elasticidad en cortante ***G*** para probetas de MAMW.

Se descartaron los datos atípicos y se calcularon parámetros estadísticos descriptivos para los resultados de módulo de elasticidad en cortante ***G*** para las probetas de MAMW (Tabla 48). No se contó con los datos de la probeta NTC5950-5 ya que la roseta no registró lecturas.

Cantidad	$\bar{x}$ G (MPa)	S MPa	CV	Min MPa	Max MPa	Rango MPa	Percentil 5% MPa
6	755.47	311.92	0.41	447.57	1165.50	717.93	483.47

Tabla 48. Estadística descriptiva para resultados de módulo de elasticidad en cortante ***G*** para probetas de MAMW.

El resultado promedio para el módulo de elasticidad en cortante ***G*** para las probetas de MAMW fué de 755.47 MPa.

El 95 % de los resultados para el módulo de elasticidad en cortante ***G*** para las probetas de MAMW fué superior a 483.47 MPa.

5.5 Contenido de humedad $W\%$ de probetas de MAMW para ensayos de flexión.

El contenido de humedad $W\%$ para las probetas de MAMW utilizadas en los ensayos de flexión de 4 puntos para determinar el módulo de rotura **MOR**, el módulo de elasticidad aparente **Eap**, el módulo de elasticidad global **MOE** y el módulo de elasticidad en cortante o de rigidez **G** de las probetas de MAMW se muestra en la Tabla 49:

Probeta	w (%)
NTC5950-1	11.70
NTC5950-2	12.74
NTC5950-3	12.15
NTC5950-4	12.49
NTC5950-5	11.18
NTC5950-6	10.39
NTC5950-7	13.03
NTC5950-8	12.54
NTC5950-9	12.90

Tabla 49. Contenido de humedad $W\%$ para probetas de MAMW ensayadas a flexión.

Se organizaron los datos y se eliminaron datos atípicos. El resumen de estadísticos descriptivos para el contenido de humedad $W\%$ de las probetas de MAMW ensayadas a flexión se muestra en la Tabla 50:

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	S ²	Min	Max	Rango	Percentil 5%
6	W %	%	0.04	%	%	%	%	%
	12.09	0.47		0.22	11.70	13.03	1.33	11.76

Tabla 50. Estadísticos descriptivos para el contenido de humedad $W\%$ para las probetas de MAMW a flexión

El contenido de humedad $W\%$ promedio para las probetas de MAMW a flexión fue del 12.09%.

5.6 Módulo de Rotura **MOR** en vigas prismáticas de MLAMW

El cálculo del módulo de rotura **MOR** se realizó con la metodología descrita en el numeral 1.2.17 y con los 5 grupos de vigas de MLAMW descritas en el numeral 3.2.

Los datos completos para el cálculo del módulo de rotura **MOR** de las vigas de MLAMW se muestran en el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Se determinó la carga máxima registrada para cada ensayo y se calculó el momento máximo actuante, los resultados para cada grupo se muestran en la Tabla 51:

VIGAS PRISMÁTICAS - MLAMW						
Parámetro	Estadístico	F1	F2	F3	F4	F5
DATOS	Cantidad total	10	10	10	10	10
	Base prom. (m)	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	Altura prom. (m)	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
	I (m ⁴)	4.33E-06	8.76E-06	1.54E-05	2.75E-05	4.28E-05
	c(m)	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	Longitud total prom. (m)	2.01	2.42	2.77	3.26	3.68
	Relación prom. [L/h]	20.06	19.97	19.69	20.13	20.50
	Fuerza máx. prom. (kN)	6.33	6.54	5.93	6.10	9.33
	M max. prom. (kN*m)	2.02	2.51	3.66	5.79	10.34

Tabla 51. Datos promedio de grupos de vigas de MLAMW para la determinación del módulo de rotura **MOR**.

El resumen de estadísticos descriptivos para el módulo de rotura **MOR** del grupo F1 de vigas de MLAMW se muestran en la Tabla 52, los resúmenes de estadísticos descriptivos para los grupos F2, F3, F4 y F5 se muestran en el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

MOR GRUPO F1 - VIGAS PRISMÁTICAS MLAMW								
Sin datos atípicos	Cantidad	$\bar{x}$ MOR (MPa)	S MPa	CV	Min MPa	Max MPa	Rango MPa	Percentil 5% MPa
	6	22.29	1.94	0.09	19.79	25.02	5.23	20.05

Tabla 52. Módulo de rotura **MOR** para el grupo F1 de vigas de MLAMW.

El módulo de rotura **MOR** para el grupo F1 de vigas de MLAMW fue de 22.29 MPa.

El resumen de los resultados para módulo de rotura **MOR** para los 5 grupos sin datos atípicos de análisis se muestran en la Tabla 53:

VIGAS PRISMÁTICAS – MLAMW						
Parámetro	Estadístico	F1	F2	F3	F4	F5
MOR	$\bar{x}$ (MPa)	22.29	16.94	16.40	16.24	19.74
	S (MPa)	1.94	1.34	1.61	2.25	3.66
	CV	0.09	0.08	0.10	0.14	0.19
	Min (MPa)	19.79	15.32	14.72	11.74	14.18
	Max (MPa)	25.02	18.72	18.30	19.08	25.76
	Rango (MPa)	5.23	3.41	3.58	7.34	11.58
	Percentil 5%	20.05	15.49	14.90	12.10	14.76

Tabla 53. Módulo de rotura **MOR** para los 5 grupos de MLAMW.

Con base en los 5 valores promedio obtenidos para módulo de rotura **MOR** y la exclusión de los datos atípicos, se estimó un valor promedio general para las el **MOR** de las vigas de MLAMW; el resultado se muestra en la Tabla 54:

MOR VIGAS PRISMÁTICAS MLAMW							
Cantidad	$\bar{x}$ MOR (MPa)	S MPa	CV	Min MPa	Max MPa	Rango MPa	Percentil 5% MPa
4	17.33	1.64	0.09	16.24	19.74	3.50	16.42

Tabla 54. Módulo de rotura **MOR** para vigas de MLAMW.

El valor promedio de módulo de rotura **MOR** para las vigas de MLAMW fué de 17.33 MPa.

El 95 % de los resultados de módulo de rotura **MOR** para las vigas de MLAMW fué superior a 16.42 MPa

5.7 Módulo de elasticidad aparente

E_{ap} en vigas de MLAMW

El módulo de elasticidad aparente E_{ap} para las vigas de MLAMW se calculó de acuerdo con la metodología descrita en el numeral 1.2.18 y con la definición dada por la ecuación (5.3).

$$E_{ap} = \frac{P' a}{4bh^3 \Delta} * (3L^2 - 4a^2) \quad (5.3)$$

Se reemplazaron en la ecuación (5.3) los datos correspondientes a la carga máxima en el límite de proporcionalidad, deflexión máxima en el centro de la luz para el límite de proporcionalidad, las dimensiones propias de cada viga y las distancias definidas por las condiciones para la ejecución de los ensayos descritas en el numeral 1.2.15 para el equipamiento N1 y en el numeral 1.2.16 para el equipamiento N2.

Los datos para calcular el módulo de elasticidad aparente E_{ap} para la viga NTC 5950-F-1-1 de MLAMW se muestran en la Tabla 55.

Datos para E_{ap}		
Viga	F1-1	
b	0.052	m
h	0.101	m
P'	1.953	kN
a	0.635	m
L	1.906	m
Δ	0.012	m

Tabla 55. Datos para cálculo del módulo de elasticidad aparente E_{ap} para la viga F1-1 de MLAMW.

Las tablas con los datos para el cálculo del módulo de elasticidad aparente E_{ap} para la totalidad de las vigas prismáticas de MLAMW se muestran en el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

A continuación se muestran las gráficas de carga aplicada contra deflexión en el centro de la luz para los grupos NTC-5950-F1 en la Figura 51, NTC-5950-F2 en la Figura 52, NTC-5950-F3 en la Figura 53, NTC-5950-F4 en la Figura 54 y NTC-5950-F5 en la Figura 55.

