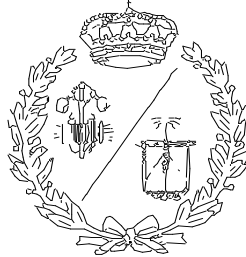


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**Análisis experimental del comportamiento de
ondas ultrasónicas en el seno de vigas de madera
laminada encolada acondicionadas
higrotérmicamente**

*Experimental analysis of the behaviour of ultrasonic waves in
hygrothermally conditioned glued-laminated timber beams*

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Francisco Bustamante Gutiérrez

Directores: Ramón Sancibrián Herrera

Ignacio Lombillo Vozmediano

Septiembre-2025

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	17
RESUMEN	20
ABSTRACT	21
AGRADECIMIENTOS.....	22
1 INTRODUCCIÓN.....	23
1.1 Objetivos	23
1.1.1 Objetivos Generales	23
1.1.2 Objetivos Específicos	24
1.2 Metodología del proyecto	25
1.3 Estructuración del documento.....	26
2 ESTADO DEL ARTE.....	28
2.1 La madera como elemento estructural	28
2.1.1 La construcción con madera a lo largo del tiempo.....	28
2.1.2 El futuro de la madera como elemento estructural	30
2.2 La madera desde su origen	33
2.2.1 La función de la madera en los árboles	33
2.2.2 Composición de la madera.....	34
2.2.3 Anatomía de la madera: partes del tronco de un árbol	34
2.2.4 Análisis microestructural: la madera a nivel celular.....	36
2.3 Propiedades de la madera	39
2.3.1 Propiedades y características físicas	39
2.3.2 Propiedades mecánicas	45
2.3.3 Otras propiedades de la madera	48
2.4 Defectos y anomalías de la madera	50
2.5 Corte de la madera	57
2.6 La madera laminada	63
2.6.1 Características de la madera laminada.....	63
2.6.2 La madera laminada encolada frente a la madera aserrada	66
2.7 La humedad de la madera.....	67
2.7.1 La humedad como concepto.....	67

2.7.2	La humedad en el campo de la madera.....	67
2.7.3	El movimiento del agua en la madera durante el secado	68
2.8	La técnica de los ultrasonidos	72
2.8.1	Ondas acústicas o sonoras y ultrasonidos.....	72
2.8.2	Propiedades de las ondas acústicas	73
2.8.3	Velocidad de propagación y tipos de ondas acústicas.	75
2.8.4	Fundamento teórico del ensayo de ultrasonidos	79
2.8.5	Factores con influencia en la velocidad de propagación.....	81
3	MATERIALES Y EQUIPOS DE ENSAYO	85
3.1	Materiales empleados.....	85
3.2	Equipos empleados durante los ensayos.....	88
3.2.1	Equipos para control dimensional y pesaje	88
3.2.2	Equipos para medición de condiciones ambientales.....	89
3.2.3	Equipos para medición del estado de las probetas	91
3.2.4	Equipo de ultrasonidos.....	94
3.2.5	Cámara de acondicionamiento higrotérmico.....	97
4	CAMPAÑA EXPERIMENTAL	101
4.1	Fase 0: Toma de medidas y comprobación de estado inicial.....	101
4.2	Fase 1: Prueba del equipo de ultrasonidos sobre probeta	101
4.3	Fase 2: Ensayos de ultrasonidos en vigas de madera.....	114
4.3.1	Gráficas de velocidades ultrasónicas de las vigas de madera de pino silvestre sin tratamiento.....	118
4.3.2	Gráficas de velocidades ultrasónicas de las vigas de madera de pino silvestre tanalizado	124
4.3.3	Gráficas de velocidades ultrasónicas de las vigas de madera de abeto	130
4.4	Fase 3: Acondicionamiento higrotérmico de la madera.....	136
4.4.1	Evolución del contenido de humedad en vigas sanas de pino silvestre sin tratamiento.....	140
4.4.2	Evolución del contenido de humedad en vigas sumergidas de pino silvestre sin tratamiento.....	142
4.4.3	Evolución del contenido de humedad en vigas sanas de pino silvestre tanalizado.....	143
4.4.4	Evolución del contenido de humedad en vigas sumergidas de pino silvestre tanalizado	145
4.4.5	Evolución del contenido de humedad en vigas sanas de abeto	147

4.4.6	Evolución del contenido de humedad en vigas sumergidas de abeto ..	148
5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	151
5.1	Potencial del método ultrasónico mediante transmisión indirecta para la determinación de posibles defectos o anomalías presentes en la en vigas de madera laminada encolada.....	151
5.2	Posible justificación de los picos de velocidad ultrasónica registrados al inicio de las gráficas obtenidas en la fase 2 del proyecto	151
5.2.1	Simulación del comportamiento de ondas ultrasónicas mediante el uso de software informático.....	153
5.2.1.1	Influencia de la separación entre transductores	154
5.2.1.2	Análisis de cómo los diferentes tipos de ondas ultrasónicas se propagan durante un ensayo.....	159
5.2.1.3	Influencia que tiene el espesor de la viga.....	161
5.3	Acondicionamiento higrotérmico y tendencia al equilibrio higroscópico (HEH)	163
5.4	Estudio de la afección a la velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas de la inmersión prolongada a la que fueron sometidas las vigas sumergidas.....	170
5.4.1	Velocidad de propagación en vigas de pino silvestre sin tratamiento ..	171
5.4.2	Velocidad de propagación en vigas de pino silvestre tanalizado....	172
5.4.3	Velocidad de propagación en vigas de abeto	174
5.5	Análisis de la influencia del tratamiento de tanalizado en la velocidad de transmisión de la onda ultrasónica.....	176
6	CONCLUSIONES	178
6.1	Detección y localización de defectos	178
6.2	Acondicionamiento higrotérmico.....	179
6.3	Afección a la velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas por la inmersión prolongada.....	180
6.4	Análisis la influencia del tratamiento de tanalizado en la velocidad de transmisión de la onda ultrasónica.....	180
6.5	Trabajos futuros.....	180
6.6	Relación del TFG con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	181
	REFERENCIAS.....	183
	ANEXO I: Registro fotográfico del estado inicial de las probetas de madera....	190
	ANEXO II: Vigas sanas añadidas en Fase 3	209
	Evolución del contenido de humedad en vigas sanas de pino silvestre sin tratamiento.....	209

Evolución del contenido de humedad en vigas sanas de pino silvestre tanalizado.....	211
Evolución del contenido de humedad en vigas sanas de abeto	212
ANEXO III: Base de datos de gráficas Fase 2	214

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Primeros refugios en la historia del ser humano. (a) Aprovechamiento de árbol caído como “refugio improvisado” natural. (b) Refugio desmontable hecho de ramas y hojas alrededor de tronco de árbol sano. (c) Primer paso hacia la vivienda, realizado con ramas o troncos finos semienterrados y protegidos con una cubierta vegetal (Senosiain, 1996).	29
Figura 2. Madera laminada en varios formatos (Naturallywood, 2022).	30
Figura 3. Madera autodensificada frente a la madera densificada por compresión (Huang et al, 2025).	31
Figura 4. Funciones de la madera en los árboles (Proyecto KEBBE).	33
Figura 5. Diagrama de sectores de la composición química de la madera (GEMCO, 2025).	34
Figura 6. Partes del tronco de un árbol (Maderame, s.f.).	35
Figura 7. Estructura interna de la madera de especies frondosas o latifoliadas (Mantilla, E. V., s.f.).	37
Figura 8. Estructura interna de la madera de especies de coníferas (Boschiero, A. T., 2009).	37
Figura 9. Comparativa de maderas al microscopio (Maderea, 2015).	39
Figura 10. A la izda. madera de especie frondosa/latifoliada, a la dcha. madera de especie conífera; ambas con 75 aumentos al microscopio (Maderea, 2015).	39
Figura 11. Anisotropía de la madera, (madera, 2020).	40
Figura 12. Transición de anillos (Wiedenhoeft, 2011).	42
Figura 13. Aspecto de diferentes ejemplos de maderas duras (A&C, 2022).	42
Figura 14. Aspecto de diferentes ejemplos de maderas blandas (A&C, 2022). .	43
Figura 15. Aspecto de diferentes ejemplos de maderas semiduras (A&C, 2022).	43
Figura 16. Aspecto de diferentes ejemplos de maderas semiblandas (A&C, 2022).	43
Figura 17. Esfuerzos de Tracción-Compresión sobre una pieza de madera.	45
Figura 18. Flexión positiva de una viga de madera con carga aplicada sobre un punto (Acosta, s.f.).	46
Figura 19. Representación de los esfuerzos de corte o cortante en pieza de madera.	46
Figura 20. El corte de leña muestra la baja resistencia a la hienda que presenta la madera en la dirección de sus fibras, imagen recreada con IA.	47
Figura 21. Torsión de una viga de madera, imagen generada con IA.	47
Figura 22. Proceso de carbonización de la madera (Swedish Wood, s. f.).	49

<i>Figura 23. Diferentes tipos de nudos de acuerdo con su estado (Romero A. & Medina G.</i>	50
Figura 24. Tipos de nudo según su forma (Vignote, S. & Martínez, I.).	51
Figura 25. Médula incluida en viga de madera, imagen generada con IA.	51
Figura 26. Gema presente en viga de madera, imagen generada con IA.	51
Figura 27. Fendas de desecación.	52
Figura 28. Fendas de cementado	52
Figura 29. Grietas en la sección del tronco de un árbol, imagen generada con IA.	53
Figura 30. Acebolladuras en durmiente de madera (NOM-056-SCT2-2016).	53
Figura 31. Acebolladura en taco de madera, imagen generada con IA.	53
Figura 32. Desviación de la fibra (A) y (B) en un plano, (C) en dos planos	54
Figura 33. Bolsa de resina en viga de madera,	54
Figura 34. Viga con madera enteada	54
Figura 35. Aspecto de la madera de compresión, (Romero A. & Medina G. , s.f.)	55
Figura 36. Tipos de deformaciones más comunes en la madera.	55
Figura 37. Coloraciones en la madera (Vignote, S. & González, V. , 1995; Romero A. & Medina G., s.f.)	56
Figura 38. Pudrición de la madera (Romero A. & Medina G. , s.f.)	56
Figura 39. Picaduras de insectos en la madera (Romero A. & Medina G.).	57
Figura 40. Tipos de cortes de madera (Kósten Art, 2024)	57
Figura 41. Técnica de corte: Corte Radial (Maderas Menur, 2018)	58
Figura 42. Técnica de corte: Hilos Encontrados (Maderas Menur, 2018)	58
Figura 43. Técnica de corte: Cortes Paralelos (Maderas Menur, 2018)	59
Figura 44. Técnica de corte: Hilos Paralelos (Maderas Menur, 2018)	59
Figura 45. Técnica de corte: Método Cantibay (Maderas Menur, 2018)	60
Figura 46. Técnica de corte: Corte Holandés (Maderas Menur, 2018)	60
Figura 47. Técnica de corte: Pieza Enteriza (Maderas Menur, 2018)	61
Figura 48. Corte en Cruz (Maderas Menur, 2018)	61
Figura 49. Técnica de corte: Corte Encuartonado (Maderas Menur, 2018)	62
Figura 50. Evolución de la resistencia mecánica de la madera en función de su contenido de humedad.	67
Figura 51. Estado del agua en el interior de la madera (Umlandt et al., 2022).	68
Figura 52. Distintas formas de presentación del agua en la madera: madera verde, madera al 30% de humedad y madera totalmente seca o anhidra, (Fernández-Golfín Seco & Conde García, 2007).	70

Figura 53. Esquema del movimiento del agua libre y el vapor de agua dentro de la madera, (Fernández-Golfín Seco & Conde García, 2007).....	71
Figura 54. Clasificación de ondas sonoras según el rango de frecuencias (Svantek Academy, s.f.).....	72
<i>Figura 55. De izquierda a derecha, representación de una onda acústica en función de la distancia (x), y del tiempo (t), respectivamente (Svantek Academy, s.f.).</i>	74
Figura 56. Relación entre longitud de onda y frecuencia de onda (Svantek Academy, s.f.).....	74
Figura 57. Principales tipos de ondas sísmicas (Geology Science 2023).	77
Figura 58. De izquierda a derecha, comportamiento de ondas ultrasónicas con transmisión directa testa-testa en pieza de material sin presencia de defectos y en pieza con presencia de un defecto, respectivamente (Íñiguez, G, 2007).	80
Figura 59. De izquierda a derecha: métodos directo, semidirecto e indirecto, respectivamente, para el posicionamiento de los palpadores de ultrasonidos (Íñiguez, G., 2007).....	81
Figura 60. Esquema de aplicación de los ángulos propuestos por Balmori et al. (2016).....	82
Figura 61. Diferentes tipos de palpadores empleados en ensayos ultrasónicos (GTED-UC).....	83
Figura 62. Esquema representativo del material de ensayo (García, D., 2020). 85	
Figura 63. Muestra de 18 probetas de madera para Fases 1 y 2 de la campaña experimental.	86
Figura 64. Muestra de 9 probetas de madera añadidas en la Fase 3 de la campaña experimental.	86
Figura 65. Regla metálica utilizada en el control dimensional de las probetas de madera.....	88
Figura 66. Báscula digital utilizada para el pesaje de las probetas de madera. .	88
Figura 67. Termohigrómetro digital TFA.	89
Figura 68. Especificaciones técnicas termohigrómetro digital TFA.	90
Figura 69. Aspecto y datos técnicos Testo 175 H1.....	90
Figura 70. Maletín del Xilohigrómetro de resistencia eléctrica GANN RTU 600. .	91
Figura 71. Xilohigrómetro GANN RTU 600.....	91
Figura 72. Diagrama de variación de la resistencia eléctrica del Pinus Elliotii en función de contenido de humedad de la madera (FPL, 2010)	92
Figura 73. Indicaciones para el manejo del Xilohigrómetro GANN RTU 600, manual del fabricante.	92
Figura 74. Esquema de botones y selectores Hydromette GANN RTU 600, manual del fabricante.	93

Figura 75. Tabla de maderas GANN, Anexo manual del fabricante Hydromette GANN RTU 600.	93
Figura 76. Hydromette GANN RTU 600: Coordenadas X-Y para el Abeto.	94
Figura 77. Hydromette GANN RTU 600: Coordenadas X-Y para el Pino silvestre.	94
Figura 78. Vista frontal Ultrasonic Timer.....	95
Figura 79. Vista superior Ultrasonic Timer.	95
Figura 80. Especificaciones técnicas FAKOPP Ultrasonic Timer.....	96
Figura 81. Evaporador de doble flujo RIVACOLD RDF3250ED (polargross.com). 97	
Figura 82. Detalle de la etiqueta del evaporador de doble flujo RIVACOLD RDF3250ED.....	97
Figura 83. Subcomponentes de calentadores de aletas cuadrada de acero inoxidable (amazon.com).	98
Figura 84. Colocación de los calentadores de aletas cuadradas.....	98
Figura 85. Componentes en el interior de la cámara climática. (a) sonda de humedad; (b) sonda de temperatura y presostato; (c) humectador/deshumidificador.	99
Figura 86. Toma de medidas de humedades con xilohigrómetro GANN en probeta de madera.	102
Figura 87. Ensayo de UT en la longitudinal de la probeta de madera.....	103
Figura 88. Gráfico de dispersión para probeta de madera de abeto sano D047.	104
Figura 89. Triángulo trigonométrico.....	106
Figura 90. Distancia entre palpadores.	106
Figura 91. Señal recibida con transductores separados más de 30 cm donde puede apreciarse la atenuación de la señal con la distancia entre palpadores (figura extraída del manual del equipo FAKOPP Ultrasonic Timer).	106
Figura 92. Gráfico extraído del manual del equipo FAKOPP Ultrasonic Timer en el que se visualiza que a partir de 35 cm la lectura de tiempo se incrementa desviándose de la recta de tendencia.....	106
Figura 93. Esquema de la división del marcado de la probeta por zonas.	107
Figura 94. Ensayo de UT en la zona 1. El palpador emisor se coloca en el punto 0 y se mantiene fijo mientras el palpador receptor se va desplazando longitudinalmente entre las marcas 0-8.	107
Figura 95. Gráfico de dispersión para Zona 1 de la probeta de madera de abeto sano D047.	108
Figura 96. Ensayo de UT en la zona 2. El palpador emisor se coloca en el punto 0' y se mantiene fijo mientras el palpador receptor se va desplazando longitudinalmente entre las marcas 6-14.....	109

Figura 97. Gráfico de dispersión para Zona 2 de la probeta de madera de abeto sano D047.	110
Figura 98. Ensayo de UT en la zona 3. El palpador emisor se coloca en el punto 0" y se mantiene fijo mientras el palpador receptor se va desplazando longitudinalmente entre las marcas 12-20.	111
Figura 99. Gráfico de dispersión para Zona 3 de la probeta de madera de abeto sano D047.	112
Figura 100. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D066 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL18.	118
Figura 101. Cara superior de la viga sana D066 de madera de pino silvestre sin tratamiento GL18.	118
Figura 102. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D071 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL24.	119
Figura 103. Cara superior de la viga sana D071 de madera de pino silvestre sin tratamiento GL24.	119
Figura 104. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D079 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL28.	120
Figura 105. Cara superior de la viga sana D079 de madera de pino silvestre sin tratamiento GL28.	120
Figura 106. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D064 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL18.	121
Figura 107. Cara superior de la viga sumergida D064 de madera de pino silvestre sin tratamiento GL18.	121
Figura 108. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D070 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL24.	122
Figura 109. Cara superior de la viga sumergida D070 de madera de pino silvestre sin tratamiento GL24.	122
Figura 110. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D076 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL28.	123
Figura 111. Cara superior de la viga sumergida D076 de madera de pino silvestre sin tratamiento GL28.	123
Figura 112. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D037 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL18.	124
Figura 113. Cara superior de la viga sana D037 de madera de pino silvestre tanalizado GL18.	124

Figura 114. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D023 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL24.	125
Figura 115. Cara superior de la viga sana D023 de madera de pino silvestre tanalizado GL24.	125
Figura 116. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D031 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL28.	126
Figura 117. Cara superior de la viga sana D031 de madera de pino silvestre tanalizado GL28.	126
Figura 118. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D035 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL18.	127
Figura 119. Cara superior de la viga sumergida D035 de madera de pino silvestre tanalizado GL18.	127
Figura 120. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D024 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL24.	128
Figura 121. Cara superior de la viga sumergida D024 de madera de pino silvestre tanalizado GL24.	128
Figura 122. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D029 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL28.	129
Figura 123. Cara superior de la viga sumergida D029 de madera de pino silvestre tanalizado GL28.	129
Figura 124. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D047 de abeto de clase resistente GL18.	130
Figura 125. Cara superior de la viga sana D047 de madera de abeto GL18.	130
Figura 126. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D051 de abeto de clase resistente GL24.	131
Figura 127. Cara superior de la viga sana D051 de madera de abeto GL24.	131
Figura 128. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D059 de abeto de clase resistente GL28.	132
Figura 129. Cara superior de la viga sana D059 de madera de abeto GL28.	132
Figura 130. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D042 de abeto de clase resistente GL18.	133
Figura 131. Cara superior de la viga sumergida D042 de madera de abeto GL18.	133
Figura 132. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D050 de abeto de clase resistente GL24.	134
Figura 133. Cara superior de la viga sumergida D050 de madera de abeto GL24.	134

Figura 134. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D058 de abeto de clase resistente GL28.	135
Figura 135. Cara superior de la viga sumergida D058 de madera de abeto GL28.	135
Figura 136. Incorporación de las probetas al interior de la cámara.....	136
Figura 137. Ábaco de Kollmann.	138
Figura 138. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D066 de madera de pino silvestre sin tratamiento y clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.....	140
Figura 139. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D071 de madera de pino silvestre sin tratamiento y clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.....	141
Figura 140. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D079 de madera de pino silvestre sin tratamiento y clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.....	141
Figura 141. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D064 de madera de pino silvestre sin tratamiento y clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.....	142
Figura 142. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D070 de madera de pino silvestre sin tratamiento y clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.....	142
Figura 143. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D076 de madera de pino silvestre sin tratamiento y clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.....	143
Figura 144. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D037 de madera de pino silvestre tanalizado y clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.....	144
Figura 145. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D023 de madera de pino silvestre tanalizado y clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.....	144
Figura 146. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D031 de madera de pino silvestre tanalizado y clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.....	145
Figura 147. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D035 de madera de pino silvestre tanalizado y clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.....	145
Figura 148. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D024 de madera de pino silvestre tanalizado y clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.....	146
Figura 149. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D029 de madera de pino silvestre tanalizado y clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.....	146

Figura 150. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D047 de madera de abeto de clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.....	147
Figura 151. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D051 de madera de abeto de clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.....	147
Figura 152. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D059 de madera de abeto de clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.....	148
Figura 153. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D042 de madera de abeto de clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.....	148
Figura 154. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D050 de madera de abeto de clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.....	149
Figura 155. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D058 de madera de abeto de clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.....	149
Figura 156. Esquema de recepción de ondas de compresión y superficiales en función de la distancia entre palpadores.....	152
Figura 157. Gráfica de velocidades de propagación de ondas ultrasónicas obtenida mediante análisis numérico en COMSOL.	154
Figura 158. Simulación de ultrasonidos para transductores separados 20 cm, COMSOL.	155
Figura 159. Vista superior de la muestra en los instantes de tiempo de (a)10 y (b)14 μ s.	155
Figura 160. Vista lateral de la muestra en los instantes de tiempo de (a)5, (b)10, (c)12'5, (d)15, (e)20, (f)22'5, (g)25 y (h)30 μ s.	157
Figura 161. Simulación de ultrasonidos para transductores separados 5 cm, COMSOL.	157
Figura 162. Modelo 3D del campo de desplazamientos de los transductores ajustando la distancia de separación a 5 cm. (a) sin mallado; (b) con mallado, COMSOL.	158
Figura 163. Simulación de ondas superficiales en vista de cara superior de la viga, COMSOL.....	158
Figura 164. Simulación de ondas ultrasónicas en vista de cara lateral de la viga, COMSOL.	159
Figura 165. Simulación de ondas ultrasónicas para una configuración con distancia de 15 cm entre transductores e instantes de tiempos de vuelo de 10 μ s (a), 15 μ s (b), (20 μ s), 25 (μ s) y 30 (μ s).	161
Figura 166. Simulación de ondas ultrasónicas en una viga muestra de 4 cm de espesor con una distancia de separación entre transductores de 10 cm.	162
Figura 167. Relación entre la variación del contenido de humedad y del peso de las probetas desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición.	164
Figura 168. Posiciones de colocación del Testo 175 H1 en el interior de la cámara climática.	167

Figura 169. Registro de datos Testo 175 H1 del 12/05/2025 al 14/05/2025. ...	168
Figura 170. Registro de datos Testo 175 H1 del 12/05/2025 al 10/07/2025. ...	168
Figura 171. Comparación de velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sanas de madera de pino silvestre sin tratamiento de diferente clase resistente.....	171
Figura 172. Comparación de velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sumergidas de madera de pino silvestre sin tratamiento de diferente clase resistente.....	172
Figura 173. Comparación de velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sanas de madera de pino silvestre tanalizado de diferente clase resistente.	173
Figura 174. Comparación de velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sumergidas de madera de pino silvestre tanalizado de diferente clase resistente.....	174
Figura 175. Comparación de velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sanas de madera de abeto de diferente clase resistente.....	175
Figura 176. Comparación de velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sumergidas de madera de abeto de diferente clase resistente.....	176
Figura 177. Objetivos de Desarrollo Sostenible en los que destaca el empleo de madera laminada.	182
Figura 178. Estado inicial de la viga GLULAM sana D066 de pino silvestre sin tratamiento (GL18).....	191
Figura 179. Estado inicial de la viga GLULAM sana D071 de pino silvestre sin tratamiento (GL24).....	192
Figura 180. Estado inicial de la viga GLULAM sana D079 de pino silvestre sin tratamiento (GL28).....	193
Figura 181. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D064 de pino silvestre sin tratamiento (GL18).....	194
Figura 182. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D070 de pino silvestre sin tratamiento (GL24).....	195
Figura 183. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D076 de pino silvestre sin tratamiento (GL28).....	196
Figura 184. Estado inicial de la viga GLULAM sana D037 de pino silvestre tanalizado (GL18).....	197
Figura 185. Estado inicial de la viga GLULAM sana D023 de pino silvestre tanalizado (GL24).....	198
Figura 186. Estado inicial de la viga GLULAM sana D031 de pino silvestre tanalizado (GL28).....	199
Figura 187. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D035 de pino silvestre tanalizado (GL18).....	200

Figura 188. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D024 de pino silvestre tanalizado (GL24).....	201
Figura 189. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D029 de pino silvestre tanalizado (GL28).....	202
Figura 190. Estado inicial de la viga GLULAM sana D047 de abeto (GL18).....	203
Figura 191. Estado inicial de la viga GLULAM sana D051 de abeto (GL24).....	204
Figura 192. Estado inicial de la viga GLULAM sana D059 de abeto (GL28).....	205
Figura 193. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D042 de abeto (GL18).	206
Figura 194. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D050 de abeto (GL24).	207
Figura 195. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D058 de abeto (GL28).	208
Figura 196. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D067 de madera de pino silvestre sin tratamiento de clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.....	209
Figura 197. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D073 de madera de pino silvestre sin tratamiento de clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.....	210
Figura 198. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D078 de madera de pino silvestre sin tratamiento de clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.....	210
Figura 199. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D039 de madera de pino silvestre tanalizado de clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.....	211
Figura 200. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D027 de madera de pino silvestre tanalizado de clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.....	211
Figura 201. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D030 de madera de pino silvestre tanalizado de clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.....	212
Figura 202. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D048 de madera de abeto de clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.....	212
Figura 203. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D057 de madera de abeto de clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.....	213
Figura 204. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D063 de madera de abeto de clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.....	213
Figura 205. Gráfico de dispersión para viga sana D066 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL18.	215
Figura 206. Gráfico de dispersión para viga sana D071 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL24.	216

Figura 207. Gráfico de dispersión para viga sana D079 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL28.	217
Figura 208. Gráfico de dispersión para viga sumergida D064 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL18.	218
Figura 209. Gráfico de dispersión para viga sumergida D070 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL24.	219
Figura 210. Gráfico de dispersión para viga sumergida D076 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL28.	220
Figura 211. Gráfico de dispersión para viga sana D037 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL18.	221
Figura 212. Gráfico de dispersión para viga sana D023 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL24.	222
Figura 213. Gráfico de dispersión para viga sana D031 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL28.	223
Figura 214. Gráfico de dispersión para viga sumergida D035 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL18.	224
Figura 215. Gráfico de dispersión para viga sumergida D024 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL24.	225
Figura 216. Gráfico de dispersión para viga sumergida D029 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL28.	226
Figura 217. Gráfico de dispersión para viga sana D047 de abeto de clase resistente GL18.....	227
Figura 218. Gráfico de dispersión para viga sana D051 de abeto de clase resistente GL24.....	228
Figura 219. Gráfico de dispersión para viga sana D051 de abeto de clase resistente GL28.....	229
Figura 220. Gráfico de dispersión para viga sumergida D042 de abeto de clase resistente GL18.....	230
Figura 221. Gráfico de dispersión para viga sumergida D042 de abeto de clase resistente GL24.....	231
Figura 222. Gráfico de dispersión para viga sumergida D042 de abeto de clase resistente GL28.....	232

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes de la madera a nivel celular (Gallardo, V. & Robles, X., 2011).....	38
Tabla 2: Ejemplos de clases resistentes de Glulam.....	64
Tabla 3. Comparación de madera laminada encolada frente a madera aserrada.	66
Tabla 4. Velocidad de propagación del sonido en gases (Cáceres, J. M., s.f.) ..	75
Tabla 5. Velocidad de propagación del sonido en líquidos (Cáceres, J. M., s.f.).	75
Tabla 6. Velocidad de propagación del sonido en sólidos (Cáceres, J. M., s.f.).	76
Tabla 7. Tipos de ondas en un medio sólido y elástico (Cáceres, J. M., s.f.).....	77
Tabla 8. Resumen de datos iniciales de las probetas de Pino Silvestre sin tratamiento.	87
Tabla 9. Resumen de datos iniciales de las probetas de Pino Silvestre tanalizado.	87
Tabla 10. Resumen de datos iniciales de las probetas de Abeto sin tratamiento.	87
Tabla 11. Tabla de datos probeta de madera de abeto D047.....	103
Tabla 12. Tabla de datos probeta de madera de abeto D047 con cálculo de velocidades.	105
Tabla 13. Tabla de datos Zona 1 de la probeta de madera de abeto D047.....	108
Tabla 14. Tabla de datos Zona 1 de la probeta de madera de abeto D047 con cálculo de velocidades.....	108
Tabla 15. Tabla de datos Zona 2 de la probeta de madera de abeto D047.....	110
Tabla 16. Tabla de datos Zona 2 de la probeta de madera de abeto D047 con cálculo de velocidades.....	110
Tabla 17. Tabla de datos Zona 3 de la probeta de madera de abeto D047.....	112
Tabla 18. Tabla de datos Zona 3 de la probeta de madera de abeto D047 con cálculo de velocidades.....	112
Tabla 19. Tabla de datos probeta de madera de abeto D047 con cálculo de velocidades con corrección de humedad.....	115
Tabla 20. Tabla de datos de velocidades ultrasónicas promedio corregidas en probetas de madera de pino silvestre.	116
Tabla 21. Tabla de datos de velocidades ultrasónicas promedio corregidas en probetas de madera de pino silvestre con tratamiento de tanalizado.....	116
Tabla 22. Tabla de datos de velocidades ultrasónicas promedio corregidas en probetas de madera de abeto.....	116
Tabla 23. Variación del contenido de humedad y del peso de las probetas desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición.	164

Tabla 24. Velocidades de propagación promedio para vigas de madera laminada encolada de madera de pino silvestre con y sin tanalizado.	177
Tabla 25. Resumen de datos iniciales de las probetas adicionales incluidas en la Fase 3.	209
Tabla 26. Tabla de datos viga sana D066 de madera de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL18, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.....	215
Tabla 27. Tabla de datos viga sana D071 de madera de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL24, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.....	216
Tabla 28. Tabla de datos viga sana D079 de madera de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL28, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.....	217
Tabla 29. Tabla de datos viga sumergida D064 de madera de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL18, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.....	218
Tabla 30. Tabla de datos viga sumergida D070 de madera de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL24, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.....	219
Tabla 31. Tabla de datos viga sumergida D076 de madera de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL28, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.....	220
Tabla 32. Tabla de datos viga sana D037 de madera de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL18, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.....	221
Tabla 33. Tabla de datos viga sana D023 de madera de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL24, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.....	222
Tabla 34. Tabla de datos viga sana D031 de madera de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL28, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.....	223
Tabla 35. Tabla de datos viga sumergida D035 de madera de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL18, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.	224
Tabla 36. Tabla de datos viga sumergida D024 de madera de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL24, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.	225
Tabla 37. Tabla de datos viga sumergida D029 de madera de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL28, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.	226
Tabla 38. Tabla de datos viga sana D047 de madera de abeto de clase resistente GL18, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.	227

Tabla 39. Tabla de datos viga sana D051 de madera de abeto de clase resistente GL24, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.	228
Tabla 40. Tabla de datos viga sana D059 de madera de abeto de clase resistente GL28, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.	229
Tabla 41. Tabla de datos viga sumergida D042 de madera de abeto de clase resistente GL18, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.	230
Tabla 42. Tabla de datos viga sumergida D050 de madera de abeto de clase resistente GL24, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.	231
Tabla 43. Tabla de datos viga sumergida D058 de madera de abeto de clase resistente GL28, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.	232

RESUMEN

En este Trabajo de Fin de Grado se estudia la propagación de ondas ultrasónicas en madera laminada encolada, con el objetivo de evaluar la validez del ensayo no destructivo mediante ultrasonidos (método indirecto) para la detección de defectos.

Se llevaron a cabo ensayos experimentales en distintas probetas pino silvestre y abeto, con y sin tratamiento de tanalizado, y tres clases resistentes (GL18, GL24 y GL28), analizando la influencia de la distancia entre transductores, la presencia de defectos, el tratamiento de tanalizado y la inmersión prolongada en agua. Estos ensayos se complementaron con simulaciones numéricas. Posteriormente, las probetas fueron sometidas a un acondicionamiento higrotérmico para estudiar el efecto de la humedad.

Se comprobó la viabilidad de aumentar la distancia entre los transductores del equipo empleado y se evidenció la fuerte influencia de la humedad en la transmisión de las ondas. Asimismo, se observó que la aplicación del tratamiento de tanalizado aumenta la velocidad de propagación; efecto contrario que el descubierto en los casos de inmersión prolongada.

Los resultados muestran que el método ultrasónico indirecto es sensible a la presencia de defectos, permitiendo la detección y localización de los mismos en los elementos estructurales estudiados; por tanto, se confirma su utilidad como técnica de diagnóstico no destructivo aplicable a elementos estructurales de madera laminada encolada.

ABSTRACT

This Final Degree Project investigates the propagation of ultrasonic waves in glued laminated timber, with the aim of assessing the validity of the non-destructive ultrasonic testing method (indirect technique) for defect detection.

Experimental tests were carried out on Scots pine and spruce specimens, with and without preservative treatment, and belonging to three strength classes (GL18, GL24 y GL28). The study analyses the influence of transducer spacing, the presence of defects, preservative treatment, and prolonged water immersion. These tests were complemented with numerical simulations. Subsequently the specimens were subjected to hygrothermal conditioning to evaluate the effect of moisture.

The results confirmed the feasibility of increasing the transducer spacing of the equipment used and highlighted the strong influence of moisture on wave transmission. It was also observed that preservative treatment increased propagation velocity, whereas prolonged immersion produced the opposite effect.

Overall, the findings demonstrate that the indirect ultrasonic method is sensitive to the presence of defects, enabling their detection and localization in the studied structural elements. Therefore, its suitability as a non-destructive diagnostic technique for glued laminated timber structures is confirmed.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mis directores, Ramón e Ignacio, por su disponibilidad, consejos, directrices, indicaciones y la ayuda prestada a lo largo de todo el proceso de realización de este proyecto.

A mi compañero Christian, por su inestimable ayuda en la simulación de ondas ultrasónicas a través del uso del software informático COMSOL.

A David, técnico de laboratorio, y Álvaro, profesor de la Escuela, por su buena disposición y amabilidad en mi paso y estancia por el Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica de la Universidad de Cantabria.

Sobre todo, quería agradecer a mi familia por acompañarme en este largo camino que he realizado y que culmino con la realización de este proyecto, después de tanto esfuerzo y perseverancia, camino que en más de una ocasión pasó por mi mente dejar de lado.

En particular a mi abuela, Rosa, que supo verme al borde del abismo cuando parecía que nadie más me veía, aunque ella estuviera luchando su propia batalla; y gracias a mi madre, que supo hallar la forma de hablar conmigo y hacerme parar un tiempo para volver con más fuerza. Gracias mamá por las salidas y oportunidades que me has dado y por tu enorme paciencia. Siento haberte hecho esperar tanto.

Quiero hacer un especial agradecimiento a mi pareja, Elena, por estar ahí en los momentos de tristeza y de flaqueza, porque en los momentos buenos todo el mundo puede estar, pero es en los duros en los que cuesta. Por aguantar carros y carretas, por ayudarme en todo lo que ha podido y más, por animarme a seguir y dar lo mejor de mí.

A todos, gracias por guiarme y no dejar que me aleje del camino.

Gracias por ayudarme a cerrar esta etapa.

1 INTRODUCCIÓN

La madera ha sido uno de los principales materiales de construcción durante miles de años. Su fácil acceso y manipulación han permitido la formación y el desarrollo de multitud de civilizaciones. A medida que avanzaron las sociedades, también lo han hecho las técnicas empleadas; la madera ha cambiado de lugar en las estructuras, así como sus funciones dentro de las mismas, pero siempre se ha mantenido presente.

Aunque con la aparición del hormigón y la producción de acero, la madera se vio desplazada a un segundo plano, esto no supuso su caída en desuso, sino que la industria asociada se vio obligada a innovar para seguir manteniendo un lugar en el sector de la construcción. Como consecuencia de esta innovación, se desarrolló la madera laminada encolada (Glulam), precursora de otras soluciones tecnológicas posteriores (madera contralaminada o CLT, etc.).

Actualmente, en construcción, la madera laminada se emplea en interiores y exteriores. Como resultado, entre otras aplicaciones, podemos encontrar madera laminada en infraestructuras civiles o en edificios de diferente tipología, en forma de elementos estructurales y/o como recubrimiento de estructuras, con formas curvas, triangulares o diseños más complejos.

En el presente Proyecto de Fin de Grado se estudiará experimentalmente la propagación de las ondas ultrasónicas en el interior de vigas de madera laminada encoladas acondicionadas higrotérmicamente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Generales

Los objetivos generales de este proyecto son principalmente dos, presentados de mayor a menor importancia:

- Poner a prueba y verificar la eficacia de la utilización del método de ensayo no destructivo de los ultrasonidos para la detección de defectos en estructuras de madera laminada.

- Acondicionar higrotérmicamente las probetas de madera para conseguir el equilibrio higroscópico teniendo un contenido de humedad similar en todas las muestras.

1.1.2 Objetivos Específicos

De los anteriores objetivos generales derivan los siguientes objetivos específicos:

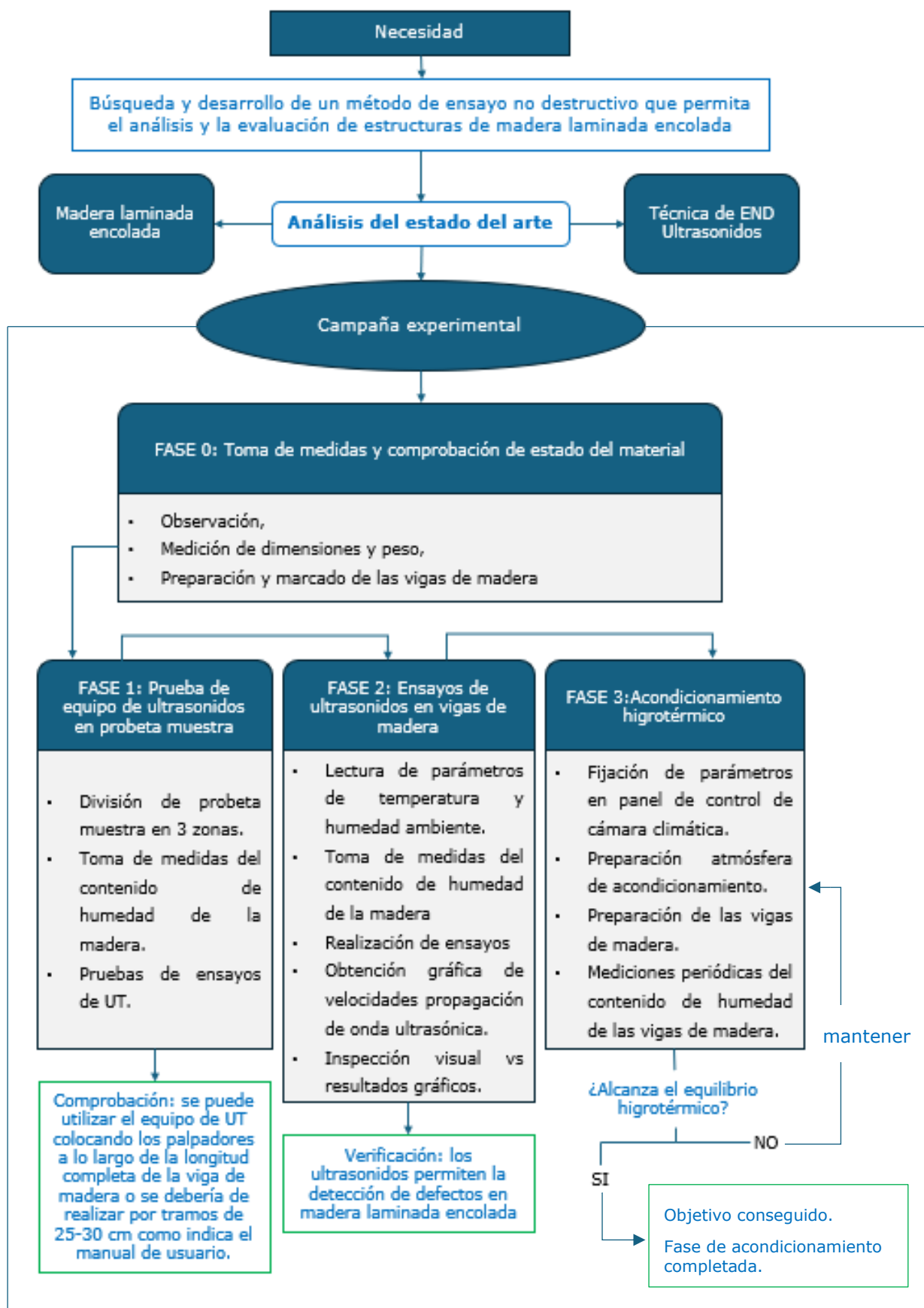
1. Desarrollar un estado del arte con objeto de conocer las características y propiedades más importantes de la madera, la madera laminada encolada, y la técnica de ensayo no destructivo de los ultrasonidos.
2. Aprender a hacer un uso adecuado de dispositivos de ensayos no destructivos como son el xilohigrómetro de resistencia eléctrica y el equipo de ultrasonidos.
3. Desarrollar una base de datos de velocidades de propagación ultrasónica adecuada de dos especies de madera (pino silvestre y abeto), con y sin tratamiento (pino silvestre sin tratamiento, pino silvestre tanalizado¹, y abeto² sin tratamiento), y tres clases resistentes (GL18, GL24 y GL28), que permita la comparación de valores entre especies y clases.
4. Realizar alguna simulación de la propagación de ondas ultrasónicas mediante el uso de software informático.
5. Estudiar si el tratamiento de tanalizado tiene algún tipo de influencia en la velocidad de transmisión de la madera de pino silvestre.
6. Estudiar si la inmersión prolongada de las vigas que fueron sumergidas en trabajos anteriores³ ha podido afectar a la velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas.

¹ La madera tratada o tanalizada es una madera que ha sufrido un proceso de tratamiento para mejorar su durabilidad y resistencia al deterioro, ataque de hongos y/o insectos.

² El abeto no fue sometido a tratamiento de tanalizado, debido al carácter de madera poco impregnable, según la clasificación de la UNE-EN 350-2:1995.

³ Condiciones de inmersión: agua dulce a 20°C, durante 304 días.

1.2 Metodología del proyecto



1.3 Estructuración del documento

Para la mejor comprensión del presente Proyecto, se ha estructurado el mismo en seis capítulos, un apartado dedicado a las referencias consultadas, anexos y todo ello precedido por sus correspondientes índice general, índice de figuras e índice de tablas, resumen, abstract y un apartado destinado a agradecimientos del autor.

La estructuración de capítulos ha sido la siguiente:

- **Capítulo 1: Introducción.** Se describe a grandes rasgos la temática del proyecto y se definen los objetivos del mismo, tanto generales como específicos. Igualmente, se alude esquemáticamente a la metodología del trabajo, y se presenta como es la organización del documento.
- **Capítulo 2: Estado del arte.** En primer lugar, se realiza un recorrido por la historia de la madera (material de ensayo) para entender cómo ha sido la evolución de su uso a lo largo del tiempo, se estudian su composición y propiedades, así como los defectos y anomalías que pueden encontrarse en ella, se muestran las técnicas de corte empleadas en los procesos de manufactura, se define la madera laminada y se dedica un apartado para analizar la humedad, el movimiento del agua en el interior de la madera y sus efectos sobre esta. A continuación, se presentan la técnica de los ultrasónicos (método de ensayo), describiendo el fundamento de su funcionamiento y las propiedades de las ondas en las que se basa.
- **Capítulo 3: Materiales y equipos de ensayo.** Este capítulo incluye un listado de los materiales utilizados en el proyecto con su denominación, especie de madera e indicación de si han recibido o no tratamiento; así como una amplia descripción de cada uno de los equipos empleados durante la realización de medidas dimensionales, lecturas de temperatura, humedad (tanto del ambiente como en lo que se refiere a contenido de humedad en el interior de la madera) y ensayos de ultrasonidos.
- **Capítulo 4: Campaña experimental.** Aquí se entra al detalle en el procedimiento y la metodología seguida durante el desarrollo de las fases en las que tiene lugar el proyecto.

- **Capítulo 5: Discusión de resultados obtenidos.** Se presentan los resultados obtenidos tras el desarrollo de la campaña experimental, relacionando estos con los objetivos iniciales a cumplir.
- **Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras.** Se extraen conclusiones en base a dichos resultados y se plantean nuevas líneas de estudio para seguir indagando en la temática del proyecto.
- **Referencias consultadas.** Este apartado recoge todas las referencias a libros, artículos científicos, revistas de investigación, etc., que han sido consultadas para la elaboración de este Proyecto de Fin de Grado.
- **Anexos.** Se incluyen varios anexos que recogen: un registro fotográfico del estado inicial de las vigas de madera, bases de datos tabuladas a partir de las cuales se representan o formulan gráficas; es decir, todo lo que no es tan representativo, pero no por ello menos valioso, como para introducirlo en el cuerpo del documento.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 La madera como elemento estructural

2.1.1 La construcción con madera a lo largo del tiempo

El uso de la madera como elemento estructural es casi tan antiguo como la propia historia de la construcción.

Desde las primeras civilizaciones, el ser humano ha utilizado este recurso por su disponibilidad, facilidad de trabajo y manipulación y propiedades mecánicas, aceptables para cualquier época. Civilizaciones de las más antiguas que conocemos, como la egipcia, la griega o la romana, ya utilizaban la madera para la construcción de viviendas, puentes, templos y acueductos, entre otras construcciones (Forehand, L., s. f.). En muchos casos, estos elementos estructurales aún perduran en la actualidad o han sido documentados arqueológicamente, lo que es una clara evidencia de su eficacia incluso sin un conocimiento técnico profundo de la ciencia de los materiales.

Incluso en los albores de la humanidad, en tiempos prehistóricos, la madera ha estado presente como un recurso para la construcción, así como herramientas y armas. Aunque no existen registros escritos de aquella época, los hallazgos arqueológicos y los estudios paleoetnográficos permiten suponer que ya entonces se aprovechaban las propiedades mecánicas básicas de ciertos tipos de madera para levantar refugios, ver Figura 1, empalizadas o pasarelas rudimentarias. En asentamientos como los descubiertos en zonas lacustres del centro de Europa, tierras donde eran comunes los palafitos (tipo de construcción que permitía mantener el suelo de la vivienda o almacén alejado del agua, la humedad y los defectos que conlleva), se han encontrado restos bien conservados de estructuras de madera que muestran una organización lógica en el uso de ramas y troncos, con técnicas avanzadas de ensamblaje y reparto de cargas. A pesar de la sencillez de estos sistemas constructivos, resulta razonable suponer que existía un conocimiento intuitivo sobre ciertas propiedades mecánicas de la madera, como la resistencia, la flexibilidad y la durabilidad relativa de ciertas especies leñosas, derivado de la experiencia acumulada.