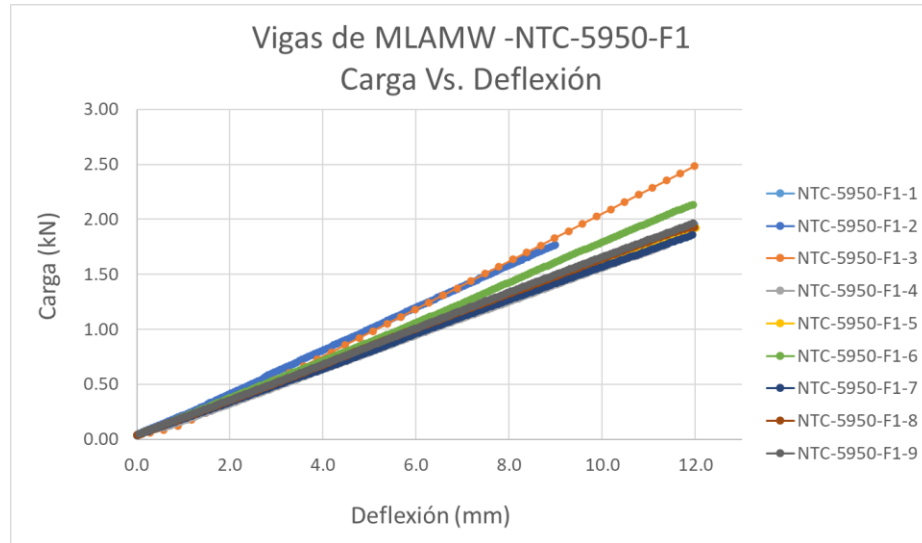


Figura 51. Curvas de carga contra deflexión en el centro de la luz para vigas de MLAMW NTC5950-F1.

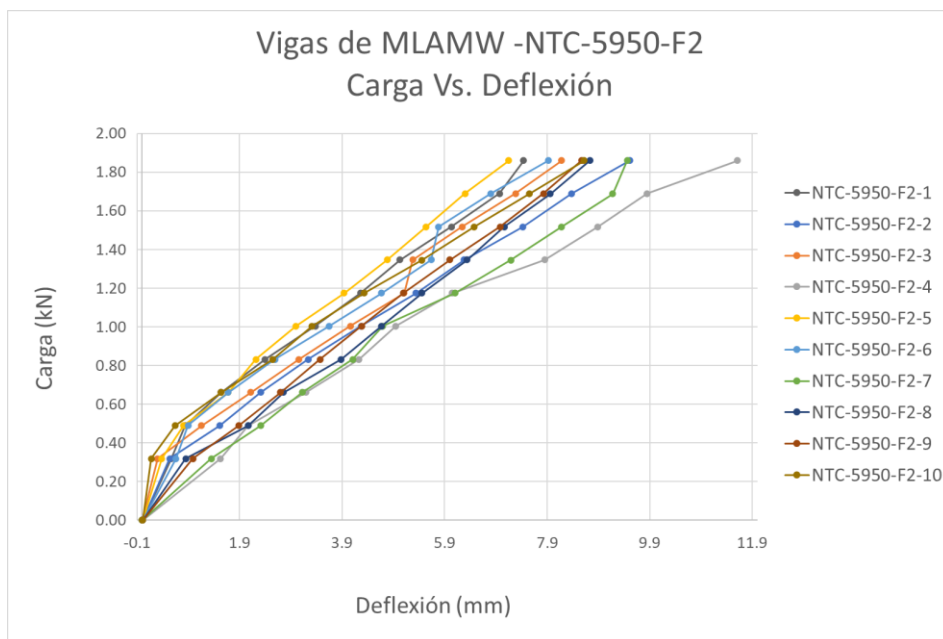


Figura 52. Curvas de carga contra deflexión en el centro de la luz para vigas de MLAMW NTC-5950-F2.

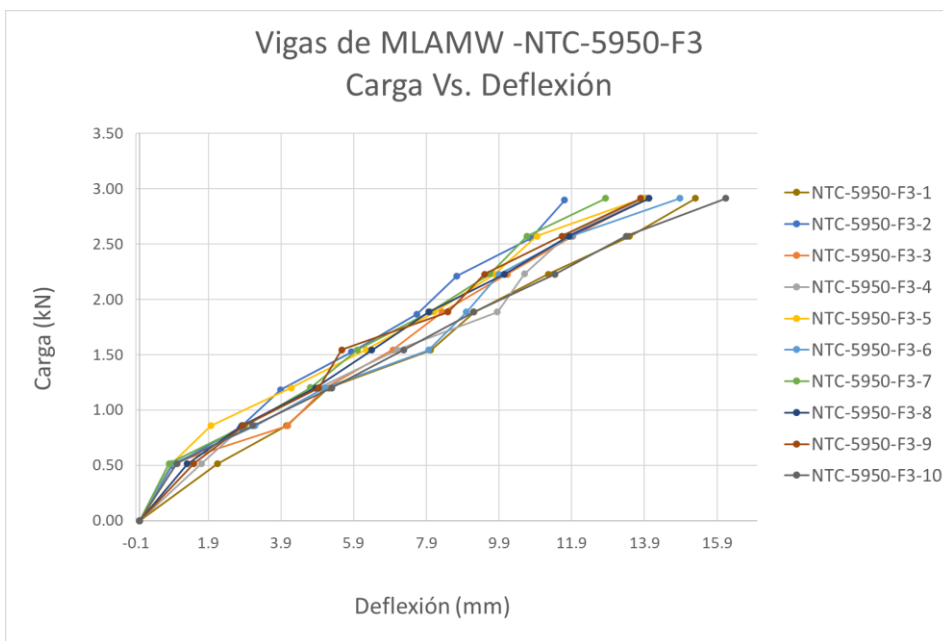


Figura 53. Curvas de carga contra deflexión en el centro de la luz para vigas de MLAMW NTC-5950-F3.

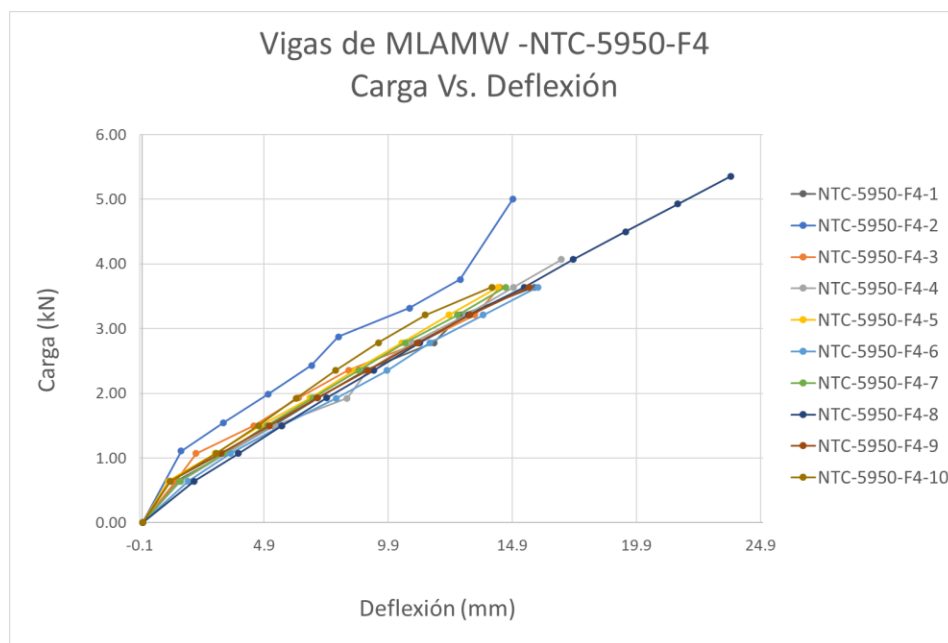


Figura 54. Curvas de carga contra deflexión en el centro de la luz para vigas de MLAMW NTC-5950-F4.