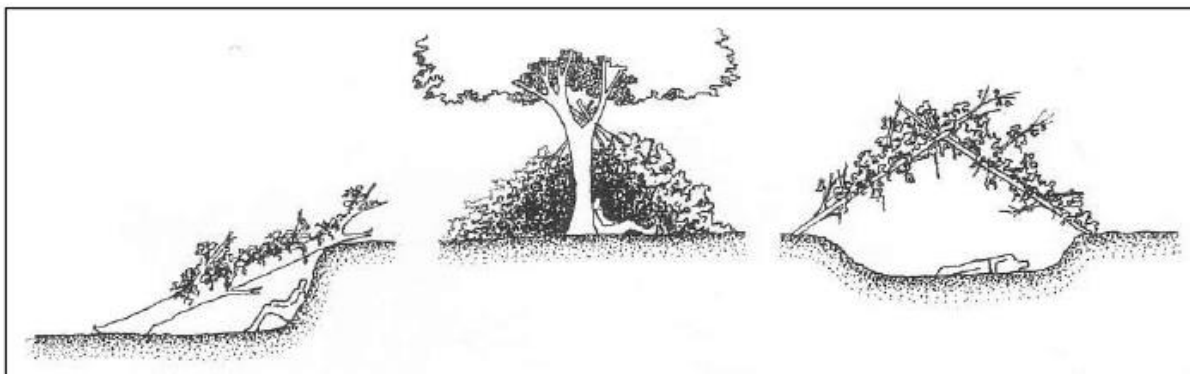


Figura 1. Primeros refugios en la historia del ser humano. (a) Aprovechamiento de árbol caído como "refugio improvisado" natural. (b) Refugio desmontable hecho de ramas y hojas alrededor de tronco de árbol sano. (c) Primer paso hacia la vivienda, realizado con ramas o troncos finos semienterrados y protegidos con una cubierta vegetal (Senosiain, 1996).

Con la llegada de la Edad Media y posteriormente el Renacimiento, la carpintería estructural evolucionó paralelamente a los avances que se iban desarrollando en la arquitectura de la época. La madera se empleaba principalmente en cubiertas y entramados (sistemas estructurales compuestos por elementos lineales como vigas, montantes, tirantes o travesaños, dispuestos ordenadamente, trabajando en conjunto para soportar cargas), haciendo uso de técnicas que se fueron perfeccionando gracias al conocimiento empírico adquirido y acumulado durante generaciones. En este contexto, comenzaron a reconocerse diferencias entre los tipos de madera, las especies, o incluso partes del mismo tronco, aunque no implantando este conocimiento y esta manera de hacer estas diferenciaciones de forma sistemática Fitchen (1986).

Durante los siglos XIX y XX, el desarrollo de la ingeniería de los materiales y la implantación de normativas técnicas permitió formalizar el uso estructural de la madera. A partir de ese momento, se establecieron clasificaciones según su resistencia, densidad o durabilidad, y se comenzaron a estudiar en mayor profundidad fenómenos y propiedades como la humedad, la anisotropía y la durabilidad en condiciones variables. Estos factores condicionaron a la madera en un entorno de competencia frente a otros materiales de construcción: el hormigón y el acero, haciendo que perdiera protagonismo debido a que sus competidores ofrecían mayor regularidad y capacidad de cálculo en grandes obras al no verse tan influenciados por las condiciones variables del ambiente.

Por el contrario, en las últimas décadas, la madera ha experimentado un resurgimiento como alternativa estructural, debido a la actual búsqueda de materiales sostenibles y con menor huella ambiental. Este nuevo impulso se ha visto reforzado por el desarrollo de nuevos materiales derivados de la madera aserrada, como son la madera laminada encolada (Glue Laminated Timber, Glulam), la madera laminada cruzada (Cross Laminated Timber, CLT) y la madera microlaminada (Laminated Veneer Lumber, LVL), ver Figura 2, que permiten un mejor aprovechamiento de la madera como materia prima o recurso natural y aportan una previsibilidad, en cuanto a comportamiento mecánico, que la madera aserrada no garantiza.

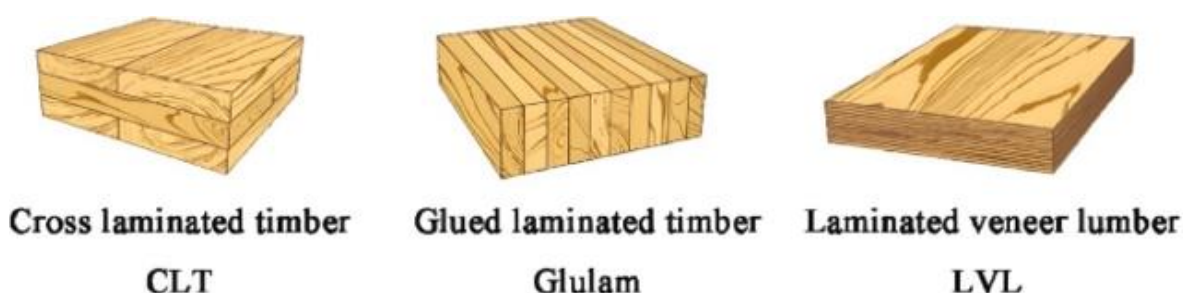


Figura 2. Madera laminada en varios formatos (Naturallywood, 2022).

Así, la madera ha recuperado parte de la importancia que perdió, empleándose especialmente en estructuras de grandes ludes y en edificios que combinan eficiencia energética con estética natural. Los tratamientos modernos han mejorado su resistencia al fuego, a las plagas y a la humedad y la han hecho más duradera y segura para diversas aplicaciones Liu (2024).

2.1.2 El futuro de la madera como elemento estructural

Hoy en día, la madera utilizada como elemento estructural es objeto de constante investigación, buscando mejorar sus prestaciones y/o nuevas aplicaciones para este material. Prueba de ello son las numerosas publicaciones sobre avances tecnológicos en el campo de la madera que aparecen reflejados en sitios web como el blog de Maderas Menur , entre las cuales destacan, entre otras, el desarrollo de una madera transparente que se podría utilizar para la fabricación de ventanas y placas solares; la creación de una “super madera” que es más fuerte que el acero, pero mucho más ligera; y, la aplicación de nuevos tratamientos sobre la madera.

De hecho, el portal Ecoinventos (26 de marzo de 2025), nos anuncia uno de los avances más recientes en el campo de la madera: el desarrollo de un método, denominado autodensificación de la madera, concebido con el fin de aportar a la madera una resistencia tal que sea capaz de competir con el metal en construcción, sin necesidad de utilizar procesos intensivos en energía como son el prensado en caliente que se usaba tradicionalmente para densificar la madera.

En la Figura 3, se presenta una comparativa entre los resultados de un proceso tradicional de densificación por compresión y los resultados que se obtienen con el nuevo método de autodensificación de la madera.

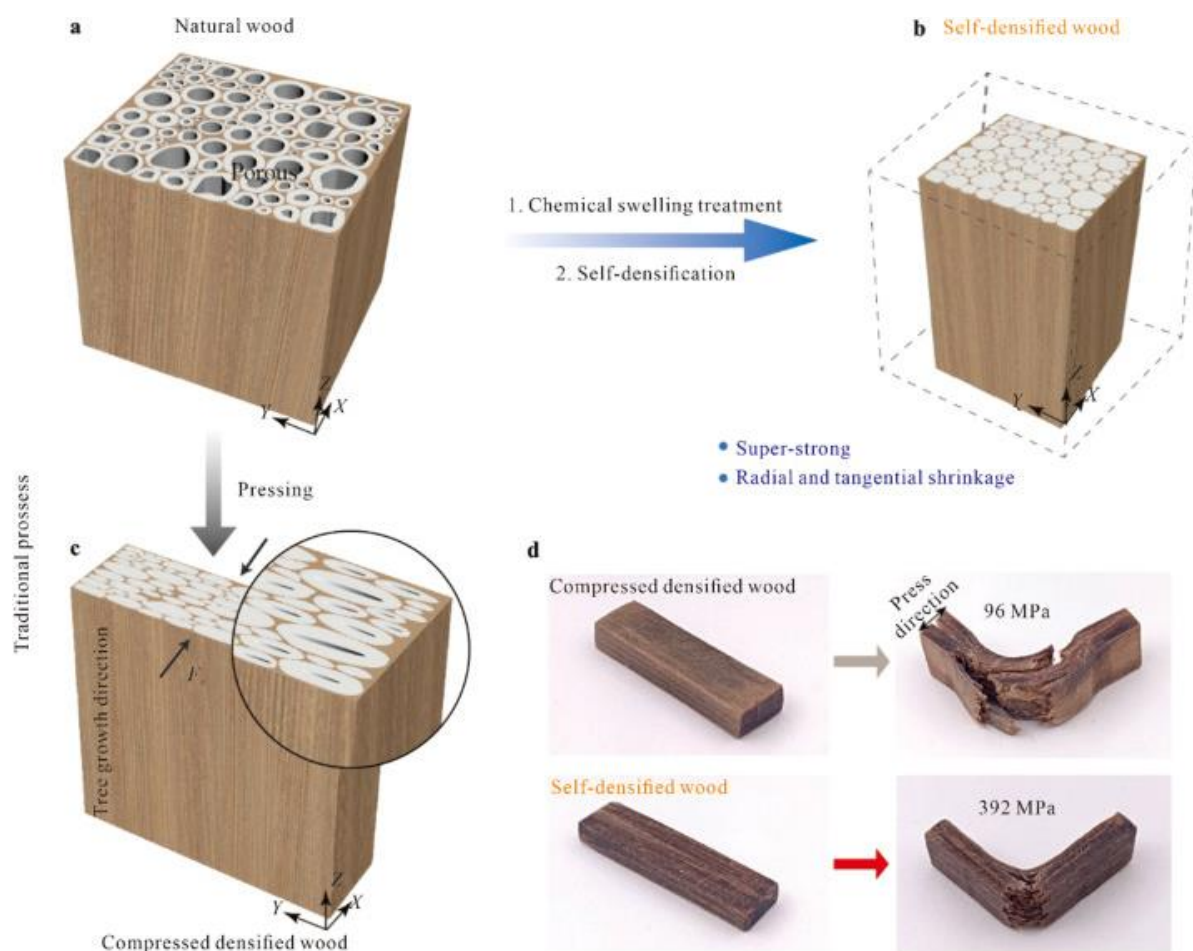


Figura 3. Madera autodensificada frente a la madera densificada por compresión (Huang et al, 2025).

El material resultante del proceso que utiliza la nueva técnica de autodensificación obtiene una resistencia y dureza mucho mayores que las de la madera natural o la madera comprimida empleando los métodos tradicionales.

¿En qué consiste el método o técnica de autodensificación de la madera?

Según el portal Ecoinventos (26 de marzo de 2025), el método diseñado por Huang et al. (2025) se trata de un procedimiento químico que se lleva a cabo en varias etapas:

1. Se hierve un bloque de madera en una solución de hidróxido de sodio y sulfito de sodio, cuyo fin es eliminar parte de la lignina de la madera.
2. Se sumerge el bloque de madera en una mezcla caliente de sal de cloruro de litio y dimetilacetamida, que provoca una expansión interna de las fibras, llenando el lumen.
3. Se deja secar el bloque de madera al aire, a temperatura ambiente, durante 10 horas. Durante este tiempo, el bloque de madera se contrae tridimensionalmente, de manera uniforme, sin perder su forma, aumentando su densidad y resistencia.

¿Por qué se elimina la lignina y se rellena el lumen?

Como bien se comenta en el portal Ecoinventos (26 de marzo de 2025), la estructura interna de la madera está constituida por fibras alargadas compuestas principalmente por celulosa y un adhesivo natural conocido como lignina. Las fibras tienen un canal interno, llamado lumen, que se encuentra hueco, debilitando el material al presentar zonas de baja densidad que no soportan las cargas.

En la primera etapa se elimina la lignina para que, en la segunda, las fibras puedan expandirse libremente, sin la acción del adhesivo que las retenía previamente.

¿Qué propiedades tiene este nuevo material?

La madera adquiere o ve reforzadas una serie de propiedades tras el proceso de autodensificado, presentando:

- Resistencia a tracción ultra-alta.
- Mayor resistencia a flexión.
- Excelente tenacidad frente a impactos.

2.2 La madera desde su origen

Para comprender las características de la madera ensayada en este proyecto, resulta fundamental analizar previamente su origen natural. En su gran mayoría, la madera se obtiene de los árboles, aunque también puede extraerse de otras plantas leñosas de tallo grueso, como ciertos arbustos.

2.2.1 La función de la madera en los árboles

Aunque en el ámbito técnico tratamos la madera como una materia prima, es importante recordar que procede de organismos vivos, compuestos por millones de células interconectadas entre sí cumpliendo funciones biológicas esenciales.

Según Vignote, S. & González, V. (1995). El mercado de la madera en España. En *Producción Maderera en España*. (pp. 44-55). Universidad Politécnica de Madrid. https://pfcyl.es/sites/default/files/biblioteca/documentos/produccion_maderera_en_espana.pdf

Vignote, S. & Martínez, I. (2017). *Madera aserrada II: Defectos y alteraciones*. Universidad Politécnica de Madrid. https://www.researchgate.net/profile/Santiago-Pena-5/publication/311924422_MADERA_ASERRADA_ii_DEFECTOS_Y_ALTERACIONES/links/58639c7808ae8fce490b6841/MADERA-ASERRADA-ii-DEFECTOS-Y-ALTERACIONES.pdf

Wiedenhoeft (2011), la madera realiza tres funciones, Figura 4:

1. Conducir el agua y elementos minerales desde las raíces hasta el tronco y circularla por las ramas para abastecer las hojas. Si esta tarea fallara, el árbol se secaría y moriría rápidamente.
2. Sostener el tronco, las ramas, hojas, etc. y mantener el árbol erguido (soporte mecánico/estructural).
3. Almacenamiento y síntesis de bioquímicos, los cuales le darán a la madera su color y olor característicos.

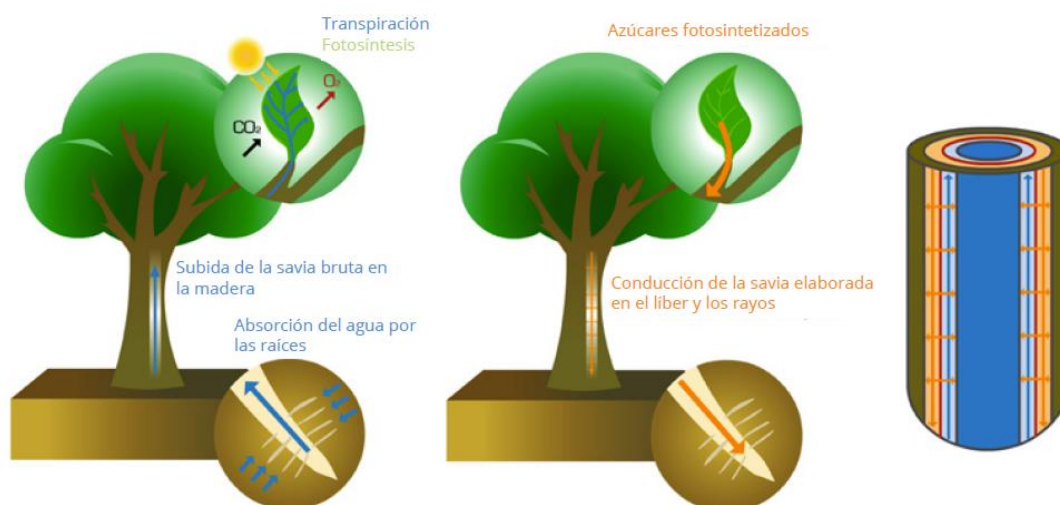


Figura 4. Funciones de la madera en los árboles (Proyecto KEBBE).

2.2.2 Composición de la madera

Según Aguilar & Guzowski (2011), desde el punto de vista químico, los componentes esenciales de la madera son, Figura 5:

- **Celulosa** ($\approx 40\%$): es un polímero con largas cadenas de moléculas de glucosa que forman un entramado de fibras entre las que se almacena la:
- **Lignina** ($\approx 22\%$): sustancia considerada como el "adhesivo"; una vez depositada en la pared celular, se forma la "Madera".
- **Hemicelulosa** ($\approx 20\%$) o productos orgánicos semejantes a la celulosa (componentes estructurales menores).
- **Otras sustancias** ($\approx 20\%$); entre las que figuran: almidón, azúcares, grasas, aceites esenciales, sales minerales, ceras y resinas.

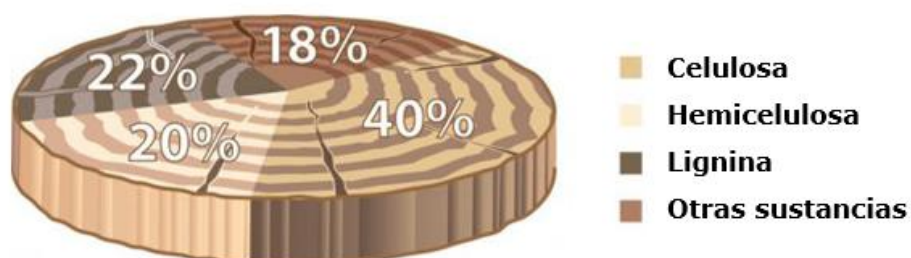


Figura 5. Diagrama de sectores de la composición química de la madera (GEMCO, 2025)

2.2.3 Anatomía de la madera: partes del tronco de un árbol

De acuerdo con Vignote, S. & González, V. (1995). El mercado de la madera en España. En *Producción Maderera en España*. (pp. 44-55). Universidad Politécnica de Madrid.
https://pfcyl.es/sites/default/files/biblioteca/documentos/produccion_maderera_en_espana.pdf

Vignote, S. & Martínez, I. (2017). *Madera aserrada II: Defectos y alteraciones*. Universidad Politécnica de Madrid.
https://www.researchgate.net/profile/Santiago-Pena-5/publication/311924422_MADERA_ASERRADA_ii_DEFECTOS_Y_ALTERACIONES/links/58639c7808ae8fce490b6841/MADERA-ASERRADA-ii-DEFECTOS-Y-ALTERACIONES.pdf

Wiedenhoeft (2011), si examinamos el corte del tronco de un árbol, podemos apreciar, a grandes rasgos, varias zonas bien marcadas o diferenciadas (ver Figura 6); citando desde el interior hacia el exterior, encontramos:

- **Médula:** ubicada más o menos en la parte central, está compuesta por el tejido que se forma antes de producirse la primera madera del árbol. Su diámetro, según la especie, puede variar entre un mm hasta varios cm.
- **Duramen:** es la zona más oscura, situada en el centro. A veces tiene olor, es odorífera. Se dice que no contiene células vivas porque éstas se encuentran fisiológicamente inactivas. Su madera es dura, resistente y menos deformable que el resto.
- **Albura:** franja que rodea al duramen y de más reciente formación, de color más claro.
- **Corteza:** última capa del tronco, la más externa y que se encuentra en contacto con el ambiente. Protege las capas internas de las inclemencias del tiempo y del ataque de agentes externos como son hongos e insectos. Es una capa que se renueva constantemente.

Volviendo a la funcionalidad de la madera y las partes del tronco, el agua es transportada a través de la albura y la función de soporte mecánico la desempeñan tanto el duramen como la albura.

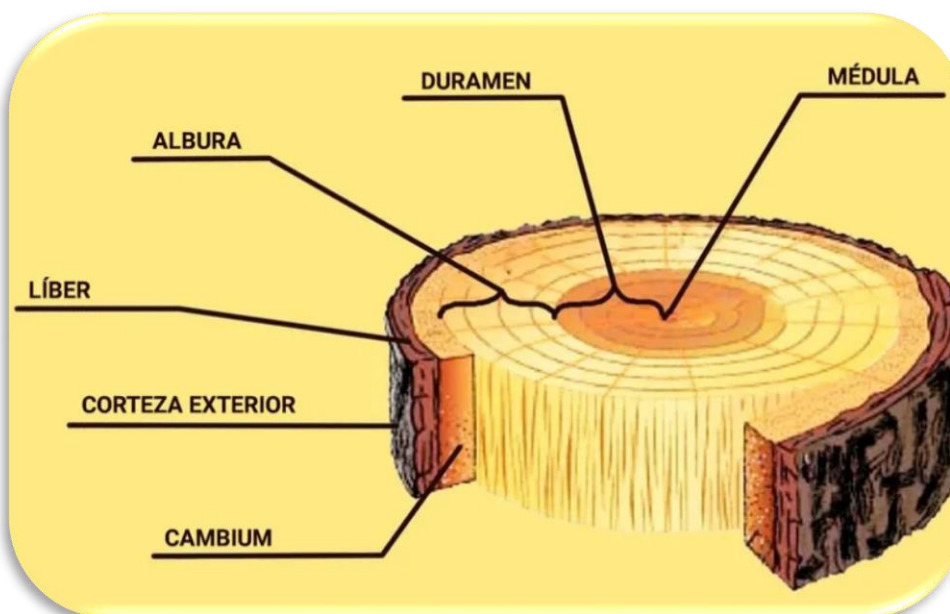


Figura 6. Partes del tronco de un árbol (Maderame, s.f.).

Si entramos más en detalle, como puede verse en la Figura 6, encontraríamos:

- **Líber:** es la capa interna de la corteza, a través de la cual los nutrientes elaborados durante la fotosíntesis se transportan a todas las partes que constituyen el árbol (Menvar del Caribe, s.f.).
- **Cámbium:** es la capa productiva del tronco del árbol. Mediante la división celular, hace crecer el tronco en grosor y el árbol en altura. Sus células forman hacia el interior la madera y hacia el exterior el líber, pudiéndose estudiar los resultados de su desarrollo en los **anillos anuales de crecimiento** que se van formando en el tronco (Menvar del Caribe, s.f.).
- **Anillos de crecimiento:** pueden tener anchuras y tonalidades diferentes y esto es indicativo de ciertos factores:
 - Los **anillos oscuros** se forman en invierno, es una madera más densa y compacta que el árbol produce como “defensa” contra el frío. Un árbol con anillos oscuros muy anchos reflejaría un invierno largo y severo.
 - Por otro lado, los **anillos claros** se forman en verano. El árbol cuenta con buenas temperaturas y nutrientes, teniendo gran actividad vegetal que le permite ensancharse más rápido, produciendo una madera menos compacta.

2.2.4 Análisis microestructural: la madera a nivel celular

Desde el punto de vista microestructural, las células no tienen todas el mismo papel ni desempeñan todas las mismas funciones dependiendo de la especie de la que provenga la madera. Así bien, en especies frondosas o latifoliadas, como roble, castaño, nogal y haya, se observan dos tipos de células con una función para cada tipo; mientras que, en las especies de coníferas, como pino y abeto, estas dos funciones son desempeñadas por un solo tipo de célula.

- **Especies de latifoliadas o frondosas;** correspondientes con especies de hoja caduca y cuyas maderas son duras. Como se puede ver en la Figura 7 estas especies presentan dos tipos de células:
 - **Células conductoras/vasos:** transportan el agua y sales minerales (savia bruta o ascendente), formando una red de suministro que va desde las raíces hasta las hojas, en las que la fotosíntesis produce el alimento. Este alimento, bajo el nombre de savia elaborada o descendente, se distribuye de vuelta por toda la planta mediante los vasos liberianos.
 - **Células de sostén/fibras:** encajadas unas con otras, dan rigidez a la madera y, por consiguiente, al árbol.

En la parte derecha de la misma Figura 7, puede observarse la enorme diferencia que presentan ambos componentes microestructurales.

- **Especies de coníferas;** correspondientes con especies de hoja perenne y maderas blandas. En estas especies las células realizan ambas funciones, tanto la conducción de savia como la función de sostén. En la Figura 8 se ilustra el aspecto de su microestructura.

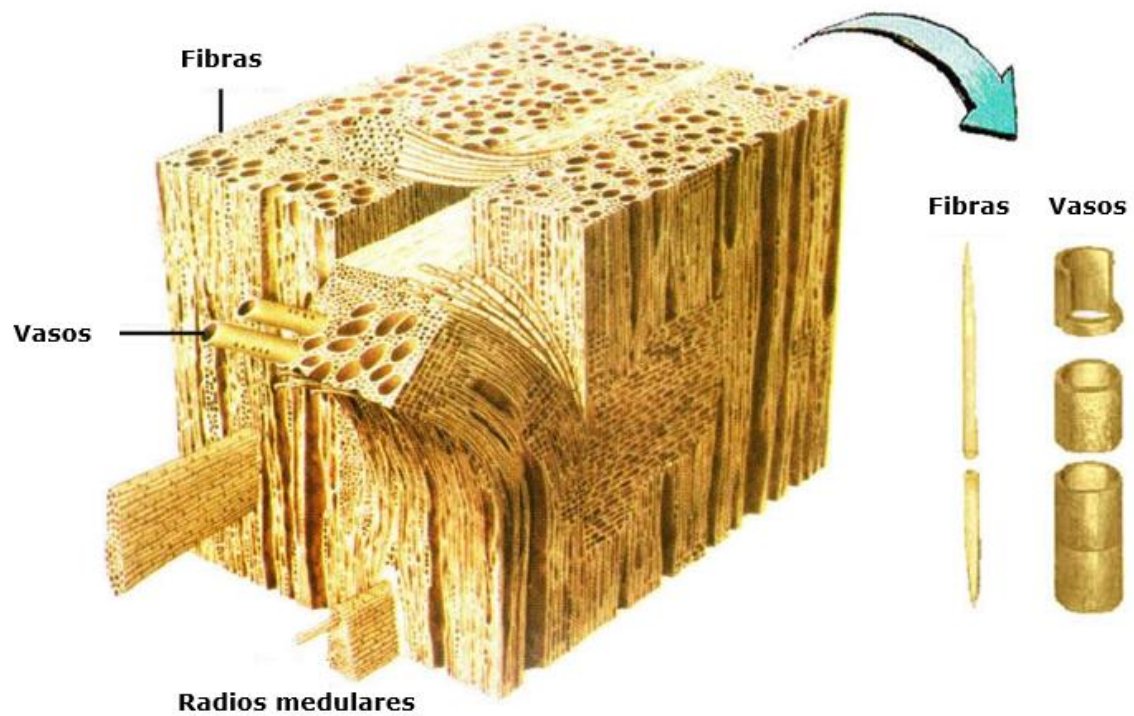


Figura 7. Estructura interna de la madera de especies frondosas o latifoliadas (Mantilla, E. V., s.f.).

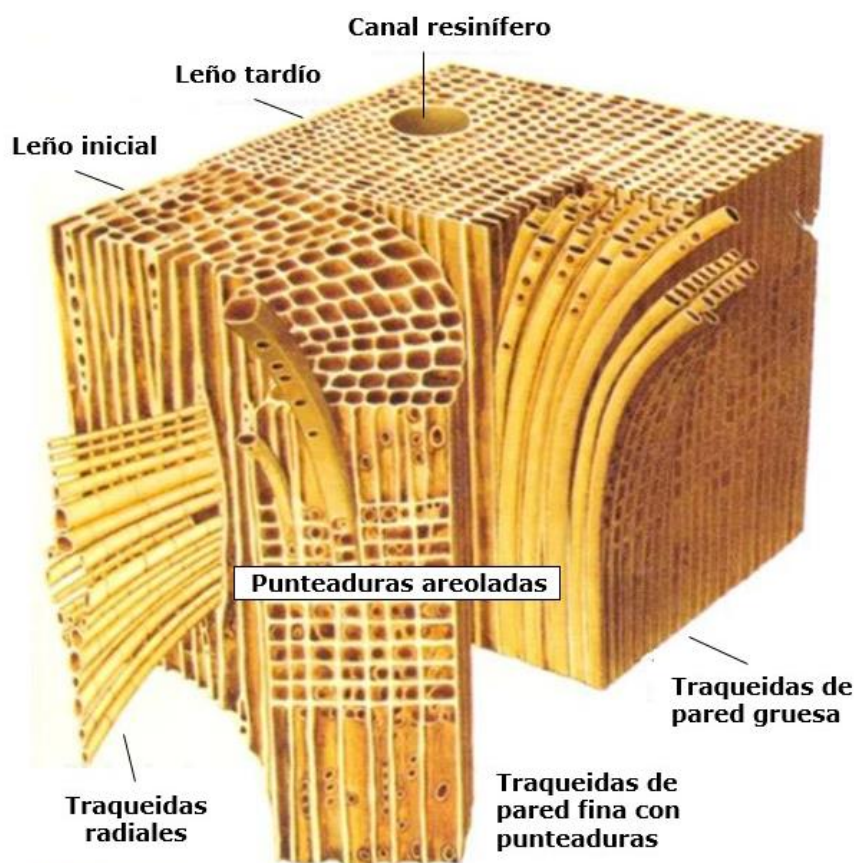


Figura 8. Estructura interna de la madera de especies de coníferas (Balmori, J. A., Acuña, L. & Basterra, L. A. (2016). Estudio de la influencia de la dirección de la fibra en la velocidad de propagación de ultrasonidos (FAKOPP) en madera estructural de "Pinus sylvestris L." y "Pinus Radiata D. Don." <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/17525>

Boschiero, A. T., 2009).

Analizando más en profundidad la estructura interna de la madera se pueden distinguir más elementos, todos ellos se encuentran recopilados y explicados a continuación, en la Tabla 1.

Tabla 1. Componentes de la madera a nivel celular (Gallardo, V. & Robles, X., 2011).

LONGITUDINALES O AXIALES	Vasos: Estructuras cilíndricas, alargadas con forma de tubo unidas a otras longitudinales en forma de elementos vasculares, que conducen el agua y savia dentro del tejido vegetal. Aparecen en las frondosas. El grano identifica el tamaño del diámetro y se clasifica en : Basto o grueso, medio y fino.	
	Traqueidas: Células de la madera formada por tubos de forma oblicua en sus extremos y paredes delgadas. Aparecen en las coníferas. El grano identifica el tamaño del diámetro y se clasifica en : Basto o grueso, medio y fino.	
	Fibras: Orientación general que adoptan las células de la madera (vasos o traqueidas) entre sí, o respecto al eje del árbol. En forma de prisma cortado en sus extremos, con pared y volumen, largas y estrechas. No incluye los elementos vasculares ni las células de parénquima. Pueden ser:	Rectas: Fibras paralelas entre sí y respecto al eje del árbol.
		Onduladas: Fibras paralelas entre sí, pero curvándose respecto al eje del árbol. Pueden aparecer ondulaciones en planos radiales o tangenciales.
		Entrelazada: Fibras inclinadas respecto al eje del árbol de forma que en unos años es en un sentido y otros en sentido contrario.
TRANSVERSALES O PERPENDICULARES	Parénquima: Tejido vegetal esponjoso, de células rectangulares alargadas verticalmente, que almacena o realiza la fotosíntesis.	
	Radios leñosos: Grupo de células rectangulares o cuadradas que unen los vasos y traqueidas. Van de la médula a la corteza y su misión es transportar o almacenar sustancias de reserva. Responsables de que se formen contracciones.	

Como se irá descubriendo a lo largo de este capítulo, la estructura interna de la madera tendrá repercusión tanto en la configuración de las diferentes partes del tronco en sus diferentes etapas de desarrollo, como en las propiedades de la madera de las diferentes especies, así como en el trabajo de identificación de las diversas especies de madera, ya que habrá dejado su huella y una serie de evidencias que los expertos fácilmente podrán diferenciar y catalogar.

De hecho, sin adentrarnos en este apartado, en las propiedades de la madera, se puede hacer una pequeña comparación de los tipos de madera a vista de microscopio (véanse Figura 9 y Figura 10), y observar diferencias en su aspecto estructural que condicionan propiedades como su resistencia mecánica o su dureza.

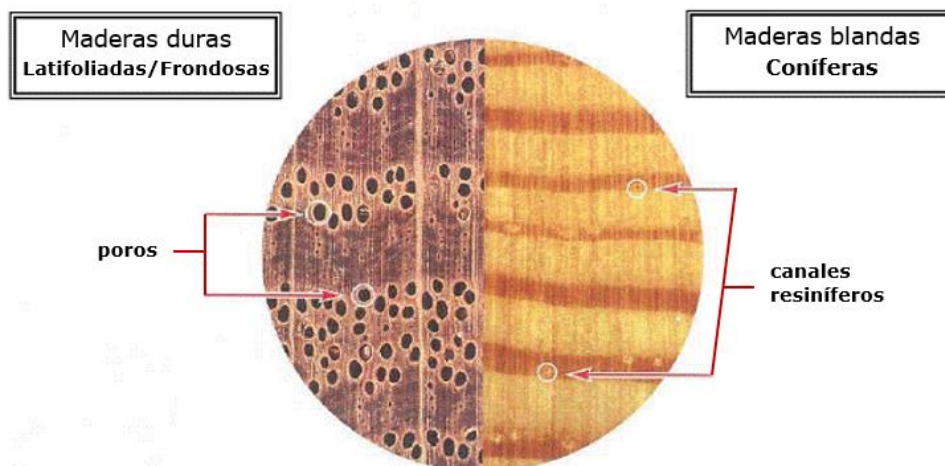


Figura 9. Comparativa de maderas al microscopio (Maderea, 2015).

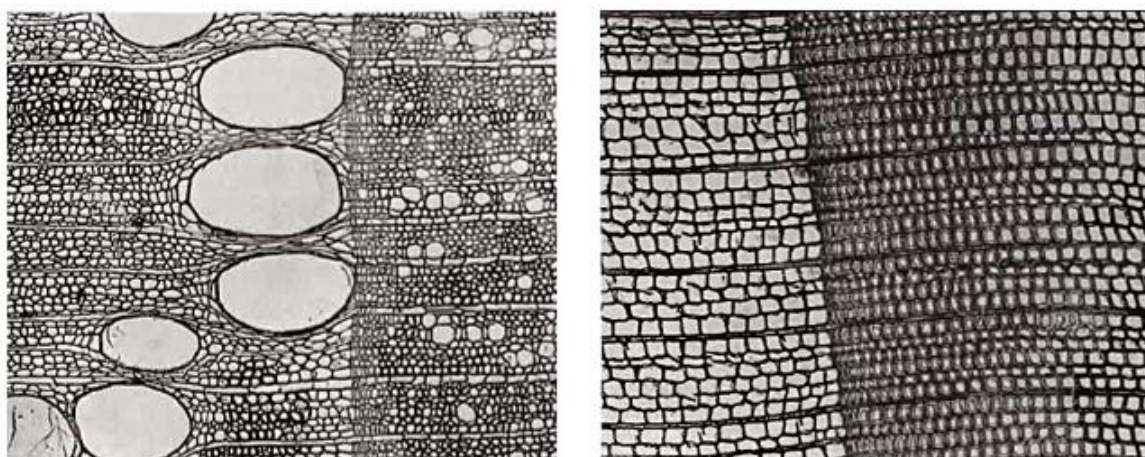


Figura 10. A la izda. madera de especie frondosa/latifoliada, a la dcha. madera de especie conífera; ambas con 75 aumentos al microscopio (Maderea, 2015).

2.3 Propiedades de la madera

2.3.1 Propiedades y características físicas

Anisotropía: la madera puede presentar distinto comportamiento físico en función de la dirección de la veta. Como indica Greemap (2020), en la madera existen tres direcciones principales:

- **Dirección axial:** es la dirección de crecimiento del árbol y, por tanto, la dirección de las fibras.
- **Dirección radial:** es perpendicular a la axial, en la dirección de los radios, cortando al eje del tronco.

- **Dirección tangencial:** es paralela a la dirección radial, se refiere al movimiento o corte que es paralelo a los anillos de crecimiento del árbol, que se forman año tras año en el tronco. Es la dirección en la que la madera experimenta el mayor índice de expansión y contracción (AWI, 2025).

Podemos estudiar las direcciones principales de forma más visual en los ejes representados en la Figura 11, en su parte derecha. Por otro lado, tendríamos ilustradas, a la izquierda, las direcciones de los esfuerzos que se generan en el tronco de madera: los esfuerzos axiales (A) son paralelos a la fibra (0°), mientras que los esfuerzos radiales (R) y tangenciales (T) son perpendiculares a la misma (90°), (madera, 2020).

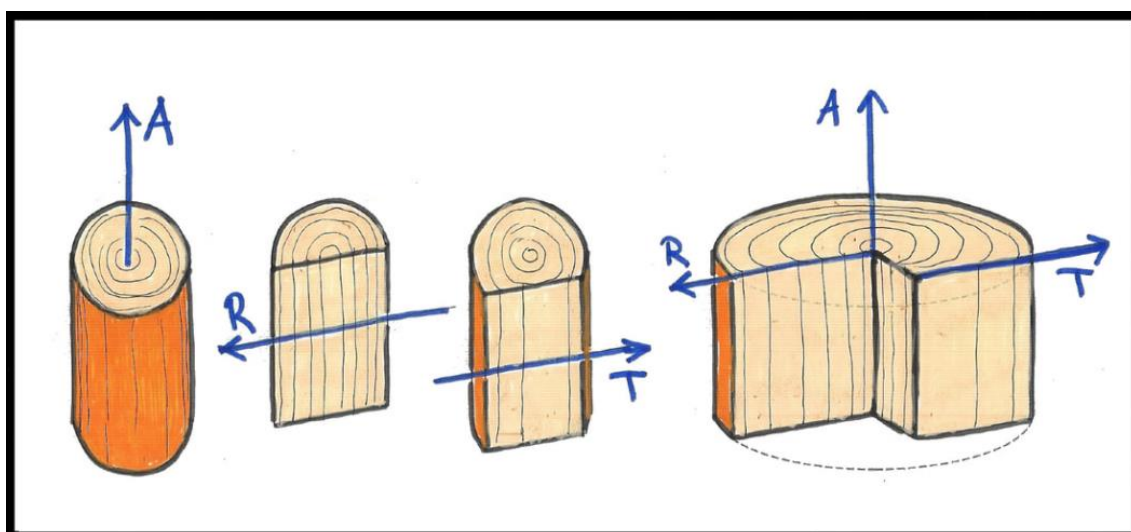


Figura 11. Anisotropía de la madera, (madera, 2020)

Densidad: es la masa por cada metro cúbico de volumen de madera. La madera flota porque es menos densa que el agua, pero no todos los tipos de árbol tienen la misma densidad ($0,3 \text{ g/cm}^3$ - $0,9 \text{ g/cm}^3$), ya que ésta es función de la especie y de las condiciones climáticas en las que se haya desarrollado el árbol, así como de la concentración de fibras de la madera y el espacio entre ellas. De esta forma, los árboles de crecimiento lento tendrán una madera más densa que su contraparte de crecimiento rápido (Forehand, L., s. f. & Greemap, 2020).

Higroscopicidad: es la capacidad que tiene la madera para absorber la humedad del medio que la rodea. "La madera es un elemento vivo, aunque esté cortada y como tal se contrae o expande en función de la humedad" (Greemap, 2020). Este efecto de contracción-expansión será más leve o pronunciado en función del tipo

de madera y de la dirección que se vea afectada por la humedad. Así, de las tres direcciones principales de la madera, la menos afectada por la higroscopicidad es la dirección axial, siendo interesante resaltar que la contracción en la dirección tangencial puede ser de casi el doble que en la dirección radial.

Según Morales, E. (2003), por sí sola, la fuerza capilar del lumen de las células no es suficiente para captar el vapor de agua del entorno y sólo podría llenarse de agua sumergiendo la madera en ella. Por el contrario, los huecos entre las microfibrillas y las fibrillas de la madera son tan pequeños que originan fuerzas capilares suficientes para captar vapor de agua del entorno.

Por otra parte, el aire de la atmósfera del entorno tiene un poder o fuerza desecante que depende de la temperatura, la humedad relativa y la presión a la que se encuentra. Esta fuerza desecante también tiene la capacidad de captar agua de la pared celular de la madera.

Ahora bien, se da un balance de fuerzas, consecuencia del cual, dependiendo de qué fuerza sea mayor, la madera capta o cede vapor de agua al entorno.

La higroscopicidad de la madera está asociada a la absorción-desorción del agua de su entorno que, a su vez, se encuentra ligada a variaciones en sus dimensiones y modificaciones en sus propiedades físicas y mecánicas.

Porosidad: es la capacidad de la madera para absorber o desprender líquidos o gases (Forehand, L., s. f.).

Este fenómeno tiene lugar entre la madera y el entorno, viéndose favorecido por la existencia de unos pequeños orificios que tiene la madera (poros), que conectan la superficie con su interior. Según Wiedenhoeft (2011), existen diferentes tipos de porosidades en función del tamaño de los poros y su variación:

- **Porosidad circular:** la transición entre anillos está bien marcada y los poros se agrupan entre poros grandes y pequeños.
- **Porosidad semicircular:** los poros varían de forma gradual entre pequeños y grandes.
- **Porosidad difusa:** no se aprecian cambios en el tamaño de los poros.

Podemos observar en la Figura 12, de izquierda a derecha, los diferentes tipos de porosidades mencionados previamente:



Figura 12. Transición de anillos (Vignote, S. & González, V. (1995). El mercado de la madera en España. En Producción Maderera en España. (pp. 44-55). Universidad Politécnica de Madrid. https://pfcyl.es/sites/default/files/biblioteca/documentos/produccion_maderera_en_espana.pdf

Vignote, S. & Martínez, I. (2017). *Madera aserrada II: Defectos y alteraciones*. Universidad Politécnica de Madrid. https://www.researchgate.net/profile/Santiago-Pena-5/publication/311924422_MADERA_ASERRADA_ii_DEFECTOS_Y_ALTERACIONES/links/58639c7808ae8fce490b6841/MADERA-ASERRADA-ii-DEFECTOS-Y-ALTERACIONES.pdf

Wiedenhoeft, 2011).

Dureza: es la resistencia que presenta la madera a ser rayada, penetrada y atravesada por otros objetos o cuerpos (Forehand, L., s. f.). Cabe resaltar que esta propiedad está relacionada directamente con la densidad, el peso y la cantidad de nudos que presenta la madera (los nudos son más duros).

Como bien afirman Wiedenhoeft (2011) & Greemap (2020), según su dureza, en esencia existen dos tipos de madera: maderas duras y maderas blandas.

- **Maderas duras:** provenientes de árboles de hoja ancha (latifoliados), de crecimiento lento y hoja caduca (angiospermas). En la Figura 13 pueden observarse algunos ejemplos de maderas duras.

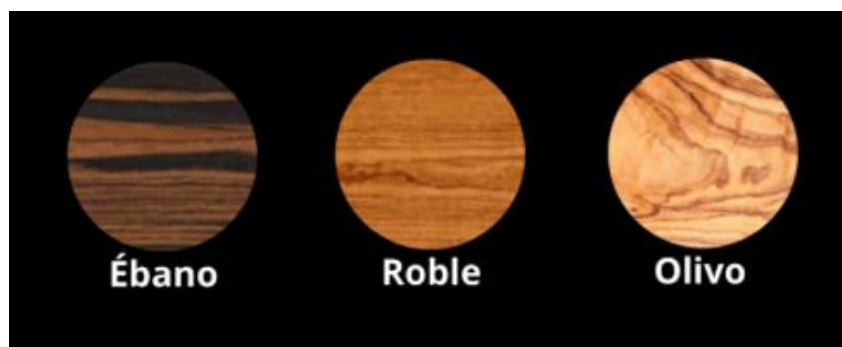


Figura 13. Aspecto de diferentes ejemplos de maderas duras (A&C, 2022).

- **Maderas blandas:** provenientes de coníferas, árboles de crecimiento rápido y hoja perenne (gimnospermas). Podemos recurrir a la Figura 14 para saber sobre el aspecto que tienen las maderas blandas.



Figura 14. Aspecto de diferentes ejemplos de maderas blandas (A&C, 2022).

A la clasificación anterior se le puede añadir un tercer grupo intermedio entre los dos anteriores:

- **Maderas semiduras/semiblandas:** son maderas que, por sus propiedades o características, cuesta catalogar en uno u otro grupo y quedan en este grupo intermedio. En la Figura 15 y la Figura 16, se muestran varios ejemplos de maderas semiduras y semiblandas, respectivamente.



Figura 15. Aspecto de diferentes ejemplos de maderas semiduras (A&C, 2022).



Figura 16. Aspecto de diferentes ejemplos de maderas semiblandas (A&C, 2022).

Estabilidad: se refiere a la reacción que experimentará la madera ante los cambios de temperatura de su entorno. Una madera estable podrá expandirse o contraerse mucho para adaptarse a las variaciones de la temperatura (Greemap, 2020). Esto, como veremos más adelante, la madera lo podrá hacer bajo unas condiciones de humedad y temperatura ambientes, en las cuales las variaciones sean progresivas y no muy bruscas.

Conductividad: esta propiedad depende en gran medida de la humedad contenida en la madera (cuanto más seca esté la madera, menos cantidad de agua tenga almacenada, peor conductor será, tanto eléctrico como térmico; la madera normalmente actúa como aislante, es el agua lo que la convierte en conductor), de su densidad (en las maderas más pesadas y densas la conductividad es mayor que en las maderas ligeras y porosas), y de la dirección de las fibras (la conductividad es mayor en el sentido longitudinal de las fibras) (Oposinet, s.f.).

Óptica: esta característica sensorial de la madera hace referencia a “cómo se ve la madera”, cómo la percibimos con los ojos ya que cada tipo de madera tiene su color y su textura propia. La radiación ultravioleta del sol puede afectar a estas características, oscureciendo la capa superficial de la madera con el tiempo si no

es protegida adecuadamente. Para evitar estos cambios y/o daño a la madera se pueden emplear barnices, esmaltes o lacas (Greemap, 2020).

Olor: es una característica sensorial de la madera propia de cada especie y que puede servir como punto diferenciador o identificativo entre maderas a través del olfato. También puede ser indicador del buen o mal estado de la madera (cuando la madera se pudre produce un olor desagradable, al contrario que cuando está sana). El olor de la madera tiene su origen en la zona central del tronco (el duramen), a consecuencia de los componentes químicos naturales que acumula la madera en esta zona (Oposinet, s.f. & Greemap, 2020).

Existe una amplia gama de especies de madera y, por tanto, una gran variedad de olores asociados a dichas especies. Hay maderas que destacan frente al resto en cuanto a su olor, son aromáticas, como es el caso de la madera de sándalo, debido a esto se emplean en herboristería y perfumería, entre otras de sus aplicaciones como la fabricación de muebles (Esteban, M. (2003). *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructura de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.1404> Estévez, 2019).

Biológicas: como mencionamos antes, la madera es un elemento vivo y, por tanto, biodegradable. Debido a esto, puede verse atacada por agentes de naturaleza biológica como son los insectos, los hongos y las bacterias. Estos ataques pueden, entre otros, dar inicio al proceso de descomposición de la madera, causando daños irreversibles y causando que la madera se pudra. Las maderas son más propensas a sufrir estos ataques a partir del 20% de humedad (Greemap, 2020).