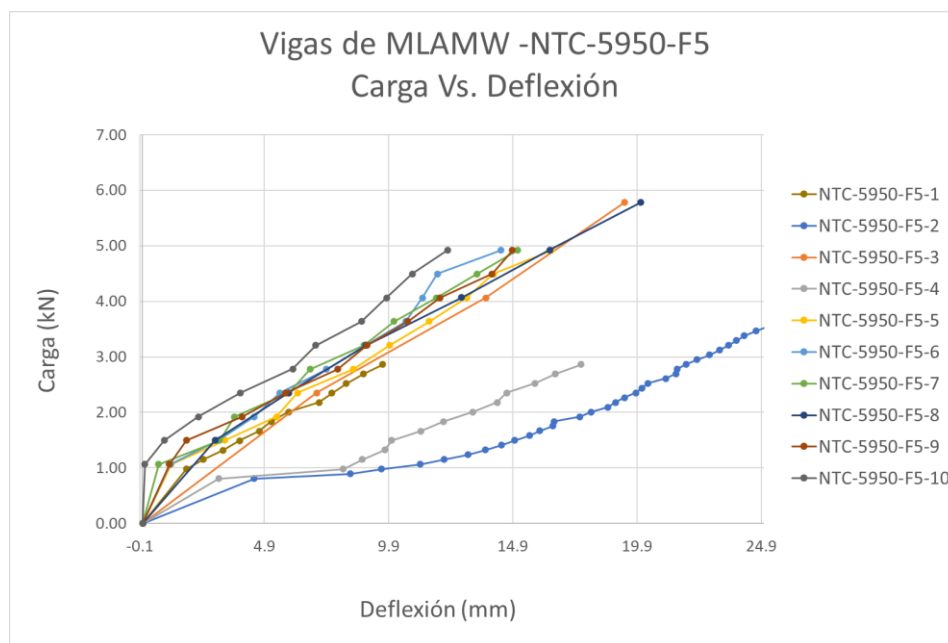


Figura 55. Curvas de carga contra deflexión en el centro de la luz para vigas de MLAMW NTC-5950-F5.

Los resultados del módulo de elasticidad aparente E_{ap} para las vigas de MLAMW se muestran en la Tabla 56:

Propiedad	Parámetro	F1	F2	F3	F4	F5
Eap	$\bar{x}$ (MPa)	9334.80	10246.80	9250.13	9249.38	-
	S (MPa)	427.04	1141.11	573.98	483.46	743.82
	CV	0.05	0.11	0.06	0.05	0.07
	S^2 (MPa ²)	182363.76	1302124.64	329448.90	233737.81	553266.52
	Min (MPa)	8907.72	7911.11	8107.02	8674.15	10122.65
	Max (MPa)	9913.05	11456.05	10131.23	10024.98	12200.78
	Rango (MPa)	1005.33	3544.94	2024.20	1350.84	2078.13
	Percentil 5%	8957.99	8088.36	8208.24	8741.69	10226.56

Tabla 56. Resumen de estadísticos de módulo de elasticidad aparente E_{ap} para vigas prismáticas de MALMW.

Se excluyeron los datos atípicos de los 5 valores promedio obtenidos para módulo de elasticidad aparente E_{ap} para los grupos vigas de MLAMW.

Después de retirados los datos atípicos, se recalcularon los parámetros estadísticos descriptivos para el módulo de elasticidad aparente E_{ap} en vigas prismáticas de MALMW, el resultado se muestra en la Tabla 57:

Eap VIGAS PRISMÁTICAS MLAMW							
Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	Min	Max	Rango	Percentil
4	9520.28	486.00	0.05	9249.38	10246.80	997.42	9299.25

Tabla 57. Módulo de elasticidad aparente E_{ap} general para vigas de MLAMW.

El valor promedio obtenido para el módulo de elasticidad aparente E_{ap} para las vigas de MLAMW fué de 9520.28 MPa.

El 95 % de los resultados para el módulo de elasticidad aparente E_{ap} para las vigas de MLAMW fué superior a 9299.25 MPa

La magnitud promedio del CV entre los 5 grupos de vigas de MLAMW fue del 8.0 % con respecto al valor promedio del E_{ap} igual a 9832.28 MPa.

5.8 Módulo de elasticidad global en flexión *MOE* en vigas de MLAMW

El módulo de elasticidad global en flexión *MOE* o E_{mg} para vigas prismáticas de MLAMW se determinó con base en la metodología descrita en el numeral 1.2.19, los equipamientos N1 y N2 descritos en los numerales 1.2.15 y 1.2.16 respectivamente y con la definición dada por la ecuación (5.4) de la NTC 5950 (ICONTEC, 2012).

$$MOE = E_{mg} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb h} \right)} \quad (5.4)$$

Con las lecturas de carga máxima aplicada y deflexiones se ajustaron curvas de regresión lineal para determinar los incrementos de deflexión correspondientes con los incrementos de carga $F_2 - F_1$ sobre la línea de regresión ajustada.

Los datos para los ajustes de las curvas de regresión lineal para los 5 grupos de vigas de MLAMW se muestran en el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Los valores de los incrementos de carga sobre la línea de regresión $F_2 - F_1$ se estimaron como el 40% de F_{max} para F_2 y el 10% de F_{max} para F_1 .

Se reemplazaron en la ecuación (5.4) los datos correspondientes a los incrementos de carga sobre la línea de regresión $F_2 - F_1$, el incremento de deflexión en el centro de la luz correspondientes con los incrementos de carga sobre la línea de regresión $F_2 - F_1$, las dimensiones propias de las vigas, las dimensiones definidas por las condiciones de equipamiento y el módulo de elasticidad en cortante o módulo de rigidez G el cual se determinó de acuerdo en el numeral 5.9.

Los datos para calcular el módulo de elasticidad global en flexión *MOE* para la viga F1-1 de MLAMW se muestra en la Tabla 58:

Datos MOE	F1-1	
a	635.34	mm
L	1906.03	mm
b	52.41	mm
h	100.64	mm

Datos MOE	F1-1	
I	4452176.97	mm ⁴
F_{max}	8.51	kN
$0.1 F_{max}$	0.85	kN
$0.4 F_{max}$	3.40	kN
$F1 = 0.1 * F_{max}$	850.59	N
$F2 = 0.4 * F_{max}$	3402.35	N
G	835.48	N/mm ²
$w1$	2.48	mm
$w2$	10.47	mm
$3 * a * L^2$	6924476046.95	mm ³
$4 * a^3$	1025848303.25	mm ³
$2 * b * h^3$	106852247.25	mm ⁴
$w2 - w1$	8.00	mm
$F2 - F1$	2551.76	N
$6 * a$	3812.05	mm
$5 * G * b * h$	22035298016.00	N

Tabla 58. Datos para cálculo del módulo de elasticidad global en flexión **MOE** para viga F1-1.

Los datos para el cálculo del módulo de elasticidad global en flexión **MOE** para todas las vigas de MLAMW se muestran en el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Los resultados del cálculo del módulo de elasticidad global en flexión **MOE** para probetas de MAMW se muestran en la Tabla 59:

Propiedad	Parámetro	F1	F2	F3	F4	F5
MOE	$\bar{x}$ (MPa)	9178.13	-	8694.20	-	9210.72
	S (MPa)	414.91	996.76	527.11	274.37	555.92
	CV	0.05	0.10	0.06	0.03	0.06
	S^2 (MPa ²)	172154.38	993539.52	277848.99	75280.37	309050.69
	Min (MPa)	8798.12	7574.27	7556.99	8259.92	8280.63
	Max (MPa)	9823.27	10668.82	9396.48	8916.87	9731.27
	Rango (MPa)	1025.16	3094.55	1839.49	656.95	1450.64
	Percentil 5%	8849.38	7729.00	7648.96	8292.77	8353.17

Tabla 59. Resumen de estadísticos para módulo de elasticidad global en flexión **MOE** para vigas prismáticas de MLAMW.

Se excluyeron los datos atípicos de los 5 valores promedio obtenidos para módulo de elasticidad global **MOE** para los grupos de vigas de MLAMW.

Después de retirados los valores extremos, se recalcularon los parámetros estadísticos descriptivos para el módulo de elasticidad global en flexión **MOE** en vigas prismáticas de MALMW, el resultado se muestra en la Tabla 60:

MOE VIGAS PRISMÁTICAS MLAMW							
Cantidad	$\bar{x}$ MOE (MPa)	S MPa	CV	Min MPa	Max MPa	Rango MPa	Percentil 5% MPa
3	9027.68	289.27	0.03	8694.20	9210.72	516.52	8720.02

Tabla 60. Módulo de elasticidad global en flexión **MOE** para vigas prismáticas de MLAMW.

El valor promedio obtenido para el módulo de elasticidad global en flexión **MOE** de las vigas de MAMW fué de 9027.68 MPa.

El 95 % de los resultados para el módulo de elasticidad global en flexión **MOE** de las vigas de MAMW fue superior a 8720.02 MPa

5.9 Módulo de elasticidad en cortante **G** en vigas prismáticas de MLAMW

El módulo de elasticidad en cortante **G** de probetas de MLAMW se determinó con base en la metodología descrita en el numeral 1.2.20, por tanto, se determinó la deformación angular y los esfuerzos cortantes por flexión en el eje neutro correspondientes.

La deformación angular, en radianes, γ_{xy} ; se calculó a partir de las lecturas de las deformaciones obtenidas con las rosetas o deformímetros triaxiales y la ecuación (5.5).