2.3.2 Propiedades mecánicas

Estas propiedades dependen en gran medida de la densidad o peso específico de la madera, y del grado de humedad que contenga (Oposinet, s.f.). Entre las propiedades mecánicas más reseñables de la madera citaremos:

Tracción: es la resistencia que presenta la madera a ser estirada. Como puede verse en la Figura 17(a) y Figura 17(b), los esfuerzos de tracción se representan como dos fuerzas de dirección opuesta (signo contrario) que salen de la pieza, alargando la longitud de la pieza y reduciendo su sección (Oposinet, s.f.).

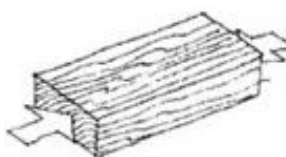
Compresión: es la resistencia que presenta la madera a su aplastamiento, el cual será mayor en sentido perpendicular a sus fibras y menor en el sentido longitudinal de las mismas (Oposinet, s.f.). La representación de los esfuerzos de compresión, como se observa también en la misma Figura 17(c) y Figura 17(d), son fuerzas de sentido opuesto al igual que las de tracción, pero de sentido entrante en la pieza.



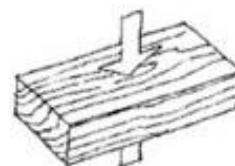
(a) Tracción axial



(b) Tracción normal a las fibras



(c) Compresión axial



(d) Compresión normal a las fibras

Figura 17. Esfuerzos de Tracción-Compresión sobre una pieza de madera.

Flexión: es la capacidad que tienen las piezas de madera de resistir el trabajo de cargas uniformemente repartidas, aplicadas a un solo punto (ver Figura 18) o en varios puntos, estando las piezas de madera descansando sobre dos apoyos (en la figura referida los apoyos se encuentran representados como dos flechas que apuntan hacia arriba para así contrarrestar la carga puntual ejercida y tener un sistema de fuerzas equilibrado $\sum F = 0$). En este caso, esto hace que se acorten las fibras de la parte superior, por la presencia de esfuerzos de compresión, y que se alarguen las fibras de la parte inferior, por la aparición de esfuerzos de tracción (Oposinet, s. f. & Greemap, 2020).

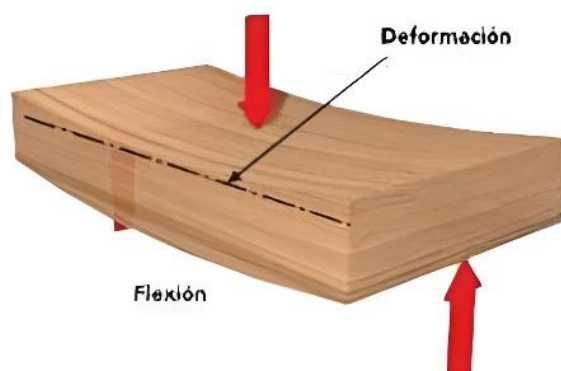


Figura 18. Flexión positiva de una viga de madera con carga aplicada sobre un punto (Acosta, s.f.).

Resistencia al corte: también conocida como cortadura o cizalladura. Es la resistencia que oponen las fibras de la madera a la acción de corte de las fuerzas paralelas (ver Figura 19), que tienden a desgarrar la sección transversal de la pieza de madera por el deslizamiento opuesto de las capas de la madera (Oposinet, s. f.).

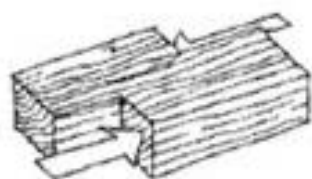


Figura 19. Representación de los esfuerzos de corte o cortante en pieza de madera.

Hendibilidad/Resistencia a la hienda: es una propiedad que está relacionada con la facilidad o resistencia que tiene la madera para romperse a lo largo de sus fibras y vetas, mediante separación de las mismas (comúnmente denominado "hienda"), al aplicar un esfuerzo de tracción transversal, Figura 20. Dicha resistencia es baja en el sentido de las fibras, lo que resulta de interés en actividades como el corte de leña pero que puede resultar perjudicial si lo que se busca es la unión de piezas mediante clavos o tornillos. Ejemplos de maderas hendibles son: castaño, alerce y abeto; mientras que de maderas poco hendibles tenemos: olmo, arce y abedul (TECNO Y TIC, s. f.).



Figura 20. El corte de leña muestra la baja resistencia a la hienda que presenta la madera en la dirección de sus fibras, imagen recreada con IA.

Torsión: es la resistencia que opone la madera sujeta por un extremo a ser retorcida y deformada cuando se la pretende aplicar un giro normal a su eje a causa de ejercer una fuerza que actúa como el brazo de una palanca en su extremo libre (Oposinet, s. f), Figura 21.



Figura 21. Torsión de una viga de madera, imagen generada con IA.

Resistencia al desgaste: hace referencia a la resistencia a la pérdida de material por el roce o la erosión de la madera (Oposinet, s. f.).

Elasticidad: es la capacidad que tiene la madera para recuperar su forma inicial, sin sufrir daños permanentes, después de verse sometida a una deformación (Acosta, s. f.).

Flexibilidad: es la capacidad que presenta la madera para doblarse y mantenerse en una misma posición sin romperse y sin volver a la posición inicial (Greemap, 2020).

Tenacidad: es la resistencia que opone la madera a romperse ante un impacto fuerte y la capacidad de absorción y disipación del golpe sin verse afectada (Forehand, L., s. f. & Oposinet, s. f.).

Resistencia a fatiga: se refiere a la capacidad de la madera de soportar tensiones repetidas o cargas cíclicas durante un determinado tiempo o número de repeticiones (ciclos) sin llegar al fallo estructural. En la madera, los signos del fallo por fatiga pueden manifestarse como un deterioro gradual que va avanzando hasta la aparición de grietas o fracturas. Existe también el concepto de **fatiga higroscópica y/o dimensional**, fallo como consecuencia del cual la madera pierde su capacidad de respuesta a los cambios de humedad (Guindeo & García, 1991).

2.3.3 Otras propiedades de la madera

Acústicas: hay maderas, como el pino, que dificultan o impiden el paso del sonido, es por ello que se emplean en trabajos de aislamiento acústico. Por el contrario, hay otras maderas que, por su constitución, no sólo dejan pasar el sonido y lo transmiten, sino que lo amplifican; estas maderas se utilizan para fabricar la caja de resonancia de algunos instrumentos musicales (Oposinet, s. f.).

Térmicas: la madera no es un buen conductor del calor y esto es consecuencia de su gran porosidad. Se utiliza como aislante térmico, ya que dificulta el paso del calor y en función del tipo de madera lo hace con mayor o menor eficacia, siendo las maderas ligeras y blandas (las más porosas) las maderas más aislantes, y las maderas pesadas y duras (las más densas y compactas, con menos poros) las menos aislantes (Greemap, 2020 & Oposinet, s.f.).

Inflamación y combustión: la madera es inflamable, arde, puede quemarse y así es considerada como un combustible de origen vegetal, lo que es una cualidad como materia prima en sí misma pero un defecto como material de construcción

y decoración (Oposinet, s. f.). No obstante, la madera presenta un comportamiento frente al fuego favorable en comparación con materiales como el acero, debido a su capacidad de carbonización controlada. Así, al ser expuesta a altas temperaturas, sus capas más externas sufren un proceso de carbonización lo que produce que estas actúen como aislante y protejan el núcleo del material, lo que retrasa la pérdida de capacidad estructural, véase la Figura 22. Además, en el caso de la madera laminada encolada (Glulam), para mejorar aún más su resistencia al fuego, se aplican tratamientos ignífugos que ralentizan la propagación del fuego y mejoran la protección del material. Estos suelen ser capas protectoras, pinturas o impregnaciones que refuerzan sus propiedades ignífugas (Forest Products Laboratory, 2010).

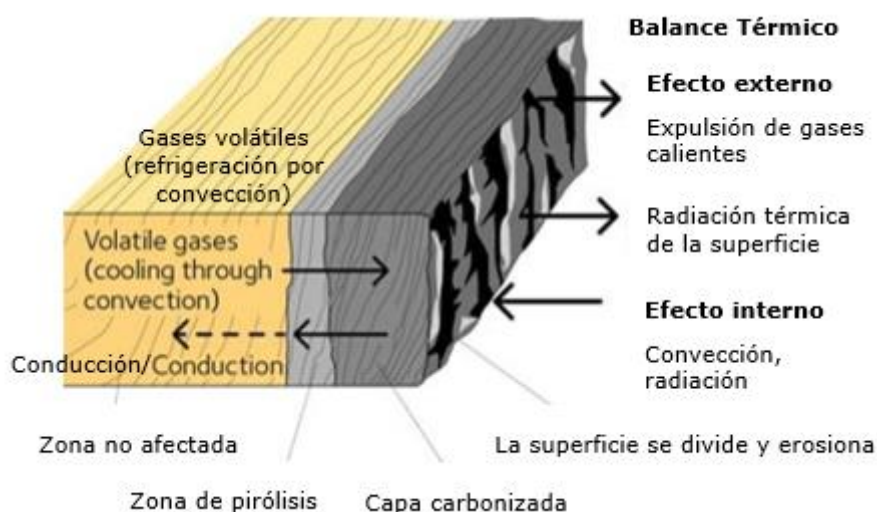


Figura 22. Proceso de carbonización de la madera (Swedish Wood, s. f.).

2.4 Defectos y anomalías de la madera

Según Romero A. & Medina G. (s.f.), la madera puede presentar, en mayor o menor medida, una serie de defectos o particularidades, o estar afectada por anomalías que pueden modificar su comportamiento. A continuación, se realiza una recopilación de los principales:

- **Nudos:** son resquicios de lo que en su día fueron las ramas del árbol; desviaciones de las fibras consecuencia de ramas que se cortaron o se secaron y fueron cubriéndose con tejidos. La madera con nudos es menos resistente y se rompe con más facilidad debido a estas discontinuidades que presentan sus fibras. Los nudos se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios.
 - En función de cómo estaba la rama en el momento de talar el árbol o del estado del nudo, tenemos: nudos vivos y nudos muertos, ver Figura 23.
 - Nudos vivos o sanos y adherentes: la rama estaba viva cuando se cortó el árbol. Tienen una mayor cantidad de resina y no son tan dañinos como los nudos muertos.
 - Nudos muertos: la rama estaba muerta cuando se cortó el árbol. Son oscuros (Nudo negro) y no se encuentran muy adheridos al resto de la madera. Suelen presentar pudrición (Nudos viciosos o podridos) y pueden llegar a caerse o saltar (Nudos saltadizos) dejando huecos.

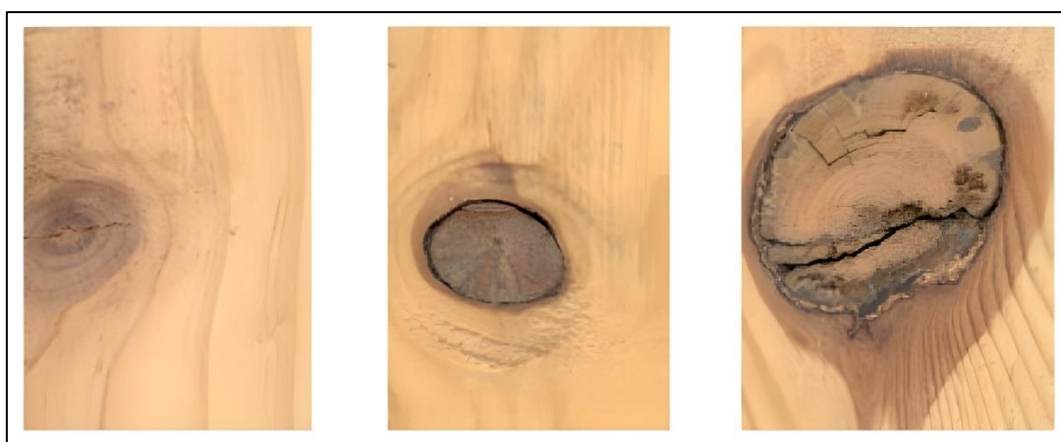


Figura 23. Diferentes tipos de nudos de acuerdo con su estado (Romero A. & Medina G.

- Atendiendo al tamaño de los nudos, se pueden apreciar: Nudo en ojo de perdiz (<5mm); Nudo pequeño (15-25mm); Nudo grande (25-40mm); y, Nudo muy grande (>40mm).
- Según la forma de los nudos, Figura 24, se pueden observar: Nudo redondo o circular; Nudo elíptico u ovalado; y, Nudo en espiga.

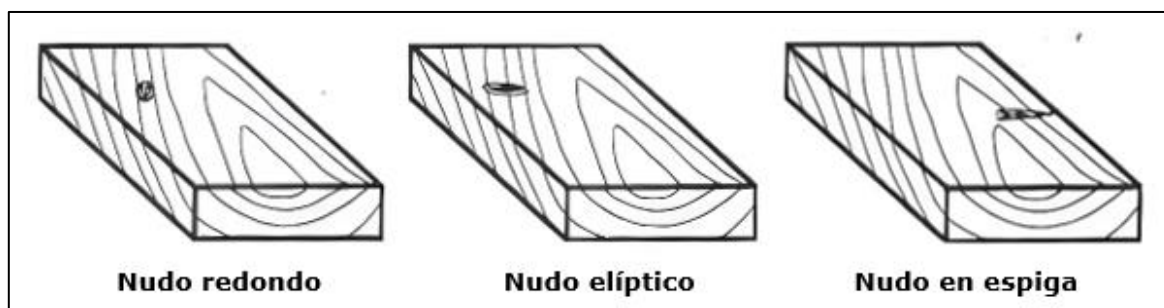


Figura 24. Tipos de nudo según su forma (Vignote, S. & Martínez, I.).

- **Médula:** no es un defecto propiamente dicho sino de un elemento anatómico característico del árbol, Figura 25. Sin embargo, se considera como tal en el ámbito industrial porque su constitución, más blanda, menos resistente y de color diferente al resto de la madera, suele ser el motivo de rechazo en las piezas que lo presentan.



Figura 25. Médula incluida en viga de madera, imagen generada con IA.



Figura 26. Gema presente en viga de madera, imagen generada con IA.

- **Gemas:** son un defecto típico derivado del proceso de aserrado. Como se puede apreciar en la Figura 26, consiste en la presencia de restos de corteza visibles en alguna de las aristas de la pieza de madera, lo que permite observar parte de la sección circular original del fuste.

- **Fendas (o rajaduras):** son roturas locales de la madera causadas por separación de sus fibras, y que se producen en los planos de corte que contienen la dirección radial y el eje longitudinal del árbol. Estas roturas son consecuencia de la acción de tensiones internas originadas por cambios en la temperatura y en el contenido de humedad de la madera.
Existen, a su vez, dos tipos de fendas, en función de cuál sea el origen de los esfuerzos que se dan sobre la madera.

- Fendas de desecación: se producen cuando el árbol muere y la humedad de la madera tiende a equilibrarse con la del entorno. La madera presenta entonces un gradiente de humedad que la lleva, como cuerpo sólido, a reducir su tamaño, provocando un estado de tensiones, siendo de tracción y perpendiculares a la fibra sobre la superficie mientras que en el interior actúan tensiones de compresión. Si el gradiente de humedad mencionado es grande, las tensiones, por consiguiente, también lo son y se produce la rotura en la zona de la superficie (ver Figura 27), debido a que la madera es muy poco resistente a las tensiones de tracción.



*Figura 27. Fendas de desecación
(Romero A. & Medina G.*



*Figura 28. Fendas de cementado
(Romero A. & Medina G. .*

- Fendas de cementado: se producen por falta de cuidado durante el secado de la madera. En este caso, cuando la madera del interior comienza a bajar del 30% de humedad, se produce una inversión de las tensiones, dándose la tracción en la superficie y la compresión en el interior, por donde se produce la rotura, teniendo como resultado fendas que se extienden desde el centro hacia el exterior de la tabla, como puede verse en la Figura 28.

- **Grietas:** separación entre fibras de la madera, de forma longitudinal y tamaño variable, sin separación completa entre fragmentos, Figura 29. Se propagan en la dirección radial. Suelen darse por falta de humedad, en maderas que se secaron excesivamente rápido. Cuando las grietas forman una estrella en el centro del tronco, este defecto es conocido como “pata de gallina”. En caso de que el defecto se extienda a todo el espesor del tronco, constituye un defecto grave que imposibilita la obtención de tablonés.



Figura 29. Grietas en la sección del tronco de un árbol, imagen generada con IA.

- **Acebolladuras:** es un tipo de fisura o grieta que se produce entre los anillos de crecimiento a causa de esfuerzos que inciden sobre la madera, Figura 30 y Figura 31.

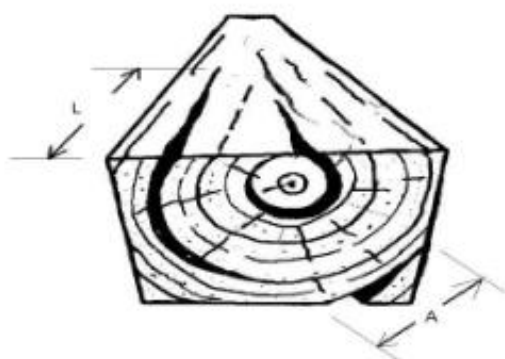


Figura 30. Acebolladuras en durmiente de madera (NOM-056-SCT2-2016).



Figura 31. Acebolladura en taco de madera, imagen generada con IA.

- **Desviación del grano, hilo o fibra:** es una anomalía que se caracteriza porque la fibra se encuentra orientada formando un ángulo, de mayor o menor magnitud, respecto al eje longitudinal de la pieza, Figura 32.

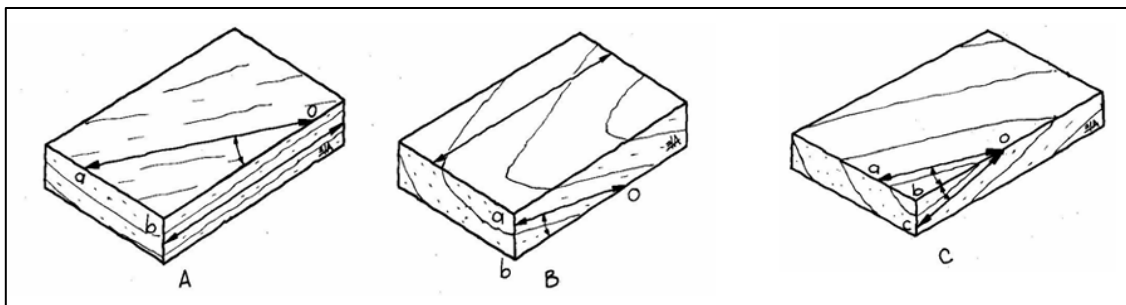


Figura 32. Desviación de la fibra (A) y (B) en un plano, (C) en dos planos

(Echenique y Robles, 1993).

- **Madera enteada, con bolsas de resina o taninos:** algunas especies de maderas experimentan un proceso por el cual su duramen y, en ocasiones, también la albura, se impregnan de resina, Figura 33. Este fenómeno no sólo modifica el color y el olor de estas maderas, sino que también les confiere un aspecto característico y fácilmente identificable, se puede observar en la Figura 34.



Figura 33. Bolsa de resina en viga de madera,
imagen generada con IA.



Figura 34. Viga con madera enteada
imagen generada con IA.

- **Madera de compresión:** es una anomalía que se presenta en maderas procedentes de árboles que han crecido inclinados o torcidos. Se puede identificar visualmente porque las franjas de madera tardía son considerablemente más anchas que las de madera temprana, Figura 35. Este desarrollo irregular en la formación de la madera conlleva importantes problemas de deformaciones por lo que se recomienda descartar las piezas que la presentan. Se considera un defecto no deseable.



Figura 35. Aspecto de la madera de compresión, (Romero A. & Medina G. , s.f.)

- **Deformaciones:** las más habituales o comunes se muestran, a modo de resumen, en la Figura 36.

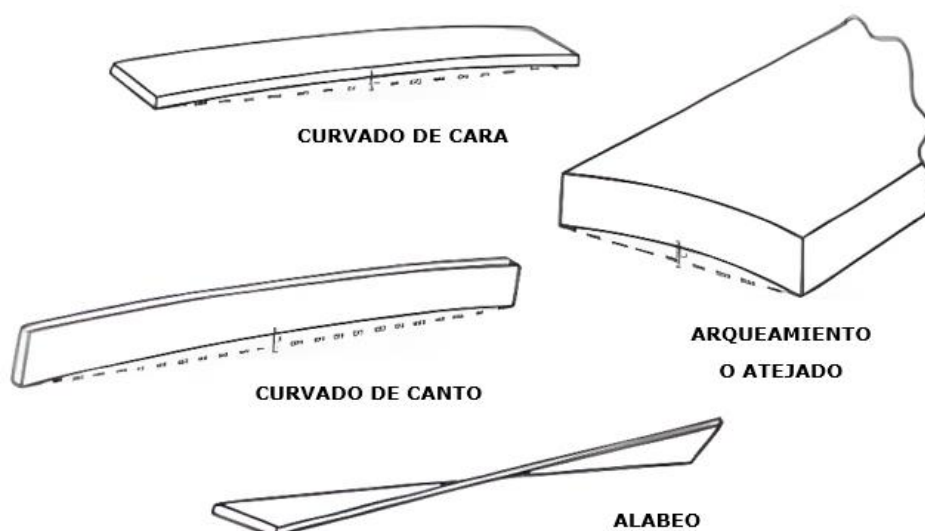


Figura 36. Tipos de deformaciones más comunes en la madera.

- **Defectos de grueso y medida:** son un reflejo de la falta de planitud de las caras, falta de paralelismo entre caras o un defecto en el espesor de las piezas aserradas. En la madera aserrada se consideran dos dimensiones: la nominal y la real. Entre la dimensión real y dimensión nominal hay una diferencia de unos milímetros consecuencia de la reducción de volumen que experimenta la madera durante el proceso de secado.

- **Ataque de organismos xilófagos.** Aunque existen multitud de organismos que se alimentan de madera, los hongos y los insectos representan los agentes bióticos más relevantes, debido a la gravedad de las anomalías que provocan en este material. Entre estas anomalías cabe destacar:
 - Coloraciones: son anomalías causadas por hongos que se alimentan de los nutrientes de las células de la madera, provocando un cambio de coloración debido al crecimiento del micelio fúngico en el interior del material, Figura 37.

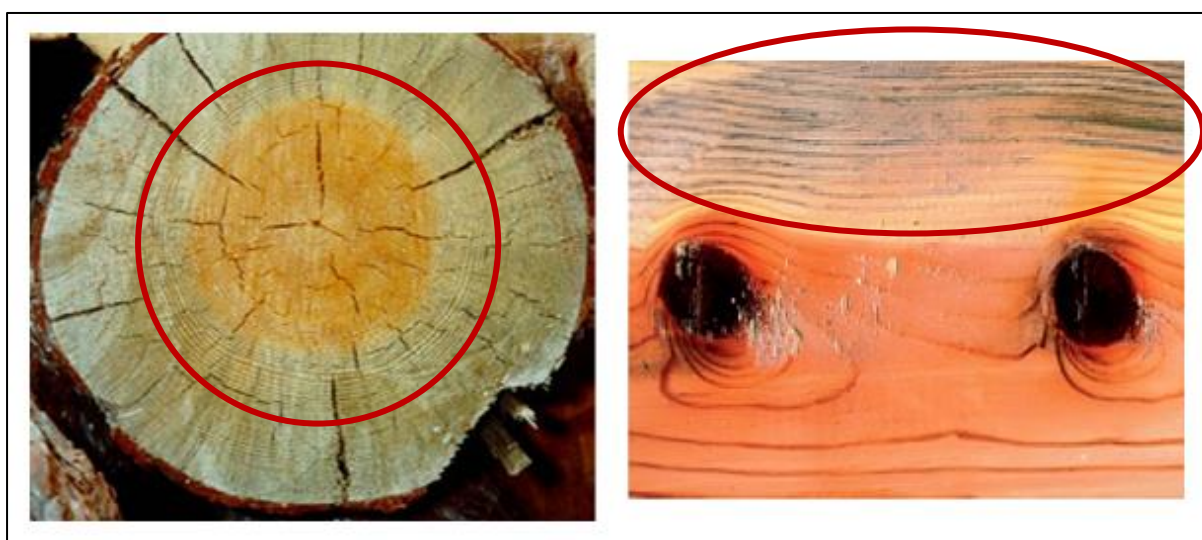


Figura 37. Coloraciones en la madera (Vignote, S. & González, V. , 1995; Romero A. & Medina G., s.f.)

- Pudriciones: son anomalías causadas por hongos alimentándose de la pared celular de la madera y originando la destrucción de esta, Figura 38.

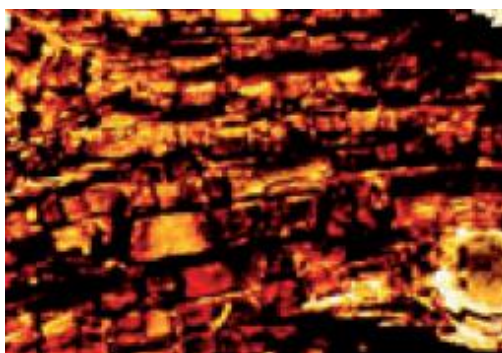


Figura 38. Pudrición de la madera (Romero A. & Medina G. , s.f.).

- Picaduras: son agujeros, en general milimétricos⁴, que han sido causados por insectos, que en alguna fase de su desarrollo se alimentan de madera formando galerías, Figura 39.

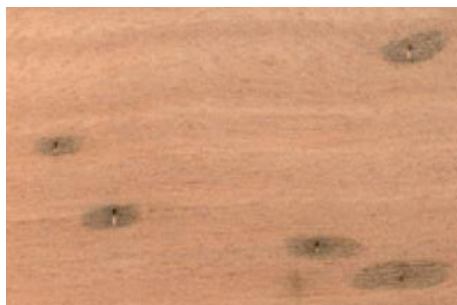


Figura 39. Picaduras de insectos en la madera (Romero A. & Medina G.).

2.5 Corte de la madera

La madera que se utiliza tanto en construcción como en decoración proviene del despiece de troncos pertenecientes a la amplia variedad de especies de árboles que se encuentran distribuidas por todo el mundo, cada una con unas propiedades físicas y mecánicas características. Además de estos factores, el tipo de corte aplicado al tronco resulta determinante para definir su funcionalidad y las características finales de cada tabla extraída, Figura 40.

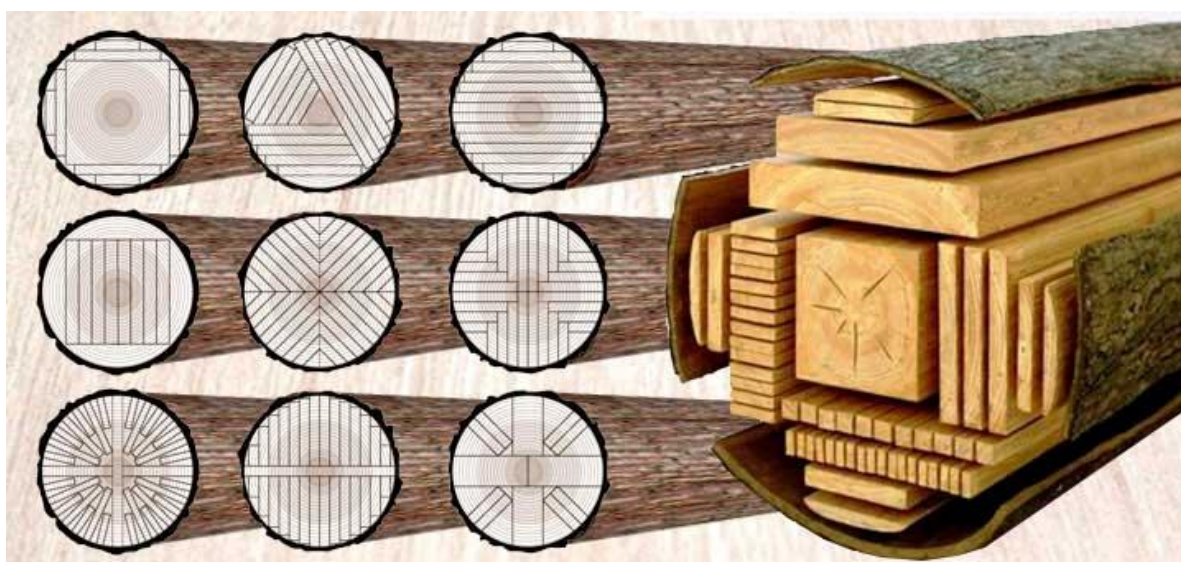


Figura 40. Tipos de cortes de madera (Kósten Art, 2024).

⁴ Existen casos particulares, como el de los cerambícidos (carcoma grande), que pueden dar lugar a perforaciones del orden del centímetro.

De acuerdo con la web de Maderas Menur, como formas de aserrado o corte de la madera, se presentan tres técnicas básicas: Corte radial, Hilos encontrados y Cortes paralelos; así como algunas variaciones que derivan de estas.

- **Corte Radial (Rift Sawn).** El corte se realiza de manera perpendicular a los anillos de crecimiento, Figura 41. La veta queda a la vista, evita alabeos (deformaciones que encorvan los bordes de las tablas) y fendas (grietas longitudinales), pero genera gran cantidad de material desperdiciado.

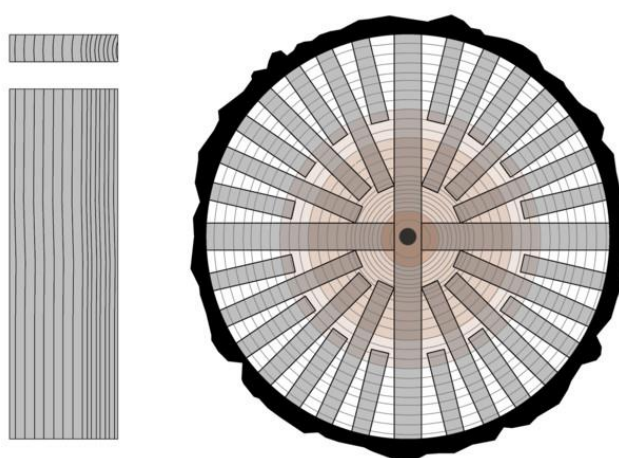


Figura 41. Técnica de corte: Corte Radial (Maderas Menur, 2018)

- **Hilos Encontrados (Quarter Sawn).** Los cortes se realizan paralelos a los ejes del tronco, Figura 42. De este proceso se obtienen piezas con gran cantidad de vetas y una baja tendencia a alabeos y deformaciones.

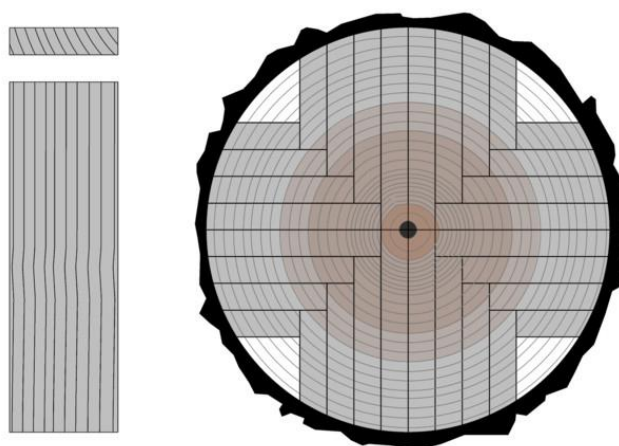


Figura 42. Técnica de corte: Hilos Encontrados (Maderas Menur, 2018)

- **Cortes Paralelos (Flat Sawn).** Las piezas que resultan de este método no son de una excelente calidad, pero es un método muy utilizado, Figura 43. La pieza central, coincidente con el núcleo, puede tender a resquebrajarse, mientras que las piezas siguientes son propensas a curvarse.

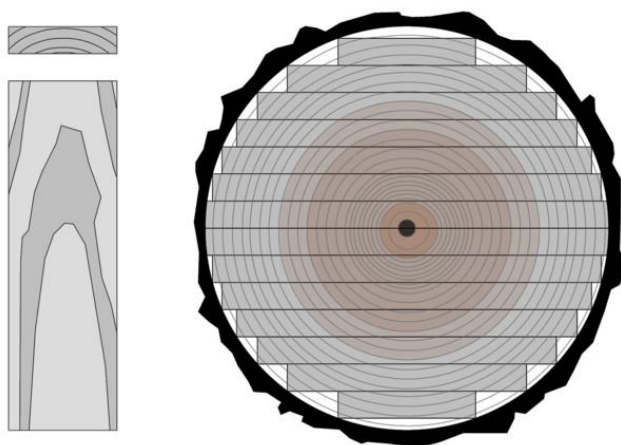


Figura 43. Técnica de corte: Cortes Paralelos (Maderas Menur, 2018)

- **Hilos Paralelos.** Proceso similar al anterior, pero del cual se extraen piezas de menor sección y posibilidad de curvarse transversalmente, Figura 44.

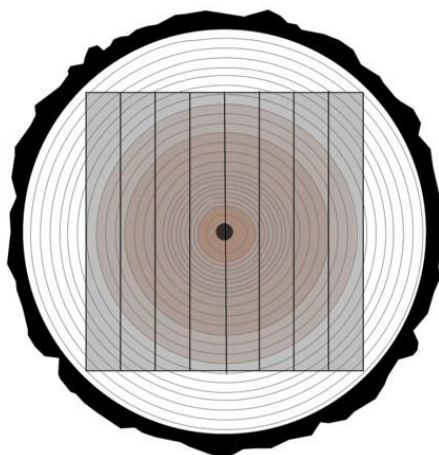


Figura 44. Técnica de corte: Hilos Paralelos (Maderas Menur, 2018)

- **Método Cantibay.** Este método permite la obtención de tablas anchas, sin mayor desperdicio y eliminando el núcleo, Figura 45.

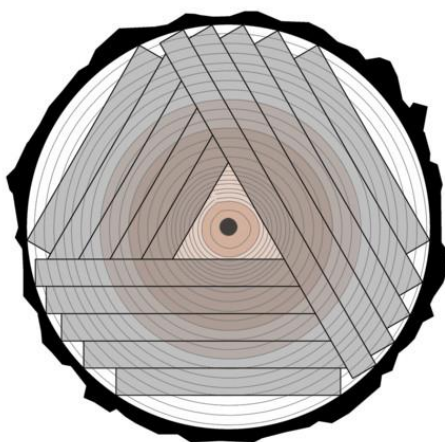


Figura 45. Técnica de corte: Método Cantibay (Maderas Menur, 2018)

- **Corte Holandés.** En el proceso se corta el tronco en cuatro cuartos con el fin de extraer piezas de buena calidad en cuanto a resistencia y apariencia se refiere, Figura 46.

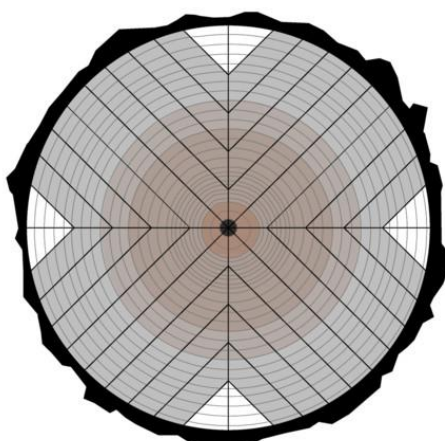


Figura 46. Técnica de corte: Corte Holandés (Maderas Menur, 2018)

- **Pieza Enteriza.** Se busca la utilización del tronco en su máxima expresión, en su máximo potencial. Se elimina la corteza y se van cortando piezas hasta obtener una sola pieza cuadrangular, Figura 47.

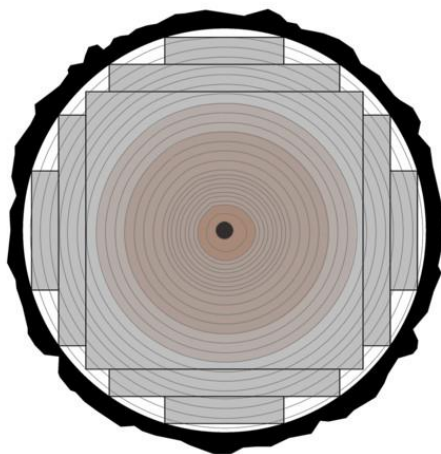


Figura 47. Técnica de corte: Pieza Enteriza (Maderas Menur, 2018)

- **Corte en Cruz.** El objetivo de esta técnica es obtener piezas muy resistentes, que estén constituidas en su mayor parte por el duramen del tronco, Figura 48. Del resto del tronco se obtienen piezas de menor tamaño.

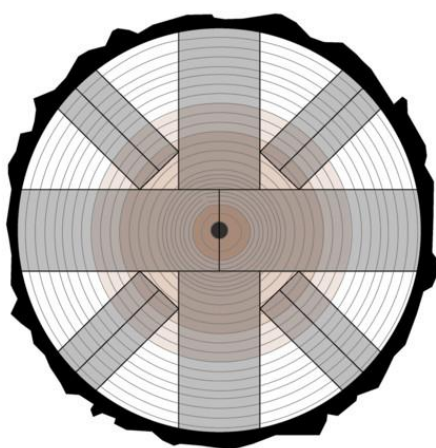


Figura 48. Corte en Cruz (Maderas Menur, 2018)

- **Corte Encuartonado.** Esta técnica se desarrolla en dos partes: primero se cortan las tablas de la zona del núcleo del tronco, para posteriormente ir cortando el resto de las piezas, que irán siendo más delgadas, pero bastante resistentes a las deformaciones, Figura 49.

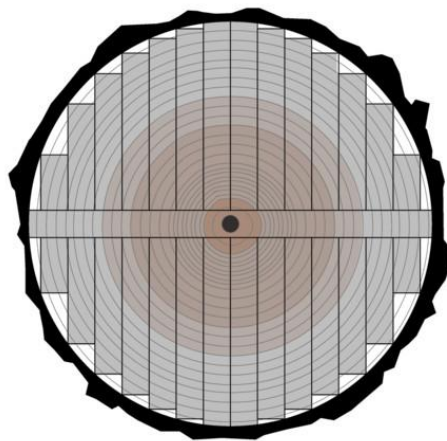


Figura 49. Técnica de corte: Corte Encuartonado (Maderas Menur, 2018)

2.6 La madera laminada

La madera laminada encolada, conocida como glulam (del inglés, *glued laminated timber*), es un material estructural derivado de la madera. Está compuesta por láminas de madera cortadas longitudinalmente, con las fibras orientadas en paralelo; es decir, en la misma dirección, y se encolan entre sí para garantizar la unión e integridad del material (Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2017). Norma Oficial Mexicana NOM-056-SCT2-2016, *Para durmientes de madera*.

https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6582/sct2a13_C/sct2a13_C.html

Sevilla, R.).

2.6.1 Características de la madera laminada

De acuerdo con AITIM (2011), la madera laminada reúne una larga lista de características entre las que cabe destacar:

- **Contenido de humedad:** deberá ser el más cercano posible al nivel de humedad de equilibrio higroscópico correspondiente a la ubicación de la obra y según requiera el tipo de servicio. Así, para clases de servicio⁵ 1 y 2, el valor deberá estar en torno al 12% de humedad, mientras que para clases de servicio 3, el valor de referencia será del 18%.

⁵ Según el CTE DB SE-M, cada elemento estructural considerado debe asignarse a una de las clases de servicio, en función de las condiciones ambientales previstas:

- **Clase de servicio 1.** Se caracteriza por un contenido de humedad en la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 65% unas pocas semanas al año. En esta clase de servicio la humedad de equilibrio higroscópico media en la mayoría de las coníferas no excede el 12%. En esta clase se encuentran, en general, las estructuras de madera expuestas a un ambiente interior.
- **Clase de servicio 2.** Se caracteriza por un contenido de humedad en la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 85% unas pocas semanas al año. En esta clase de servicio la humedad de equilibrio higroscópico media en la mayoría de las coníferas no excede el 20%. En esta clase se encuentran, en general, las estructuras de madera a cubierto, pero abiertas y expuestas al ambiente exterior, como es el caso de cobertizos y viseras. Las piscinas cubiertas, debido a su ambiente húmedo, encajan también en esta clase de servicio.
- **Clase de servicio 3.** Condiciones ambientales que conduzcan a contenido de humedad superior al de la clase de servicio 2. En esta clase de servicio la humedad de equilibrio higroscópico media en la mayoría de las coníferas excede el 20%. En esta clase se encuentran, en general, las estructuras de madera expuestas a un ambiente exterior sin cubrir.

- **Calidades o clases resistentes:** se distinguen 8 clases resistentes, definidas en la Norma **UNE-EN 1194** y cuyos valores se ven modificados ligeramente en la Norma **UNE-EN 14080**. De estas 8 clases resistentes podemos hacer una distinción atendiendo a su homogeneidad:
 - 4 constan de una composición homogénea en la que todas sus láminas son de la misma clase resistente.
 - 4 tienen una homogeneidad combinada en la que sus láminas externas pertenecen a una clase resistente superior en comparación con la clase resistente de las láminas interiores.

A medida que aumenta la clase (por ejemplo, GL28, GL30, GL32 o GL36), también lo hacen sus propiedades mecánicas, como la resistencia a flexión, la resistencia a tracción paralela a la fibra y el módulo de elasticidad. Esta variedad permite seleccionar la clase más adecuada según el tipo de carga, luz libre, exigencia y condiciones ambientales de la estructura. Estos valores incluyen:

- Resistencia a flexión ($f_{m,k}$).
- Resistencia a tracción y compresión paralela a la fibra ($f_{t,0,k}$ y $f_{c,0,k}$).
- Resistencia a tracción y compresión perpendicular a la fibra.
- Resistencia al cizallamiento ($f_{v,k}$).
- Módulo de elasticidad ($E_{o,mean}$).
- Módulo de cizalladura (G_{mean}).
- Densidad característica (ρ_k).

En la Tabla 2 se muestran algunos ejemplos de clases resistentes.

Tabla 2: Ejemplos de clases resistentes de Glulam

Clase	$f_{m,k}$ (MPa)	$E_{o,mean}$ (MPa)	ρ_k (kg/m ³)	Observaciones
GL20h/ GL20c	20	11 000	385	Calidad básica, uso general
GL22h/ GL22c	22	11 600	410	-
GL24h/ GL24c	24	12 000	430	Muy común en estructuras
GL26h/ GL26c	26	12 500	460	-
GL28h/ GL28c	28	13 000	470	Uso en estructuras exigentes
GL30h/ GL30c	30	13 200	485	Alta resistencia
GL32h/ GL32c	32	13 500	500	Alta calidad
GL36h/ GL36c	36	14 000	510	Aplicaciones especiales

Entre las clases más comunes se encuentran la GL24h y la GL24c, ampliamente utilizadas en edificación y obra civil por su buena relación entre resistencia, peso y coste.

- **Durabilidad:** este punto es de vital importancia para la madera, ya que exponer este material a la intemperie sin protección es un riesgo para su integridad y puede conllevar un rápido deterioro de este.

En piezas de clase de riesgo⁶ 1 y 2 no suele haber problemas de durabilidad, por tanto, no suelen necesitarse tratamientos para proteger la madera y casi cualquier especie es apta. El problema viene en las clases de servicio 3, 4 y 5 en las que ya es necesario emplear tratamientos químicos de protección **(EN 335:2013)**.

Generalmente, las maderas de especies de coníferas no tienen durabilidad natural suficiente para su uso en exteriores y necesitan del uso de tratamientos químicos para aumentarla. **En Europa, las especies más empleadas son el abeto**, cuyo uso queda relegado únicamente para clases de servicio 1 y 2 debido a que no es impregnable y, por tanto, no se puede tratar químicamente, **y el pino silvestre**, la especie más utilizada para la clase de servicio 3 ya que, al contrario que el abeto, puede tratarse profundamente.

⁶ Las clases de riesgo se definen en la norma UNE-EN 335:2013:

- Clase de riesgo 1: La madera está completamente protegida de la intemperie y no está expuesta a la humedad (madera en interior seco, humedad de la madera < 20%). Un ejemplo sería la madera utilizada en interiores de edificios.
- Clase de riesgo 2: La madera está protegida de la intemperie pero puede estar expuesta a humedad ocasional (madera en interior húmedo, humedad de la madera ocasionalmente > 20%), como en el caso de la madera en interiores con alta humedad ambiental.
- Clase de riesgo 3: La madera no está protegida de la intemperie y está expuesta a humedad frecuente, ya sea continua o intermitente (madera al exterior, humedad de la madera frecuentemente > 20%). Un ejemplo sería la madera en exteriores no protegida, como revestimientos de fachadas o mobiliario de jardín.
- Clase de riesgo 4: La madera está en contacto directo con el suelo o con agua dulce y está permanentemente expuesta a la humedad (humedad de la madera permanentemente > 20%). Ejemplos son postes, pilotes o estructuras enterradas.
- Clase de riesgo 5: La madera está permanentemente en contacto con agua salada (humedad de la madera permanentemente > 20%), como en muelles o embarcaciones.

- **Resistencia química:** al no interaccionar con el entorno en cuanto a agentes oxidantes o reductores se refiere, la madera laminada encolada se convierte en un material adecuado para su uso en ambientes en los que los metales se ven limitados por su oxidación o corrosión.

2.6.2 La madera laminada encolada frente a la madera aserrada

La mejor manera de entender las ventajas que supone el uso de la madera laminada frente a la madera aserrada es, como se hace en la Tabla 3, mediante la comparación directa de sus características.

Tabla 3. Comparación de madera laminada encolada frente a madera aserrada.

Criterio	Madera Laminada encolada	Madera Aserrada
Procedencia	Resultado de la unión encolada de láminas de madera	Madera obtenida directamente del aserrado del tronco
Homogeneidad estructural	Alta, se seleccionan y clasifican las láminas, eliminando defectos importantes	Baja, depende de los defectos y anomalías naturales de la madera
Resistencia mecánica	Alta y predecible atendiendo a la clasificación de las clases resistentes	Variable y limitada por los defectos y anomalías naturales de la madera
Dimensiones posibles	Puede alcanzar grandes longitudes, espesores y formas curvas	Limitadas a la forma del árbol
Estabilidad dimensional	Más estable por su disposición en capas	Mayor deformación por sensibilidad a cambios en la humedad
Apariencia estética	Uniforme y controlada, especialmente en ambientes arquitectónicos	Aspecto natural, puede presentar irregularidades
Durabilidad natural	Similar, puede mejorarse con tratamientos previos	Dependiendo de la especie
Sostenibilidad	Alta, permite el uso de maderas de menor calidad con óptimo aprovechamiento	Renovable, pero menos eficiente en el aprovechamiento del tronco
Aplicaciones	Vigas de grandes ludes, cubiertas de naves, puentes, estructuras...	Vigas, pilares, entramados en construcciones pequeñas.
Normativa técnica aplicable	UNE-EN 14080:2022	UNE-EN 14081-1/2/3 UNE-EN 15497:2014

Como puede observarse, las aplicaciones de la madera laminada son limitadas, mientras que la madera lamina dispone de una gran variedad de aplicaciones.

2.7 La humedad de la madera

La peor situación para la madera es una situación de cargas permanentes elevadas en un ambiente húmedo (Sánchez, M., 2016), Figura 50.

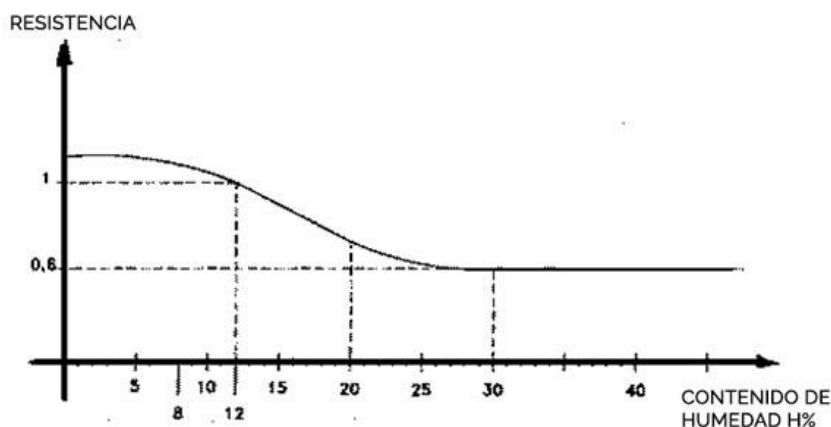


Figura 50. Evolución de la resistencia mecánica de la madera en función de su contenido de humedad.

Para hablar de la humedad de la madera, primero tenemos que entender su concepto por sí solo, sin aplicarlo a la madera.

2.7.1 La humedad como concepto

La humedad es la cantidad de vapor de agua que está presente en una sustancia o entorno. Se puede expresar en términos absolutos (masa de agua por unidad de masa o de volumen) o relativos (porcentaje respecto al máximo alcanzable a esa temperatura), Çengel et al. (2015).

2.7.2 La humedad en el campo de la madera

De manera extensiva, basándonos en el concepto de humedad, podemos concluir que la humedad de la madera es la cantidad de agua contenida en el interior de la madera.

En línea con Umlandt et al. (2022), el agua contenida en la madera puede presentarse en varias formas, Figura 51:

- **Agua libre:** es agua retenida en la madera por fuerzas de atracción capilares, por lo que se pierde fácilmente por evaporación; de hecho, es la primera que se pierde en el proceso de secado de la madera. Se encuentra en el lumen de las células.

- **Agua higroscópica o de impregnación:** agua ligada a las paredes celulares por interacción molecular. Es el agua que la madera absorbe del ambiente (o en ocasiones expulsa) hasta alcanzar el equilibrio higroscópico que, dependiendo de la región, puede variar entre un 12% y un 18% de humedad. Durante esta fase, la madera experimenta cambios en sus dimensiones y variaciones en sus resistencias mecánicas.
- **Agua de constitución:** agua que forma parte de la pared celular y que no puede ser extraída, salvo en el caso de que la madera se someta a un proceso de combustión.



Figura 51. Estado del agua en el interior de la madera (Umlandt et al., 2022).

Dejando a un lado la forma de presentación del agua en la madera, en función de la cantidad de agua que contenga la madera (humedad), al igual que Umlandt et al. (2022), podemos clasificar la madera en tres grupos:

- **Madera verde:** entre 50 y 200% de agua respecto al peso seco.
- **Madera puesta en servicio expuesta al exterior:** del 12% al 17% de agua respecto al peso seco.
- **Madera puesta en servicio en contacto con ambientes interiores:** del 8% al 13% de agua respecto al peso seco.

Debido a la higroscopicidad de la madera, esta intercambia agua con el entorno que la rodea, variando su humedad hasta alcanzar el equilibrio.

2.7.3 El movimiento del agua en la madera durante el secado

Para comprender el movimiento del agua en el seno de la madera hay que recurrir a la definición de secado: "El secado de la madera es un fenómeno consistente en

la eliminación superficial del agua, a la vez que esta migra desde el interior hacia el exterior de la madera” (Fernández-Golfín & Conde García, 2007, p.40).

Es importante prestar atención a esta definición porque, de acuerdo a estos mismos autores, Fernández-Golfín & Conde García (2007), según va avanzando el secado en la madera, lo que conocemos como “frente de evaporación”, que en un principio se encontraba situado en la propia superficie (por aquello que decía la definición de: “eliminación superficial del agua”), va adentrándose en las capas internas de la madera, haciendo que el proceso de evaporación se vaya desplazando por el interior de la madera y desplazando el agua (en forma de vapor y agua ligada), desde el frente de evaporación hacia el exterior de la madera, de dentro hacia afuera, mediante un proceso dependiente de las leyes de difusión. Este proceso finaliza una vez que el conjunto que conforma la pieza de madera alcanza el equilibrio higroscópico.

Siguiendo con Fernández-Golfín & Conde García (2007), estos autores afirman que:

- Cuando la madera se encuentra en estado verde, el agua líquida rellena todas las cavidades celulares, existiendo normalmente burbujas de aire en su seno. El proceso de circulación del agua libre desde el interior hacia el frente de evaporación, donde pasa a estado gaseoso, se efectúa por la acción de fuerzas de tipo capilar, generadas por la existencia de meniscos entre las interfases aire-agua de los poros de las membranas de las punteaduras⁷. **El proceso en esta fase es altamente dependiente del tamaño de los capilares** donde se generan las fuerzas tanto mayores conforme estos capilares son más estrechos.
- **La presencia de burbujas de aire en el interior del agua líquida** presente en el interior de la célula **ayuda en el proceso** ya que el **calentamiento del aire interior** por la acción de la temperatura **obliga a su dilatación, empujando al agua hacia el exterior a través de los capilares** citados.

⁷ Una punteadura (o puntuación) es un sector de la pared celular vegetal primaria no desarrollada, a través de las cuales se comunican las células entre sí. Para que exista comunicación deben coincidir las punteaduras de las células adyacentes, formando un par de punteaduras.

- En ocasiones las maderas presentan **capilares de tamaño extremadamente reducido**, lo que hace que las **tensiones generadas en el interior de la célula sean muy elevadas**, llegando a superar la máxima resistencia al aplastamiento de las fibras de la madera, **produciéndose entonces un fenómeno de aplastamiento de fibras** (similar al que ocurre cuando se aspira fuertemente el agua contenida en una botella de plástico), **conocido como colapso**, [...] suele presentarse en maderas altamente impermeables (capilares reducidos) y en zonas donde no existan burbujas de aire. Esto explica la causa por la cual **el colapso se produce únicamente en determinadas maderas muy impermeables** (por ejemplo, en eucalipto, roble, castaño y haya) **y solamente en la primera fase del secado** cuando la madera está totalmente verde. Todos los **factores aceleradores del secado** (por ejemplo, a temperatura seca muy elevada o la humedad relativa muy baja) **acrecentarían el riesgo de colapso** en maderas susceptibles para ello.
- Evaporada el agua líquida esta tiene que migrar, por difusión, desde el frente de evaporación hasta la superficie de la pieza, donde es eliminada por **el aire que circula dentro del secadero** [...].

En las Figura 52 y Figura 53 pueden observarse varias formas de presentación del agua en el interior de la madera, así como el movimiento del agua en estado líquido y de vapor cuando la madera está verde.

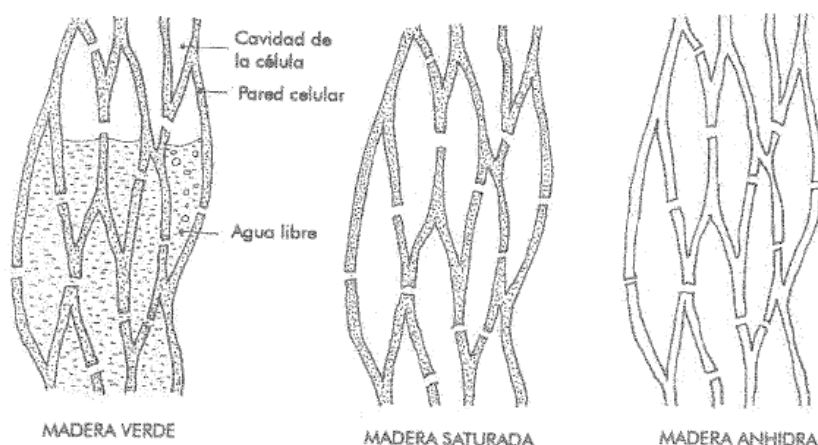


Figura 52. Distintas formas de presentación del agua en la madera: madera verde, madera al 30% de humedad y madera totalmente seca o anhidra, (Fernández-Golfín Seco & Conde García, 2007).

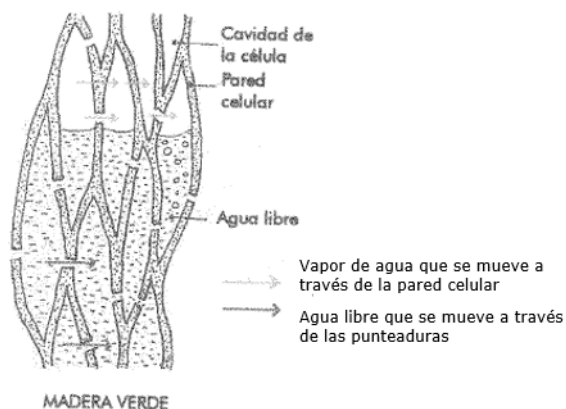


Figura 53. Esquema del movimiento del agua libre y el vapor de agua dentro de la madera, (Fernández-Golfín Seco & Conde García, 2007).

2.8 La técnica de los ultrasonidos

La técnica de los ultrasonidos es un método de ensayo no destructivo (END) que consiste en la inspección del material introduciendo en el mismo ondas sonoras; es decir, mecánicas de alta frecuencia para la detección de discontinuidades en el material. Las ondas ultrasónicas son reflejadas por las superficies de interfase y se representan y analizan para definir la presencia, localización y dimensionamiento de discontinuidades en el material que es sometido a estudio.

2.8.1 Ondas acústicas o sonoras y ultrasonidos

Para entender el método de ensayo de ultrasonidos primero se debe acudir a sus fundamentos basados en las ondas sonoras.

Una onda sonora o acústica es una perturbación mecánica que se propaga a través de un medio, ya sea aire, agua o un cuerpo sólido, **transportando energía e información a través de oscilaciones de presión y deslizamiento de partículas**.

Las ondas acústicas abarcan una amplia gama de frecuencias, Figura 54, desde los infrasonidos (<20 Hz) hasta los ultrasonidos (>20 kHz), pasando por la gama de sonidos perceptibles para el oído humano (entre 20 Hz y 20 kHz). Debido a sus propiedades y versatilidad, las ondas acústicas son imprescindibles para numerosas aplicaciones en el sector de las comunicaciones, la industria de la música, la medicina y el monitoreo ambiental (SKZ Industrial (2025). *Medidor de humedad vs método de secado en horno: ¿cuál es más eficiente?* <https://www.skztester.com/es/blog/Moisture-Meter-vs-Oven-Drying-Method-Which-Is-More-Efficient>

Svantek Academy, s.f.).

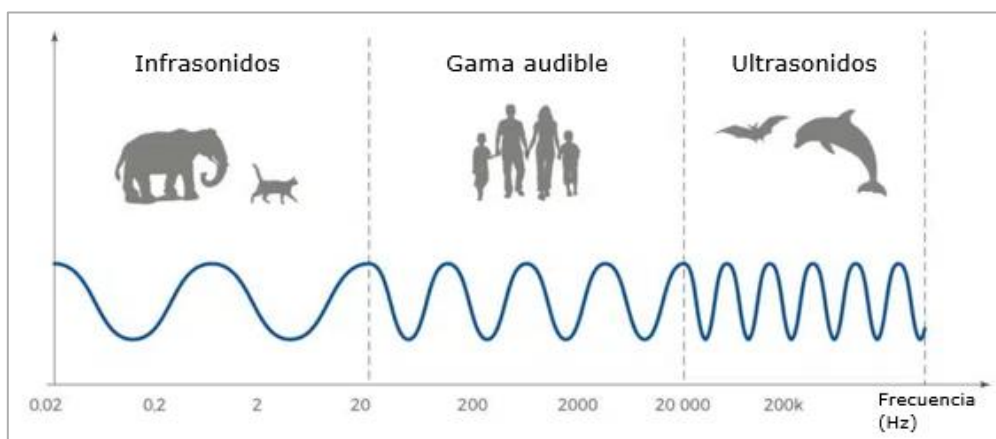


Figura 54. Clasificación de ondas sonoras según el rango de frecuencias (SKZ Industrial (2025). *Medidor de humedad vs método de secado en horno: ¿cuál es más eficiente?* <https://www.skztester.com/es/blog/Moisture-Meter-vs-Oven-Drying-Method-Which-Is-More-Efficient>

Svantek Academy, s.f.).

En el sentido más técnico, se utiliza el término “**onda de presión sonora**” para referirse a ondas que se encuentren dentro del rango audible para el ser humano, mientras que se emplea el término “**onda acústica**” para abarcar tanto la gama de sonidos audibles para el ser humano como las ondas de presión que quedan fuera de este rango (SKZ Industrial (2025). *Medidor de humedad vs método de secado en horno: ¿cuál es más eficiente?* <https://www.skztester.com/es/blog/Moisture-Meter-vs-Oven-Drying-Method-Which-Is-More-Efficient>

Svantek Academy, s.f.).

2.8.2 Propiedades de las ondas acústicas

De acuerdo con SKZ Industrial (2025). *Medidor de humedad vs método de secado en horno: ¿cuál es más eficiente?* <https://www.skztester.com/es/blog/Moisture-Meter-vs-Oven-Drying-Method-Which-Is-More-Efficient>

Svantek Academy (s.f.), las ondas acústicas están caracterizadas por diversas propiedades físicas que definen su comportamiento mientras se propagan a través de un medio, interacción con el entorno e influyen en cómo son percibidas por el

ser humano y/o detectadas por los instrumentos concebidos para tal fin. Las propiedades físicas más importantes de las ondas acústicas son, ver Figura 55:

- **Frecuencia de onda (f):** es el número de oscilaciones por segundo. Se mide en Hercios (Hz). Determina el tono del sonido, siendo los sonidos más agudos correspondientes a frecuencias altas, mientras que los más graves corresponden a frecuencias bajas.
- **Longitud de onda (λ):** es la distancia física entre dos puntos consecutivos de una onda que estén en fase (p.ej.: cresta-cresta, valle-valle). Su valor está directamente relacionado con la velocidad del sonido (c) y con la frecuencia de onda (f), siendo inversamente proporcional a esta, $\lambda=c/f$ (ver Figura 56).
- **Amplitud de onda (A):** representa el máximo desplazamiento que causa el paso de la onda en las partículas, desde su posición de equilibrio. En este tipo de ondas, esta propiedad está relacionada con el volumen del sonido. Gráficamente se muestra como la altura de los picos de las ondas desde el eje central del gráfico sinusoidal. Puede medirse en pascuales (Pa), para una representación lineal, o en decibelios (dB), para una representación logarítmica.

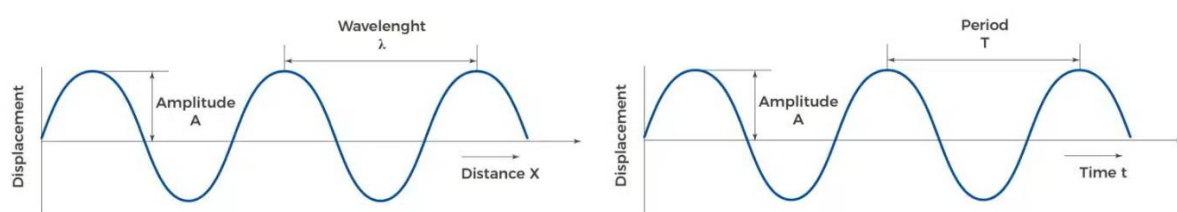


Figura 55. De izquierda a derecha, representación de una onda acústica en función de la distancia (x), y del tiempo (t), respectivamente (SKZ Industrial (2025). *Medidor de humedad vs método de secado en horno: ¿cuál es más eficiente?*

<https://www.skztester.com/es/blog/Moisture-Meter-vs-Oven-Drying-Method-Which-Is-More-Efficient>

Svantek Academy, s.f.).

Wavelength and Frequency

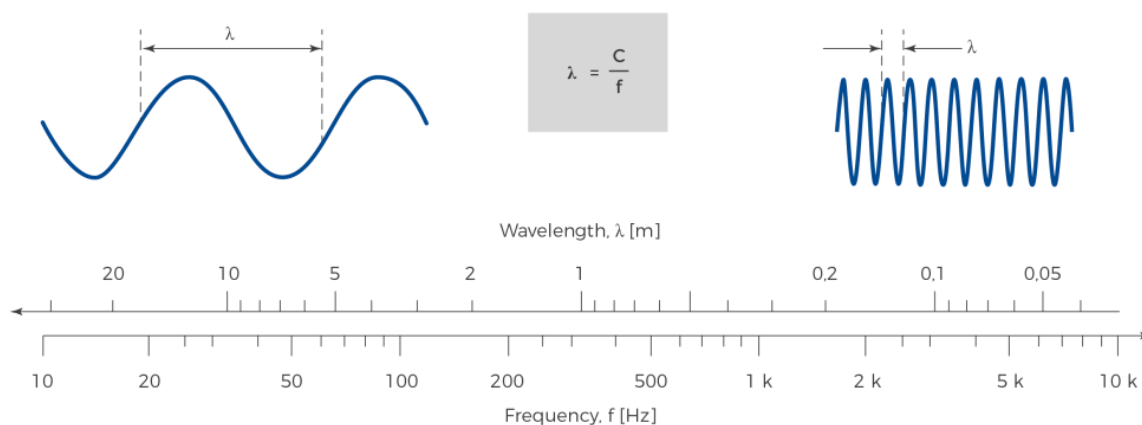


Figura 56. Relación entre longitud de onda y frecuencia de onda (SKZ Industrial (2025). *Medidor de humedad vs método de secado en horno: ¿cuál es más eficiente?* <https://www.sksztester.com/es/blog/Moisture-Meter-vs-Oven-Drying-Method-Which-Is-More-Efficient>

Svantek Academy, s.f.).

- **Velocidad (v):** es la velocidad con la que la onda se propaga a través del medio que atraviesa. Varía en función de las propiedades del medio, siendo el desplazamiento más rápido en los sólidos, disminuyendo en los líquidos y aún más en los gases, donde se dan las menores velocidades.
- **Intensidad (I):** es la potencia transportada por la onda acústica por unidad de área. Se mide en Watts por metro cuadrado (W/m^2). Está relacionado con la amplitud y la distancia desde la fuente de alimentación, por lo que influye en el volumen del sonido que se percibe.
- **Fase (φ):** describe la posición de un punto en el tiempo en un ciclo de forma de onda.

En la representación gráfica de las ondas acústicas se emplea la función seno para mostrar la naturaleza oscilatoria de las propias ondas. Los cruces de la onda sinusoidal con el eje central, lo que sería un valor cero, representan gráficamente momentos en los que la presión de la onda acústica (del sonido) se iguala a la

presión ambiental, indicando un cambio en la dirección de las partículas dentro del medio (SKZ Industrial (2025). *Medidor de humedad vs método de secado en horno: ¿cuál es más eficiente?* <https://www.skztester.com/es/blog/Moisture-Meter-vs-Oven-Drying-Method-Which-Is-More-Efficient>

Svantek Academy, s.f.).

2.8.3 Velocidad de propagación y tipos de ondas acústicas.

La velocidad de propagación de las ondas acústicas varía en función del medio en el que se transmiten. Las ondas acústicas no viajan a la misma velocidad en todos los medios y se ven afectadas por factores como la densidad o viscosidad del medio que atraviesan. Las diferencias más notorias se dan entre los medios gaseosos, líquidos y sólidos, como podemos ver en la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6, respectivamente, que corresponden a los valores de la velocidad de propagación del sonido según el medio material que se encuentre atravesando la onda acústica.

Tabla 4. Velocidad de propagación del sonido en gases (Cáceres, J. M., s.f.).

Medio atravesado	Temperatura °C	Velocidad de propagación m/seg
Aire seco	0	330
Aire	20	344
Nitrógeno	20	338
Helio	20	970
Hidrógeno	0	1270
Oxígeno	0	317
Vapor de agua	100	405

Tabla 5. Velocidad de propagación del sonido en líquidos (Cáceres, J. M., s.f.).

Medio atravesado	Temperatura °C	Velocidad de propagación m/seg
Agua	20	1 460
Agua marina	20	1 490
Alcohol metílico	20	1 200
Nafta	25	1 225
Aceite mineral lubricante	25	1 530
Petróleo	35	1 295

En el caso que atañe a este proyecto, conviene centrarse en conocer cómo es el comportamiento de las ondas acústicas en medios sólidos, ya que el método de ensayo de ultrasonidos se va a utilizar en vigas de madera laminada encolada, atravesando por tanto las ondas acústicas un material sólido (despreciando huecos con aire o resina).

Tabla 6. Velocidad de propagación del sonido en sólidos (Cáceres, J. M., s.f.).

Medio atravesado	Temperatura °C	Velocidad de propagación m/seg
Acero al carbono	20	5 000
Aluminio	20	5 100
Plata	20	2 700
Bronce	20	3 430
Duraluminio	20	5 760
Hierro puro	20	5 130
Fundición	20	4 050
Goma	15	40
Madera seca	20	3 600
Níquel	20	4 973
Latón	20	3 480
Plomo	20	1 300
Cuarzo	15	5 398
Cobre	20	3 560

Aunque la teoría de propagación de ondas en la madera puede resultar de una alta complejidad debido a las propiedades de este material (heterogeneidad, anisotropía, higroscopicidad, etc.) y las diversas anomalías y particularidades que puede presentar dicho material (nudos, bolsas de resina, desviaciones de fibra, etc.), **se pueden realizar buenas aproximaciones asumiendo la madera como un medio infinito, isótropo y elástico** (García, D., 2020).

En concordancia con Íñiguez, G. (2007), cuando un medio sólido y elástico es afectado por una carga dinámica o vibratoria aparecen tres **tipos de onda**, ver Figura 57 y Tabla 7:

- ❖ **Ondas longitudinales o de compresión (P):** su dirección es paralela a la dirección del movimiento de propagación de las partículas. Pueden propagarse en todo tipo de medios. Se asocian a tensiones normales y provocan compresiones y expansiones del material en la dirección de propagación de las ondas.
- ❖ **Ondas transversales o de cortante (S):** su dirección es perpendicular a la dirección del movimiento de propagación de las partículas. Se asocian a tensiones tangenciales. Sólo pueden propagarse en medios sólidos.
- ❖ **Ondas de superficie:**
 - **Ondas de Rayleigh.** Se propagan sobre la superficie de medios sólidos, describiendo las partículas un movimiento elíptico retrógrado (similar a las olas en el agua). Se atenúan rápidamente con la profundidad.

- **Ondas de Love.** Se propagan sobre la superficie de medios sólidos estratificados y son dispersivas (la velocidad depende de la frecuencia), describiendo un movimiento horizontal y perpendicular a la dirección de propagación. El interés del estudio de este tipo de ondas tiene su interés en el campo de la geología, desde un punto de vista sismológico. Las ondas Love no son de gran interés para el proyecto debido a que se trabaja con el método de ensayo de inspección por ultrasonidos, el cual requiere que las ondas penetren en el material sometido a estudio.

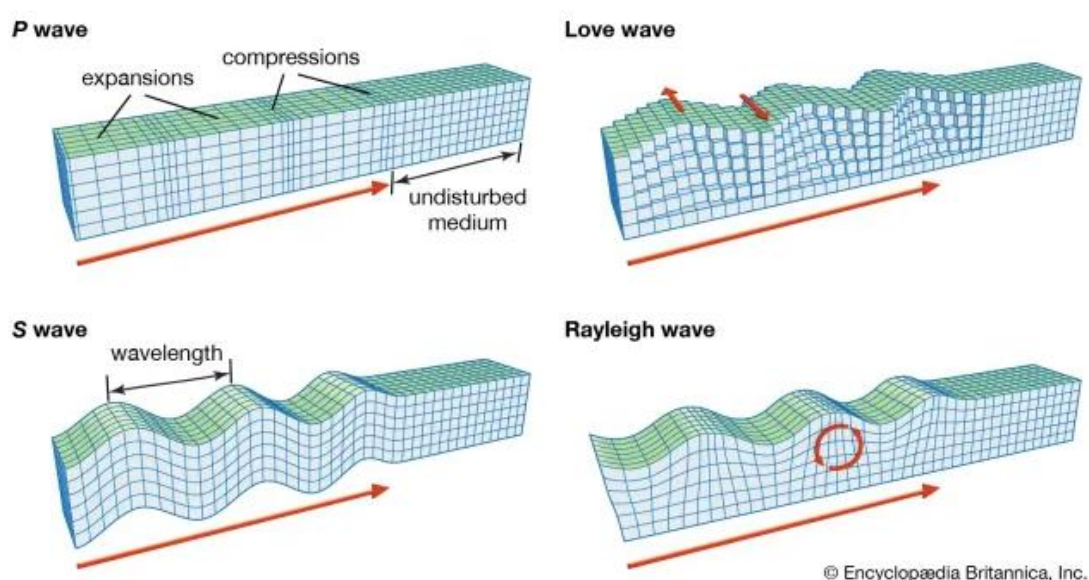


Figura 57. Principales tipos de ondas sísmicas (Geology Science 2023).

Tabla 7. Tipos de ondas en un medio sólido y elástico (Cáceres, J. M., s.f.)

Tipo de onda	Dirección de vibración	Medio de propagación	Velocidad relativa
Longitudinal (onda P)	Paralela a la propagación	Sólido, líquido, gas	Alta
Transversal (onda S)	Perpendicular a la propagación	Solo en sólidos	Media
Superficial - Rayleigh	Elíptica retrógrada (superficie)	Solo en sólidos	Baja
Superficial - Love	Horizontal, perpendicular	Solo en sólidos estratificados	Baja

De acuerdo con Íñiguez, G. (2007), se pueden calcular las velocidades de propagación de los diferentes tipos de onda, siguiendo las siguientes expresiones:

- Para **ondas longitudinales o de compresión (P)** en medios sólidos infinitos y elásticos:

$$V_P = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad [1]$$

V_P = velocidad de propagación de la onda longitudinal

E = módulo de elasticidad/módulo de Young

ν = coeficiente de Poisson

ρ = densidad del material

Esta expresión, en medios finitos, se simplifica ya que la velocidad de propagación de las ondas P varía en función de la geometría a causa de su dependencia entre las dimensiones transversales de la pieza y la longitud de la onda propagada. En piezas donde la dimensión transversal (d) es mucho menor⁸ que la longitud de la onda propagada (λ), $\frac{d}{\lambda} \ll 1$, la velocidad de propagación de la onda es independiente del coeficiente de Poisson y la expresión simplificada resultante sería:

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [2]$$

V_P = velocidad de propagación de la onda longitudinal

E = módulo de elasticidad longitudinal/módulo de Young

ρ = densidad del material

- Para ondas **transversales o de cortante (S)** en medios sólidos elásticos:

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [3]$$

⁸ Se entiende que la longitud transversal (d) es **mucho menor** cuando es tan reducida en comparación con la longitud de onda (λ), que la onda no percibe la longitud transversal y viaja por la longitudinal como si se tratara de una barra ideal, comportándose como una onda unidimensional e ignorando los efectos de flexión, modos transversales o dispersión pueden ignorarse. En el contexto de ingeniería de materiales y acústica, el criterio práctico suele ser: $\frac{d}{\lambda} < 0,1$. Es decir, cuando la dimensión transversal es menor del 10% de la longitud de onda, se considera que los efectos transversales son mínimos y que la onda se propaga prácticamente de forma unidimensional. En el campo de los ultrasonidos, se considera válido un modelo unidimensional cuando la frecuencia y la velocidad generan longitudes de onda de al menos 5 a 10 veces mayores que el espesor de la pieza.

V_S = velocidad de propagación de la onda transversal

ρ = densidad del material

G = módulo de elasticidad transversal, $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$. Siendo:

E = módulo de elasticidad longitudinal/módulo de Young

ν = coeficiente de Poisson

- Para **ondas de superficie o Rayleigh (R)** se calcula la velocidad de propagación de forma aproximada haciendo uso de la ecuación:

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12 \cdot \nu}{1 + \nu} * V_S \quad [4]$$

V_R = velocidad de propagación de la onda Rayleigh

V_S = velocidad de propagación de la onda transversal

ν = coeficiente de Poisson

La sensibilidad o capacidad de los métodos acústicos para detectar singularidades o defectos en el material sometido a estudio, depende de las dimensiones de las singularidades y de la longitud de la onda propagada. En general, para poder ser detectado un defecto, el tamaño del mismo debe ser igual o superior a la longitud de onda (Íñiguez, G., 2007); por ello, ondas de mayor frecuencia ofrecen mejor resolución, ver Figura 56.

Ahora bien, como contraprestación, hay que tener en cuenta que la velocidad de propagación de las ondas acústicas está sujeta a la atenuación de la señal en el propio medio material que atraviesan, que será mayor cuanto mayor sea su frecuencia (longitud de onda menor); además de experimentar cambios bruscos al pasar de un medio a otro (Íñiguez, G., 2007 & Cáceres, J. M., s.f.).

2.8.4 Fundamento teórico del ensayo de ultrasonidos

Aunque la gama de ondas ultrasónicas es, de lejos, la más amplia de las ondas acústicas, comenzando en los 20 kHz y llegando a incluir valores de varios MHz, es su pequeña longitud de onda lo que ha permitido su uso en multitud de aplicaciones y campos diversos, gracias a su potente resolución en la detección y visualización de defectos en medios materiales (García, D., 2020).

Haciendo uso de alguno de los diversos equipos diseñados para la realización de ensayos de ultrasonidos, se colocan sus palpadores sobre la pieza que se va a estudiar, a una distancia concreta (s). A continuación, se activa el equipo, el cual, mediante un pulso eléctrico de su fuente de alimentación, transmitirá una señal en forma de onda ultrasónica que viajarán a través del material.

En función del método de transmisión escogido (directo, semidirecto o indirecto), la señal rebotará o no, en mayor o menor medida, en las paredes de la pieza, llegando desde emisor hasta el receptor en un tiempo determinado, denominado tiempo de vuelo (t).

Conocidos los valores de la distancia (s) y el tiempo de vuelo (t) se puede calcular de forma sencilla la velocidad de propagación longitudinal de la onda ultrasónica mediante la fórmula de velocidad lineal extensamente conocida:

$$V = \frac{s}{t} \quad [5]$$

s = espacio entre palpadores (emisor – receptor)

t = tiempo de vuelo (lo que tarda la onda en recorrer la distancia entre palpadores)

V = velocidad de la onda ultrasónica

Una vez halladas las velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas en varios puntos de la pieza de madera sometida a estudio, podemos hacernos una idea general de su estado interno ya que, ante posibles defectos, anomalías o particularidades en el material, para una misma distancia entre palpadores, el tiempo de vuelo de la onda puede sufrir aumentos por tener que rodear o sortear estos obstáculos en su camino, como se puede visualizar en la Figura 58.



Figura 58. De izquierda a derecha, comportamiento de ondas ultrasónicas con transmisión directa testa-testa en pieza de material sin presencia de defectos y en pieza con presencia de un defecto, respectivamente (Íñiguez, G, 2007).

NOTA: es importante trabajar en un entorno libre de ruidos o vibraciones que puedan interferir en la señal y dar lugar a resultados no fiables.

2.8.5 Factores con influencia en la velocidad de propagación

Durante multitud de estudios realizados se ha observado que hay una serie de factores que tienen cierta influencia en la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas. En líneas generales, estos factores son los siguientes:

- **Posición de los sensores:** se pueden realizar tres configuraciones o posicionamientos diferentes, cada uno de los cuales arroja resultados diferentes, Figura 59.

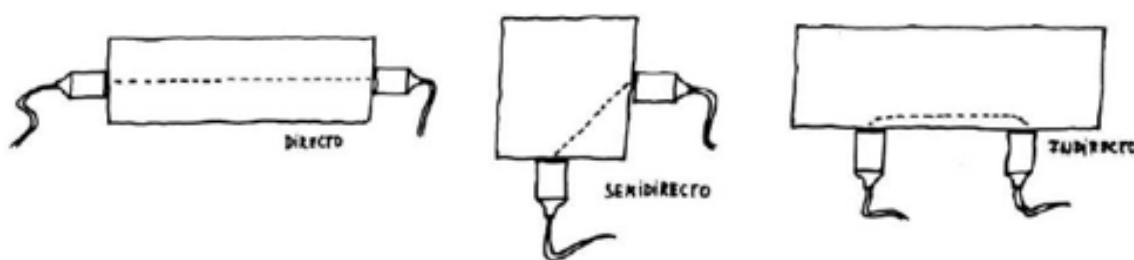


Figura 59. De izquierda a derecha: métodos directo, semidirecto e indirecto, respectivamente, para el posicionamiento de los palpadores de ultrasonidos (Íñiguez, G., 2007).

- **Método de transmisión directa.** Puede ser paralelo a las fibras (transmisión directa longitudinal o de testa a testa) o perpendicular a las fibras (transmisión directa transversal).

El ensayo paralelo a la fibra (de testa a testa) es el método más adecuado, en tanto que en él se transmite y recibe la máxima cantidad de energía de la onda propagada; no obstante, hay ocasiones en las que no es viable su aplicación por no disponer de acceso a las testas.

- **Método de transmisión semidirecta** o medida cruzada.
- **Método de transmisión indirecta** o medida superficial.

Los métodos de transmisión indirecta y semidirecta tienen una peor recepción de la señal y un mayor error experimental.

Existen estudios que muestran que la dirección y el ángulo de inclinación en la posición de los sensores respecto a la fibra también tienen cierta influencia en los resultados obtenidos en los ensayos con el método de ultrasonidos.

Así pues, según las conclusiones de Esteban, M. (2003), se pudo observar que en la dirección perpendicular a la fibra se obtienen resultados del orden

de cuatro veces más bajos que en la dirección paralela a la fibra, mientras que para variaciones entre 0° y 7° de inclinaciones de fibra no hay variaciones significativas.

En el caso de medición por una sola cara (transmisión indirecta), no se puede considerar el ángulo del recorrido de la onda con la fibra porque se producen rebotes internos de la onda con las caras exteriores de la pieza, aunque los valores resultantes se aproximan sobre todo a las mediciones en la dirección paralela a las fibras (medidas longitudinales).

Por otra parte, de acuerdo con los resultados de los trabajos de Balmori et al. (2016), los ángulos que arrojan mediciones más precisas y fiables son los comprendidos entre 45° y 75° . Destacando el ensayo indirecto de 63° con respecto a la dirección de la fibra como el más preciso y fiable, Figura 60.

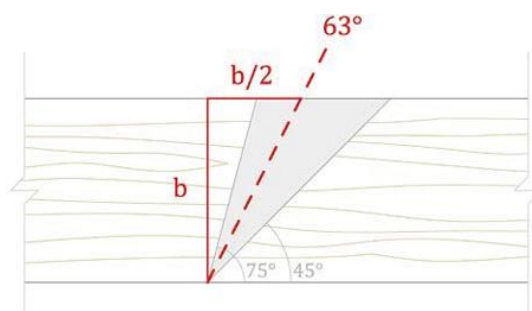


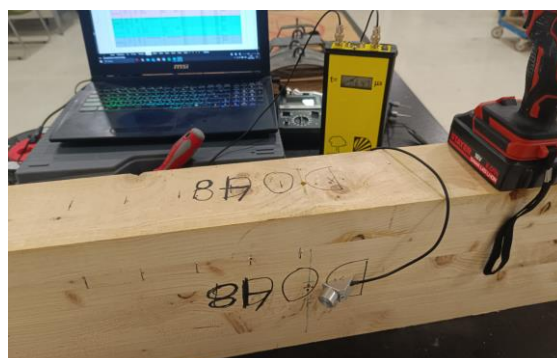
Figura 60. Esquema de aplicación de los ángulos propuestos por Balmori et al. (2016).

- **Acople de los palpadores:** para emitir y recibir la señal de manera adecuada, los palpadores deben mantenerse en un contacto pleno con el material, evitando la presencia de bolsas de aire entre el palpador y el material, ya que, de lo contrario, se podría producir dispersiones parciales o incluso totales de la señal. Hay materiales, como en el caso del hormigón y el acero, en los que el problema se soluciona con la aplicación de geles acoplantes entre el material y el palpador (interfase). En el caso de la madera, el problema se soluciona dotando a los palpadores de geometrías determinadas, como en el caso de los palpadores cónicos que se introducen en perforaciones previamente confeccionadas, y/o otorgándoles mecanismos de anclaje (como pernos o tornillos), o por simple clavado, para garantizar la presión de contacto entre el palpador y el material (Íñiguez, G., 2007), ver Figura 61.

- **Forma y dimensiones de la pieza:** en la mayoría de los casos, la velocidad de propagación de las ondas acústicas no depende de estos factores, pero, como ya se comentó previamente, en piezas donde la dimensión longitudinal es mucho mayor que la transversal se nos presentan situaciones en las que aparece una mayor variabilidad en los resultados obtenidos, siendo necesario recurrir a palpadores de mayor frecuencia (Íñiguez, G., 2007).



*Transductores cónicos del equipo
Sylvatest Trio*



*Transductores clavados del equipo
Microsecond Timer*



*Transductores atornillados del equipo
Ultrasonic Timer*

Figura 61. Diferentes tipos de palpadores empleados en ensayos ultrasónicos (GTED-UC).

- **Contenido de humedad:** según Sandoz (1989), se estima que por cada incremento de un 1% de humedad, se produce una disminución de la velocidad de un 0,8%, siguiendo una relación lineal entre el 5 y el 30% de humedad.

Analizando a las ecuaciones de velocidad de propagación longitudinal obtenidas anteriormente:

$$V_P = \sqrt{\frac{E * (1 - \nu)}{\rho * (1 + \nu) * (1 - 2\nu)}} \quad [1]$$

Ec. Para medio infinito y elástico

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [2]$$

*Ec. para medio finito y elástico
Dimensión longitudinal >>> transversal*

Si la humedad de la madera aumenta, su peso y, por tanto, su densidad, también lo hará. Como son factores situados en el denominador, resultarán en una disminución de la velocidad de propagación longitudinal, como bien propone la estimación de Sandoz (1989).

- **Temperatura:** un aumento de la temperatura reduce ligeramente la velocidad de propagación de los ultrasonidos. La influencia de la temperatura en la velocidad de propagación se hace más notoria a medida que aumenta el contenido de humedad en la madera. Esta reducción de velocidad se estima en un 0,07-0,08% por cada 1°C de aumento de la temperatura, para un contenido de humedad del 12% y por debajo del punto de saturación de la fibra (Esteban, M., 2003 & Sandoz, 1991).

3 MATERIALES Y EQUIPOS DE ENSAYO

Los ensayos realizados para la consecución de este proyecto han tenido lugar en el Laboratorio de Estructuras, perteneciente al Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica, y la nave anexa al mismo. La ubicación de ambos espacios es la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria. En los siguientes apartados, se describen los materiales y equipos empleados durante las fases de desarrollo de la campaña experimental.

3.1 Materiales empleados

Las probetas (o material de ensayo) son 27 vigas de madera de dos especies de madera (pino silvestre y abeto), con y sin tratamiento (pino silvestre sin tratamiento, pino silvestre tanalizado, y abeto⁹ sin tratamiento), y tres clases resistentes (GL18, GL24 y GL28).

Hay que tener en cuenta que estas vigas no son de madera maciza aserrada sino de madera laminada encolada pudiendo presentar desde 0 hasta 5 empalmes entre tablas (o *fingers*) en su zona central, como se muestra en la Figura 62.

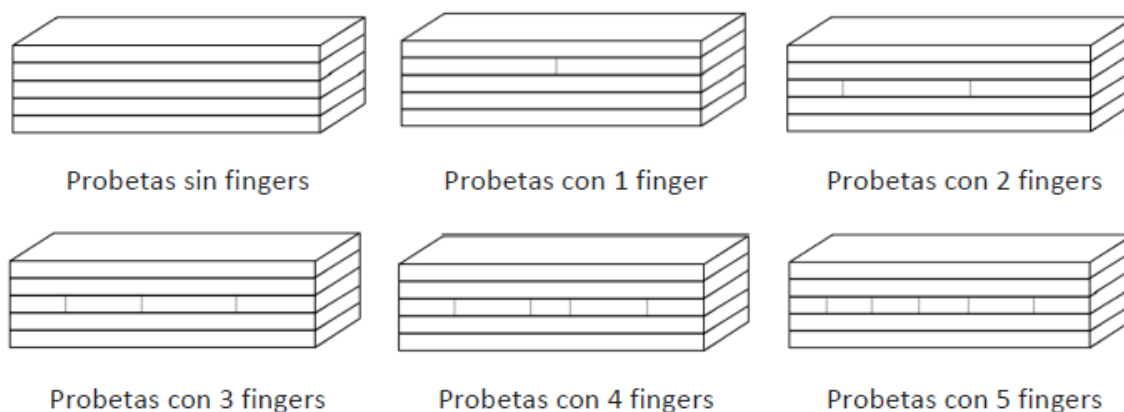


Figura 62. Esquema representativo del material de ensayo (García, D., 2020)

De las 27 probetas totales, 9 de ellas fueron sumergidas en agua en trabajos anteriores¹⁰, y se ven notablemente envejecidas respecto al resto, con un tono más amarronado y oscuro; las otras 18 probetas, a las cuales nos referiremos como

⁹ El abeto no fue sometido a tratamiento de tanalizado, debido al carácter de madera poco impregnable, según la clasificación de la UNE-EN 350-2:1995.

¹⁰ Condiciones de inmersión: agua dulce a 20°C, durante 304 días.

probetas o vigas “sanas”, tiene un color más amarillento y claro. La diferencia es obvia si observamos la Figura 63.



Figura 63. Muestra de 18 probetas de madera para Fases 1 y 2 de la campaña experimental.



Figura 64. Muestra de 9 probetas de madera añadidas en la Fase 3 de la campaña experimental.

De las 18 probetas consideradas en mejor estado, denominadas como “sanas”¹¹, solo se utilizaron 9 durante las Fases 1 y 2 de la campaña experimental. Las otras 9, mostradas en la Figura 64, fueron incorporadas al inicio de la Fase 3 con el objetivo de iniciar su acondicionamiento higrotérmico en la cámara climática.

Todas las probetas fueron suministradas por la empresa Yofra S.A. No se trata de unidades fabricadas ex profeso para el desarrollo de este proyecto, sino de las mismas vienen siendo empleadas en otros ensayos previos y estudios diversos. Desde entonces, han permanecido almacenadas en la nave anexa al Laboratorio de Estructuras, expuestas a condiciones no controladas de temperatura y humedad.

A continuación, en la Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10, se muestra una recopilación de los datos correspondientes a cada una de las probetas iniciales, incluyendo sus

¹¹ Cabe señalar que, en el contexto de realización de este proyecto, se emplea el término “sanas” para referirse a aquellas probetas que presentan un mejor estado relativo respecto al caso de las probetas previamente “sumergidas”, que se consideran las menos sanas.

dimensiones y su peso, tomadas previamente al inicio de la Fase 1, antes de comenzar el período de ensayos.

Tabla 8. Resumen de datos iniciales de las probetas de Pino Silvestre sin tratamiento.

Id. Probeta	Especie	Clase	Empalmes	Dimensiones	Peso (Kg)
D066	Pino Silvestre sin tratamiento (Sano)	GL18	3	1049x172x100	9,600
D071		GL24	4	1049x172x100	10,050
D079		GL28	2	1049x171x100	9,400
D064	Pino Silvestre sin tratamiento (Sumergido)	GL18	5	1050x172x100	10,000
D070		GL24	5	1049x172x100	10,650
D076		GL28	5	1048x172x100	9,800

Tabla 9. Resumen de datos iniciales de las probetas de Pino Silvestre tanalizado.

Id. Probeta	Especie	Clase	Empalmes	Dimensiones	Peso (Kg)
D037	Pino Silvestre Tanalizado (Sano)	GL18	3	1099x172x98	9,150
D023		GL24	4	1080x171x99	9,650
D031		GL28	3	1048x172x99	7,650
D035	Pino Silvestre Tanalizado (Sumergido)	GL18	5	1049x173x100	9,100
D024		GL24	5	1049x172x100	9,300
D029		GL28	5	1049x173x99	8,100

Tabla 10. Resumen de datos iniciales de las probetas de Abeto sin tratamiento.

Id. Probeta	Especie	Clase	Empalmes	Dimensiones	Peso (Kg)
D047	Abeto sin tratamiento (Sano)	GL18	1	1049x172x99	7,900
D051		GL24	4	1049x173x100	7,950
D059		GL28	4	1048x172x98	8,450
D042	Abeto sin tratamiento (Sumergido)	GL18	5	1049x227x100	10,600
D050		GL24	5	1048x172x98	8,250
D058		GL28	5	1050x172x99	8,100

Los datos correspondientes a las 9 probetas añadidas en la Fase 3, se encuentran recogidos en el anexo II.

3.2 Equipos empleados durante los ensayos

Durante el desarrollo la campaña experimental se han utilizado varios equipos de medida que dividiremos según la función que desempeñaron en el proyecto; de esta forma tenemos: equipos para control dimensional y pesaje, equipos para medición de condiciones ambientales, equipos para medición del estado de las probetas (humedad), y equipo de ultrasonidos.

3.2.1 Equipos para control dimensional y pesaje

En este primer grupo se inscriben las cintas métricas y las reglas metálicas, Figura 65, utilizadas tanto en la medición de dimensiones de las probetas como en su posterior marcado. Además, estos instrumentos sirvieron como elementos de apoyo para la alineación y correcta colocación de los palpadores durante la realización de los ensayos de ultrasonidos.



Figura 65. Regla metálica utilizada en el control dimensional de las probetas de madera.

En este mismo grupo se incluye una balanza digital, Figura 66, la cual se empleó para realizar todos los pesajes, tanto antes como durante la campaña experimental.



Rango de medida:
máximo 150 kg
Precisión: ± 50 g

Figura 66. Báscula digital utilizada para el pesaje de las probetas de madera.

3.2.2 Equipos para medición de condiciones ambientales

En este grupo se incluyen todos aquellos equipos que se utilizaron para la toma de medidas de condiciones del entorno en el que estuvieron almacenadas las probetas y/o se realizaron los ensayos y el acondicionamiento posterior de la madera.

Termohigrómetro digital TFA 30.5013

Este aparato se usó a modo de termómetro para tomar una medida estimada de la temperatura ambiente de la sala los días en los que se realizaron los ensayos, Figura 67. Mide temperaturas y humedades en el interior y exterior de la sala. Consta de una pantalla controlada por botones y alimentada por pilas, además de un cable de 1,5 metros con un sensor en su extremo. Este sensor es el encargado de captar las variaciones de temperatura y humedad, que se traducirán como datos para su lectura en la pantalla



Figura 67. Termohigrómetro digital TFA.

En la Figura 68 se relacionan las especificaciones técnicas del Termohigrómetro digital TFA 30.5013.