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c \quad (5.5)$$

Se instalaron 2 rosetas en las vigas de MLAMW por cada grupo de 10 unidades, las vigas con galgas instaladas se listan en la Tabla 61:

GRUPO	Vigas de MLAMW instrumentadas con rosetas
F1	F1-1
	F1-6
F2	F2-3
	F2-7
F3	F3-9
	F3-10
F4	F4-3
	F4-6
F5	F5-7
	F5-9

Tabla 61. Listado de vigas de MLAMW instrumentadas con deformímetros triaxiales.

Los esfuerzos cortantes por flexión, definidos en el numeral 1.2.4 , fueron generados por la aplicación de las cargas puntuales en los tercios centrales de la luz y se determinaron con la ecuación (5.6).

$$\tau_{max} = \frac{3V}{2A} \quad (5.6)$$

Los datos para el cálculo del módulo de elasticidad en cortante G de las vigas de MLAMW se presentan en el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** A continuación, se muestra el procedimiento para la determinación de G de la viga MLAMW F1-1.

Con los datos calculados para el esfuerzo cortante y la deformación angular se ajustó una regresión lineal simple. La pendiente de la curva de regresión (Figura 56) corresponde al módulo de rigidez G de la viga de MLAMW F1-1.

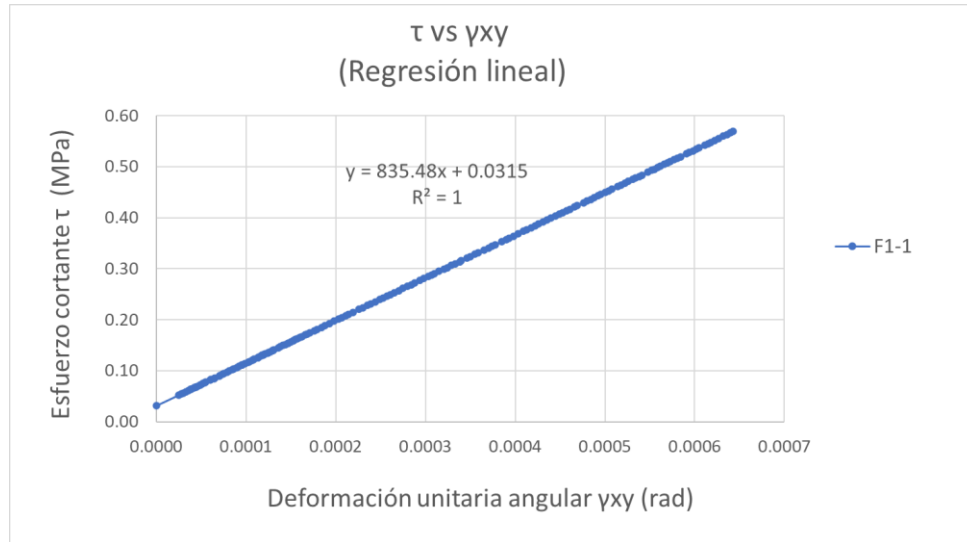


Figura 56. Curva de regresión lineal para determinación del módulo de elasticidad en cortante G para la viga de MLAMW F1-1.

Los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad en cortante G para probetas de MAMW se muestran en la Tabla 62:

Propiedad	Parámetro	F1	F2	F3	F4	F5
G	$\bar{x}$ (MPa)	647.49	498.42	523.59	458.46	-
	S (MPa)	265.86	94.24	45.82	88.35	423.12
	CV	0.41	0.19	0.09	0.19	0.39
	S^2 (MPa ²)	70679.94	70679.94	70679.94	70679.94	70679.94
	Min (MPa)	459.50	431.79	491.19	395.98	785.07
	Max (MPa)	835.48	565.06	555.99	520.93	1383.46
	Rango (MPa)	375.98	133.27	64.80	124.95	598.38
	Percentil 5%	478.30	478.30	478.30	478.30	478.30

Tabla 62. Resumen de estadísticos para de módulo de elasticidad en cortante G para vigas de MLAMW.

Se removieron los datos atípicos de los 5 valores promedio obtenidos para módulo de elasticidad en cortante G de las vigas de MLAMW.

Después de retirados los datos atípicos, se recalcularon los parámetros estadísticos descriptivos para el módulo de elasticidad en cortante G en vigas prismáticas de MLAMW, el resultado se muestra en la Tabla 63:

Cantidad	$\bar{x}$ G (MPa)	S MPa	CV	Min MPa	Max MPa	Rango MPa	Percentil 5% MPa
4	531.99	81.54	0.15	458.46	647.49	189.03	467.91

Tabla 63. Módulo de elasticidad en cortante G para vigas prismáticas de MLAMW.

El resultado promedio para el módulo de elasticidad en cortante G para vigas de MLAMW fué de 531.99 MPa.

El 95 % de los resultados para para el módulo de elasticidad en cortante G para vigas de MLAMW fué superior a 476.91 MPa.

5.10 Contenido de humedad $W\%$ de vigas de MLAMW sometidas a ensayos de flexión.

El contenido de humedad $W\%$ se determinó para cada una de las vigas de MLAMW utilizadas en los ensayos de flexión de 4 puntos para determinar los valores del módulo de rotura **MOR**, módulo de elasticidad aparente **Eap**, el modulo de elasticidad global **MOE** y el modulo de elasticidad en cortante o de rigidez G .

Los resultados del contenido de humedad $W\%$ se reportaron por grupo de análisis y se muestran en la Tabla 64.

VIGAS PRISMÁTICAS - MLAMW						
Propiedad	Parámetro	F1	F2	F3	F4	F5
W%	$\bar{x}$ (MPa)	13.62	13.71	12.87	14.39	15.06

VIGAS PRISMÁTICAS - MLAMW						
Propiedad	Parámetro	F1	F2	F3	F4	F5
	S (MPa)	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73
	CV	0.13	0.05	0.06	0.09	0.09
	Min (MPa)	11.86	12.61	12.13	12.83	12.82
	Max (MPa)	17.36	14.71	14.04	16.56	16.57
	Rango (MPa)	5.50	2.10	1.91	3.73	3.75
	Percentil 5%	12.14	12.71	12.23	13.02	13.01

Tabla 64. Resumen de estadísticos descriptivos para el contenido de humedad $W\%$ de las vigas de MLAMW ensayadas a flexión.

El resumen de estadísticos descriptivos para el contenido de humedad $W\%$ general de las vigas de MLAMW ensayadas a flexión se muestra en la Tabla 65:

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	S^2	Min	Max	Rango	Percentil 5%
3	$W\%$	$W\%$	0.03	$W\%^2$	$W\%$	$W\%$	$W\%$	$W\%$
	13.91	0.42		0.18	13.62	14.39	0.77	13.66

Tabla 65. Resumen de estadísticos descriptivos para el contenido de humedad $W\%$ para las vigas de MLAMW sometidas a ensayos de flexión.

Luego de remover datos atípicos, el contenido de humedad $W\%$ promedio general para las probetas de MLAMW sometidas a flexión fue del 13.91%.

5.11 Determinación del esfuerzo máximo de corte

τ_{max} en vigas cortas de MLAMW.

La determinación del esfuerzo máximo de corte τ_{max} en las vigas cortas de MLAMW se estimó con base en la identificación visual del modo de falla de las vigas y la carga máxima aplicada.

El esfuerzo máximo de corte τ_{max} en vigas cortas de MLAMW se calculó de acuerdo con la metodología descrita en el numeral 3.13 y con la definición del esfuerzo cortante máximo dada por la ecuación (5.7):

$$\tau_{max} = \frac{3V_{max}}{2A} \quad (5.7)$$

Donde

V_{max} = Fuerza cortante máxima

A = Área de la sección transversal

Se reemplazaron los datos correspondientes a la fuerza cortante máxima y las dimensiones propias de cada viga de acuerdo con la Tabla 10. El ensayo se realizó de acuerdo con el equipamiento N1 descrito en el numeral 1.2.15.

El modo de falla por cortante se definió como aquel que produce un desplazamiento relativo entre las lamelas en alguno de los tercios extremos de las vigas de MLAMW.