- Temperatura y humedad interior y exterior. Vista simultánea de los datos.
- Rango de temperatura: -10...+60°C.
- Precisión: $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ de 10 a 30°C; resto $\pm 1^{\circ}\text{C}$.
- Rango de humedad: 10...99%hr.
- Precisión: $\pm 3,5\%$ de 30 a 80%. Resto $\pm 5\%$.
- Memoria de máxima y mínima temperatura y humedad interior y exterior desde el último borrado.
- Altura dígitos: 25 mm.
- Longitud cable: 1,5 mts. aprox.. No desconectable.
- Para sobremesa o colgar.
- Alimentación: una pila AAA.
- Dimensiones: 110 x 100 x 10 mm. (alto x frente x fondo).

Figura 68. Especificaciones técnicas termohigrómetro digital TFA.

Datalogger de temperatura y humedad: Testo 175 H1

Equipo utilizado para medir y registrar los datos de temperatura y humedad en el interior de la cámara durante el acondicionamiento de la madera, Figura 69.

Se configuró este equipo para que registrara valores medidos en intervalos de un minuto y se situó el aparato sobre las vigas de madera para tener datos que comparar con los leídos en el cuadro externo de la cámara de acondicionamiento y verificar así que las condiciones internas se correspondían realmente con las fijadas en el mismo. Los sensores tanto de temperatura como de humedad de la cámara están situados cerca del techo y las condiciones medidas en la parte alta de la cámara, en teoría y en el peor de los casos, podrían diferir de las condiciones en la parte baja de la misma.

testo 175 H1

testo 175 H1, registrador de datos de humedad y temperatura de dos canales, sensor de humedad externo (sensor de humedad capacitivo/NTC), incl. sujeción mural, cerradura, pilas y protocolo de calibración

Modelo 0572 1754

Datos técnicos generales

Canales	2 internos (en vaina)
Tipo de pila	3 pilas tipo AAA o pilas miniatura Energizer L92 AAA
Tiempo de operatividad	3 años (intervalo de medición de 15 min, +25 °C)
Temperatura de servicio	-20 ... +55 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 ... +55 °C
Medidas	149 x 53 x 27 mm
Peso	130 g
Caja	ABS/PC
Tipo de protección	IP54
Intervalo de medición	10 seg - 24 h
Memoria	1 millón de lecturas

Tipos de sensor

	NTC	Parámetros calculados td	Sensor de humedad capacitivo Testo
Rango de medición	-20 ... +55 °C	-40 ... +50 °C _{td}	0 ... 100 %HR*
Exactitud ± 1 dígito	$\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ (-20 ... +55 °C)	+0.03 %HR/K	± 2 %HR (2 ... 98 %HR) a +25 °C
Resolución	0.1 °C		0.1 %HR

* Inadecuado para atmósferas con condensación. Para uso en humedad elevada continua (>80 %HR a $\leq 30^{\circ}\text{C}$ >12 h, >60 %HR a >30 °C >12 h), por favor contacte con nuestro departamento de asesoramiento.

Figura 69. Aspecto y datos técnicos Testo 175 H1.

3.2.3 Equipos para medición del estado de las probetas

Xilohigrómetro de resistencia eléctrica: GANN Hydromette RTU 600

Es un equipo para la medición de humedad en la madera que resulta muy manejable, de hecho, es un equipo portátil que puede llevarse de un lado a otro en un maletín, como podemos apreciar en la Figura 70. En la Figura 71, puede observarse la apariencia del equipo de medida.



Figura 70. Maletín del Xilohigrómetro de resistencia eléctrica GANN RTU 600.



Figura 71. Xilohigrómetro GANN RTU 600.

Los xilohigrómetros resistivos miden el contenido de humedad de la madera basándose en el método de resistencia eléctrica (UNE-EN 13183-2:2002).

Su principio de funcionamiento es sencillo:

1. Insertamos las dos puntas de metal en la madera, que hacen de electrodos;
2. el xilohigrómetro mide la resistencia eléctrica entre ambos;
3. el propio aparato convierte esta lectura en un porcentaje de humedad mediante la comparación de los datos obtenidos con los de unas gráficas calibradas que tiene integradas y haciendo algunas correcciones.

Como podemos ver en la gráfica de la Figura 72, el contenido de humedad aumenta a medida que la resistencia eléctrica va en disminución.

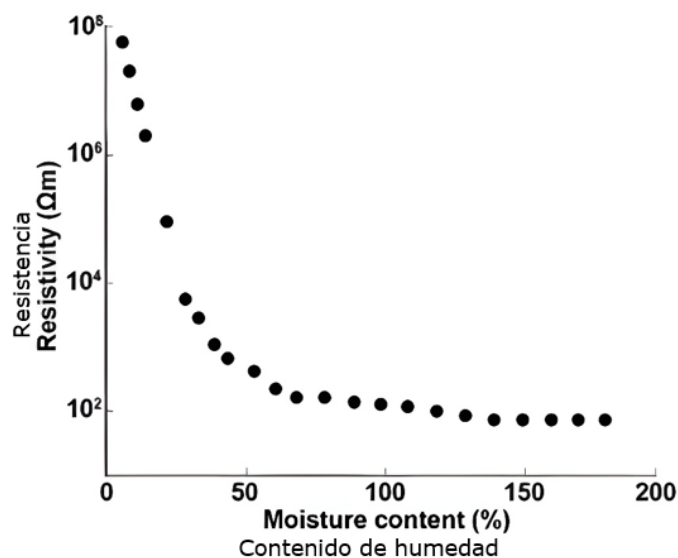


Figura 72. Diagrama de variación de la resistencia eléctrica del *Pinus Elliotii* en función de contenido de humedad de la madera (FPL, 2010)

Estas curvas, de manera genérica vienen dadas por la relación logarítmica:

$$\log R = a - b \cdot M \quad [6]$$

En donde:

R=resistencia eléctrica (Ohmios, Ω)

M=contenido de humedad de la madera (%)

a, b=constantes dependientes de la especie y la temperatura

En la Figura 73 pueden consultarse determinadas consideraciones a tener en cuenta durante el manejo del Xilohigrómetro GANN RTU 600.

Temperaturas ambientales admisibles	
En almacenaje:	5 hasta 40 °C; temporalmente -10 hasta 60 °C
En funcionamiento:	0 hasta 50 °C, durante un breve margen de tiempo -10 hasta 60 °C, sin condensación
El instrumento, incluidos los accesorios, no se ha de almacenar o utilizar en entornos de aire agresivo o aire contaminado por disolventes.	

Figura 73. Indicaciones para el manejo del Xilohigrómetro GANN RTU 600, manual del fabricante.

Además de comprender el principio de funcionamiento del xilohigrómetro, para realizar mediciones correctas es necesario que el instrumento esté debidamente calibrado y que se realicen unos ajustes previos mediante sus selectores. Para esta explicación, la Figura 74, nos servirá de guía.

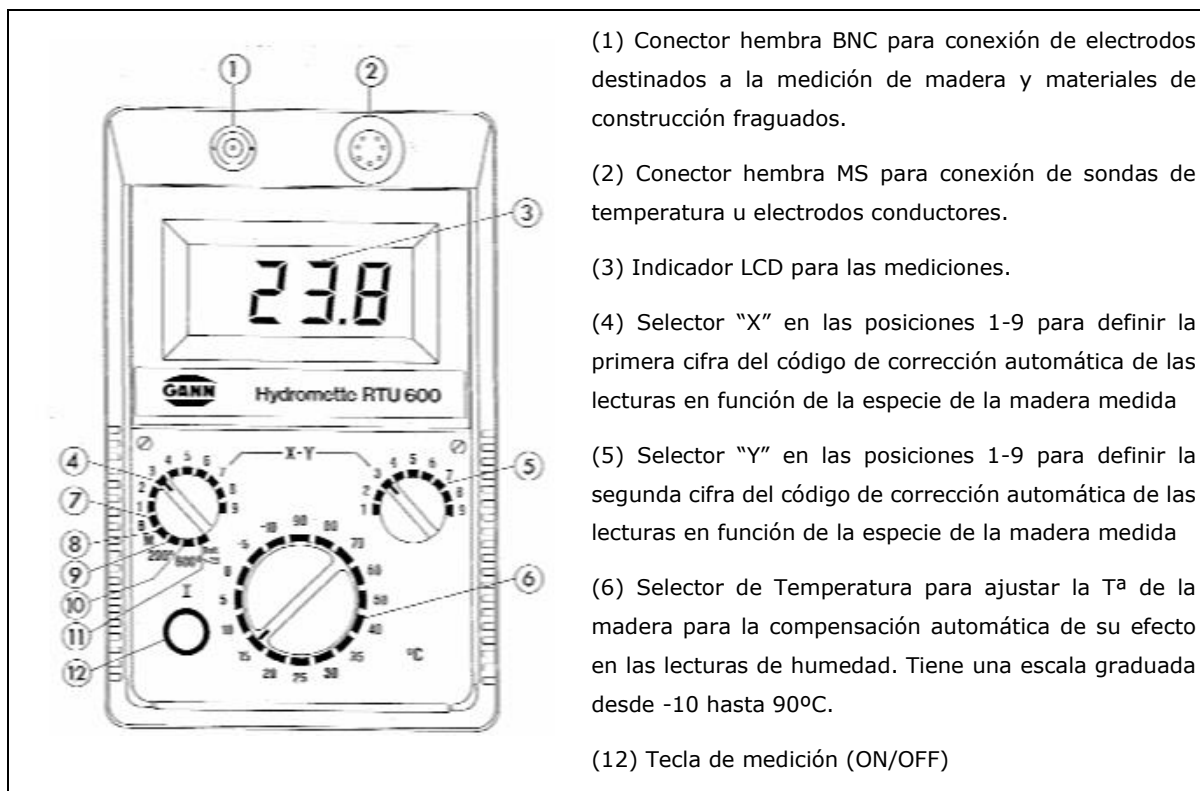


Figura 74. Esquema de botones y selectores Hydromette GANN RTU 600, manual del fabricante.

Las dos ruedas selectoras superiores del instrumento corresponden con un código numérico de dos dígitos, asociado a las letras X e Y, dependientes de la especie de la madera la cual es objeto de medición del contenido de humedad.

Este código viene tabulado en un anexo del manual del fabricante, Figura 75.



Figura 75. Tabla de maderas GANN, Anexo manual del fabricante Hydromette GANN RTU 600.

En nuestro caso, a partir de la Figura 76 y la Figura 77 puede extraerse dicha información numérica de las "Tablas de maderas GANN" de forma que, tanto para el Abeto como para el Pino silvestre, este código numérico (X-Y) es 9-2. Por tanto, el selector de la izquierda (X) debe situarse en la posición 9, mientras que el selector de la derecha (Y) debe colocarse la posición 2.

Holzsorte, Species, Essence, Madera	1..4	1..7	x-y	Code	g/cm³
Abele	3	6	8-1	302	0,40
Abete adoso d'America	3	3	5-5	158	0,45
Abete bianco	3	7	9-2	309	0,40
Abete del Canada	3	3	7-3	185	0,40
Abete di California	3	7	9-2	309	0,40
Abete di Sitka	3	3	9-1	305	0,40
Abetina rosso	3	3	6-5	176	0,40
Abeto	3	7	9-2	309	0,40
Abeto de California	3	7	9-2	309	0,40
Aboudikro	3	3	6-5	296	0,65
Abura	3	3	1-9	101	0,50
Abyssinian Juniper	3	3	6-5	133	0,50
Acácia falsa	3	3	6-5	293	0,60
Acacia faux	3	3	6-5	293	0,60

- 2 -

Holzsorte, Species, Essence, Madera	1..4	1..7	x-y	Code	g/cm³
Pino resinoso	3	7	9-2	278	0,45
Pino rodeno	3	3	6-5	299	0,50
Pino rojo americano	3	3	6-5	290	0,45
Pino rosso d'America	3	3	6-5	291	0,35
Pino royo	3	7	9-2	207	0,45
Pino silvestre	3	7	9-2	207	0,45
Pino strobo	3	3	6-5	318	0,35
Pioppo	3	6	8-1	270	0,40
Pioppo bianco	3	6	8-1	302	0,40
Pioppo del Canada	3	6	8-1	152	0,40
Pioppo tremulo	3	5	8-1	116	0,40
Pitch Pine	3	7	9-2	278	0,45
Pitchpin	3	7	9-2	278	0,45
Piuva	2	5	2-6	191	1,00

- 78 -

Figura 76. Hydromette GANN RTU 600: Coordenadas X-Y para el Abeto.

Figura 77. Hydromette GANN RTU 600: Coordenadas X-Y para el Pino silvestre.

Una vez realizados estos ajustes, queda regular la posición del selector de temperatura, la cual deberá modificarse en función de las condiciones ambientales del ensayo.

El xilohigrómetro se ha utilizado prácticamente en toda la campaña experimental, haciendo tanto una toma inicial de valores del contenido de humedad de la madera de las probetas como en el seguimiento periódico posterior realizado durante el acondicionamiento de las vigas.

3.2.4 Equipo de ultrasonidos

FAKOPP Ultrasonic Timer

Este es un equipo diseñado para la detección de defectos en plantines, láminas o tabloncillos de madera mediante la aplicación de ultrasonidos a través de unos palpadores, Figura 78. En el contexto del presente proyecto, el equipo fue empleado sobre vigas de madera laminada encolada, con el objetivo de localizar y evaluar posibles defectos, así como comprobar la eficacia tanto del equipo como de la técnica de ensayo no destructiva para este tipo de análisis estructural en la

madera. El principio de operación de este equipo puede explicarse a través de su modo de uso.



Figura 78. Vista frontal Ultrasonic Timer.



Figura 79. Vista superior Ultrasonic Timer.

Según el manual del fabricante y la propia experiencia en el manejo del equipo, se puede afirmar que para hacer uso del equipo se necesita seguir unos pasos:

1. Se conectan los cables de los transductores a los conectores del dispositivo. Ambos transductores son idénticos, por lo que si se intercambian los cables se mediría el mismo tiempo de tránsito.
2. Acoplamos los dos transductores piezoeléctricos sobre la superficie del material, sujetándolos con tornillos, Figura 79; la superficie de colocación debe ser lo más plana posible y estar libre de elementos extraños o sustancias que puedan generar interferencias en las mediciones.
3. Se enciende el temporizador mediante la activación del botón "ON/OFF". En este momento, en la pantalla aparecerá como primera lectura "0000".
4. Simultáneamente, el dispositivo enviará una onda de ultrasonidos entre los transductores, actuando uno de ellos como emisor y el otro como receptor.
5. El sonido se propaga a través del material, transcurriendo un tiempo, denominado tiempo de tránsito o tiempo de vuelo de la onda ultrasónica, hasta llegar al segundo transductor (que actúa como receptor) y deteniendo el temporizador.
6. El tiempo de tránsito entre transductores aparece en la pantalla del equipo, en microsegundos (μs), pero hay que tener en cuenta que este tiempo

incluye una pequeña parte que es tiempo de tránsito en el interior del transductor, por lo que se **requerirá realizar una corrección de tiempo**¹² sobre la lectura del equipo.

NOTA: Es necesario hacer una verificación en las primeras medidas. Si la desviación es de 0 o 1 μ s, se deben aceptar los datos como válidos.

Para la realización del ensayo es necesario un entorno libre de vibraciones, al menos durante la realización de la prueba, ya que las señales externas pueden interferir con la señal ultrasónica.

La sensibilidad del equipo para vibraciones de baja frecuencia es baja.

En la Figura 80 se relacionan las especificaciones técnicas del FAKOPP Ultrasonic Timer.

Weight*	910 g
Dimensions:	297 x 106x 45 mm
Material of the case:	Al
Timer frequency range:	15-300 kHz
Time resolution:	0.1 μ s
Signal amplification:	1000x
Threshold level:	120 mV
Excitation pulse	
frequency	one in 2 sec
voltage	200 V
duration	60 μ s
shape	uni-polar, square
Powered by	9 V block battery
Power consumption	
timer	70 mW
excitation unit	120 mW
Ultrasonic transducer frequency	
with spike wave guide	90 kHz
with triangle wave guide	45 kHz
Operation and storage temperature	0-35 °C

Figura 80. Especificaciones técnicas FAKOPP Ultrasonic Timer.

¹² Para obtener el valor de la **CORRECCIÓN DE TIEMPO** se registrarán los tiempos mostrados en la pantalla del equipo mientras se varía la distancia entre los transductores piezoeléctricos a lo largo de longitud de la viga de madera. Estos valores se representarán en una gráfica distancia entre palpadores(cm) - tiempo de vuelo(μ s), encajando una recta de regresión con los puntos representados. El punto de corte o intersección de la recta con el eje de ordenadas se corresponderá con el valor de la corrección de tiempo.

Entre los equipos alternativos para realizar esta misma función, puede resaltarse el equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio, equipo que al igual que el empleado en la realización del proyecto, permite medir el tiempo de vuelo de la onda ultrasónica transmitida entre dos transductores, ver Figura 61.

3.2.5 Cámara de acondicionamiento higrotérmico

Esta cámara, de apariencia similar a la de una cámara frigorífica industrial fue diseñada y preparada para mantener en su interior unas condiciones atmosféricas de temperatura y humedad parametrizadas desde su consola o panel de mando situado en el exterior de dicha cámara.

Nos referiremos a este equipo denominándolo como “cámara climática” para simplificar sus llamadas en el texto.

La cámara climática consta de varios componentes, situados en su mayoría en su parte alta, ya sea en el interior o exterior de la misma. La cámara dispone de:

- Un **evaporador de doble flujo**, localizado en el interior de la cámara, en la zona media del techo. Empleando este evaporador, el flujo de aire es recogido por los tres ventiladores situados en la cara inferior del evaporador, siendo expulsado acto seguido a través de las rejillas que tiene a lo largo de sus dos laterales más largos, ver Figura 81, lo que se cataloga o define como una **distribución bilateral del aire**. Así, se garantiza una conservación uniforme y óptima de los productos que se introduzcan en el interior de cámaras frigoríficas, reduciendo el riesgo de fluctuaciones de temperatura. En la Figura 82, pueden consultarse las características técnicas del modelo de evaporador instalado en la cámara climática.



Figura 81. Evaporador de doble flujo RIVACOLD RDF3250ED (polargross.com).



Figura 82. Detalle de la etiqueta del evaporador de doble flujo RIVACOLD RDF3250ED.

- **Calentadores de aletas cuadradas** de acero inoxidable situados en ambas salidas de aire del evaporador de doble flujo. Un total de cuatro calentadores, situados uno en cada esquina y orientados hacia las rejillas de ventilación, tal como puede verse en la Figura 84. Los subcomponentes más distintivos de estos calentadores serían un tubo de acero en forma de "U" que conecta y hace de soporte para las aletas de acero inoxidable, que se encuentran soldadas a dicho tubo, Figura 83. Los extremos de esta "U" van conectadas a un terminal eléctrico, el cual activa el calentamiento o enfriamiento del subconjunto que, a su vez, calienta o enfría el aire cuando este atraviesa las aletas de acero inoxidable. El terminal se encuentra controlado por los parámetros de temperatura fijados en el panel de mando situado en el exterior de la cámara.



Figura 83. Subcomponentes de calentadores de aletas cuadrada de acero inoxidable (amazon.com).

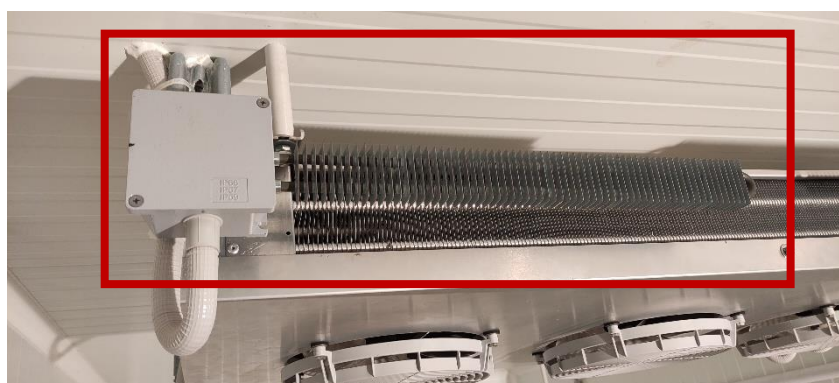


Figura 84. Colocación de los calentadores de aletas cuadradas.

- Una **sonda de humedad** que realiza lecturas de las condiciones de humedad que se dan en el interior de la cámara climática, Figura 85(a).

- Una **sonda de temperatura o termostato y un presostato**, que realizan lecturas de las condiciones de temperatura y presión, respectivamente, que hay en el interior de la cámara climática, Figura 85(b).
- Un **humectador/deshumidificador**, Figura 85(c), inyecta o extrae vapor de agua para garantizar la atmósfera de acondicionamiento higrotérmico prefijada en el panel de mando que está en el exterior de la cámara. Se complementa con una tubería que conecta con un depósito en el exterior y en el cual vierte el exceso de agua que hay en el interior cuando se realiza la acción de deshumidificación.

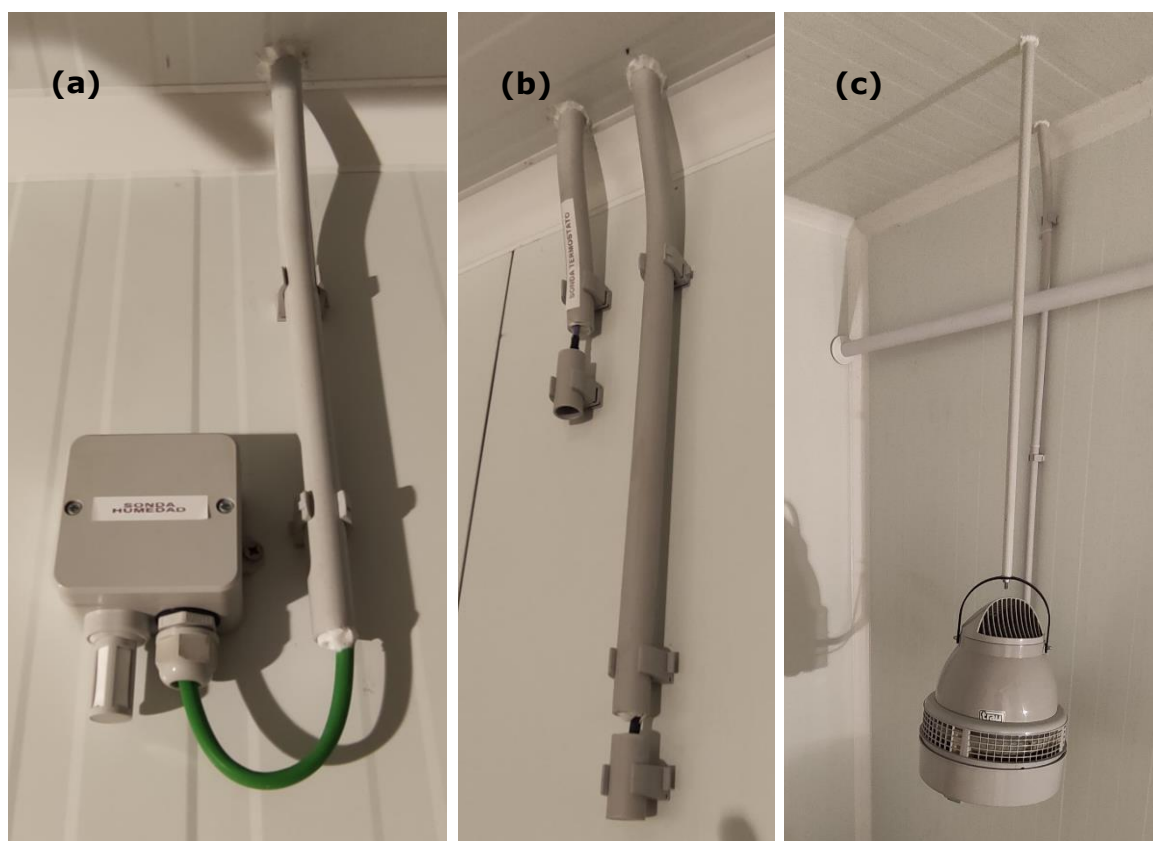


Figura 85. Componentes en el interior de la cámara climática. (a) sonda de humedad; (b) sonda de temperatura y presostato; (c) humectador/deshumidificador.

A modo de resumen, el funcionamiento de la cámara climática lo podríamos contemplar de la siguiente forma:

Una vez fijados, en el panel de mando exterior, los parámetros que se desean mantener para, en nuestro caso, realizar el acondicionamiento de la madera en el interior de la cámara climática, los diferentes elementos que componen el conjunto de la cámara climática trabajan en armonía para conseguir que la

atmósfera que se da en el interior de la cámara alcance unas condiciones acordes a los parámetros establecidos en el panel de mando.

Los ventiladores del evaporador se pondrán en funcionamiento para hacer circular el aire, absorbiéndolo y haciéndolo pasar a través de las aletas de los calentadores y adecuarlo a las condiciones térmicas buscadas.

El humectador/deshumidificador inyectará o extraerá vapor de agua al entorno en función de las necesidades del acondicionamiento.

Las sondas de humedad, temperatura y presión son elementos de medida que realizarán lecturas constantes del ambiente interno de la cámara climática para compararlas con los valores establecidos que se deben cumplir. En caso de que las medidas varíen respecto a los valores establecidos que se deben cumplir, se vuelve a activar toda la maquinaria de la cámara climática para conseguir que se cumplan y mantengan las condiciones higrotérmicas buscadas.

4 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

4.1 Fase 0: Toma de medidas y comprobación de estado inicial

Antes de dar comienzo a la campaña experimental, resultaba fundamental disponer de un conocimiento detallado del estado inicial de las probetas, con el fin de establecer un punto de partida claro que permitiera interpretar adecuadamente los resultados obtenidos posteriormente.

Siguiendo este objetivo, se llevó a cabo una inspección visual con su correspondiente **registro fotográfico** para disponer de una referencia del estado inicial de las probetas que consultar en caso de requerirlo más adelante. Se remite al lector al "UNE. (2016). Madera estructural. Clases resistentes (UNE-EN 338:2016).

ANEXO I: Registro fotográfico del estado inicial de las probetas de madera" para su consulta.

Asimismo, se tomaron medidas de su peso y dimensiones iniciales, ya que con el paso del tiempo podrían experimentar variaciones en su peso y volumen como consecuencia de los procesos de expansión y contracción provocados en la madera por los cambios en la humedad y temperatura de su entorno, más aún si no se encuentran en un entorno de almacenaje con parámetros controlados de temperatura y humedad.

4.2 Fase 1: Prueba del equipo de ultrasonidos sobre probeta

En esta primera fase, se puso a prueba el equipo de ultrasonidos **FAKOPP Ultrasonic Timer**

sobre una de las probetas de madera con el fin de observar su alcance y limitaciones, no atendiendo únicamente a lo que dice el manual de usuario del propio fabricante sino sometiéndolo a experimentación.

Para ello, en primer lugar, se deben describir una serie de factores en los cuales se inscriben los ensayos, lo que se denominaría **marco experimental**.

Se concretó que los ensayos se realizarían únicamente en la cara superior de las probetas y a una distancia prudencial del borde, línea longitudinal central, atendiendo a lo que sería el sentido de trabajo de las cargas durante el servicio.

Se trazó una línea longitudinal centrada en la cara superior y se realizó un marcado a lápiz sobre dicha línea, cada 5 centímetros. Dejando libres los primeros 5 centímetros, se numeraron cada una de las marcas realizadas del 0 al 19-20, según la longitud de cada viga.

Se tomó la medida de la temperatura de la sala en la que se realizaron los ensayos, el Laboratorio de Estructuras, empleando un **Termohigrómetro digital**: $T=20^{\circ}\text{C}$.

Se realizó una toma de medidas de las humedades de la probeta de madera, utilizando para ello el **Xilohigrómetro de resistencia eléctrica: GANN Hydromette RTU 600**

¹³. Para ello, se tomó una medida en cada una de las 19-20 marcas a lo largo de la longitudinal de la probeta de madera, Figura 86. Una vez hecho esto, se calculó una aproximación de la humedad media de la madera de la probeta: $H=17,9\%$.

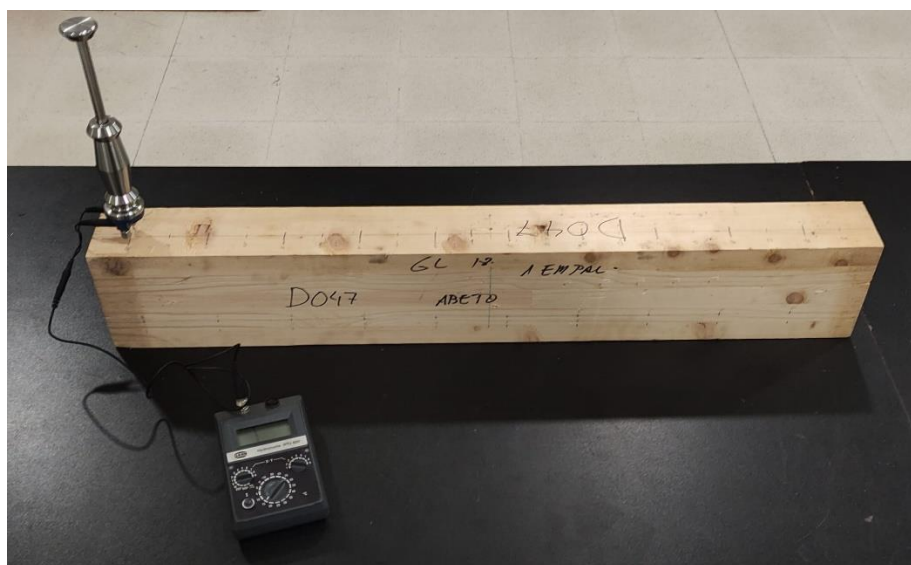


Figura 86. Toma de medidas de humedades con xilohigrómetro GANN en probeta de madera.

Se colocó el primer palpador en el Punto 0 y se mantuvo fijo. Por el contrario, el otro palpador se colocó en el Punto 1 (como puede observarse en la Figura 87) y,

¹³ Recordatorio: como coordenadas X-Y se colocan los parámetros dependientes de la especie 9-2 e, igualmente, se selecciona la temperatura.

posterior y sucesivamente, se fue desplazando uno a uno a los diferentes puntos distanciados 5 cm, tomando 10 lecturas de la medida del tiempo de vuelo en cada una de las posiciones de los transductores, y calculando para cada caso el promedio de tiempo de vuelo. Así se fue completando la Tabla 11.

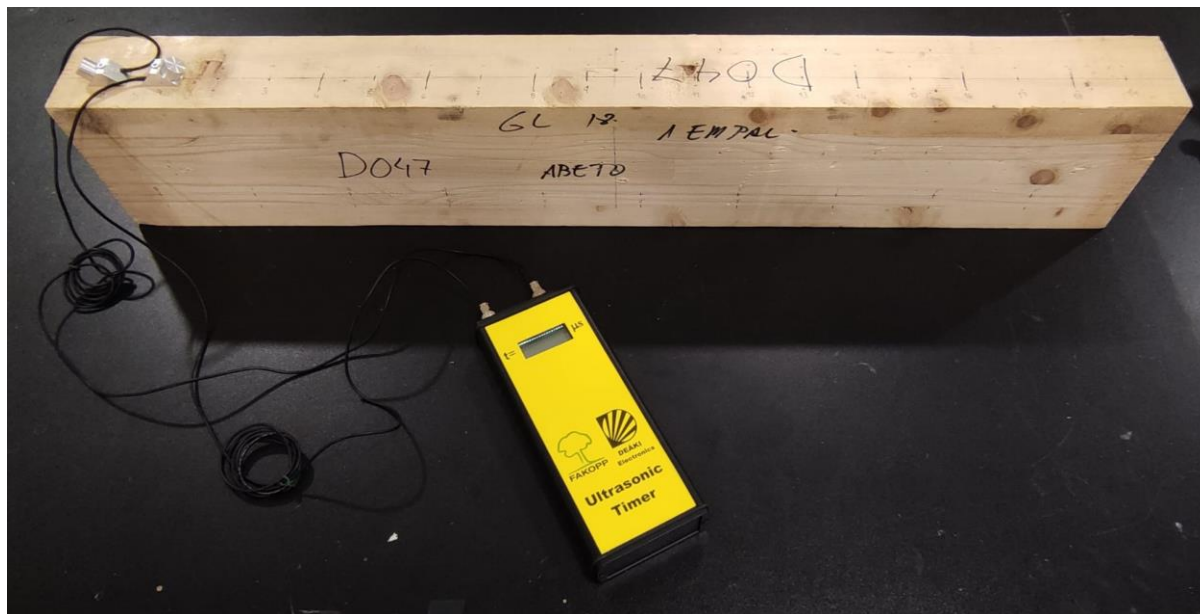


Figura 87. Ensayo de UT en la longitudinal de la probeta de madera.

Tabla 11. Tabla de datos probeta de madera de abeto D047.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μ s)
Punto 0	0,0	17,6	-
Punto 1	5,0	17,8	13,93
Punto 2	10,0	17,7	24,62
Punto 3	15,0	18,0	32,05
Punto 4	20,0	18,0	41,36
Punto 5	25,0	17,8	50,92
Punto 6	30,0	17,9	63,20
Punto 7	35,0	18,1	72,09
Punto 8	40,0	17,6	79,90
Punto 9	45,0	17,5	90,75
Punto 10	50,0	17,9	99,96
Punto 11	55,0	17,9	108,07
Punto 12	60,0	18,0	114,86
Punto 13	65,0	18,1	124,38
Punto 14	70,0	17,9	131,62
Punto 15	75,0	17,8	140,87
Punto 16	80,0	18,0	149,93
Punto 17	85,0	17,9	159,74

Punto 18	90,0	18,0	168,61
Punto 19	95,0	17,7	179,17

Volviendo al manual/guía de usuario del equipo de ultrasonidos FAKOPP Ultrasonic Timer, en el apartado “Corrección de Tiempo” se observó que la determinación teórica de la corrección del tiempo se basa en la velocidad de propagación de la onda en el aluminio y la distancia total del trayecto recorrido en este material. Como bien se aprecia en el apartado mencionado, si se representan los datos medidos de los tiempos de vuelo (μs) frente a la distancia entre el transductor fijo (ubicado en el punto 0) y el transductor móvil para cada uno de los casos, Figura 88, puede obtenerse el valor de la corrección de tiempo a través de la ordenada en el origen de la recta de regresión obtenida. En este caso, el valor de la corrección de tiempo fue 6,7758 μs .

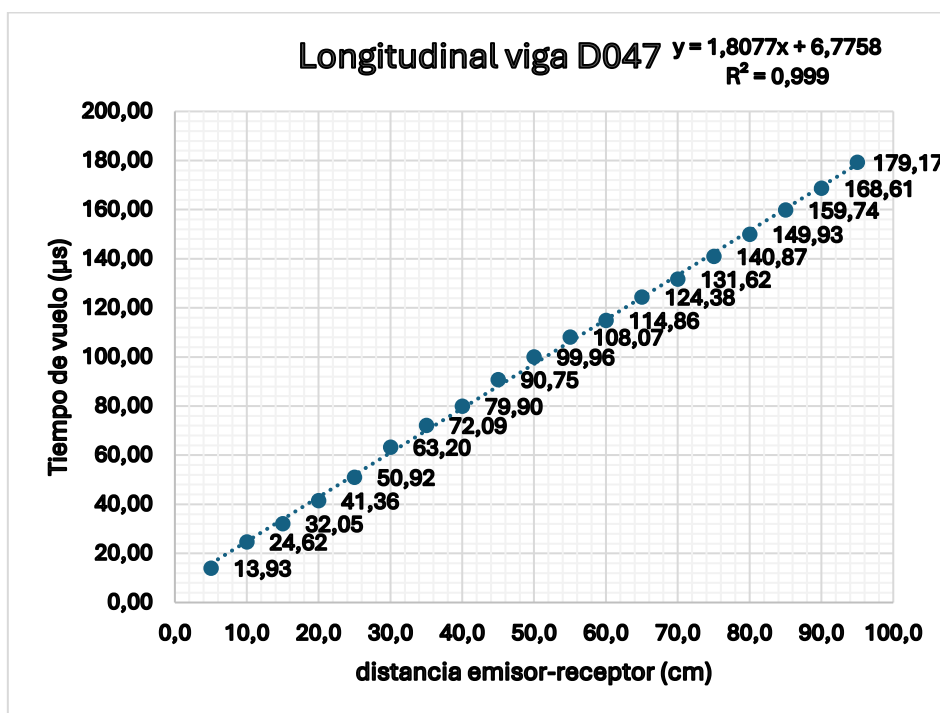


Figura 88. Gráfico de dispersión para probeta de madera de abeto sano D047.

Sustituyendo el valor de la corrección de tiempo en la determinación de la velocidad de propagación longitudinal de la onda, ver ecuación siguiente, se obtuvieron los valores de velocidad ultrasónica en cada posición definida por los transductores (a la que también nos referiremos como intervalo entre marcas), ver Tabla 12. Excluyendo el primero de los valores debido a su gran diferencia con el resto (la cercanía de los palpadores en el primer intervalo puede estar

produciendo algún tipo de interferencia), puede obtenerse una velocidad de propagación longitudinal de las ondas ultrasónicas promedio de 5543,37 m/s, con un coeficiente de variación reducido del 2,80% (o lo que es lo mismo con una desviación típica de 155,02 m/s).

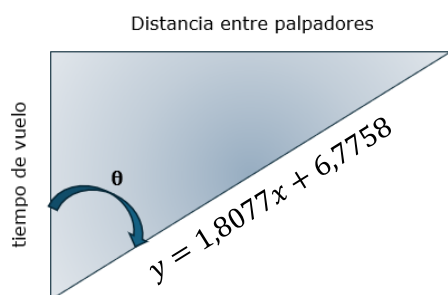
$$V\left(\frac{m}{s}\right) = \frac{1000 \cdot distancia(mm)}{registro\ de\ tiempo(\mu s) - corrección\ de\ tiempo} \quad [7]$$

Tabla 12. Tabla de datos probeta de madera de abeto D047 con cálculo de velocidades.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)	V(m/s)
Punto 0	0,0	17,6	-	(emisor)
Punto 1	5,0	17,8	13,93	6988,9016
Punto 2	10,0	17,7	24,62	5604,0618
Punto 3	15,0	18,0	32,05	5934,9060
Punto 4	20,0	18,0	41,36	5782,9876
Punto 5	25,0	17,8	50,92	5663,2581
Punto 6	30,0	17,9	63,20	5316,8676
Punto 7	35,0	18,1	72,09	5358,7122
Punto 8	40,0	17,6	79,90	5470,1453
Punto 9	45,0	17,5	90,75	5358,7888
Punto 10	50,0	17,9	99,96	5365,7165
Punto 11	55,0	17,9	108,07	5429,7285
Punto 12	60,0	18,0	114,86	5551,2277
Punto 13	65,0	18,1	124,38	5527,0135
Punto 14	70,0	17,9	131,62	5606,9886
Punto 15	75,0	17,8	140,87	5593,0831
Punto 16	80,0	18,0	149,93	5588,3795
Punto 17	85,0	17,9	159,74	5556,8558
Punto 18	90,0	18,0	168,61	5561,2473
Punto 19	95,0	17,7	179,17	5510,6262

Se calculó también el valor de la velocidad mediante trigonometría para comparar ambos cálculos entre sí y extraer un coeficiente de error del método empleado. Para ello, en Figura 89 se replica el triángulo que forman la recta de regresión o línea de tendencia de la Figura 88.

En consecuencia, puede afirmarse que $V = \frac{\text{distancia entre palpadores}}{\text{tiempo de vuelo}} = \tan \theta$, siendo θ el ángulo complementario del definido por la recta de regresión obtenida respecto del eje de abscisas.



$$\theta = 90^\circ - \tan^{-1}(1,8077) = 90^\circ - 61,05^\circ = 28,95^\circ$$

De esta forma, la velocidad sería:

$$V = \tan(28,95^\circ) = 0,55316 \frac{\text{cm}}{\mu\text{s}} \rightarrow V = 5531,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Y el error existente entre los dos métodos:

$$\text{error} = \left| \frac{5543,4 - 5531,6}{5543,4} \right| * 100 \rightarrow \text{error} \cong 0,21\%$$

Acabado todo este proceso, se repitió el procedimiento, realizando el ensayo de ultrasonidos en zonas de tamaño más reducido, ya que en el apartado "Consideraciones de sensibilidad" del manual de usuario del equipo FAKOPP Ultrasonic Timer se recomendaba utilizar distancias cortas entre los transductores. En dicho apartado se mencionaba que la distancia recomendada entre los palpadores, Figura 90, fuese de entre 25 y 30 centímetros, Figura 91 y Figura 92.

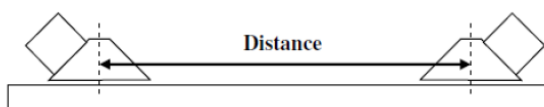


Figura 90. Distancia entre palpadores.

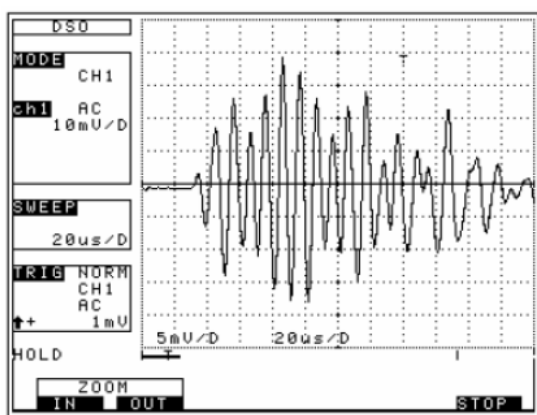


Figura 91. Señal recibida con transductores separados más de 30 cm donde puede apreciarse la atenuación de la señal con la distancia entre

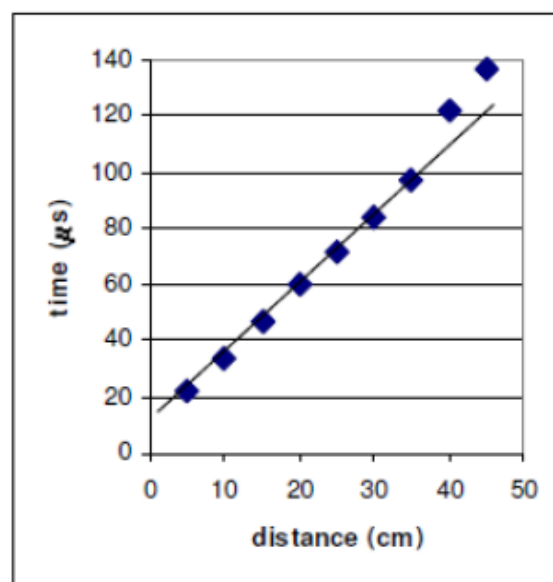


Figura 92. Gráfico extraído del manual del equipo FAKOPP Ultrasonic Timer en el que se visualiza que a partir de 35 cm la lectura de

palpadores (figura extraída del manual del equipo FAKOPP Ultrasonic Timer).

tiempo se incrementa desviándose de la recta de tendencia.

Cabe referir que la información contenida en el manual se obtuvo parcialmente realizando ensayos con palpadores cónicos sobre plantines amorfos (con formas naturales); mientras que, en el presente proyecto, se utilizarán palpadores triangulares/trapezoidales, como los que se muestran en la Figura 90. **No se encuentra el origen de la referencia.**, sobre probetas de madera con forma de prisma de base rectangular. Por tanto, las observaciones recogidas en el manual de uso no pueden considerarse directamente en nuestro caso.

En consecuencia, se realizó una división de la probeta en tres zonas o tramos de 40 centímetros que se solapaban entre sí para analizar los puntos críticos, que serían los extremos de cada intervalo, ver Figura 93.

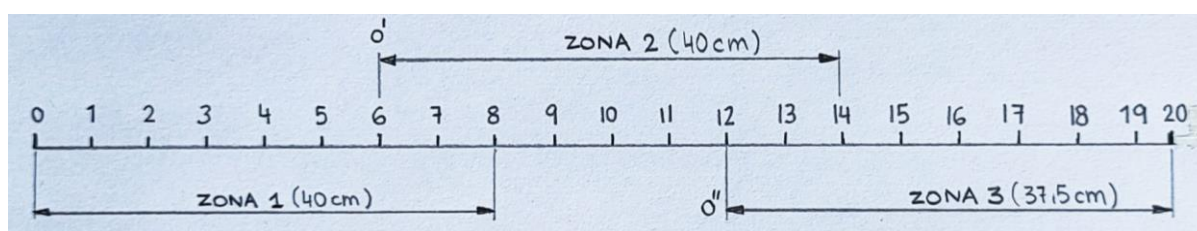


Figura 93. Esquema de la división del marcado de la probeta por zonas.

Zona por zona se fueron realizando los ensayos de ultrasonidos (posicionamiento de palpadores: Figura 94, Figura 96 y Figura 98) y rellenando las tablas de datos medidos (Tabla 13, Tabla 15, y Tabla 17) y calculados siguiendo el procedimiento anteriormente descrito (gráficos de dispersión: Figura 95, Figura 97 y Figura 99; y, Tabla 14, Tabla 16, y Tabla 18).

ZONA 1



Figura 94. Ensayo de UT en la zona 1. El palpador emisor se coloca en el punto 0 y se mantiene fijo mientras el palpador receptor se va desplazando longitudinalmente entre las marcas 0-8.

El valor de la humedad promedio para esta zona es:

$$H_m = \frac{\sum_0^8 H_n}{9} \rightarrow H_m \cong 17,83\%$$

Partiendo de los tiempos de vuelo y distancias de la Tabla 13, la Figura 95 ilustra el gráfico de dispersión para los datos de este tramo.

Tabla 13. Tabla de datos Zona 1 de la probeta de madera de abeto D047.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)
Punto 0	0,0	17,6	
Punto 1	5,0	17,8	13,93
Punto 2	10,0	17,7	24,62
Punto 3	15,0	18,0	32,05
Punto 4	20,0	18,0	41,36
Punto 5	25,0	17,8	50,92
Punto 6	30,0	17,9	63,20
Punto 7	35,0	18,1	72,09
Punto 8	40,0	17,6	79,90

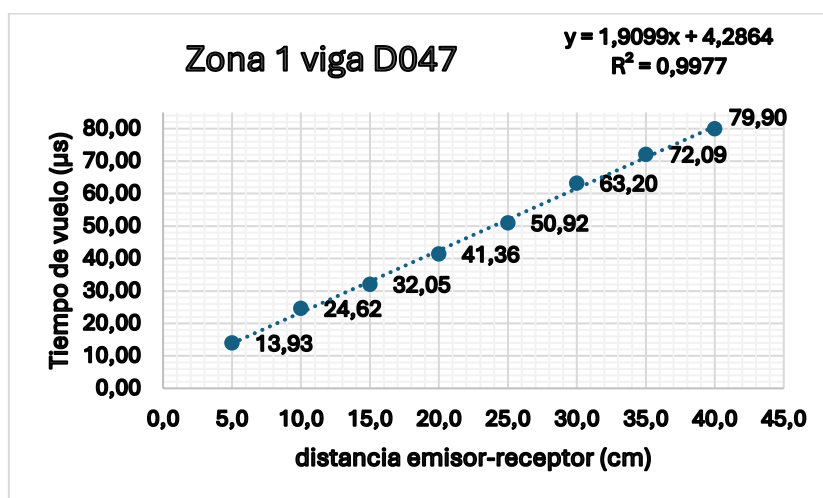


Figura 95. Gráfico de dispersión para Zona 1 de la probeta de madera de abeto sano D047.