Los datos para calcular el esfuerzo máximo de corte τ_{max} del grupo de vigas cortas NTC-663-F5 se muestran en la Tabla 66, los datos para calcular el esfuerzo máximo de corte τ_{max} de las vigas cortas de MLAMW para los grupos NTC-663-F1, NTC-663-F2, NTC-663-F3 y NTC-663-F4 se muestran en el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Viga	Promedio dimensiones			F_{Max} kN
	Base (m)	Altura (m)	Longitud (m)	
NTC-663-F5-1	0.089	0.179	0.722	99.05
NTC-663-F5-2	0.089	0.179	0.708	68.31
NTC-663-F5-3	0.089	0.179	0.724	93.05
NTC-663-F5-4	0.089	0.179	0.718	84.84
NTC-663-F5-6	0.089	0.179	0.716	85.82
NTC-663-F5-7	0.089	0.178	0.728	100.49
NTC-663-F5-8	0.089	0.179	0.724	70.40

Viga	Promedio dimensiones			F_{Max} kN
	Base (m)	Altura (m)	Longitud (m)	
NTC-663-F5-9	0.089	0.179	0.715	89.69
NTC-663-F5-10	0.089	0.179	0.714	63.48

Tabla 66. Datos para calcular el esfuerzo máximo de corte τ_{max} para las vigas cortas de MLAMW del grupo NTC-663-F5.

Los datos se organizaron y se calculó el esfuerzo cortante máximo τ_{max} , luego se identificaron los modos de falla por cortante de las vigas cortas de MLAMW, la verificación se realizó con ayuda del registro fotográfico mostrado en el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Los resultados obtenidos para el grupo NTC-663-F5 se muestran en la Tabla 67:

Viga	Modo de falla	F_{Max} kN	τ_{max} . MPa
NTC-663-F5-1	Cortante	99.05	4.68
NTC-663-F5-2	Cortante	68.31	3.22
NTC-663-F5-3	-	-	-
NTC-663-F5-4	Flexión	-	-
NTC-663-F5-5	Cortante	93.59	4.46
NTC-663-F5-6	Flexión	-	-
NTC-663-F5-7	Cortante	100.49	4.77
NTC-663-F5-8	Cortante	70.40	3.33
NTC-663-F5-9	Flexión	-	-
NTC-663-F5-10	Cortante	63.48	2.99

Tabla 67. Resultados para determinación del modo de falla y esfuerzo cortante máximo τ_{max} para vigas cortas del grupo NTC-663-F5.

Se descartó la probeta NTC-663-5-3 por las condiciones del ensayo.

Los estadísticos descriptivos para el esfuerzo máximo de corte τ_{max} en vigas cortas de MLAMW para el grupo NTC-663-F5 se muestran en la Tabla 68:

τ max - NTC-663-F5 - VIGAS CORTAS MLAMW							
Cantidad	$\bar{x}$ τ max. (MPa)	S MPa	CV	Min MPa	Max MPa	Rango MPa	Percentil 5% MPa
6	3.91	0.81	0.21	2.99	4.77	1.79	3.08

Tabla 68. Resumen de estadísticos descriptivos para esfuerzo máximo de corte τ_{max} en vigas cortas de MLAMW del grupo NTC-663-F5.

El valor promedio obtenido para el esfuerzo máximo de corte τ_{max} en vigas cortas de MLAMW fue de 3.91 MPa.

EL resumen de resultados obtenidos para el esfuerzo máximo de corte τ_{max} de los 5 grupos vigas cortas de MLAMW ensayadas se muestra en la Tabla 69:

Grupo	F max (kN)	τ max. (MPa)
NTC-663-F1	31.31	4.57
NTC-663-F2	26.62	2.83
NTC-663-F3	49.12	3.95
NTC-663-F4	52.91	3.15
NTC-663-F5	82.56	3.91

Tabla 69. Resumen esfuerzo máximo de corte τ_{max} para los 5 grupos de vigas cortas de MLAMW.

El resultado promedio para máximo de corte τ_{max} para los 5 grupos de vigas cortas de MLAMW ensayadas se muestra en la Tabla 70:

τ max VIGAS CORTAS MLAMW							
Cantidad	$\bar{x}$ τ max. (MPa)	S MPa	CV	Min MPa	Max MPa	Rango MPa	Percentil 5% MPa
5	3.68	0.69	0.19	2.83	4.57	1.74	2.92

Tabla 70. Resultado promedio para esfuerzo máximo de corte τ_{max} para los 5 grupos de vigas cortas de MLAMW.

Después de remover datos atípicos se obtuvo los datos mostrados en la Tabla 71:

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	S ²	Min	Max	Rango	Percentil
	τ max. (MPa)	MPa		MPa ²	MPa	MPa	MPa	MPa

3	3.67	0.45	0.12	0.20	3.15	3.95	0.79	3.19
---	------	------	------	------	------	------	------	------

Tabla 71. Resultado promedio para esfuerzo máximo de corte τ_{max} para los 5 grupos de vigas cortas de MLAMW sin datos atípicos.

El valor promedio para esfuerzo máximo de corte τ_{max} para los 5 grupos de vigas cortas de MLAMW fué de 3.68 MPa.

El 95 % de los resultados para esfuerzo máximo de corte τ_{max} para los 5 grupos de vigas cortas de MLAMW fué mayor a 2.92 MPa

El contenido de humedad $W\%$ para cada grupo de vigas de MLAMW utilizadas para calcular el esfuerzo máximo de corte τ_{max} se muestra en la Tabla 72:

Grupo	W %
NTC-663-F1	11.94
NTC-663-F2	12.44
NTC-663-F3	11.40
NTC-663-F4	9.42
NTC-663-F5	9.62

Tabla 72. Contenido de humedad para cada grupo de vigas cortas de MLAMW.

El contenido de humedad $W\%$ para cada grupo de vigas de MLAMW utilizadas para calcular el esfuerzo máximo de corte τ_{max} se muestra en la Tabla 73 :

W% - VIGAS CORTAS MLAMW							
Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	Min	Max	Rango	Percentil 5%
5	10.96	1.37	0.12	9.42	12.44	3.02	9.57

Tabla 73. Resumen de estadísticos descriptivos para el contenido de humedad $W\%$ para las probetas para calcular el esfuerzo máximo de corte τ_{max} en vigas cortas de MLAMW.

El contenido de humedad promedio $W\%$ para los 5 grupos de vigas cortas de MLAMW fué de 10.96%.

5.12 Determinación de la resistencia al cortante paralelo al grano σ_{czad} en la línea de pegado con adhesivo **MUF**.

La resistencia al cortante paralelo al grano $\sigma_{czad} = \frac{P}{S}$ en la línea de pegado con adhesivo MUF para probetas de MLAMW se estimó como la fuerza máxima de corte aplicada a las probetas dividida en entre el área de pegado entre las lamelas.

El ensayo se realizó utilizando la metodología mostrada en el numeral 1.2.21 y con el equipamiento mostrado en la Figura 29.

La resistencia máxima de rotura a corte σ_{czad} aportada por el adhesivo **MUF** entre lamelas se determinó mediante la ecuación (5.8):

$$\sigma_{czad} = \frac{P}{S} \quad (5.8)$$

Donde P corresponde a la carga máxima soportada por la probeta laminada y S a la superficie del plano en que se produce el cizallamiento.

Los datos y los resultados para el cálculo de la resistencia máxima de rotura a corte σ_{czad} aportada por el adhesivo **MUF** se muestran en la Tabla 74:

Probeta	S mm ²	P kN	σ_{czad} MPa
1	2575.43	10.28	3.99
2	2594.16	13.43	5.18
3	2673.66	17.38	6.50
4	2562.64	3.99	1.56
5	2569.70	13.85	5.39
6	2554.10	9.53	3.73
7	3358.46	13.82	4.11
8	2564.28	8.80	3.43
9	2633.32	2.74	1.04
10	2595.12	13.70	5.28

Tabla 74. Datos y resultados para la resistencia máxima de rotura a corte σ_{czad} aportada por el adhesivo **MUF**.

El resumen de estadísticos descriptivos para los resultados de la resistencia máxima de rotura a corte σ_{czad} aportada por el adhesivo **MUF** se muestra en la Tabla 75:

Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	S ²	Min	Max	Rango	Percentil
7	σ_{czad} (MPa)	MPa	0.18	MPa ²	MPa	MPa	MPa	MPa
	4.45	0.81		0.66	3.43	5.39	1.96	3.53

Tabla 75. Resumen de estadísticos descriptivos para los resultados de la resistencia máxima de rotura a corte σ_{czad} aportada por el adhesivo **MUF**.

El valor promedio máximo de la resistencia a cortante σ_{czad} aportada por el adhesivo **MUF** en la línea de pegado para probetas de MLAMW fué de 4.45 MPa.

El 95% de los resultados del valor promedio máximo de la resistencia a cortante σ_{czad} aportada por el adhesivo **MUF** en la línea de pegado para probetas de MLAMW fué superior a 3.53 MPa.