Atendiendo a su recta de regresión: $y = 1,9099x + 4,2864$, se tiene que:

$$\theta = \tan^{-1}(1,9099) \cong 62,36^\circ$$

$$\text{corrección de tiempo} = 4,2864 \mu s$$

Con el valor de la corrección de tiempo y la fórmula [7] para la determinación de la velocidad de propagación, se calculó la velocidad en cada intervalo, Tabla 14.

Tabla 14. Tabla de datos Zona 1 de la probeta de madera de abeto D047 con cálculo de velocidades.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)	V(m/s)
Punto 0	0,0	17,6		(emisor)
Punto 1	5,0	17,8	13,93	5184,7858
Punto 2	10,0	17,7	24,62	4917,9683
Punto 3	15,0	18,0	32,05	5402,7576
Punto 4	20,0	18,0	41,36	5394,6744
Punto 5	25,0	17,8	50,92	5360,9415
Punto 6	30,0	17,9	63,20	5092,2028
Punto 7	35,0	18,1	72,09	5161,9678
Punto 8	40,0	17,6	79,90	5290,0536

Excluyendo de forma sistemática el primero de los valores por la proximidad entre los palpadores, realizando la media y redondeando se obtuvo un valor de velocidad de propagación de onda promedio en la zona 1 de $V \cong 5231,5 \left(\frac{m}{s} \right)$.

De nuevo a través del método trigonométrico, se saca el ángulo complementario de θ y, la velocidad de propagación longitudinal de las ondas ultrasónicas:

$$90 - \theta = 90 - 62,36^\circ \cong 27,64^\circ$$

$$V = \tan(27,64^\circ) = 0,52368 \frac{cm}{\mu s} \rightarrow V \cong 5236,8 \frac{m}{s}$$

El error en este caso sería de:

$$error = \left| \frac{5231,5 - 5236,8}{5231,5} \right| \cdot 100 \rightarrow error \cong 0,10\%$$

ZONA 2



Figura 96. Ensayo de UT en la zona 2. El palpador emisor se coloca en el punto 0' y se mantiene fijo mientras el palpador receptor se va desplazando longitudinalmente entre las marcas 6-14.

El valor de la humedad promedio para esta zona es:

$$H_m = \frac{\sum_0^8 H_n}{9} \rightarrow H_m \cong 17,88\%$$

Partiendo de los tiempos de vuelo y distancias de la Tabla 15, la Figura 97 ilustra el gráfico de dispersión para los datos de este tramo.

Tabla 15. Tabla de datos Zona 2 de la probeta de madera de abeto D047.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)
Punto 0' (6)	0,0	17,9	
Punto 7	5,0	18,1	13,21
Punto 8	10,0	17,6	22,18
Punto 9	15,0	17,5	32,62
Punto 10	20,0	17,9	43,62
Punto 11	25,0	17,9	52,83
Punto 12	30,0	18,0	60,54
Punto 13	35,0	18,1	71,45
Punto 14	40,0	17,9	78,82

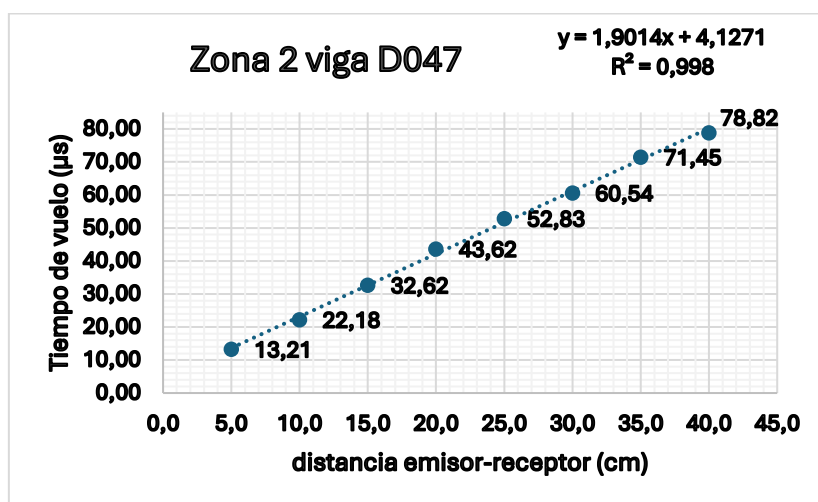


Figura 97. Gráfico de dispersión para Zona 2 de la probeta de madera de abeto sano D047.

Atendiendo a su recta de regresión: $y = 1,9014x + 4,1271$, se tiene que:

$$\theta = \tan^{-1}(1,9014) \cong 62,26^\circ$$

$$\text{corrección de tiempo} = 4,1271 \mu s$$

Con el valor de la corrección de tiempo y la fórmula [7] para la determinación de la velocidad de propagación, se calculó la velocidad en cada intervalo, Tabla 16.

Tabla 16. Tabla de datos Zona 2 de la probeta de madera de abeto D047 con cálculo de velocidades.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)	V(m/s)
Punto 0' (6)	0,0	17,9		(emisor)
Punto 7	5,0	18,1	13,21	5504,8498
Punto 8	10,0	17,6	22,18	5539,2762
Punto 9	15,0	17,5	32,62	5264,4694
Punto 10	20,0	17,9	43,62	5064,2014
Punto 11	25,0	17,9	52,83	5133,1646
Punto 12	30,0	18,0	60,54	5317,9326
Punto 13	35,0	18,1	71,45	5198,8254
Punto 14	40,0	17,9	78,82	5355,2613

Excluyendo de forma sistemática el primero de los valores por la proximidad entre los palpadores, realizando la media y redondeando se obtuvo un valor de velocidad de propagación de onda promedio en la zona 2 de $V \cong 5267,6 \left(\frac{m}{s}\right)$.

De nuevo a través del método trigonométrico, se saca el ángulo complementario de θ y, la velocidad de propagación longitudinal de las ondas ultrasónicas:

$$90 - \theta = 90 - 62,26^\circ = 27,74^\circ$$

$$V = \tan(27,74^\circ) = 0,52590 \frac{\text{cm}}{\mu\text{s}} \rightarrow V = 5259,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El error en este caso sería de:

$$\text{error} = \left| \frac{5267,6 - 5259,0}{5267,6} \right| \cdot 100 \rightarrow \text{error} \cong 0,16\%$$

ZONA 3



Figura 98. Ensayo de UT en la zona 3. El palpador emisor se coloca en el punto 0'' y se mantiene fijo mientras el palpador receptor se va desplazando longitudinalmente entre las marcas 12-20.

El valor de la humedad promedio para esta zona es:

$$H_m = \frac{\sum_0^8 H_n}{9} \rightarrow H_m \cong 17,88\%$$

Partiendo de los tiempos de vuelo y distancias de la Tabla 17, la Figura 99 ilustra el gráfico de dispersión para los datos de este tramo.

Tabla 17. Tabla de datos Zona 3 de la probeta de madera de abeto D047.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)
Punto 0'' (12)	0,0	18,0	
Punto 13	5,0	18,1	14,83
Punto 14	10,0	17,9	22,68
Punto 15	15,0	17,8	33,69
Punto 16	20,0	18,0	41,18
Punto 17	25,0	17,9	49,99
Punto 18	30,0	18,0	58,74
Punto 19	35,0	17,7	68,53
Punto 20	37,5	17,5	73,73

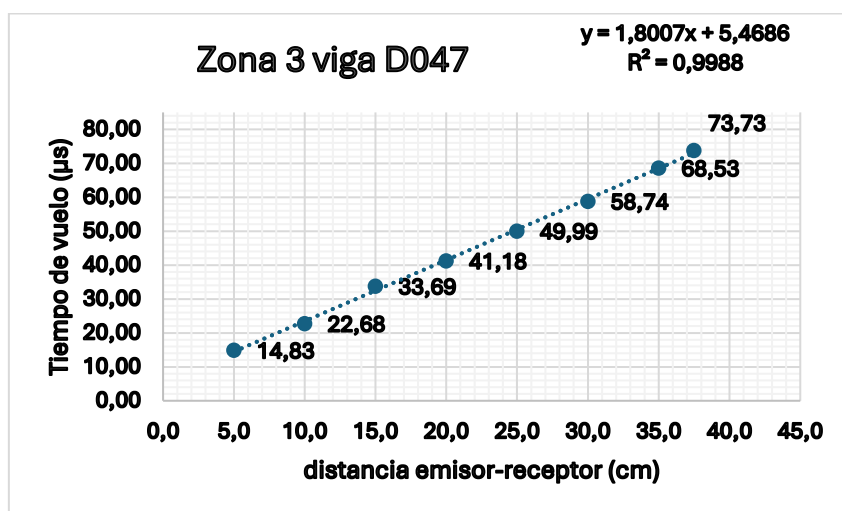


Figura 99. Gráfico de dispersión para Zona 3 de la probeta de madera de abeto sano D047.

Atendiendo a su recta de regresión: $y = 1,8007x + 5,4686$, se tiene que:

$$\theta = \tan^{-1}(1,8007) \cong 60,95^\circ$$

$$\text{corrección de tiempo} = 5,4686 \mu s$$

Con el valor de la corrección de tiempo y la fórmula [7] para la determinación de la velocidad de propagación, se calculó la velocidad en cada intervalo, Tabla 18.

Tabla 18. Tabla de datos Zona 3 de la probeta de madera de abeto D047 con cálculo de velocidades.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)	V(m/s)
Punto 0" (12)	0,0	18,0		(emisor)
Punto 13	5,0	18,1	14,83	5341,0815
Punto 14	10,0	17,9	22,68	5810,1026
Punto 15	15,0	17,8	33,69	5315,1155
Punto 16	20,0	18,0	41,18	5600,4525
Punto 17	25,0	17,9	49,99	5615,2771
Punto 18	30,0	18,0	58,74	5631,5396
Punto 19	35,0	17,7	68,53	5550,1464
Punto 20	37,5	17,5	73,73	5493,5879

Excluyendo de forma sistemática el primero de los valores por la proximidad entre los palpadores, realizando la media y redondeando se obtuvo un valor de velocidad de propagación de onda promedio en la zona 3 de $V \cong 5544,7 \left(\frac{m}{s}\right)$.

De nuevo a través del método trigonométrico, se saca el ángulo complementario de θ y, la velocidad de propagación longitudinal de las ondas ultrasónicas:

$$90 - \theta = 90 - 60,95^\circ = 29,05^\circ$$

$$V = \tan(29,05^\circ) = 0,55545 \frac{cm}{\mu s} \rightarrow V = 5554,5 \frac{m}{s}$$

El error en este caso sería de:

$$error = \left| \frac{5544,7 - 5554,5}{5544,7} \right| \cdot 100 \rightarrow error \cong 0,18\%$$

NOTA: en la Figura 94, la Figura 96 y la Figura 98 se muestra la colocación de los palpadores en cada una de las zonas (entre los palpadores se encuentran delimitadas las distancias de 30 cm, recomendadas por el manual de usuario del equipo FAKOPP Ultrasonic Timer, inscritas en cada una de las zonas).

Conclusiones:

Analizando el ensayo a lo largo de la longitud completa de la viga de madera y comparándolo con el ensayo de ultrasonidos por tramos o zonas, puede observarse que no hay una diferencia apreciable en los resultados obtenidos. En ninguno de los gráficos de dispersión se presentan desviaciones notorias de la línea de tendencia.

Es cierto que, en el caso del ensayo por tramos, haciendo el cálculo por el método trigonométrico, se reduce el error a la mitad en el primer tramo, pero va aumentando en el resto acercándose al valor del caso del ensayo en la longitud completa. Aun así, los valores de error de cálculo entre métodos son tan pequeños que las diferencias no son significativas (0,10-0,21%).

Si se observa la variación del ángulo θ , que influye en el cálculo de velocidades en el caso del ensayo por tramos, oscila entre $60,95^\circ$ y $62,36^\circ$ (una diferencia de $1,41^\circ$), mientras que para el caso de ensayo en la longitud completa $\theta=61,05^\circ$, valor situado entre los valores anteriores.

Con estos resultados se puede asegurar que, a pesar de la recomendación de la guía de usuario del equipo de ultrasonidos FAKOPP Ultrasonic Timer, que mencionaba que la distancia recomendada entre los palpadores debía de estar entre 25 y 30 centímetros, en el contexto de nuestro proyecto y bajo el **marco experimental** descrito al principio y a lo largo de este apartado, se puede realizar el ensayo con una distancia entre palpadores mayor a la recomendada, incluso con una distancia que analice la longitud completa de la probeta que se estudie; sin necesidad de tener que realizar un estudio por tramos más cortos y sin que

los resultados experimenten desviaciones notorias o significativas por atenuación de la señal respecto al método de análisis por tramos cortos.

4.3 Fase 2: Ensayos de ultrasonidos en vigas de madera

En esta fase, con el procedimiento y parámetros experimentales definidos durante la fase anterior, se fueron realizando los ensayos de ultrasonidos sobre las diferentes probetas de madera, calculando las velocidades ultrasónicas para cada una de las diferentes especies y clases resistentes de madera.

Correcciones de humedad en las velocidades ultrasónicas

Ahora bien, como bien se comprobó, las condiciones de humedad de cada una de las probetas de madera no eran exactamente las mismas, por lo que para poder realizar una comparación efectiva de las velocidades ultrasónicas entre probetas fue necesario realizar correcciones para llevarlas a una referencia común de humedad (12%). Para ello, se emplearon los procedimientos descritos en Unterwieser, H. & Schickhofer, G. (2011); así, según la fuente, autor y contenido de humedad de la madera, se empleará una fórmula u otra para llevar a cabo la corrección del valor de las velocidades en base al 12% de humedad (V_{12}).

Siendo u : contenido de humedad medido en la probeta y V_u : velocidad en base a u :

- Sandoz (1993):

$$V_{12} = V_u + 29 \cdot (u - 12) \quad \text{si } u \leq 32\% \quad [9]$$

$$V_{12} = 580 + V_u + 4 \cdot (u - 32) \quad \text{si } u > 32\% \quad [10]$$

- Steiger (1995):

$$V_{12} = \frac{V_u}{1 \pm 0,0053 \cdot (u - 12)} \quad \text{si } u < 28\% \quad [11]$$

$$V_{12} = \frac{V_u}{0,915 \pm 0,00036 \cdot (u - 28)} \quad \text{si } 50\% > u > 28\% \quad [12]$$

$$V_{12} = 1.11 \cdot V_u \quad \text{si } u \geq 50\% \quad [13]$$

Aplicando las ecuaciones de corrección de humedad [9] y [11] a las velocidades ultrasónicas de la probeta de abeto D047 estudiada en la Fase 1 se obtuvieron los valores indicados en la Tabla 19.

Tabla 19. Tabla de datos probeta de madera de abeto D047 con cálculo de velocidades con corrección de humedad.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	17,6		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	17,8	13,93	6988,9016	6901,8683	6879,8866
Punto 2	10,0	17,7	24,62	5604,0618	5827,0234	5820,9970
Punto 3	15,0	18,0	32,05	5934,9060	6016,5350	6005,2732
Punto 4	20,0	18,0	41,36	5782,9876	5580,2626	5578,1336
Punto 5	25,0	17,8	50,92	5663,2581	5791,3488	5785,2499
Punto 6	30,0	17,9	63,20	5316,8676	5213,0283	5217,9637
Punto 7	35,0	18,1	72,09	5358,7122	5409,0793	5410,4068
Punto 8	40,0	17,6	79,90	5470,1453	5495,8735	5495,4251
Punto 9	45,0	17,5	90,75	5358,7888	5411,8838	5412,7397
Punto 10	50,0	17,9	99,96	5365,7165	5274,7369	5278,5993
Punto 11	55,0	17,9	108,07	5429,7285	5475,6727	5475,6011
Punto 12	60,0	18,0	114,86	5551,2277	5561,7282	5559,9150
Punto 13	65,0	18,1	124,38	5527,0135	5353,4897	5355,5572
Punto 14	70,0	17,9	131,62	5606,9886	5608,9744	5606,3552
Punto 15	75,0	17,8	140,87	5593,0831	5506,3021	5505,7152
Punto 16	80,0	18,0	149,93	5588,3795	5502,4605	5501,9061
Punto 17	85,0	17,9	159,74	5556,8558	5530,0064	5528,9557
Punto 18	90,0	18,0	168,61	5561,2473	5586,5661	5584,8615
Punto 19	95,0	17,7	179,17	5510,6262	5545,0764	5543,9486
			Promedios->	5437,6836	5538,3360	5537,0891

Si se calcula el error de ambas velocidades corregidas, puede apreciarse que prácticamente no hay diferencia entre aplicar una u otra ecuación, siempre y cuando se escoja la del rango del contenido de humedad adecuado.

$$error = \left| \frac{5538,33 - 5537,09}{5538,33} \right| \cdot 100 = 0,02\%$$

Al final de esta fase, se tienen recopilados los tiempos de vuelo y las velocidades ultrasónicas calculadas en los diferentes intervalos de cada una de las probetas de madera, así como las velocidades ultrasónicas **corregidas** promedio de dichas probetas de madera (ver Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22).

Tabla 20. Tabla de datos de velocidades ultrasónicas promedio corregidas en probetas de madera de pino silvestre.

Id. Probeta	Especie	Clase	V(m/s)	V _{Steiger} (m/s)	V _{Sandoz} (m/s)
D066	Pino Silvestre (Sano)	GL18	4862,23	4969,67	4980,49

D071	Pino Silvestre (Sumergido)	GL24	5367,90	5501,35	5500,65
D079		GL28	5098,76	5181,12	5185,76
D064		GL18	4754,98	4874,77	4889,35
D070		GL24	4853,38	4982,91	4995,64
D076		GL28	4693,92	4812,99	4829,25

Tabla 21. Tabla de datos de velocidades ultrasónicas promedio corregidas en probetas de madera de pino silvestre con tratamiento de tanalizado.

Id. Probeta	Especie	Clase	V(m/s)	V _{Steiger} (m/s)	V _{Sandoz} (m/s)
D037	Pino Tanalizado (Sano)	GL18	5128,57	5254,85	5259,23
D023		GL24	6047,73	6206,34	6187,54
D031		GL28	5524,40	5670,69	5665,53
D035	Pino Tanalizado (Sumergido)	GL18	4451,52	4569,11	4592,17
D024		GL24	5716,84	5881,89	5870,22
D029		GL28	6121,52	6279,65	6259,27

Tabla 22. Tabla de datos de velocidades ultrasónicas promedio corregidas en probetas de madera de abeto.

Id. Probeta	Especie	Clase	V(m/s)	V _{Steiger} (m/s)	V _{Sandoz} (m/s)
D047	Abeto (Sano)	GL18	5543,37	5721,64	5713,82
D051		GL24	5156,14	5273,24	5277,62
D059		GL28	5573,58	5722,85	5716,33
D042	Abeto (Sumergido)	GL18	5086,03	5205,35	5211,37
D050		GL24	5019,67	5151,43	5159,67
D058		GL28	5313,60	5496,78	5495,97

Aunque durante el análisis de los resultados se realizan representaciones **gráficas de los tiempos de vuelo en función de la longitud del intervalo recorrido por las ondas de ultrasonidos**, es en la representación gráfica de las velocidades ultrasónicas frente a la distancia recorrida por las ondas de ultrasonidos (distancia emisor-receptor), a modo de ejemplo ver la Figura 100, donde se hace notoria la aparición y presencia de picos y ondulaciones, consecuencia de potenciales “perturbaciones” que alteran la continuidad de las curvas representadas.

Analizando visualmente las zonas de las vigas de madera en las que aparecen gráficamente estas “perturbaciones”, se ha observado que se corresponden con la presencia de defectos o anomalías existentes, como son nudos, grietas y rugosidades superficiales. Por el contrario, en las zonas en las que las velocidades

no presentan estas alteraciones, efectivamente, tampoco existe la presencia de defectos, al menos superficialmente que podamos apreciar mediante una inspección visual.

A continuación, se ilustran las gráficas de velocidades ultrasónicas por cada probeta de ensayo, corregidas al 12% mediante la ecuación de Steiger, emparejando los picos presentes en dichas gráficas con los defectos observados en sus intervalos correspondientes. Después de cada gráfica, se presenta una imagen de la cara superior de la viga correspondiente, en la que pueden observarse tanto las zonas con defectos como las que están libres de estos.

Salvo excepciones, en el análisis de las gráficas, **en caso de aparecer picos o caídas de velocidad en los primeros 15 cm de la probeta, no se supone de entrada que haya defectos en dicho tramo** ya que **estos picos pueden ser causados por interferencias debidas a la proximidad entre los palpadores**¹⁴. El desarrollo y explicación de esta hipótesis se realiza en el capítulo referente a la discusión de resultados.

¹⁴ La cercanía entre el emisor y el receptor podría estar causando que las ondas superficiales (ondas Rayleigh), que normalmente son mucho más lentas que las longitudinales, estuvieran llegando antes al receptor que las ondas longitudinales por tener estas que realizar un mayor recorrido, aunque lo hagan a mayor velocidad, provocando estas alteraciones en los tramos iniciales de las gráficas.

4.3.1 Gráficas de velocidades ultrasónicas de las vigas de madera de pino silvestre sin tratamiento

Viga sana D066 (pino silvestre sin tratamiento - GL18)

Aunque a lo largo de la cara superior de la viga D066 pueden observarse varias zonas con machas, Figura 101, algunas son únicamente cambios de tonalidades en la madera, no son defectos. Los defectos se muestran de manera ampliada sobre la propia gráfica de la Figura 100, indicando el tramo o intervalo en el que están situados.

De izquierda a derecha encontramos un gran nudo alargado localizado en el intervalo 12-13, a 60-65 cm de la posición del transductor emisor, y con parte del mismo situada por debajo del intervalo 11-12. Por su parte, en el intervalo 17-18, aparece otro nudo.

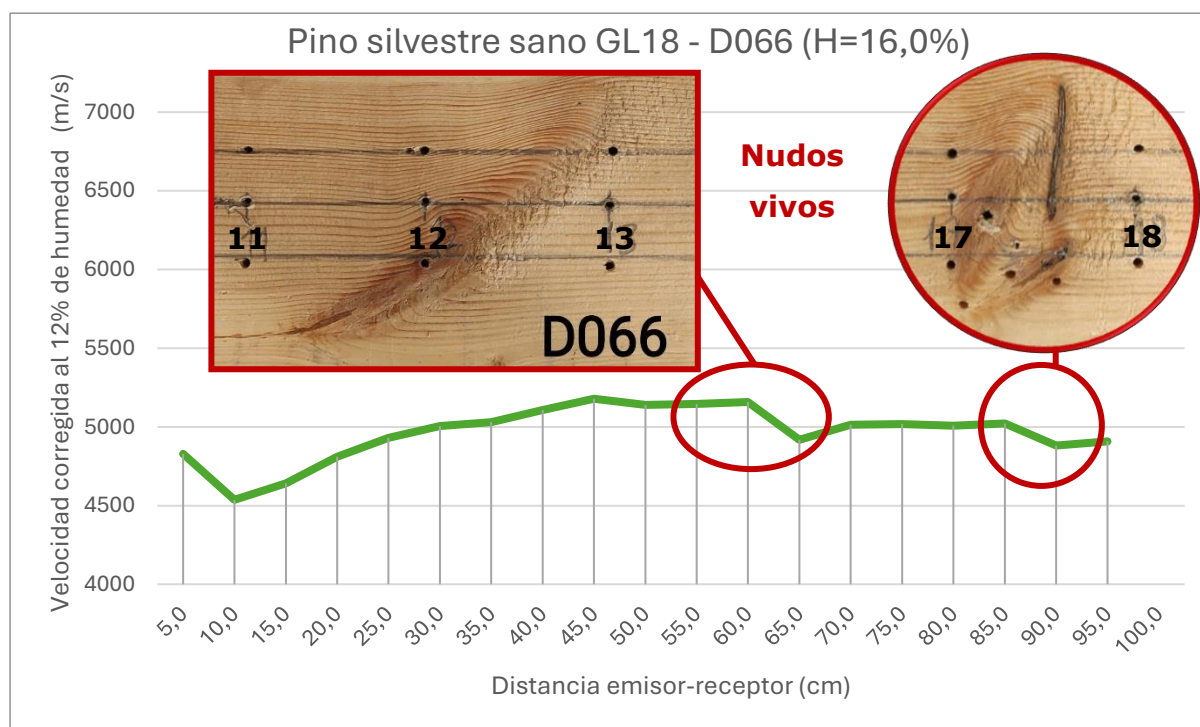


Figura 100. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D066 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL18.



Figura 101. Cara superior de la viga sana D066 de madera de pino silvestre sin tratamiento GL18.

Viga sana D071 (pino silvestre sin tratamiento – GL24)

En la viga D071, salvo una llamativa franja de coloración más oscura que recorre la viga de madera longitudinalmente y unos pequeños nudos, no hay nada reseñable que se aprecie a simple vista durante la inspección visual, Figura 103.

Debido a su pequeño tamaño y al quedar fuera de la línea de intersección de la alineación de los palpadores parece que la presencia de estos pequeños defectos no parece afectar a la velocidad de propagación de la onda ultrasónica, ya que no hay saltos o cambios de pendiente tan notorios, Figura 102, y detectables gráficamente como en el primer caso.

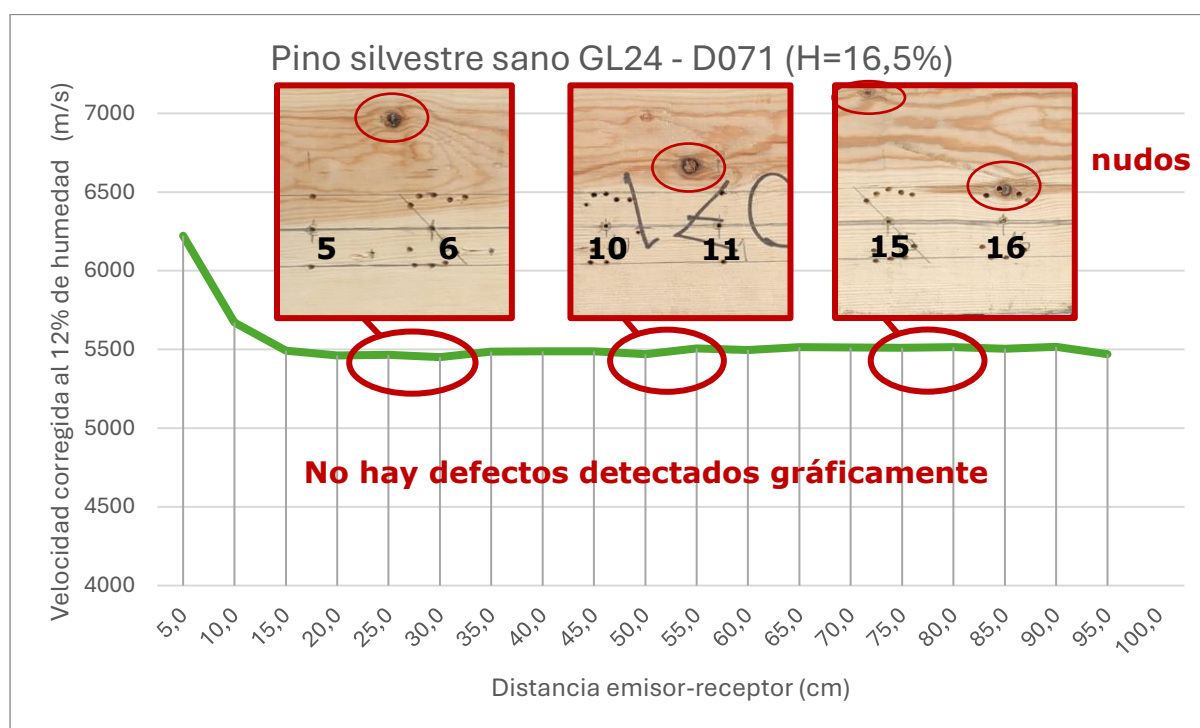


Figura 102. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D071 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL24.

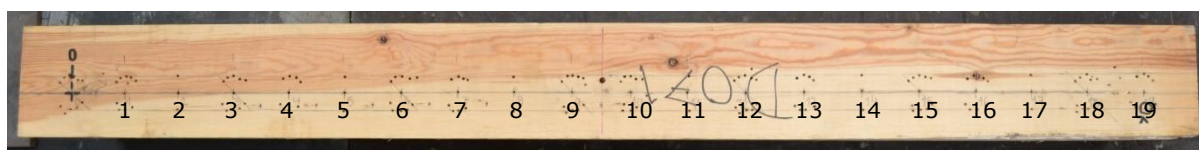


Figura 103. Cara superior de la viga sana D071 de madera de pino silvestre sin tratamiento GL24.

Viga sana D079 (pino silvestre sin tratamiento – GL28)

La viga D079, Figura 105, parece ser el caso contrario, en ella, aunque los defectos presentes en la viga de madera no intersecan superficialmente de forma directa a la alineación definida por los palpadores, estos parecen afectar a la velocidad de propagación de la onda ultrasónica que se traduce en unas caídas puntuales de esta, ver Figura 104, la mayor de ellas visible en el tramo de la gráfica correspondiente al intervalo 18-19.

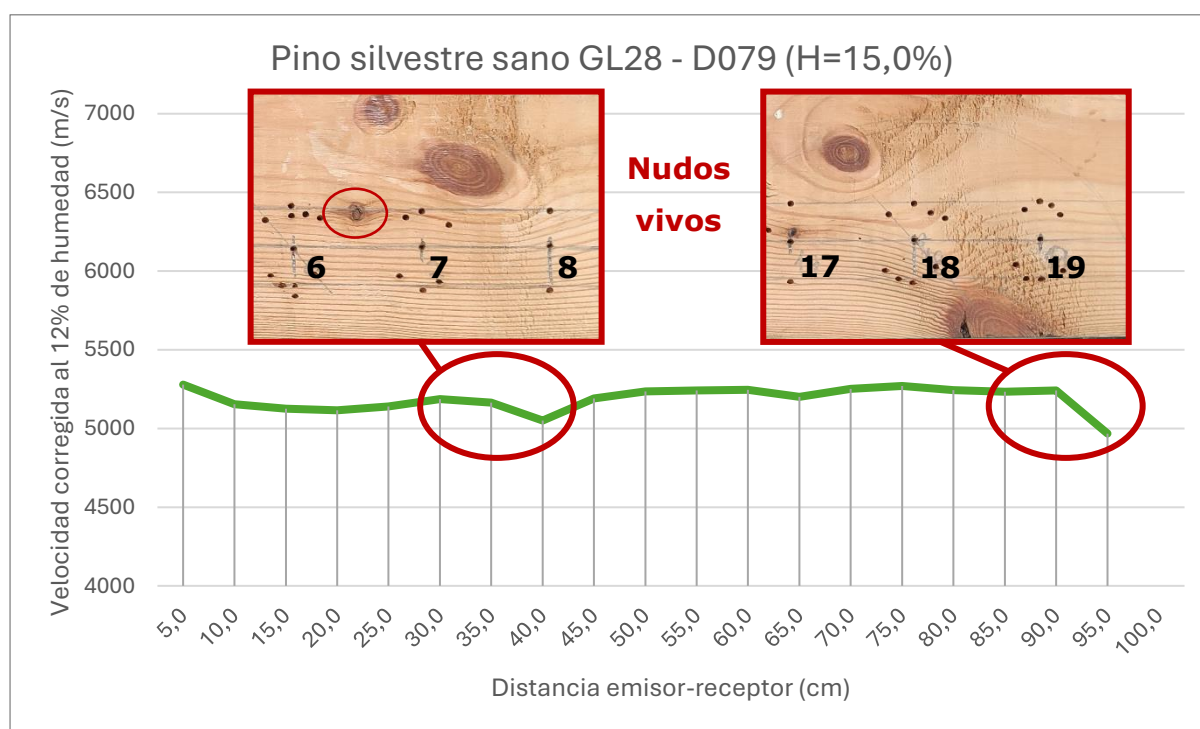


Figura 104. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D079 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL28.

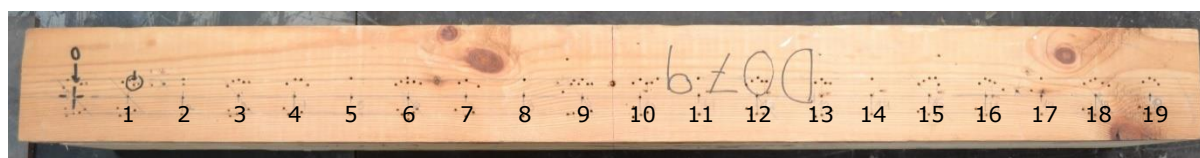


Figura 105. Cara superior de la viga sana D079 de madera de pino silvestre sin tratamiento GL28.

Viga sumergida D064 (pino silvestre sin tratamiento - GL18)

En la gráfica de la viga sumergida D064, Figura 106, se aprecia una gran caída de velocidad en el tramo inicial, la cual coincide con la presencia de un gran nudo muerto saltadizo en el borde de la cara superior de la probeta en la zona del intervalo 0-1.

En el intervalo 9-10 puede observarse otro gran nudo muerto, parte del cual se ha desprendido de la viga, dejando un hueco en el cual antes había madera.

Tras la inspección visual, en el resto de la viga no se perciben defectos, particularidades o anomalías, ver Figura 107.

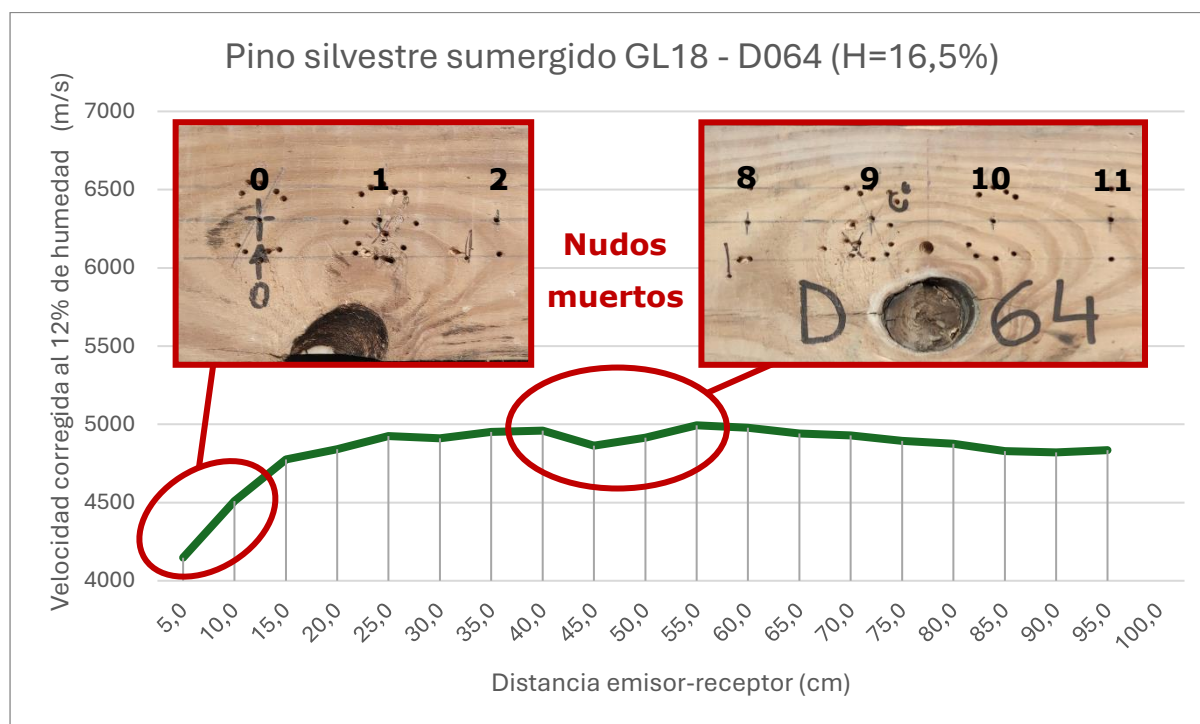


Figura 106. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D064 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL18.



Figura 107. Cara superior de la viga sumergida D064 de madera de pino silvestre sin tratamiento GL18.

Viga sumergida D070 (pino silvestre sin tratamiento – GL24)

En la viga D070 se advierte la presencia de un nudo muerto en la zona media de la viga, más concretamente en el intervalo 9-10, ver Figura 108 y Figura 109.

Se muestra también, en la parte superior izquierda de la Figura 108, una ampliación de la zona correspondiente al intervalo 0-3; es decir, los 15 primeros centímetros entre palpadores, para recalcar que, aunque existe un gran pico al inicio de la gráfica, no se han encontrado defectos en la inspección visual.

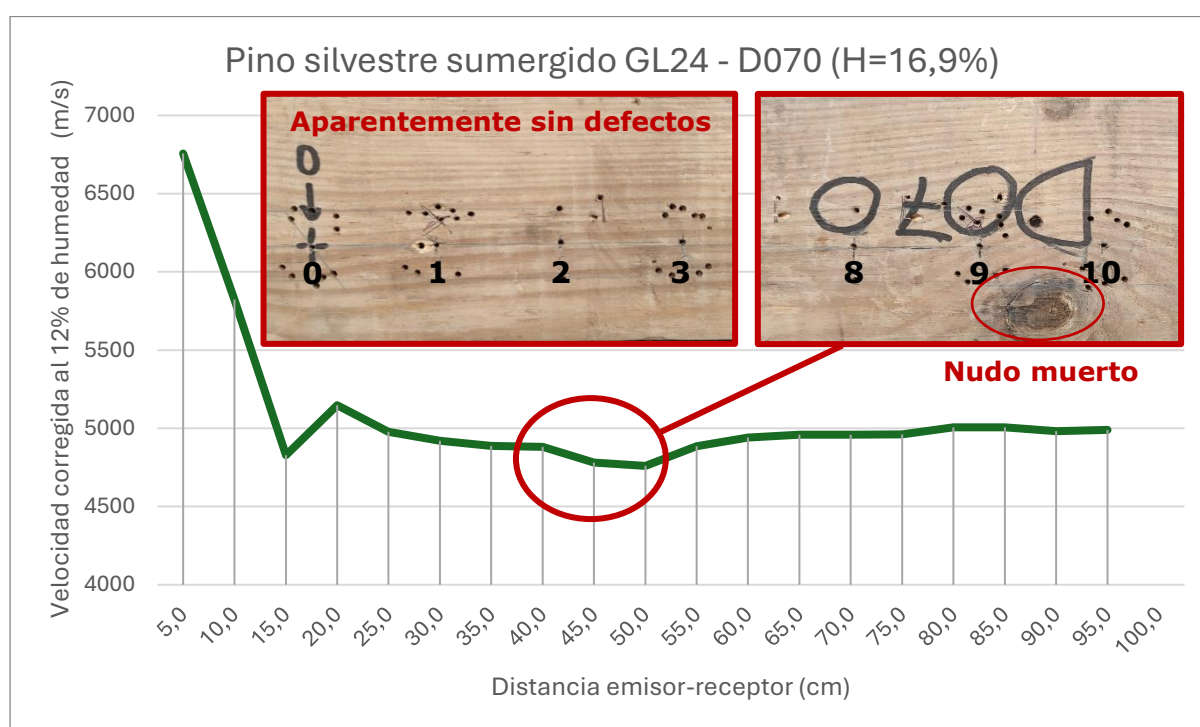


Figura 108. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D070 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL24.



Figura 109. Cara superior de la viga sumergida D070 de madera de pino silvestre sin tratamiento GL24.

Viga sumergida D076 (pino silvestre sin tratamiento – GL28)

En el análisis gráfico e inspección de la viga sumergida D076, Figura 110 y Figura 111, cabe referir lo siguiente visualizando las figuras de izquierda a derecha:

- La existencia de un pequeño nudo en el intervalo 2-3 genera un leve descenso de la velocidad de propagación.
- Dos nudos de mayor tamaño en el intervalo 13-14 provocan una disminución más acusada.
- Y los restos de lo que parece ser una bolsa de resina seca, prácticamente al final de la viga de madera en el intervalo 18-19, también se ha detectado mediante una leve variación de la velocidad de propagación.

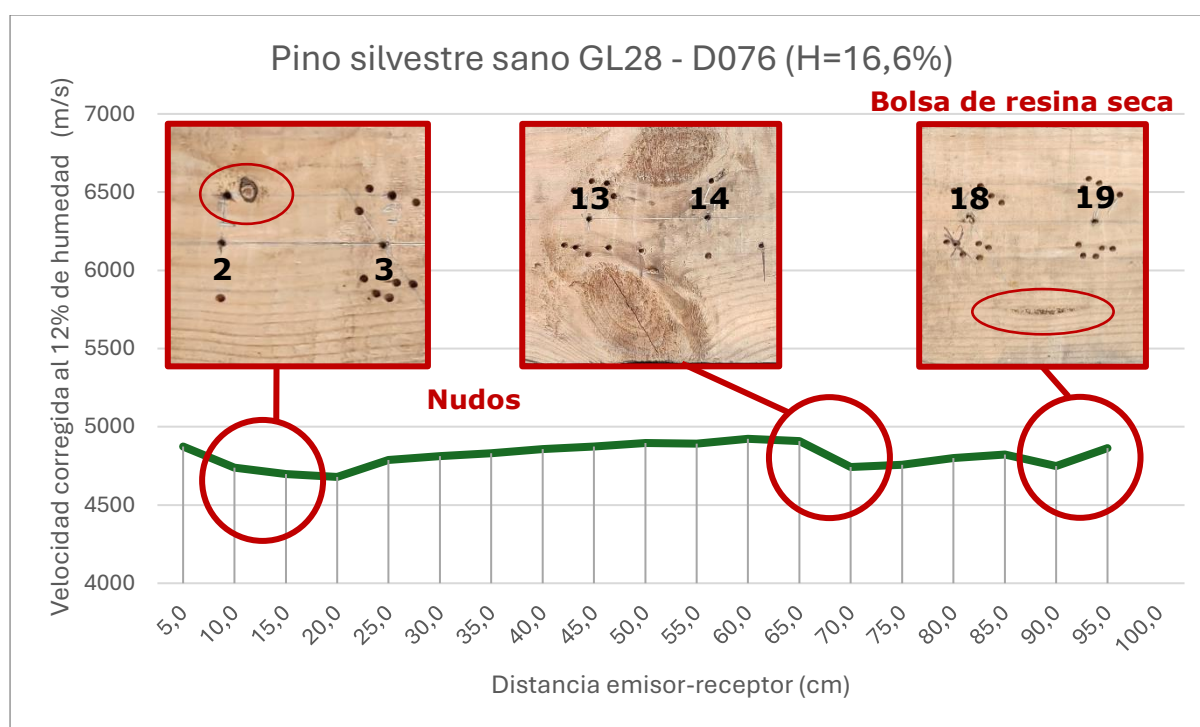


Figura 110. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D076 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL28.



Figura 111. Cara superior de la viga sumergida D076 de madera de pino silvestre sin tratamiento GL28.

4.3.2 Gráficas de velocidades ultrasónicas de las vigas de madera de pino silvestre tanalizado

Viga sana D037 (pino silvestre tanalizado – GL18)

El caso de la viga D037, Figura 112, es bastante peculiar, ya que la enorme depresión presente en la parte situada más a la derecha de la gráfica no sólo coincide con la presencia de un gran nudo sino con la inserción y empalme de dos piezas de madera laminada que parecieran tener diferentes propiedades, puesto que, en la toma de lectura de datos de humedades, los datos del contenido de humedad en este último tramo diferían considerablemente de los tomados en el resto de la probeta de madera.

En el resto de la probeta, ver Figura 113, hay dos empalmes más pero no son tan notorios como el referido. En el tramo 15-16 se observa la presencia de otro nudo.

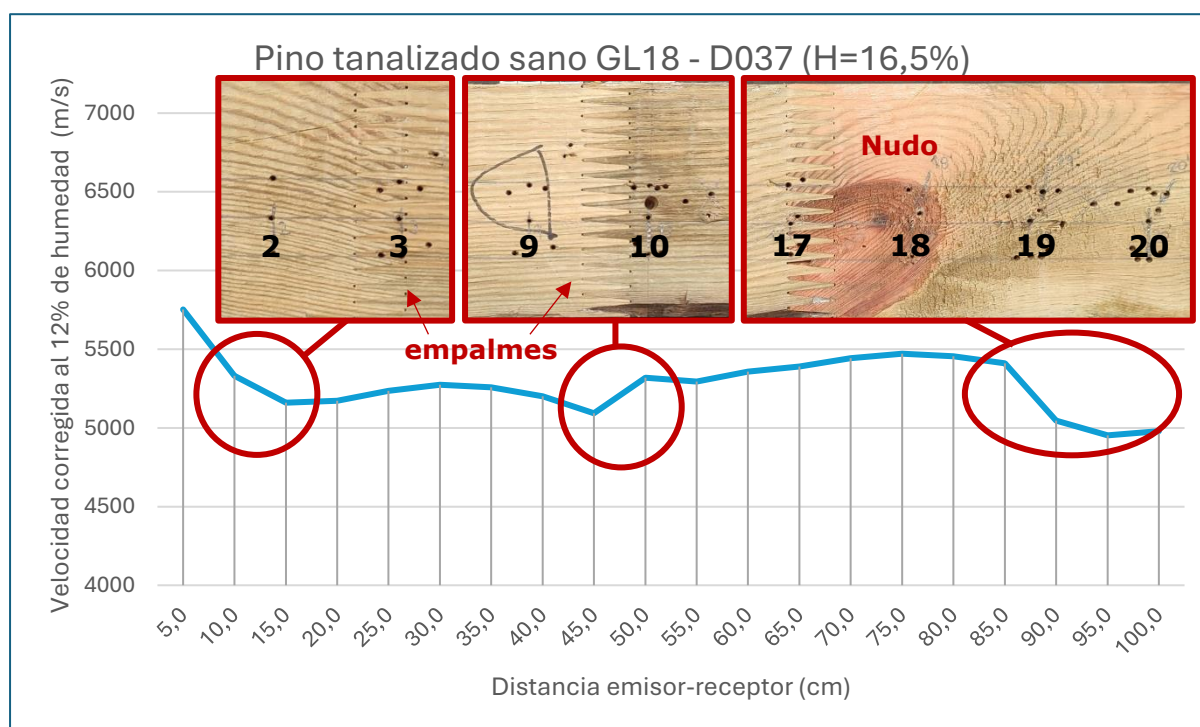


Figura 112. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D037 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL18.



Figura 113. Cara superior de la viga sana D037 de madera de pino silvestre tanalizado GL18.