Al comparar el esfuerzo máximo de corte τ_{max} promedio en vigas cortas de MLAMW con la resistencia promedio a cortante σ_{czad} aportada por el adhesivo **MUF** en la línea de pegado para probetas de MLAMW, se observa que σ_{czad} es mayor que τ_{max} un 17.3%.

La diferencia entre la resistencia al corte en las probetas de MLAMW y las vigas cortas de MLAMW podría estar en que las probetas pequeña de MLAMW no fueron sometida a esfuerzos de corte anteriormente, como si lo estuvieron las vigas cortas de MLAMW, que en un momento previo formaron parte de los tercios extremos de las vigas largas de MLAMW, que se fallaron a flexión.

El contenido de humedad **W**% para las probetas de MLAMW para determinar la resistencia máxima de rotura a corte σ_{czad} aportada por el adhesivo **MUF** se muestra en la Tabla 77:

W% - PROBETAS DE MLAMW PARA DETERMINACION DE σ_{czad}								
Cantidad	$\bar{x}$	S	CV	S ²	Min	Max	Rango	Percentil
7	W %	%	0.03	% ²	%	%	%	%
	15.15	0.48		0.23	14.47	15.85	1.38	14.54

Tabla 76. Contenido de humedad **W**% para las probetas de MLAMW para determinar la resistencia máxima de rotura a corte σ_{czad} aportada por el adhesivo **MUF**

El contenido de humedad **W**% para las probetas de MLAMW para determinar la resistencia máxima de rotura a corte σ_{czad} aportada por el adhesivo **MUF** fue de 15.10%.

6 Comportamiento a compresión de columnas de MLAMW

En este capítulo se muestra el cálculo para la determinación del módulo de elasticidad a compresión de la MLAMW, los valores experimentales del esfuerzo axial máximo para probetas con diferentes relaciones de esbeltez y la gráfica esfuerzo crítico en función de relación de esbeltez.

6.1 Determinación del módulo de elasticidad $E_{c//lam}$ a compresión para probetas de MLAMW

Determinación del módulo de elasticidad $E_{c//lam}$ a compresión para probetas de MLAMW

El módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ para probetas de MLAMW se calculó de acuerdo con la metodología descrita en el numeral 3.14 y la definición dada por la ecuación (3.19).

Los datos para calcular el módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ para probetas de MLAMW se muestran en el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Conocidos los datos de carga aplicada, los acortamientos registrados por el extensómetro digital y las dimensiones de las probetas de MLAMW, se calculó el esfuerzo normal y la deformación unitaria longitudinal para cada una de las probetas.

Se graficaron las curvas de esfuerzo contra deformación con los datos calculados para observar la dispersión de los resultados, ajustar los datos y descartar datos atípicos (Figura 57).

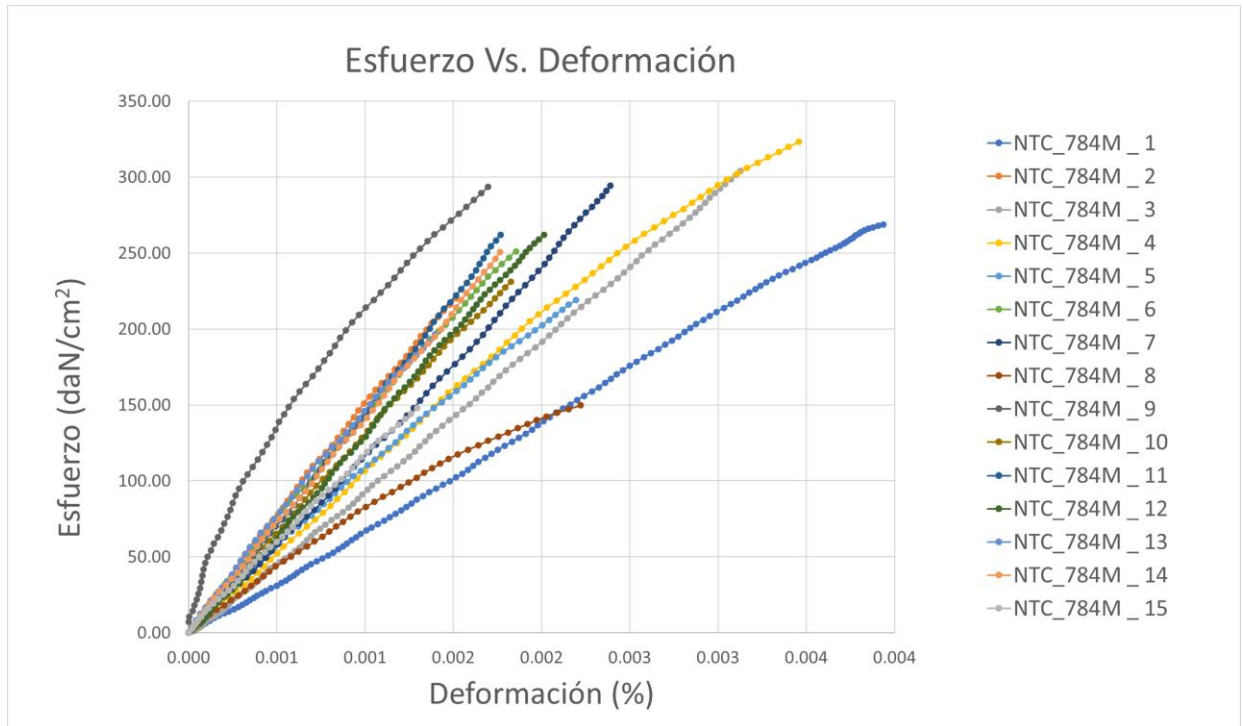


Figura 57. Gráfica esfuerzo deformación a compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ de las probetas de MLAMW.

Para la determinación del módulo de elasticidad se tomó un rango desde el origen hasta el 60% de la carga máxima P resistida por la probeta debido a que gráficamente se observó que en dicho punto aún se conserva la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación.

Se ajustaron regresiones lineales para determinar el acortamiento de las probetas correspondientes en el rango elástico.

Los datos para el ajuste de las regresiones lineales para la totalidad de probetas de MLAMW se muestran en el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Los resultados del módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ de las probetas de MLAMW se muestran en la Tabla 77:

Tipo	$E_c //$ (daN/cm ²)	$E_c //$ (MPa)
NTC_784M _ 1	-	-
NTC_784M _ 2	159479.03	15947.90
NTC_784M _ 3	98603.57	9860.36
NTC_784M _ 4	-	-
NTC_784M _ 5	114501.62	11450.16
NTC_784M _ 6	144362.18	14436.22
NTC_784M _ 7	122336.50	12233.65
NTC_784M _ 8	99642.34	9964.23
NTC_784M _ 9	-	-
NTC_784M _ 10	189232.98	18923.30
NTC_784M _ 11	177660.61	17766.06
NTC_784M _ 12	187198.33	18719.83
NTC_784M _ 13	-	-
NTC_784M _ 14	-	-
NTC_784M _ 15	135062.09	13506.21

Tabla 77. Resultados para módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ de las probetas de MLAMW.

El resumen de estadísticos descriptivos para el módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ de las probetas de MLAMW se muestra en la Tabla 78:

$E_c //$ probetas de MLAMW							
Cantidad	$\bar{x}$ $E_c //$ (MPa)	S MPa	CV	Min MPa	Max MPa	Rango MPa	Percentil 5% MPa
10	14280.79	3451.00	0.24	9860.36	18923.30	9062.94	10313.50

Tabla 78. Resumen de estadísticos descriptivos para módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ de las probetas de MLAMW.

El valor promedio obtenido para el módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ de las probetas de MLAMW fué de 14280.79 MPa.

El 95 % de los resultados para el módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ de las probetas de MLAMW fue superior a 10313.50 MPa.