Viga sana D023 (pino silvestre tanalizado – GL24)

En inspección visual de la viga D023, Figura 115, se aprecian dos grandes defectos transversales que atraviesan, con una ligera inclinación, de manera prácticamente perpendicular la cara de la viga. Uno de estos defectos está localizado en torno al punto 7 mientras que el otro se encuentra situado en el intervalo 11-12. Ambos defectos podrían categorizarse como nudos en espiga.

Por su parte, en el intervalo 2-3 puede notarse una zona en la que se ha producido separación de fibras en la madera.

En el gráfico de la Figura 114, parece que el segundo nudo en espiga no provoca gran alteración en la velocidad de propagación de la onda ultrasónica, quizá debido a su menor anchura e inclinación en comparación con el primero.

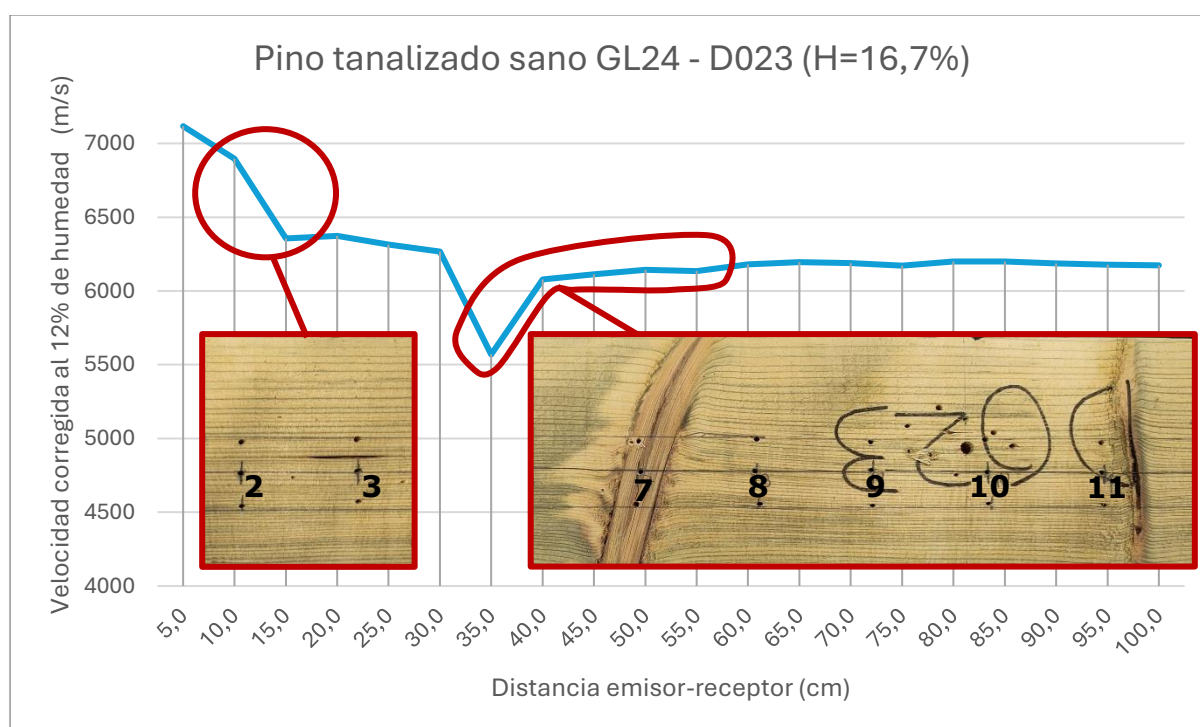


Figura 114. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D023 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL24.

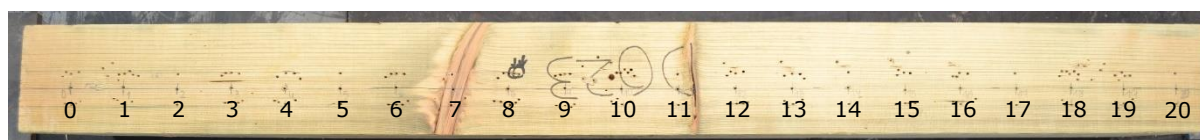


Figura 115. Cara superior de la viga sana D023 de madera de pino silvestre tanalizado GL24.

Viga sana D031 (pino silvestre tanalizado – GL28)

En el examen visual de la viga D031, Figura 117, se hallaron varios nudos en ojo de perdiz en el intervalo comprendido entre las marcas 3 y 5. Debido a su reducido tamaño, su detección mediante representación gráfica de las lecturas de velocidades de propagación de la onda ultrasónica en el ensayo de ultrasonidos es complicada, ver Figura 116, y sería necesario un ajuste de escala, aunque esto podría suponer la aparición de más picos que no se correlacionen con defectos, generando más confusión que claridad en la detección gráfica de defectos.

También se encontraron, en la mitad derecha de la viga, un nudo pequeño en el intervalo 15-16 y otro en el intervalo 17-18, situado en el borde de la cara.

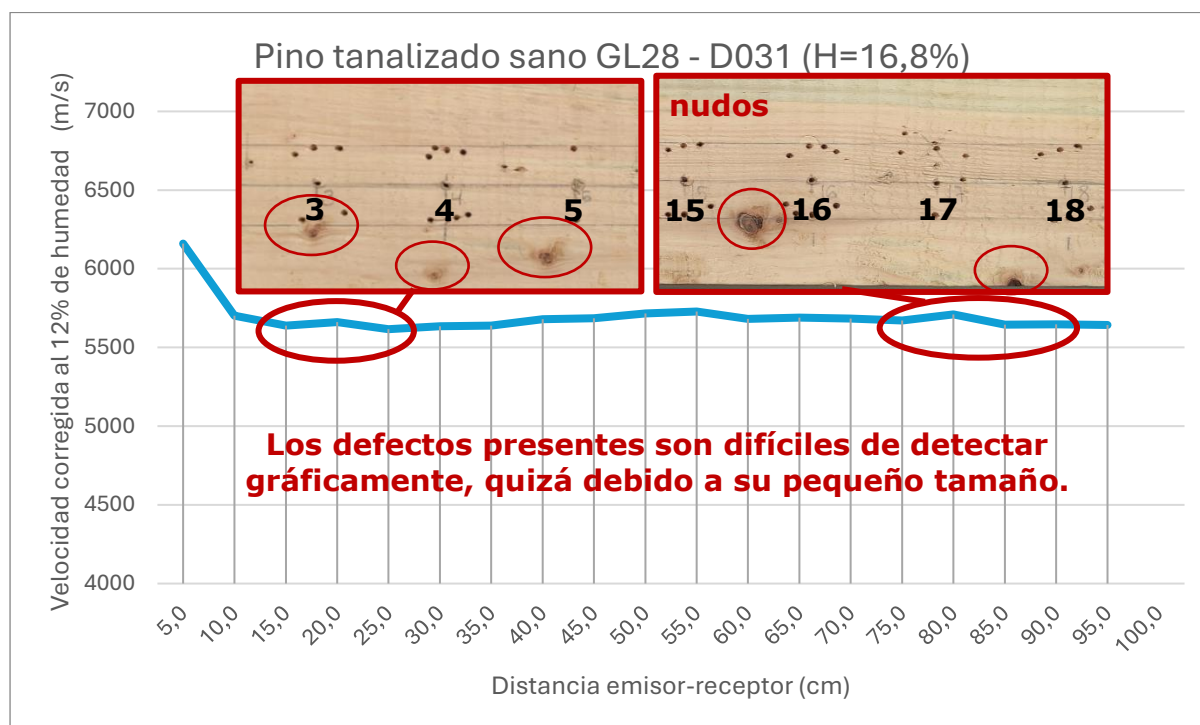


Figura 116. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D031 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL28.

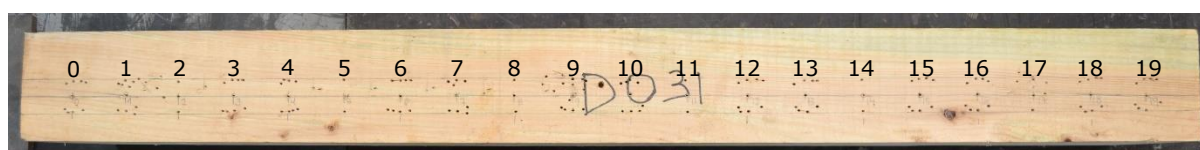


Figura 117. Cara superior de la viga sana D031 de madera de pino silvestre tanalizado GL28.

Viga sumergida D035 (pino silvestre tanalizado – GL18)

En la viga sumergida D035, Figura 119, pueden verse cuatro nudos muertos que presentan grietas en forma de estrella, defecto conocido como “pata de gallina”: dos de ellos, presentes en los intervalos 1-2 y 10-11, son de tamaño grande; mientras que los otros dos, de tamaño muy grande, están situados uno sobre la marca 3 y el último por debajo de la marca 19.

También se observan dos diminutos nudos en ojo de perdiz, que se localizan en los intervalos 5-6 y 8-9. Al estar tan próximos a los nudos de mayor tamaño, su detección gráfica (Figura 118) es complicada debido a que los defectos más grandes pueden enmascarar la presencia de los defectos más pequeños.

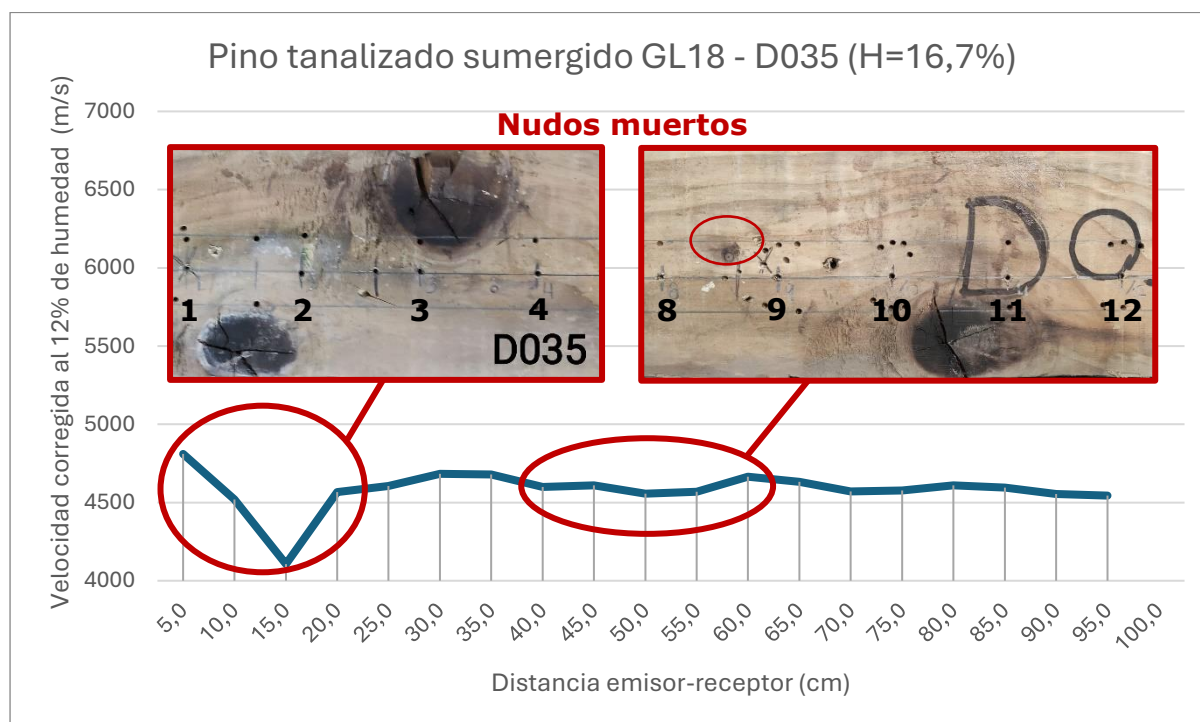


Figura 118. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D035 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL18.



Figura 119. Cara superior de la viga sumergida D035 de madera de pino silvestre tanalizado GL18.

Viga sumergida D024 (pino silvestre tanalizado – GL24)

En la viga sumergida D024, Figura 121, solo se encuentra un nudo muerto ovalado de tamaño grande que se pueda detectar gráficamente como defecto, Figura 120.

En el resto de la viga solo se aprecian coloraciones, las cuales pueden ser resultado del efecto prolongado de inmersión de la probeta en agua (recordemos que varias vigas estuvieron sumergidas en un tanque de agua durante un largo período de tiempo y luego se dejaron secar al aire).

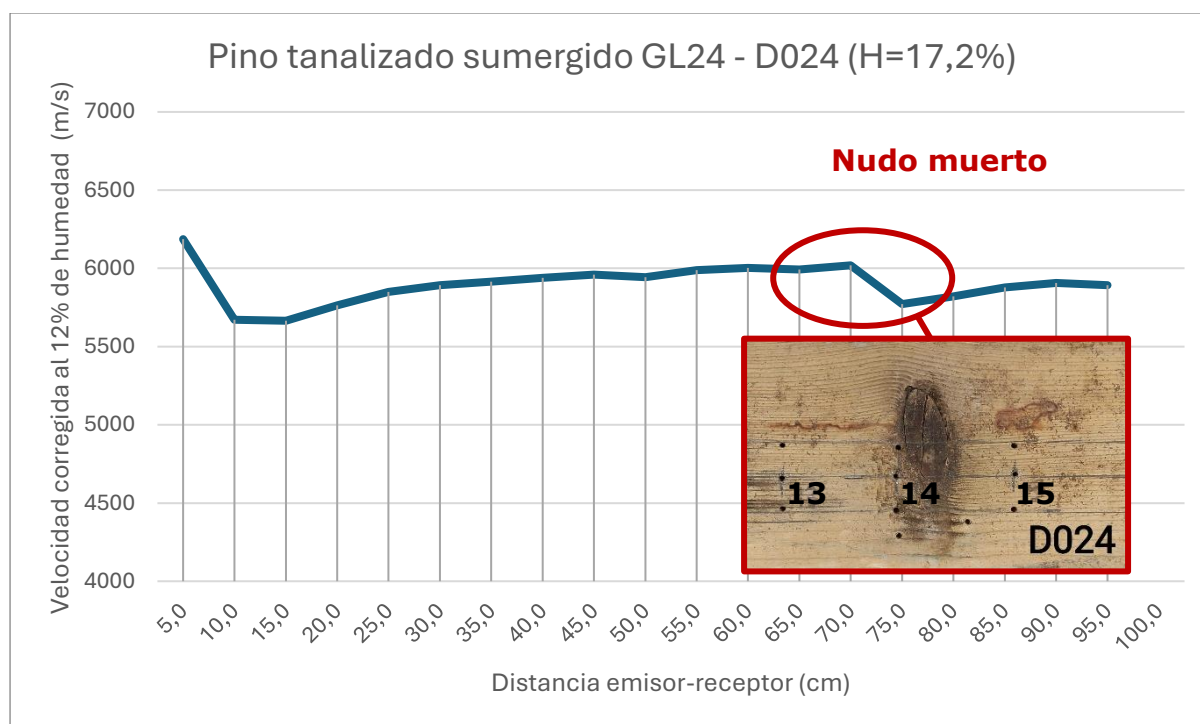


Figura 120. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D024 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL24.

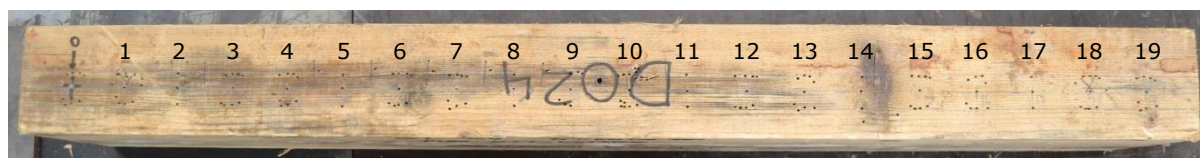


Figura 121. Cara superior de la viga sumergida D024 de madera de pino silvestre tanalizado GL24.

Viga sumergida D029 (pino silvestre tanalizado – GL28)

En el caso de la viga sumergida D029, Figura 123, también se observan coloraciones, motivadas por el efecto prolongado de inmersión de la probeta en agua (recordemos que varias vigas estuvieron sumergidas en un tanque de agua durante un largo período de tiempo y luego se dejaron secar al aire).

No obstante, los defectos que han podido detectarse y cotejarse gráficamente, Figura 122, han sido dos nudos muertos de tamaño pequeño: uno redondo en el intervalo 6-7 y otro ovalado o elíptico en el intervalo 12-13.

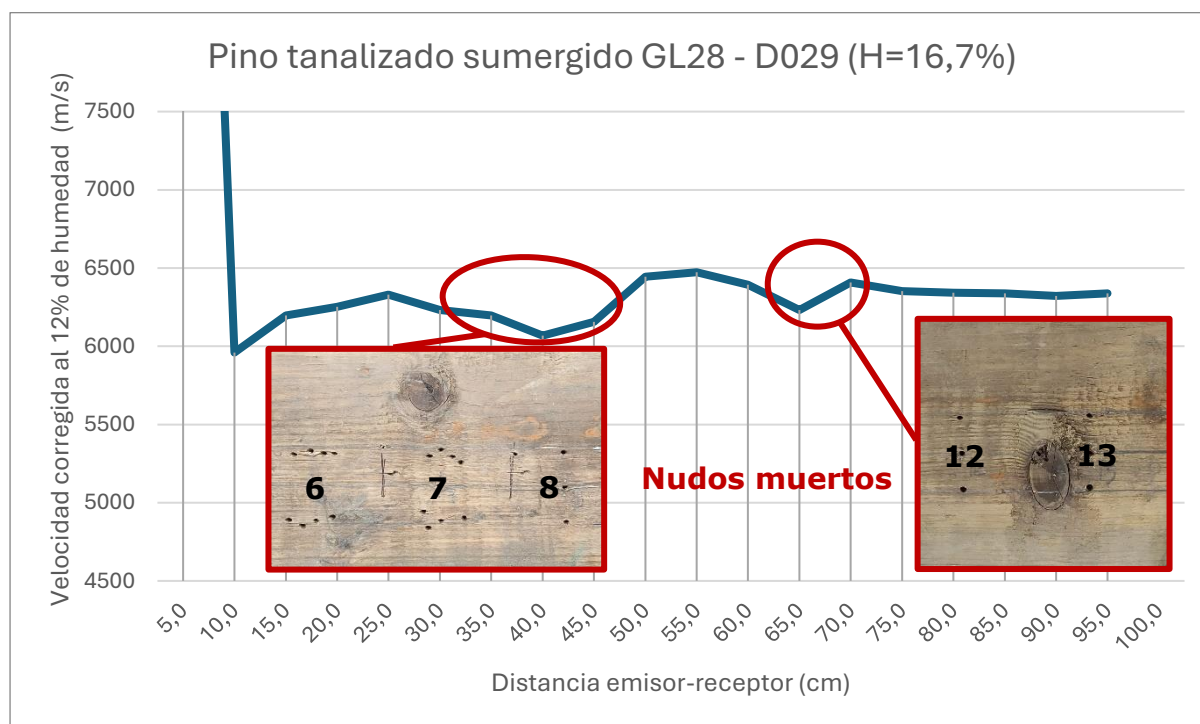


Figura 122. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D029 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL28.



Figura 123. Cara superior de la viga sumergida D029 de madera de pino silvestre tanalizado GL28.

4.3.3 Gráficas de velocidades ultrasónicas de las vigas de madera de abeto

Viga sana D047 (abeto – GL18)

En la inspección visual realizada sobre la viga sana D047, Figura 124, se encuentran dos nudos de tamaño grande (localizados en los intervalos 5-6 y 8-9), una bolsa de resina (situada en el intervalo 10-11) y dos nudos de tamaño pequeño (en los intervalos 14-15 y 15-16, en el borde de la cara).

Además, existe un defecto en el intervalo 1-2, de tamaño equiparable al de un nudo grande, que presenta una notable desviación de fibras a su alrededor y rugosidad superficial (podría ser un nudo, pero no en la forma que suelen presentarse habitualmente).

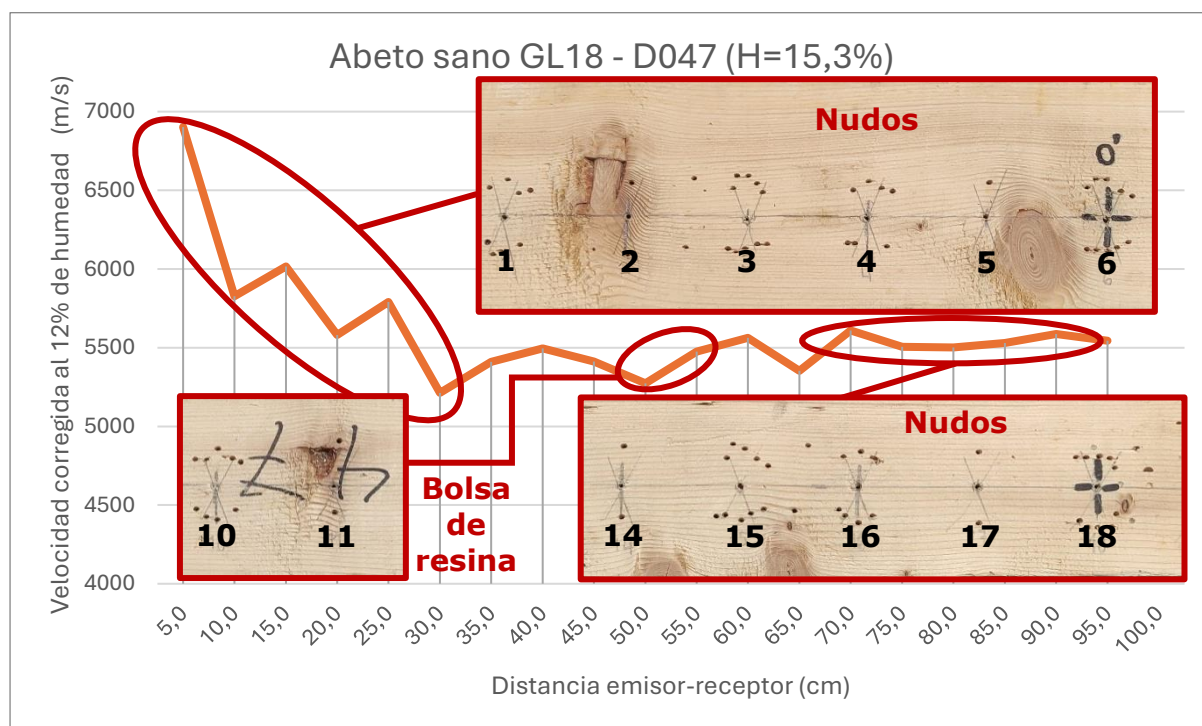


Figura 124. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D047 de abeto de clase resistente GL18.



Figura 125. Cara superior de la viga sana D047 de madera de abeto GL18.

Viga sana D051 (abeto – GL24)

En la viga D051, Figura 127, pueden observarse tres nudos pequeños en ojo de perdiz: el primero en la marca 4; el segundo, en el intervalo 6-7; y el tercero, en el intervalo 9-10. También tiene un nudo pequeño en el intervalo 1-2 y otro, que podríamos considerar de tamaño mediano-grande, situado en la perpendicular de la marca 13, en el borde de la cara. Este último defecto, gráficamente parece no tener gran influencia sobre la velocidad de propagación de la onda ultrasónica (ver Figura 126), este hecho puede deberse a que esté prácticamente en el límite del rango de colocación de los palpadores en el intervalo 13-14 y, a su vez, en el borde de cara, lejos de la línea de intersección entre la línea que une ambos palpadores.

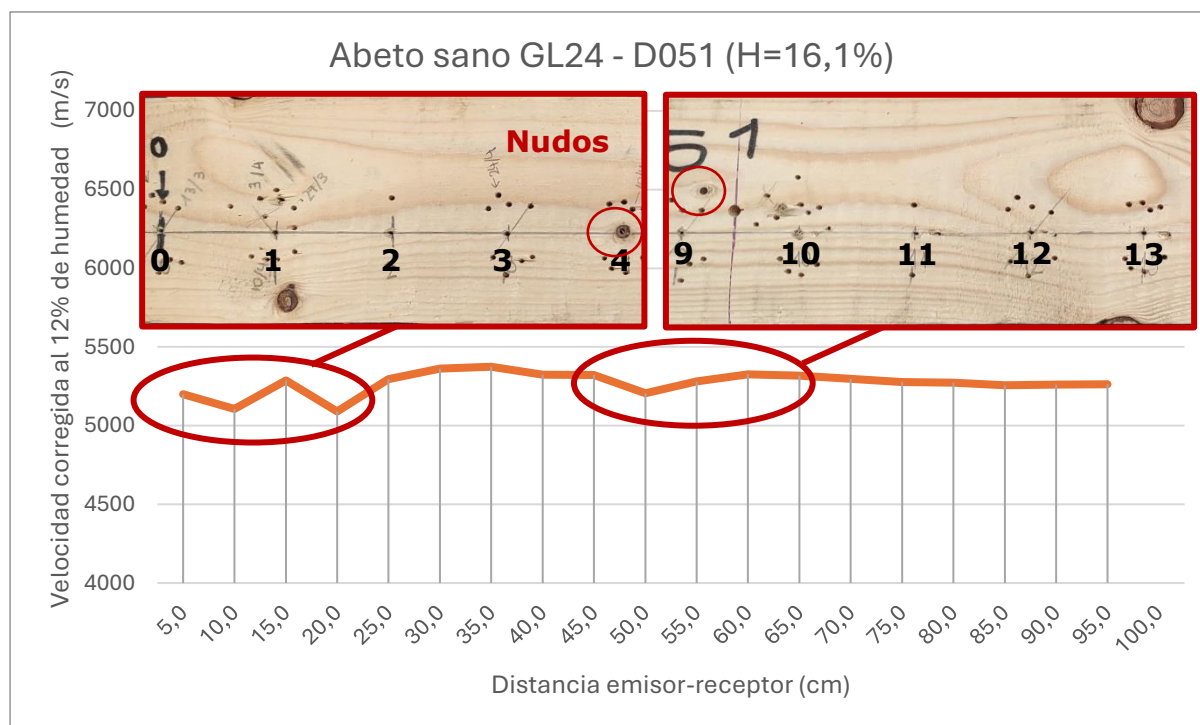


Figura 126. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D051 de abeto de clase resistente GL24.



Figura 127. Cara superior de la viga sana D051 de madera de abeto GL24.

Viga sana D059 (abeto – GL28)

En la viga sana D059, Figura 129, se observan un nudo de tamaño grande en la marca 0, dos nudos pequeños en ojo de perdiz situados en los intervalos 4-5 y 10-11 y un nudo pequeño en el intervalo 13-14.

Gráficamente, Figura 128, en torno a los 40 cm entre palpadores (intervalo 7-8) aparece un pico que no se corresponde con ninguno de los defectos identificados en la inspección visual, lo que podría indicar la presencia de algún defecto por debajo de la superficie visible.

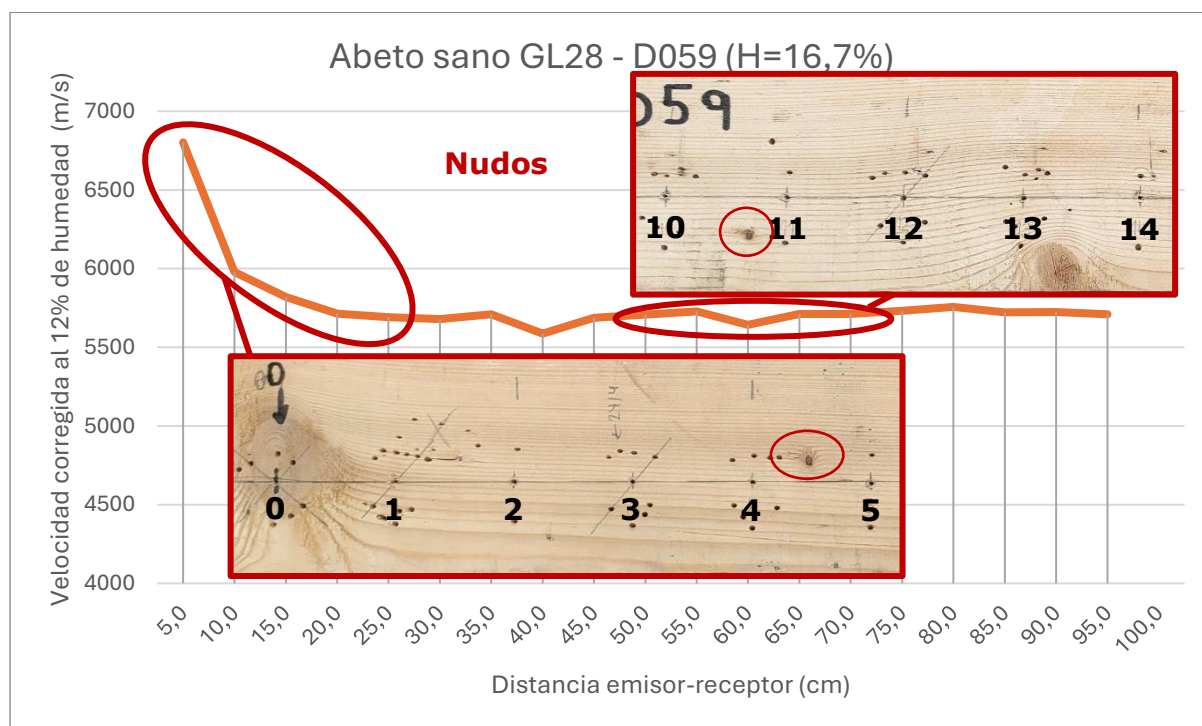


Figura 128. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sana D059 de abeto de clase resistente GL28.



Figura 129. Cara superior de la viga sana D059 de madera de abeto GL28.

Viga sumergida D042 (abeto – GL18)

En la viga sumergida D042, Figura 131, la inspección visual nos muestra:

- Un nudo de tamaño pequeño previo al intervalo 0-1 (por lo que quedaría fuera del ensayo por ultrasonidos y el análisis gráfico posterior),
- Una incisión en el intervalo 10-11 (que, por lo que se ve en la gráfica de la Figura 130, podría tener efecto en la velocidad de propagación de la onda ultrasónica transmitida entre los palpadores, lo que hace a **las incisiones en el material, defecto detectable mediante ensayo de UT**),
- Y, por último, un nudo de tamaño grande en el intervalo 17-18.

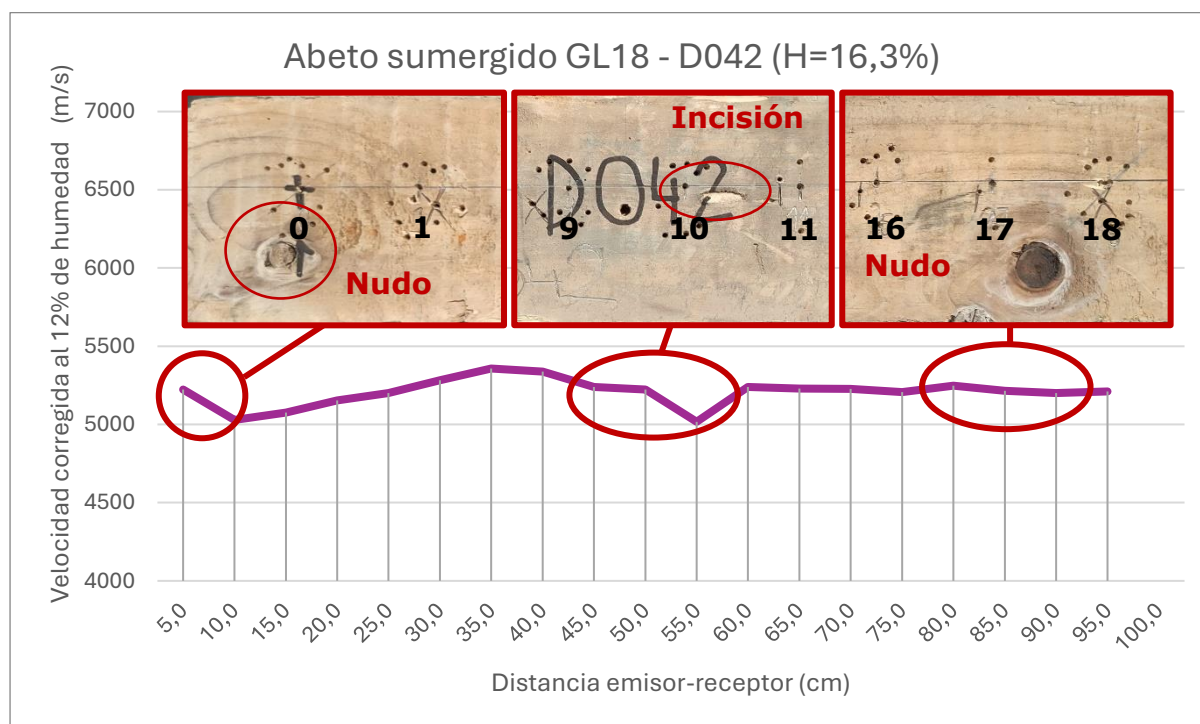


Figura 130. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D042 de abeto de clase resistente GL18.

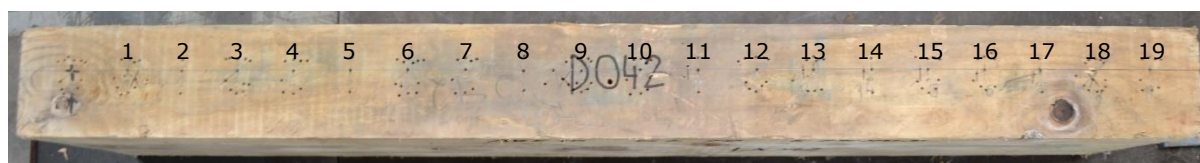


Figura 131. Cara superior de la viga sumergida D042 de madera de abeto GL18.

Viga sumergida D050 (abeto – GL24)

En el caso de la viga sumergida D050, el único defecto que provoca una alteración considerable en la velocidad de propagación de la onda ultrasónica, que puede observarse fácilmente tanto en una inspección visual, Figura 133, como gráficamente, Figura 132, es el nudo muerto presente en el intervalo 12-13.

Las coloraciones no parecen tener mucha influencia en la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas.

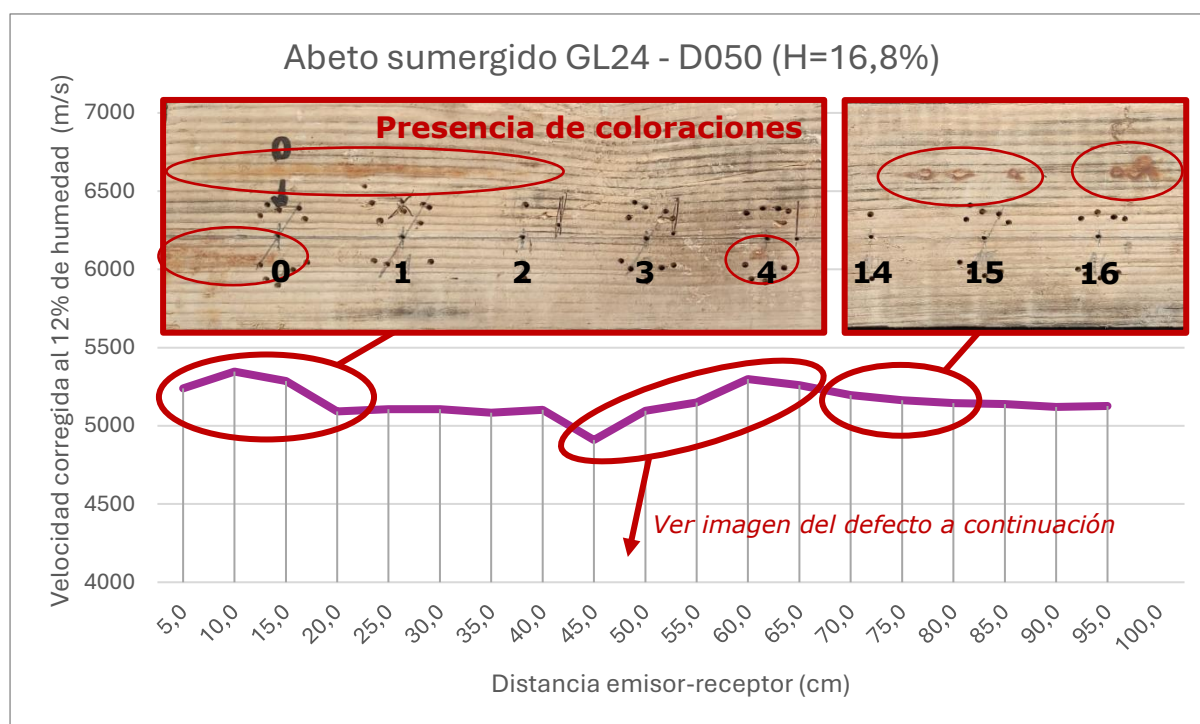


Figura 132. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D050 de abeto de clase resistente GL24.



Figura 133. Cara superior de la viga sumergida D050 de madera de abeto GL24.

Viga sumergida D058 (abeto – GL28)

Para la viga sumergida D058, Figura 135, se observan:

- Coloraciones repartidas en gran parte de la viga,
- Un pequeño nudo en el intervalo 4-5,
- Dos nudos de tamaño grande en el tramo 7-8 cuyos efectos sobre las velocidades ultrasónicas se pueden comprobar gráficamente, Figura 134,
- Y, al final de la viga de la madera, se localizan otros dos nudos de tamaño grande, posteriores al intervalo 18-19 pero que no podríamos detectar gráficamente al estar fuera de los límites definidos para la colocación de los palpadores y la realización del ensayo de ultrasonidos sobre las vigas en este proyecto.

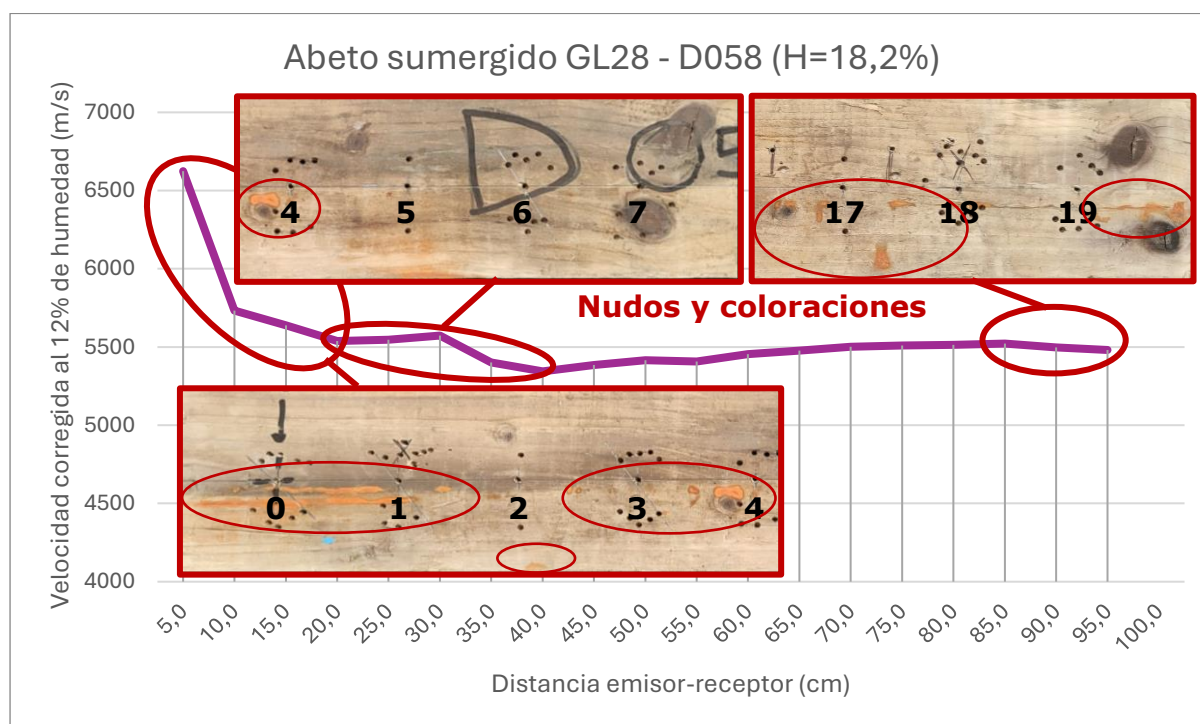


Figura 134. Gráfica de velocidades ultrasónicas corregidas al 12% de humedad en la viga sumergida D058 de abeto de clase resistente GL28.



Figura 135. Cara superior de la viga sumergida D058 de madera de abeto GL28.

4.4 Fase 3: Acondicionamiento higrotérmico de la madera

Para la realización de esta fase, se trasladaron las 18 probetas de madera ensayadas durante la Fase 2 del proyecto desde la sala del Laboratorio de Estructuras hasta la cámara estanca de acondicionamiento higrotérmico mencionada en el apartado 3.2.5, ubicada en la nave de ensayos anexa al mismo.

Con el objetivo de evitar el contacto directo de las probetas con el suelo de la cámara, se colocaron varios pallets de madera, sobre los cuales se dispusieron las 18 probetas de madera ya mencionadas y otras 9 adicionales, pertenecientes a las mismas clases resistentes (GL18, GL24 y GL28), así como a los mismos tipos de madera (abeto y pino silvestre tanto tanalizadas como sin tratamiento). La incorporación de estas probetas adicionales tuvo como finalidad su acondicionamiento junto a las probetas seleccionadas inicialmente, con vistas a la realización de futuras pruebas sobre las mismas, una vez alcanzado el equilibrio higrotérmico en todas ellas.

Se tomaron ciertas precauciones durante la disposición de las probetas, como dejar una distancia de separación entre las mismas para permitir una adecuada circulación de aire, y evitar colocarlas cerca de las paredes, situándolas lo más centradas posible dentro de la cámara, no sin olvidar dejar un pequeño pasillo lateral para facilitar el acceso y el desplazamiento en el interior de la cámara a la hora de realizar los controles periódicos de toma de medidas, ver Figura 136.

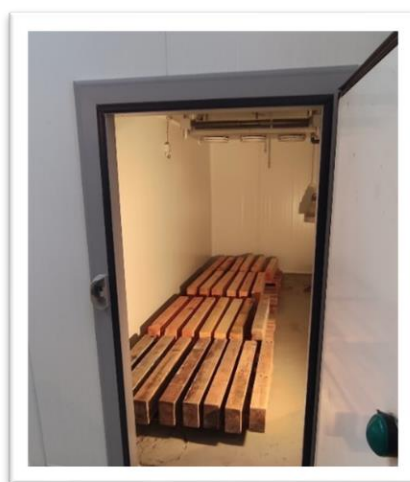


Figura 136. Incorporación de las probetas al interior de la cámara.

Una vez finalizada la colocación de las probetas, se procedió al cierre de la puerta de la cámara para garantizar la estanqueidad y mantenerlas las condiciones atmosféricas del interior.

En el cuadro de mando de la cámara se establecieron los siguientes parámetros:

- Temperatura: 20,0°C
- Humedad: 65%

¿Por qué se establecen estos parámetros concretos y no otros? Como bien indica Morales, E. (2003), debido a su **higroscopicidad**, la madera intercambia constantemente vapor de agua con su entorno de tal modo que, a cada par de valores de temperatura y humedad relativa del aire, les corresponde un valor asociado de contenido de humedad de la madera, al cual denominamos **Humedad de Equilibrio Higroscópico (HEH)**.

En un ambiente con parámetros no controlados, las condiciones climáticas cambian cada instante, por lo que el HEH también se ve afectado y varía en consecuencia.

Kollmann comprobó que la HEH es prácticamente constante para todas las especies de madera. Para su visualización y comprensión, desarrolló un ábaco, de estructura y apariencia similar al de la gráfica mostrada en la Figura 137, el cual recoge los valores medios de contenido de humedad de la madera (%) para una humedad relativa del aire (%) y una temperatura (°C) determinadas.

Centrándonos en los valores concretos de nuestro entorno controlado para el acondicionamiento de la madera, como muestra la Figura 137, a través del ábaco de Kollmann y las curvas de humedad de equilibrio de la madera representadas en él, puede observarse que, bajo unas condiciones atmosféricas de 20,0°C y una humedad relativa del aire del 65%, la madera tiende a alcanzar un equilibrio higroscópico en torno al 12% de humedad.

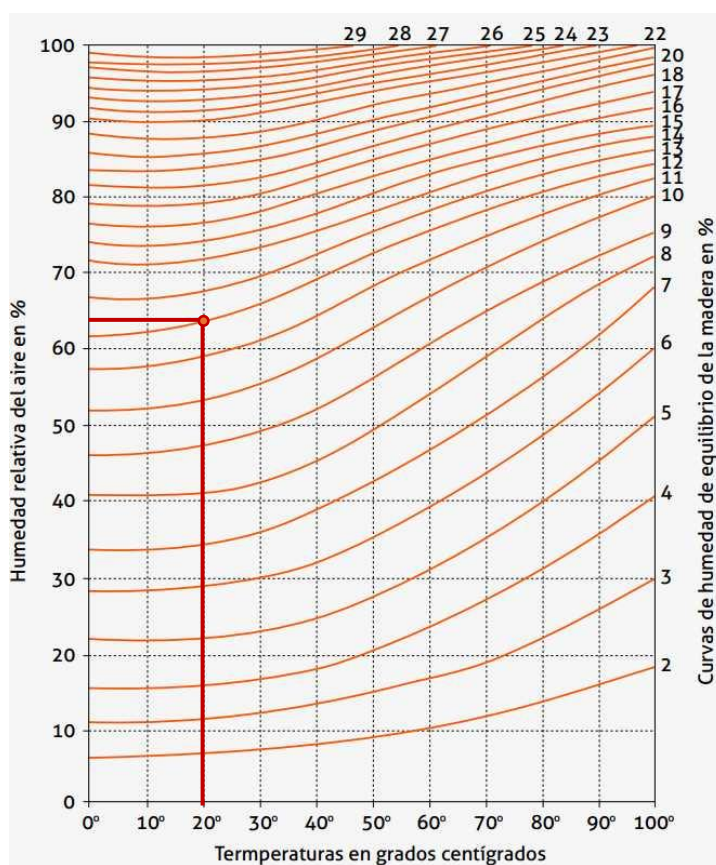


Figura 137. Ábaco de Kollmann.

El proceso de acondicionamiento de las vigas de madera en la cámara ha sido realizado bajo el siguiente procedimiento:

Las vigas de madera laminada encolada se introdujeron el día 11 de marzo de 2025 en la cámara climática, manteniéndolas en acondicionamiento higrotérmico durante dos meses, realizando controles periódicos de su contenido de humedad, primero cada semana y, posteriormente, cada dos semanas.

Para evitar desórdenes o variaciones notorias en las condiciones del entorno controlado y el contenido de humedad de las vigas de madera durante su acondicionamiento, los controles periódicos se han realizado, en su mayoría en el interior de la propia cámara climática con el fin de reducir aperturas de puertas y tiempos de exposición con el ambiente exterior.