El contenido de humedad $W\%$ de las probetas ensayadas a compresión paralelo al grano para la determinación de $E_{c//lam}$ se muestra en la Tabla 79:

Tipo	Contenido de humedad W (%)
NTC_784M _ 1	11.67
NTC_784M _ 2	9.67
NTC_784M _ 3	12.33
NTC_784M _ 4	11.33
NTC_784M _ 5	14.33
NTC_784M _ 6	11.67
NTC_784M _ 7	11.00
NTC_784M _ 8	12.67
NTC_784M _ 9	11.00
NTC_784M _ 10	11.33
NTC_784M _ 11	12.00
NTC_784M _ 12	13.00
NTC_784M _ 13	10.67
NTC_784M _ 14	11.33
NTC_784M _ 15	12.33

Tabla 79. Contenido de humedad $W\%$ para probetas solicitadas de MLAMW a compresión paralelo al grano para la determinación de $E_{c//lam}$

El resumen de estadísticos descriptivos para el contenido de humedad $W\%$ de las probetas de MLAMW a compresión paralelo al grano para la determinación de $E_{c//lam}$ de las probetas (Munévar, Quintero et al., 2023) se muestra en la Tabla 80:

W% de probetas de MLAMW							
Cantidad	$\bar{x}$ W%	S %	CV	Min %	Max %	Rango %	Percentil 5% %
15	11.76	1.10	0.09	9.67	14.33	4.67	9.90

Tabla 80. Resumen de estadísticos descriptivos para contenido de humedad $W\%$ de probetas de MLAMW a compresión paralelo al grano para la determinación de $E_{c//lam}$

El contenido de humedad $W\%$ para probetas utilizadas para determinar el módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ de las probetas de MLAMW fue de 11.76%.

6.2 Esfuerzo axial máximo para tres grupos de columnas con respecto a seis relaciones de esbeltez diferentes.

Los valores experimentales del esfuerzo axial máximo se calcularon para 3 grupos de columnas de MLAMW utilizando la metodología descrita en el numeral 3.15. El factor de longitud efectiva K fue estimado igual a 1.0.

Se definieron 3 rangos de relación de esbeltez λ para estimar el comportamiento a compresión de las columnas (Tabla 81).

Rango	Relación de esbeltez λ	Comportamiento a compresión
1	$0 < \lambda \leq 40$	Columnas cortas
2	$40 < \lambda \leq 120$	Columnas intermedias
3	$120 < \lambda$	Columnas largas

Tabla 81. Definición del comportamiento a compresión en función de la relación de esbeltez. (Munévar, Quintero et al., 2023)

Se calcularon esfuerzos normales máximos de falla y esfuerzos críticos de pandeo para las columnas de MLAMW ensayadas.

Los resultados de los ensayos de compresión para los grupos G4, G5 y G6 se muestran en el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Se graficaron los datos con el objetivo de observar la dispersión entre esfuerzos y relaciones de esbeltez, encontrando lo siguiente:

- Para el rango 1 las columnas presentan un comportamiento que se puede justar a una recta de pendiente cero.
- Para el rango 2 las columnas presentan un comportamiento que se puede estimar como una línea recta con pendiente negativa.
- Para el rango 3 las columnas cumplen con la definición de esfuerzo crítico de Euler.

Se ajustaron funciones para los esfuerzos de compresión teniendo como criterio que el 95% de los datos se encuentren por encima de las curvas ajustadas para cada rango de relación de esbeltez.

La ecuación de esfuerzo por compresión en el rango 1 se define según la ecuación (6.1).

$$\sigma = 26.80 \text{ MPa} \quad (6.1)$$

La ecuación de esfuerzo por compresión en el rango 2, se define según la ecuación (6.2).

$$\sigma = -0.21 \text{ MPa} * \left(\frac{KL}{r}\right) + 35.31 \text{ MPa} \quad (6.2)$$

Para el rango 3, la ecuación de esfuerzo por compresión se define según la ecuación (6.3).

$$\sigma = \frac{\pi^2 * E_{c//lam}}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (6.3)$$

Donde $E_{c//lam}$ es igual a 14280.79 MPa.

Las curvas ajustadas y sus respectivas ecuaciones de esfuerzo por compresión por rangos se muestran en la Figura 58.

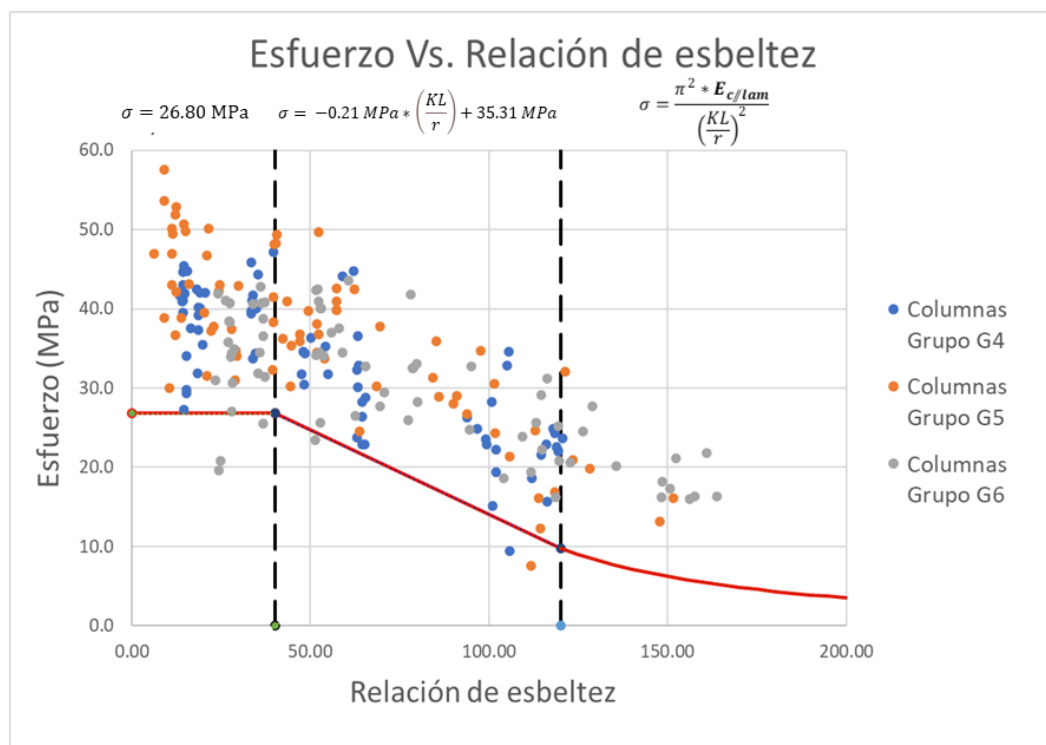


Figura 58. Valores experimentales para comportamiento a compresión de probetas de MLAMW en función de la relación de esbeltez para los 3 grupos analizados.

El contenido de humedad $W\%$ promedio de las probetas para ensayos de compresión se muestra por grupos en la Tabla 82, Tabla 83 y Tabla 84.

Grupo	G4							
Subgrupo	G4T1	G4T2	G4T3	G4T4	G4T5	G4T6	G4T7	G4T8
w prom. (%)	12.07	12.03	11.93	11.87	12.17	11.54	11.04	11.30

Tabla 82. Contenido de humedad $W\%$ promedio de las probetas de MLAMW para ensayos de compresión del grupo G4.

G5							
G5T1	G5T2	G5T3	G5T4	G5T5	G5T6	G5T7	G5T8
11.03	10.78	9.75	11.28	9.70	10.19	10.26	9.11

Tabla 83. Contenido de humedad $W\%$ promedio de las probetas de MLAMW para ensayos de compresión del grupo G5.

Grupo	G6					
Subgrupo	G6T1	G6T2	G6T3	G6T4	G6T5	G6T6
w prom. (%)	10.39	11.19	11.11	11.00	11.31	11.61

Tabla 84. Contenido de humedad $W\%$ promedio de las probetas de MLAMW para ensayos de compresión del grupo G6.

7 Conclusiones.

- Las propiedades físico-mecánicas encontradas de la MAMW utilizada en la fabricación de los laminados se listan en la Tabla 85:

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMW	Magnitud	Unidades
Peso específico [$PE_{CH=12\%}$]	0.654	g/cm^3
Resistencia por compresión axial paralela al grano [$\sigma_c//max$]	532.68	daN/cm^2
Resistencia a la compresión perpendicular al grano [$\sigma_c\perp$]	10.39	MPa
Resistencia a la compresión perpendicular al grano para deformación del 1% de espesor de probeta [$\sigma_c\perp 1\%$]	0.17	MPa
Esfuerzo unitario máximo en tracción paralela al grano [EM]	77.03	MPa
Esfuerzo unitario máximo a la tracción perpendicular al grano [RT]	2.76	MPa
Cizallamiento paralelo al grano [σ_z]	7.62	MPa

Tabla 85. Propiedades físico mecánicas de la MAMW utilizada para la fabricación de MLAMW.

- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para peso específico o densidad y módulo de elasticidad promedio, se compararon dichos valores con maderas de los grupos ES6 y ES5 del apéndice G-B del título G de la NSR-10, encontrando lo mostrado en la Tabla 86:

Tipo	Nombre científico	Nombre vulgar	DB (g/cm^3)	E0.5 (MPa)
N.A.	Acacia mangium Willd	Acacia	0.657	11686.47

ES6	Pinus Patula Schlecht	Pino Patula	0.430	10000.00
ES6	Tectona Grandis	Teca	0.530	10800.00
ES5	Erisma Uncinatum	Flor Morado Muerillo	0.470	11500.00

Tabla 86. Comparación de densidades y Modulos de elasticidad promedio.

Se puede ver que en términos de densidad y módulo de elasticidad la MAMW posee características comparables a las de la madera de las especies Pino Patula, Teca y Flor Morado Muerillo.

- No se encontró diferencia relevante entre las mediciones del contenido de humedad $W\%$ en comparación entre los procedimientos descritos por la NTC 206-1 y el uso del higrómetro digital, no obstante, se recomienda el uso de la normativa vigente debido a que es un proceso estandarizado de amplio uso en la practica de la ingeniería a nivel nacional, a pesar de que el uso del higrómetro digital es mucho mas sencillo y práctico.
- El valor promedio obtenido para el módulo de elasticidad **MOE** para vigas largas de MLAMW fue de 9027.68 MPa. La variación del módulo de elasticidad **MOE** para vigas largas de MLAMW se presenta en función del coeficiente de variación de los valores mostrados en la Tabla 60, cuyo resultado fue del 3.0% con respecto a la media de los grupos analizados. Con relación al módulo de elasticidad de la MAMW, se observa una reducción de resistencia, que posiblemente puedan ser generadas por las discontinuidades por las conexiones *finger joint* en la zona de tracciones de las vigas.
- El valor promedio obtenido para el módulo de rotura **MOR** para vigas largas de MLAMW fue de 17.33 MPa. La variación del módulo de rotura **MOR** para vigas largas de MLAMW se presenta en función del coeficiente de variación de los valores mostrados en la Tabla 54, con un coeficiente de variación del 9.0% con respecto a la media de los grupos analizados.
- El valor promedio obtenido para el módulo de elasticidad **G** en vigas largas de MLAMW fue de 531.99 MPa. La variación del módulo de elasticidad **G** en vigas

largas de MLAMW se presenta en función del coeficiente de variación de los valores reportados en la Tabla 63, cuyo resultado fue del 15% con respecto a la media del grupo de análisis. También se observó una reducción del modulo G de la MLAMW en comparación con el mismo parámetro G para la MAMW. Se debe investigar sobre la influencia de la localización de las conexiones tipo finger joint y la resistencia a la deformación angular de los miembros laminados.

- Aunque los parámetros mecánicos obtenidos para la MLAMW son de menor magnitud en términos de modulos de elasticidad en comparación con los de la MAMW, el uso de elementos de MLAMW se proyecta como una buena alternativa para su uso estructural ya que permite maximizar el uso del recurso natural que debe acompañarse por un buen criterio de diseño estructural.
- El valor promedio de resistencia al cizallamiento en la línea de pegado fue mayor en las probetas de MLAMW que en las vigas cortas de MLAMW, dicho fenómeno se pudo dar al factor de escala.
- El valor promedio obtenido para el esfuerzo máximo de corte τ_{max} en vigas cortas de MLAMW para para cinco longitudes fue de 3.68 MPa, con un coeficiente de variación del 19% con respecto a la media del grupo de análisis.
- El valor promedio obtenido para el esfuerzo máximo de corte τ_{max} en probetas pequeñas de MLAMW fue de 4.45 MPa, con un coeficiente de variación del 18% con respecto a la media del grupo de análisis.
- El valor del módulo de elasticidad en compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ fue de 14280,79 MPa con un coeficiente de variación del 24%. El valor mínimo fue de 9860,36 MPa, el máximo fue de 9062,94 MPa y el correspondiente al percentil 5 de 10313,50 MPa. j
- El modulo de elasticidad a compresión paralelo al grano $E_{c//lam}$ facilita el diseño de columnas con madera laminada de Acacia Mangium Willd, hace falta mas

investigación y probar dicha constante con elementos a escala de elementos estructurales reales.

- Se ajustaron funciones para el cálculo de los esfuerzos de compresión teniendo como criterio que el 95% de los datos experimentales se encuentren por encima de las curvas ajustadas para tres rangos de relación de esbeltez: comportamiento columnas cortas, intermedias y largas con base en un módulo de elasticidad $E_{c//lam}$ igual a 14280.79 MPa. Las expresiones para el esfuerzo por compresión por rangos son las mostradas en las ecuaciones (7.1), (7.2) y (7.3):

- Rango 1:

$$\sigma = 26.80 \text{ MPa} \quad (7.1)$$

- Rango 2:

$$\sigma = -0.21 \text{ MPa} * \left(\frac{KL}{r}\right) + 35.31 \text{ MPa} \quad (7.2)$$

- Rango 3:

$$\sigma = \frac{\pi^2 * E_{c//lam}}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (7.3)$$

8 Bibliografía

- Arbocenter. (2022). *Sementes de Acácia Mangium (Acacia mangium Wild.)*.
<https://www.sementesarbocenter.com.br/sementes-de-acacia-mangium.html>
- Arroyave, M. P., Posada, M. I., & Gutiérrez, M. E. (2014). *Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá*. <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/216>
- ASTM. (2015). *D198-15 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes*. <https://doi.org/10.1520/D0198-15>
- CAR Cundinamarca. (2014). *Maderas. Especies comercializadas en el territorio CAR: Guía para su identificación*.
- Feijoo Feijoo, E. C., Ramón Armijos, D. D., & Pucha Cofrep, D. A. (2018). *GUÍA PARA CORTES ANATÓMICOS DE LA MADERA*.
<https://www.researchgate.net/publication/329999339>
- Garzón López, C. D. (2022). *Caracterización de propiedades físicas y mecánicas para el uso estructural de la madera de la especie "Acacia Mangium."*
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2016). *MECÁNICA DE MATERIALES Octava edición*.
- ICONTEC. (1974a). *NTC 290 MADERAS. DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO APARENTE* (pp. 1–5).
- ICONTEC. (1974b). *NTC 784 MADERAS. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN AXIAL O PARALELA AL GRANO* (pp. 1–5).
- ICONTEC. (1975). *NTC 944 MADERAS. DETERMINACIÓN DE LA TRACCIÓN PARALELA AL GRANO*.
- ICONTEC. (2004). *NTC 5279 MÉTODOS DE ENSAYO ESTÁTICOS PARA MADERA EN TAMAÑOS ESTRUCTURALES*.

- ICONTEC. (2012). *NTC 5950 ESTRUCTURAS DE MADERA. MADERA ASERRADA Y MADERA LAMINADA ENCOLADA PARA USO ESTRUCTURAL. DETERMINACION DE ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS.* (p. 43). ICONTEC.
- ICONTEC. (2018). *NTC 206-2 MEDICIÓN DIRECTA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA MADERA Y MATERIALES A BASE DE MADERA* (pp. 1–16).
- Koutika, L. S., & Richardson, D. M. (2019). *Acacia mangium* willd: Benefits and threats associated with its increasing use around the world. In *Forest Ecosystems* (Vol. 6, Issue 1). SpringerOpen. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0159-1>
- Krisnawati, H., Kallio, M., & Kanninen, M. (2011). *Acacia mangium Willd: Ecology, silviculture and productivity.*
- Linero, D. L. (2017). *Apuntes de mecánica de sólidos.*
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2006). *INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL.*
- Munévar, J., Quintero, J., & Takeuchi, C. (2023). *STRESS VS. SLENDERNESS RATIO IN COMPRESSED LAMINATED ACACIA WOOD ELEMENTS.*
- PDADT-REFORD, J. del A. de C. (1982). *Manual de diseño para maderas del grupo andino.*
- Shahnewaz, M., Islam, M. S., Tannert, T., & Alam, M. S. (2019). Flange-notched wood I-joists reinforced with OSB collars: Experimental investigation and sensitivity analysis. *Structures*, 19, 490–498. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.02.009>
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, D. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias.*
- Yela, F. N. L., Tapia, C. P., & Escovar3, J. C. B. (2013). Caracterización Mecánica Estructural Para Veinte Combinaciones De Madera Laminada Encolada. *Colombia Forestal*, 16(2), 138–157. <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/article/view/3918/6990>

9 Anexos