En el control inicial y final se han realizado medidas del peso de las vigas para comprobar si la influencia de un aumento o disminución del contenido de humedad de las vigas de madera se ve reflejada en un incremento o decremento del peso, respectivamente. En teoría, una caída en el contenido de humedad de la madera

puede ser indicativo del secado de esta y, por lo tanto, de una pérdida de agua que se debería de hacer notoria en una disminución de su peso.

Según la teoría, los parámetros de temperatura y humedad aplicados en la cámara climática y el dato arrojado por el **ábaco de Kolmann**, tras un período de acondicionamiento de la madera, las vigas deberían aproximarse a un contenido de un 12% humedad.

Ahora bien, advierte Morales, E. (2003) de la existencia de un fenómeno conocido como **inercia higroscópica**, el cual hace referencia al retraso que experimenta la madera en el cambio de su contenido de humedad y que es más lento de lo que cabría esperar respecto a las condiciones meteorológicas.

Esta velocidad de cambio en el contenido de humedad de la madera ya sea de ganancia o de pérdida, **depende de la permeabilidad**; lo que a su vez supondrá una dependencia del **tipo de recubrimiento** o tratamiento superficial que haya recibido la madera (si es que lo ha hecho), así como del **peso aparente** de la misma (las maderas más ligeras son más permeables que las maderas pesadas).

A continuación, se muestra gráficamente (Figura 138 - Figura 155) la evolución del contenido de humedad de cada viga de madera durante este período de acondicionamiento higrotérmico.

Cada uno de los puntos representados en las gráficas de las figuras siguientes, son el resultado del valor promedio de 7 mediciones realizadas con el xilohigrómetro sobre cada viga en puntos marcados de la longitud de la cara superior, donde actuarían las fuerzas de carga.

4.4.1 Evolución del contenido de humedad en vigas sanas de pino silvestre sin tratamiento

Viga sana D066 (pino silvestre sin tratamiento – GL18)

En la viga de madera D066 puede observarse una diferencia del 0,93% del contenido de humedad y 50 g de peso, Figura 138, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición.

La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 16,69% y 16,79% de contenido de humedad.

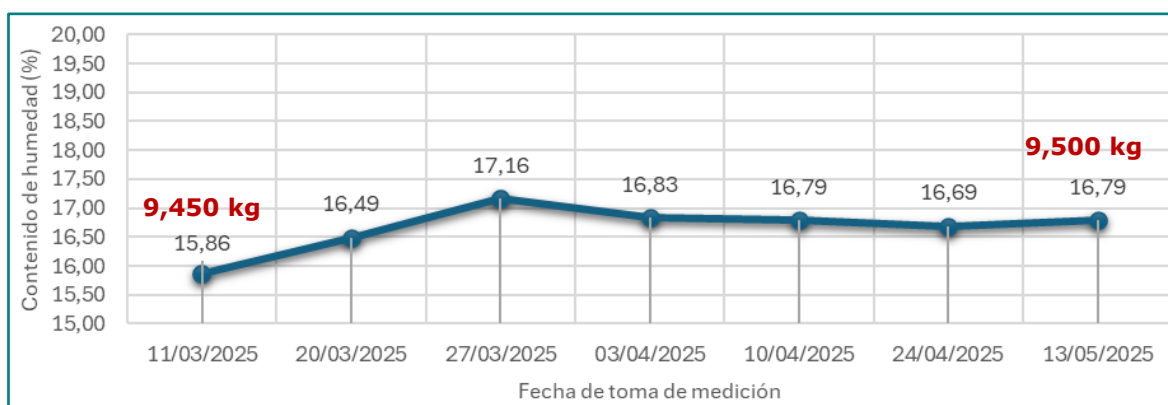


Figura 138. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D066 de madera de pino silvestre sin tratamiento y clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.

Viga sana D071 (pino silvestre sin tratamiento – GL24)

En la viga D071 puede observarse una diferencia del 0,66% contenido de humedad, Figura 139, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición.

En este caso, al medir el peso de la viga, la lectura oscilaba entre dos valores (9,950 y 10 kg) y parecía que la lectura en pantalla se estabilizaba en el valor inferior. Esto es indicativo de que el valor real está comprendido en este intervalo, pero debido a la precisión de la báscula (± 50 gramos) no se puede leer con mayor exactitud. En situaciones como estas, procederemos de la siguiente manera: al valor medio del intervalo le sumaremos o restaremos 5 gramos en función de que su lectura se estabilice hacia el valor superior o inferior del intervalo (que señalaremos en el gráfico con una flecha apuntando hacia arriba o hacia abajo junto a los valores entre los que oscila la lectura). En este caso concreto, al

estabilizarse hacia el valor inferior, hemos restado 5 gramos al valor medio que sería 9,975 kg. Por tanto, considerando un peso final de 9,975 kg, la variación de peso experimentada por la probeta ha sido de 20 g.

La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 16,96% y 17,17% de contenido de humedad.

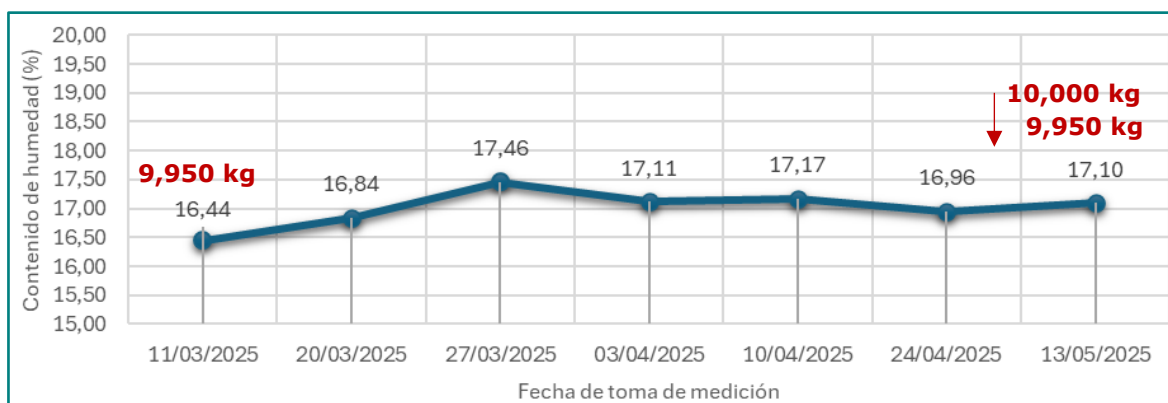


Figura 139. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D071 de madera de pino silvestre sin tratamiento y clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.

Viga sana D079 (pino silvestre sin tratamiento – GL28)

En la viga D079 puede observarse una diferencia del 0,59% en el contenido de humedad y de 50 g en peso, Figura 140, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición.

La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 15,60% y 15,73% de contenido de humedad.

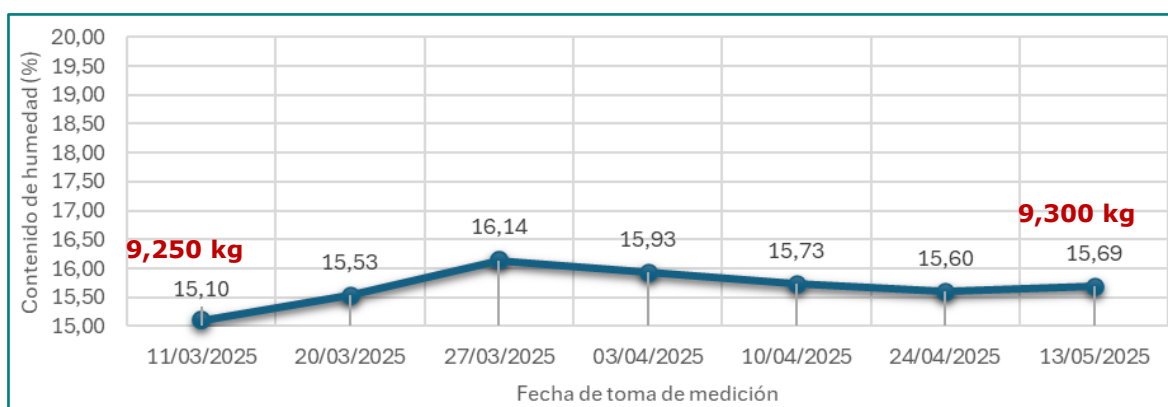


Figura 140. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D079 de madera de pino silvestre sin tratamiento y clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.

4.4.2 Evolución del contenido de humedad en vigas sumergidas de pino silvestre sin tratamiento

Viga sumergida D064 (pino silvestre sin tratamiento – GL18)

En la viga de madera sumergida D064 puede observarse una diferencia del 0,57% en el contenido de humedad y de 50 g en peso, Figura 141, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 16,93% y 17,06% de contenido de humedad.

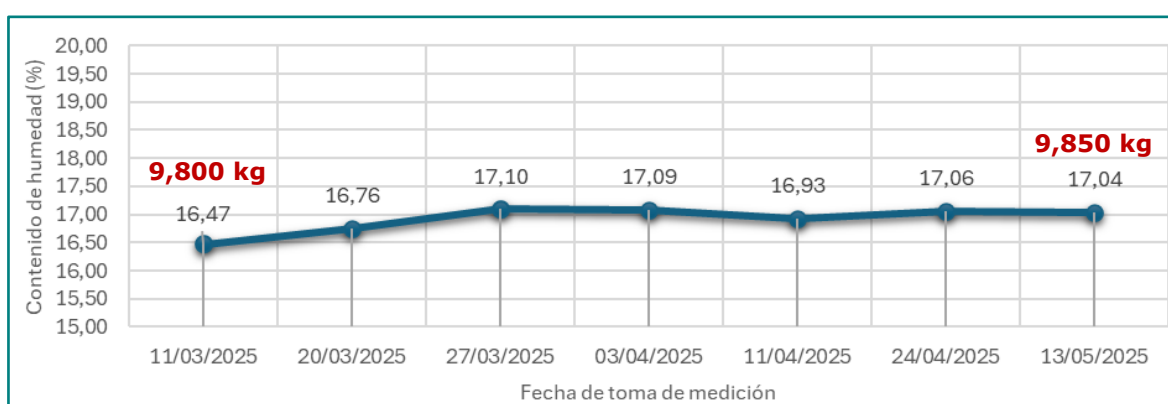


Figura 141. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D064 de madera de pino silvestre sin tratamiento y clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.

Viga sumergida D070 (pino silvestre sin tratamiento – GL24)

En la viga D070 puede observarse una diferencia del 0,22% en el contenido de humedad y de 30 g de peso, Figura 142, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 16,97% y 17,19% de contenido de humedad.

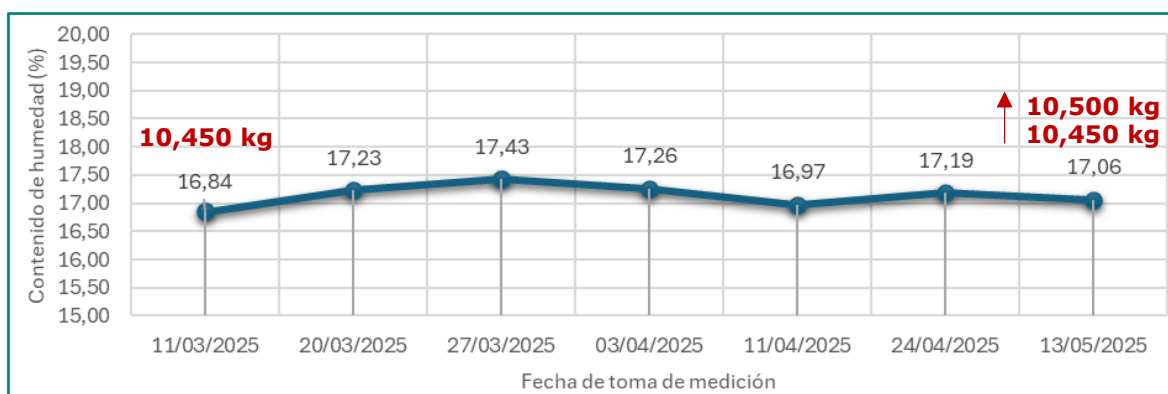


Figura 142. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D070 de madera de pino silvestre sin tratamiento y clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.

Viga sumergida D076 (pino silvestre sin tratamiento – GL28)

En la viga D076 puede observarse una diferencia del 0,74% en el contenido de humedad, Figura 143, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. En relación al peso, en este caso, la lectura oscila entre dos valores (9,600 y 9,650 kg) no llegando a estabilizarse. En el gráfico se señala con una doble flecha junto a los valores entre los que oscila la lectura. En estos casos, el valor que tomaremos para realizar los cálculos será el valor medio. Por tanto, la variación en peso ha sido de 25 g.

La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,17% y 17,30 % de contenido de humedad.

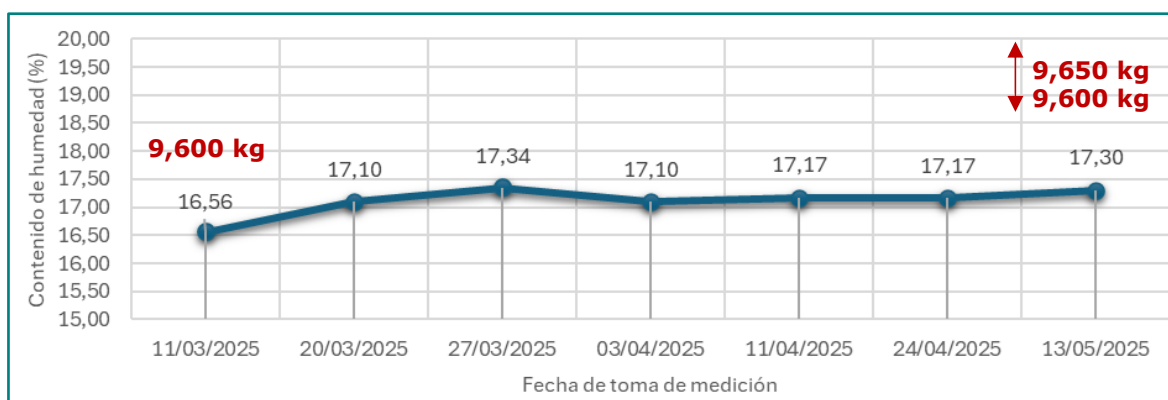


Figura 143. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D076 de madera de pino silvestre sin tratamiento y clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.

4.4.3 Evolución del contenido de humedad en vigas sanas de pino silvestre tanalizado

Viga sana D037 (pino silvestre tanalizado – GL18)

En la viga D037 puede observarse una diferencia del 1,08% en el contenido de humedad y de 50 g de peso, Figura 144, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su equilibrio higrotérmico (HEH) próximo o entre los valores de 17,88% y 18,20% de contenido de humedad.

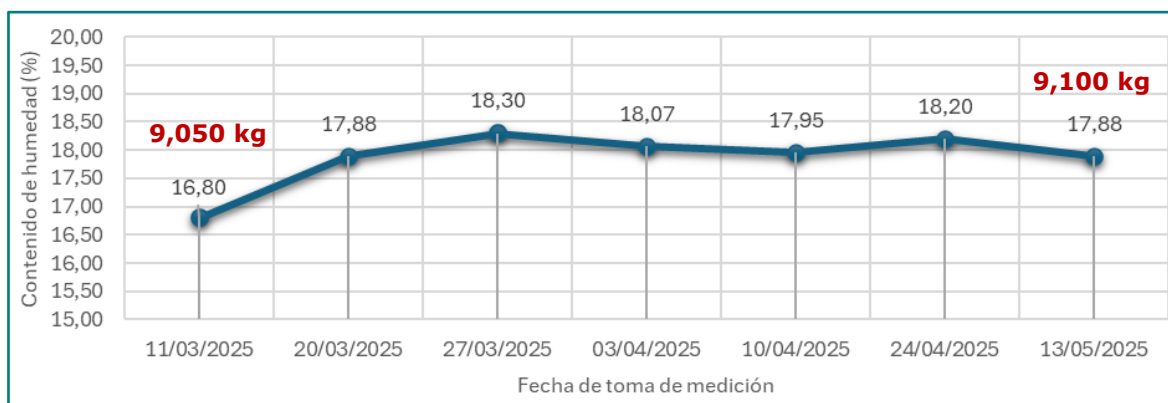


Figura 144. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D037 de madera de pino silvestre tanalizado y clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.

Viga sana D023 (pino silvestre tanalizado – GL24)

En la viga D023 puede observarse una diferencia del 0,87% en el contenido de humedad y de 50 g de peso, Figura 145, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,51% y 17,60% de contenido de humedad.

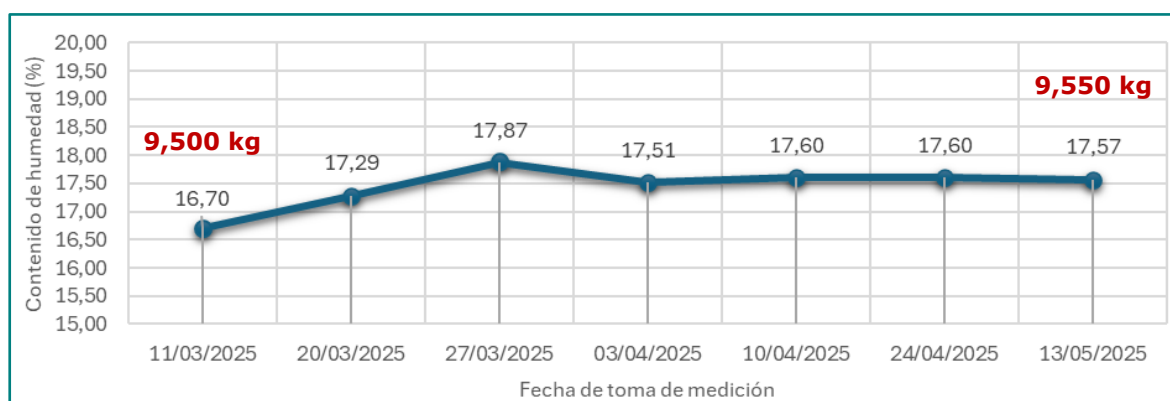


Figura 145. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D023 de madera de pino silvestre tanalizado y clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.

Viga sana D031 (pino silvestre tanalizado – GL28)

En la viga D031 puede observarse una diferencia del 1,03% en el contenido de humedad y de 30 g en peso¹⁵, Figura 146, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,53% y 17,66% de contenido de humedad.

¹⁵ Por un momento la lectura se queda fija en el valor superior pero no llega a estabilizarse en el tiempo.

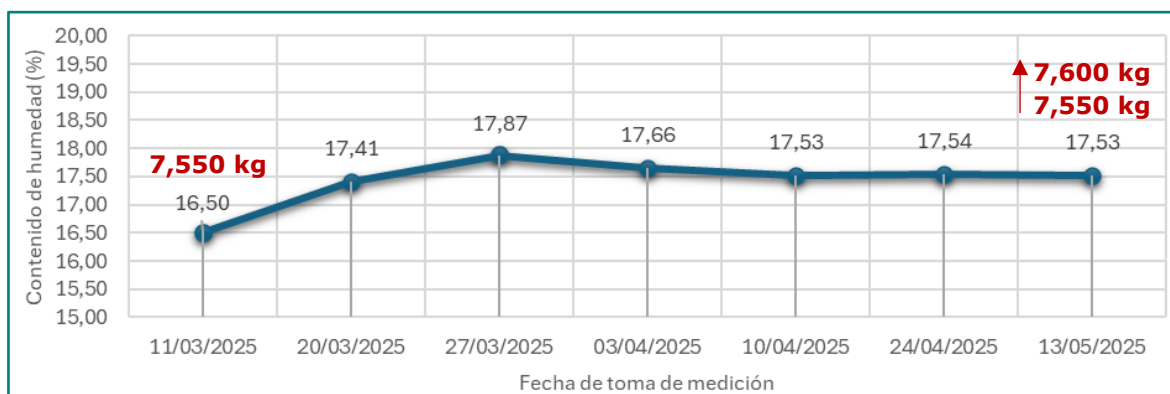


Figura 146. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D031 de madera de pino silvestre tanalizado y clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.

4.4.4 Evolución del contenido de humedad en vigas sumergidas de pino silvestre tanalizado

Viga sumergida D035 (pino silvestre tanalizado – GL18)

En la viga de madera sumergida D035 puede observarse una diferencia del 0,70% en el contenido de humedad y de 50 g en peso, Figura 147, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,40% y 17,64% de contenido de humedad.

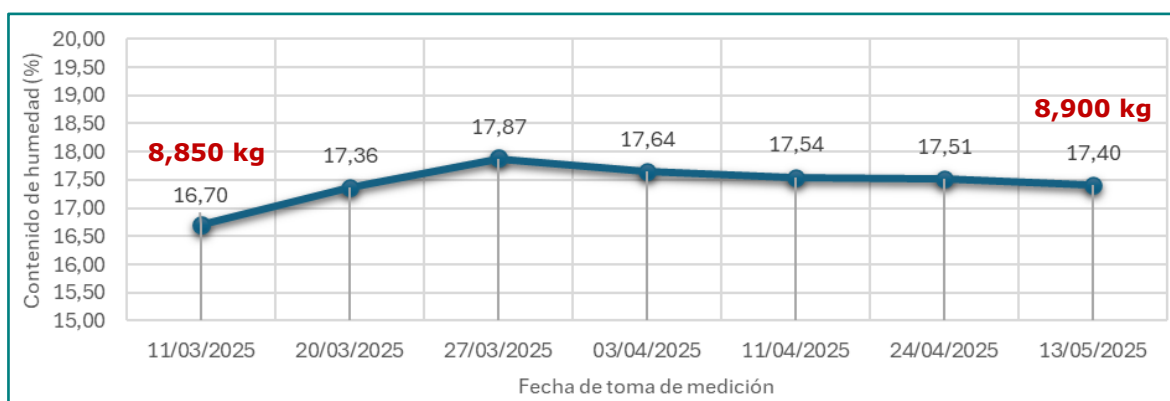


Figura 147. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D035 de madera de pino silvestre tanalizado y clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.

Viga sumergida D024 (pino silvestre tanalizado – GL24)

En la viga D024 puede observarse una diferencia del 0,51% en el contenido de humedad, Figura 148, desde su entrada en la cámara climática hasta su última

medición. En este caso particular, no se observaron variaciones en la lectura del peso, pero sí hubo variaciones en el contenido de humedad lo que **podría indicar** que no hubo un intercambio de vapor de agua con el medio que rodea a la viga de madera, si no **una redistribución del agua en el interior de la estructura de la propia madera**.

La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,71% y 17,91% de contenido de humedad.

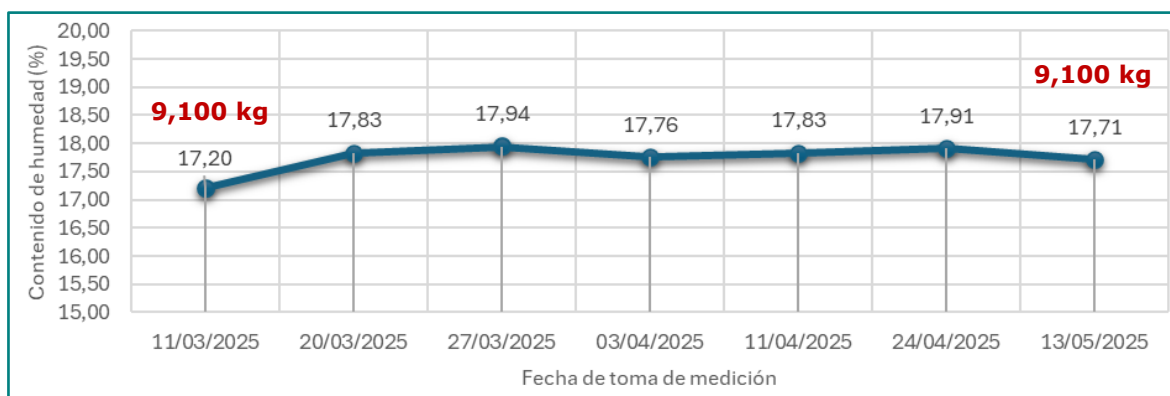


Figura 148. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D024 de madera de pino silvestre tanalizado y clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.

Viga sumergida D029 (pino silvestre tanalizado – GL28)

En la viga D029 puede observarse una diferencia del 0,51% en el contenido de humedad y de 25 g en peso, Figura 149, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,21% y 17,51% de contenido de humedad.

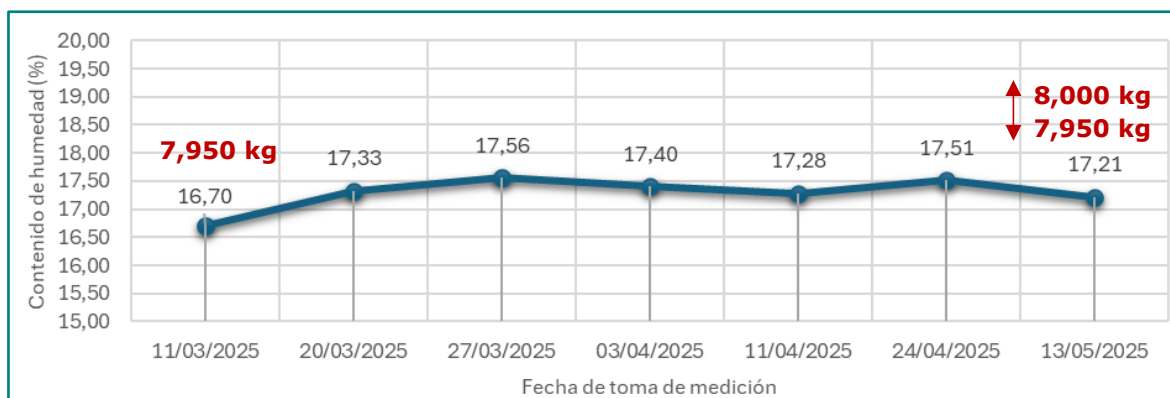


Figura 149. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D029 de madera de pino silvestre tanalizado y clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.

4.4.5 Evolución del contenido de humedad en vigas sanas de abeto

Viga sana D047 (abeto – GL18)

En la viga de madera sana D047 puede observarse una diferencia del 1,44% en el contenido de humedad y de 50 g en peso, Figura 150, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,06% y 17,41% de contenido de humedad.

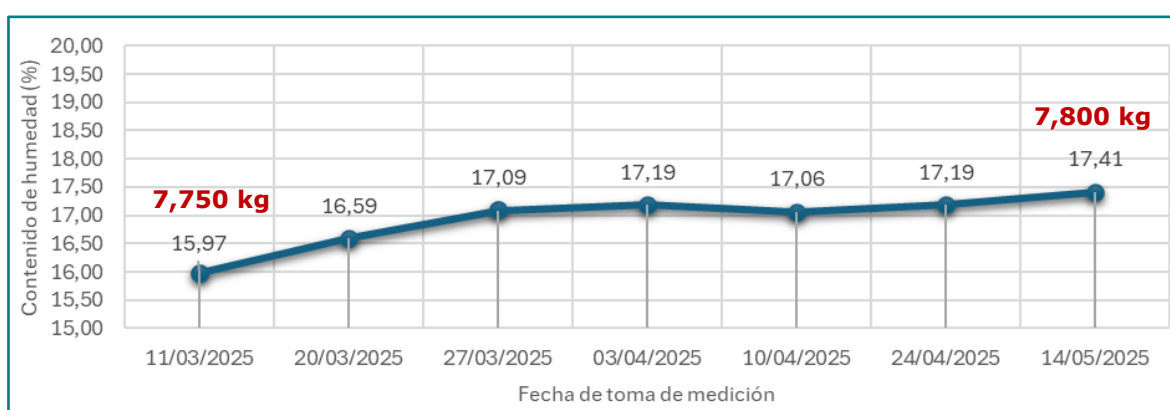


Figura 150. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D047 de madera de abeto de clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.

Viga sana D051 (abeto – GL24)

En la viga D051 puede observarse una diferencia del 1,24% en el contenido de humedad y de 50 g en peso, Figura 151, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 16,89% y 17,07% de contenido de humedad.

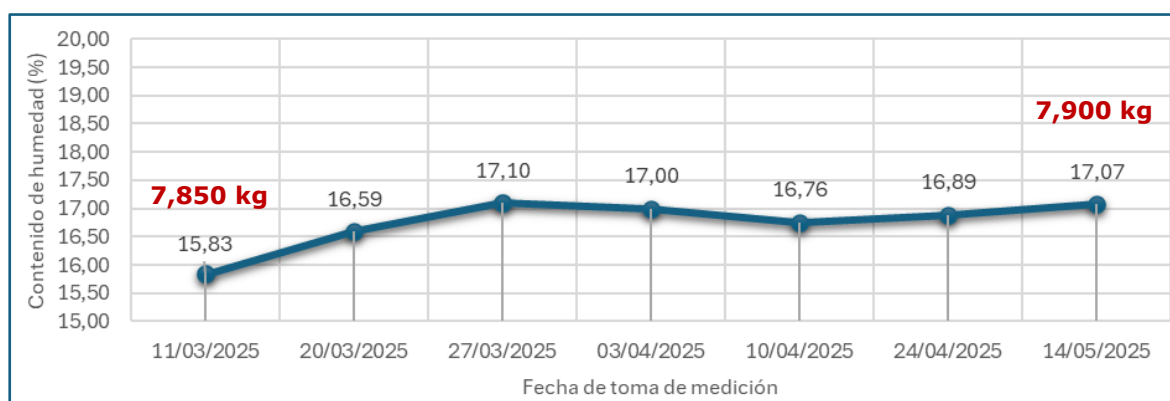


Figura 151. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D051 de madera de abeto de clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.

Viga sana D059 (abeto – GL28)

En la viga D059 puede observarse una diferencia del 0,91% en el contenido de humedad y de 50 g en peso, Figura 152, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,24% y 17,40% de contenido de humedad.

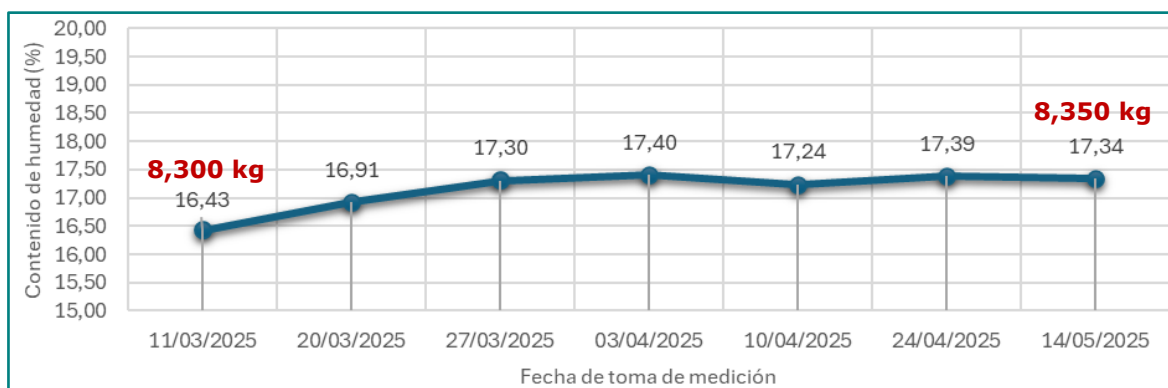


Figura 152. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D059 de madera de abeto de clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.

4.4.6 Evolución del contenido de humedad en vigas sumergidas de abeto

Viga sumergida D042 (abeto – GL18)

En la viga de madera sumergida D042 puede observarse una diferencia del 1,26% en el contenido de humedad y de 100 g en peso, Figura 153, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,14% y 17,26% de contenido de humedad.

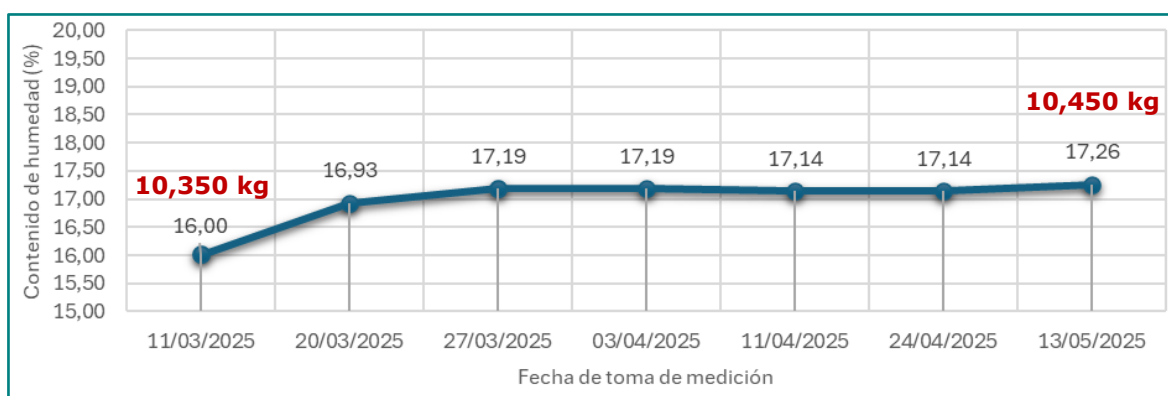


Figura 153. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D042 de madera de abeto de clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.

Viga sumergida D050 (abeto – GL24)

En la viga D050 puede observarse una diferencia del 0,80% en el contenido de humedad y de 50 g en peso, Figura 154, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,34% y 17,41% de contenido de humedad.

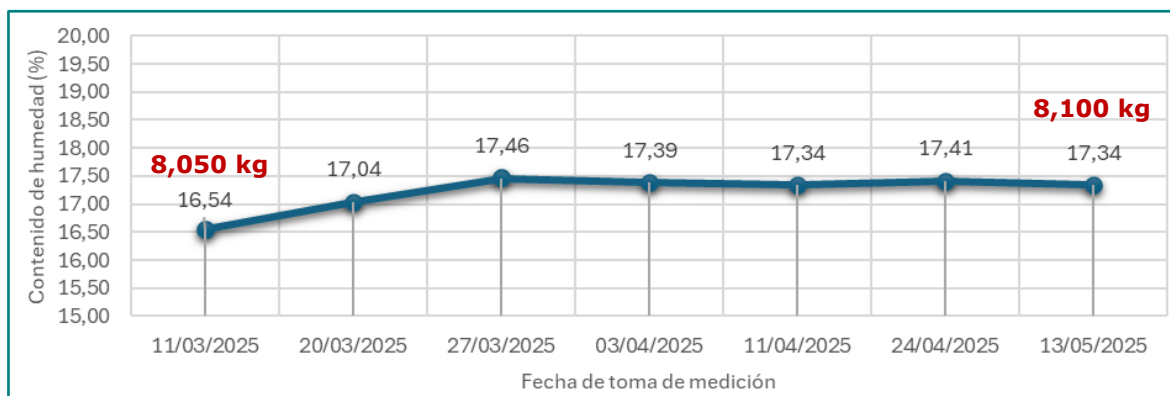


Figura 154. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D050 de madera de abeto de clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.

Viga sumergida D058 (abeto – GL28)

En la viga D058 puede observarse una diferencia del 0,90% en el contenido de humedad y de 50 g en peso, Figura 155, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener HEH próximo o entre los valores de 17,10% y 17,23% de contenido de humedad.

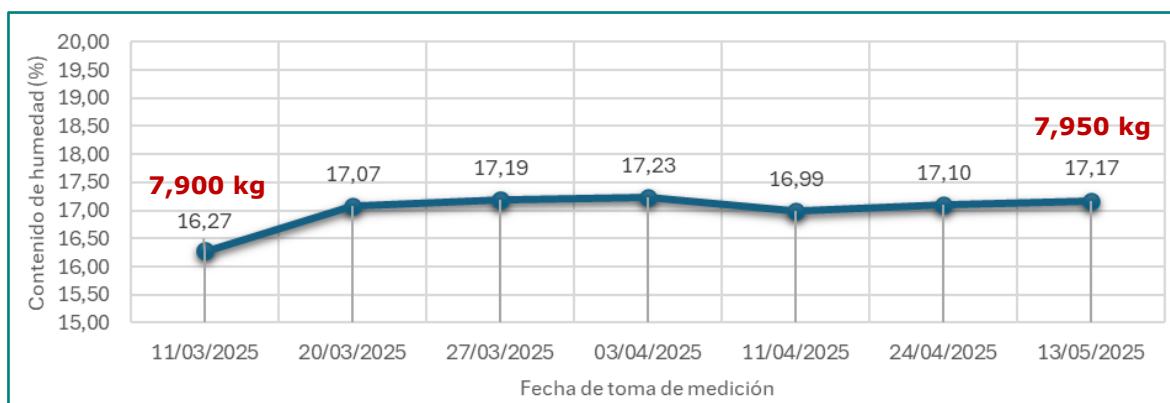


Figura 155. Evolución del contenido de humedad en la viga sumergida D058 de madera de abeto de clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.

Observando una por una las gráficas de evolución del contenido de humedad en las vigas de madera, se advierte que, salvo en casos puntuales (Figura 138, Figura 140, Figura 144 y Figura 148), hay una tendencia hacia valores situados entre 17,0%-17,5 % de contenido de humedad en la madera por lo que podríamos plantear la posibilidad de que, a pesar de las condiciones para el acondicionamiento higrotérmico definidas en base a los estudios y el ábaco de Kollmann, el punto de equilibrio (HEH) para la madera de estas vigas no sea del 12% del contenido de humedad, sino que se haya visto alterado debido a cambios en las propiedades de la madera. Estos cambios podrían ser consecuencia del largo período de almacenaje del conjunto de las vigas de madera, sin embalaje externo protector y sin medidas de control de temperatura y humedad.

La tendencia hacia valores en torno al 17,0%-17,5% de contenido de humedad de la madera ocurre tanto en las vigas sanas como en las vigas que se sometieron a inmersión durante 304 días en agua dulce a 20°C, en las cuales se observa un mayor deterioro y, por donde, en caso de experimentarse modificación de las propiedades de la madera, cabría esperarse estos cambios.

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Potencial del método ultrasónico mediante transmisión indirecta para la determinación de posibles defectos o anomalías presentes en la en vigas de madera laminada encolada

Como ya se ha justificado en el apartado 4.3, el método ultrasónico mediante transmisión indirecta permite detectar y localizar la presencia de defectos o anomalías en vigas de madera laminada encolada.

Por tanto, para no resultar reiterativo, se remite al lector a dicho apartado, y concretamente a los subapartados 4.3.1-4.3.3, para una consulta más exhaustiva de los resultados obtenidos y de la discusión de los mismos.

5.2 Posible justificación de los picos de velocidad ultrasónica registrados al inicio de las gráficas obtenidas en la fase 2 del proyecto

Por una parte, como ya se ha referido en el estado del arte y suele ser contemplado en los manuales de los equipos ultrasónicos, no suele ser recomendable disponer los transductores (emisor y receptor) muy próximos pues suelen obtenerse resultados incoherentes. No obstante, en ninguna referencia de las consultadas se ha encontrado justificación alguna para dicha afirmación.

Por otra, en el caso de realizar las mediciones por una sola cara (transmisión indirecta), no se puede considerar el ángulo del recorrido de la onda con la fibra porque se producen rebotes internos de la onda con las caras exteriores de la pieza, y en interfases existentes definidas por imperfecciones u otros factores, aunque los valores resultantes se aproximan sobre todo a las mediciones en la dirección paralela a las fibras (medidas longitudinales).

Considerando los comentarios anteriores, la hipótesis contemplada para tratar de justificar los picos de velocidad ultrasónica registrados al inicio de las gráficas obtenidas en la fase 2 del proyecto (ver por ejemplo la Figura 102, la Figura 108 o la Figura 122) es que **cuando la distancia entre transductores sea reducida podría existir una superposición de ondas en el transductor receptor**, que

haría que el tiempo de vuelo registrado no se correspondiese con el de la onda longitudinal, si no con las ondas superficiales o de Rayleigh, afectando a los valores de velocidad de propagación obtenidos, dando resultados mayores de los registrados a partir de cierta distancia entre palpadores.

Así, en los primeros centímetros de las vigas de madera, la cercanía entre el emisor y el receptor podría estar causando que las ondas superficiales (ondas Rayleigh), que normalmente son mucho más lentas que las longitudinales, estuvieran llegando antes o de manera simultánea al receptor, que las ondas longitudinales (ondas primarias o de compresión) por tener estas últimas que realizar un mayor recorrido, aunque lo hagan a mayor velocidad, provocando estas alteraciones en los tramos iniciales de las gráficas.

Esta hipótesis se muestra de manera esquemática en la Figura 156. Puede observarse una parte de una de las vigas de madera del presente proyecto, de espesor (e). En la cara superior se colocan los palpadores: uno fijo en el punto 0 (emisor) y otro móvil en el punto 1 que luego se mueve al punto 3 (receptor). Desde el emisor se transmiten ondas ultrasónicas a través del material, ondas que llegan hasta el receptor. Las ondas más importantes para esta hipótesis son las ondas primarias o de compresión (P), representadas en color azul cian, y las ondas superficiales (S), mostradas en color morado.

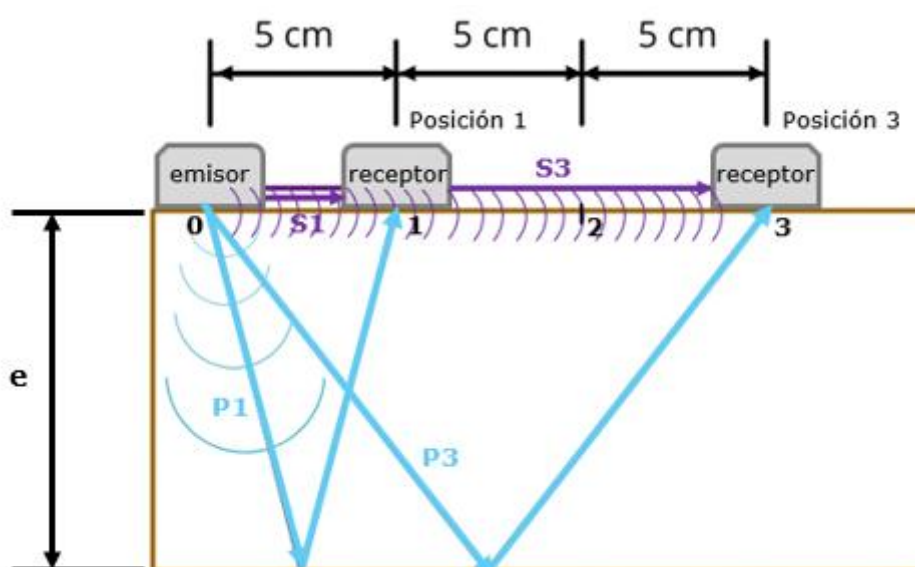


Figura 156. Esquema de recepción de ondas de compresión y superficiales en función de la distancia entre palpadores.

En la representación gráfica nos podemos hacer una idea del movimiento y recorrido que realiza cada tipo de onda. Mientras que las ondas de compresión viajan a través del espesor del material (con cierto ángulo), rebotan en el fondo y vuelven a la superficie, las ondas superficiales se transmiten a través de las primeras capas del material directamente hacia el receptor sin atravesar el material ni producirse rebotes ni desvíos.

En la "Posición 1", cuando los palpadores están situados a tan solo 5 cm, el recorrido que realizan las ondas superficiales es tan corto que, pese a que su velocidad de propagación es mucho más lenta que la de las ondas de compresión, al tener que realizar estas un mayor recorrido, puede producirse un solape en la llegada de ambas ondas o que las ondas superficiales incluso estén llegando antes al receptor que las ondas de compresión y, a consecuencia de esto, se den alteraciones o picos de velocidad en los primeros tramos de estudio de las vigas de madera, en torno a los 15 primeros centímetros, debido a la proximidad entre palpadores. A medida que nos acercamos a la "Posición 3", este efecto va disminuyendo al aumentar las distancias que tienen que recorrer las ondas, ya que las relaciones de velocidad y distancia a recorrer se van inclinando a la llegada al receptor de las ondas primarias o de compresión.

5.2.1 Simulación del comportamiento de ondas ultrasónicas mediante el uso de software informático.

Para intentar comprobar la validez de esta hipótesis se ha recurrido al **programa de simulación COMSOL**. Con el fin de simplificar el problema, el análisis se ha realizado considerando un medio isótropo, en lugar de ortótropo como es el caso de la madera. En cuanto a los parámetros mecánicos introducidos para modelar el material, se ha planteado madera de abeto, considerando una densidad de 450kg/m^3 , un módulo de Young de 10 GPa y un coeficiente de Poisson de 0,35. Se realizó un análisis numérico de la velocidad propagación de ondas ultrasónicas en la muestra modelada, simulando el ensayo de ultrasonidos realizado sobre las vigas de madera lamina encolada y obteniendo la gráfica de velocidades de la Figura 157, con una forma y valores muy similares a lo que se obtuvo en los ensayos experimentales, pero para un caso teórico ideal en el que la viga de la muestra simulada no presenta ningún defecto ni anomalía.

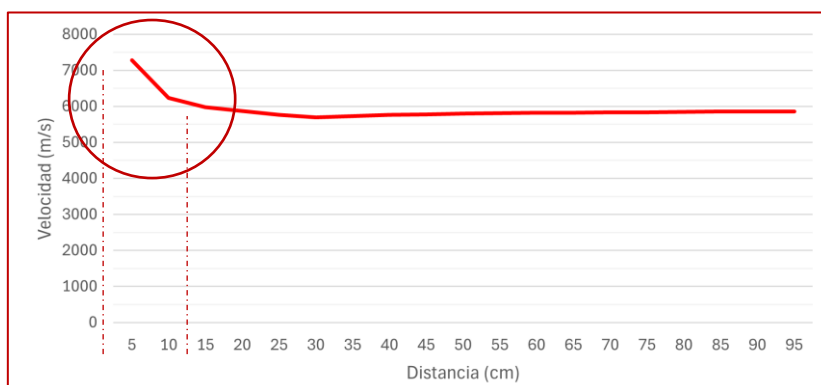


Figura 157. Gráfica de velocidades de propagación de ondas ultrasónicas obtenida mediante análisis numérico en COMSOL.

Al igual que en los ensayos, también aparece un pico cuando los transductores piezoeléctricos están muy próximos entre sí, en la zona observada previamente, de 5 a 15 cm aproximadamente.

Durante las simulaciones se plantean varias situaciones:

5.2.1.1 Influencia de la separación entre transductores

En el presente apartado se analizan diferentes separaciones entre transductores, concretamente 20 cm, 10 cm y 5 cm. Para ello, se representa el campo de desplazamientos para las separaciones referidas.

I.- Separación entre transductores de 20 cm

El caso general, en el que no habría interferencias, sería el que se observa en la Figura 158, con los transductores separados 20 centímetros o más (lo que podría dar una idea del porqué la recomendación del fabricante de utilizar el equipo de ultrasonidos con una separación entre transductores de entre 25 y 30 cm, quizá para asegurar esta situación y evitar otros efectos). En la imagen tomada a la llegada de las ondas longitudinales al receptor puede distinguirse con claridad las ondas superficiales que van perdiendo amplitud y se encuentran todavía a cierta distancia del frente de onda de las ondas longitudinales (primarias o de compresión). En este caso, las ondas longitudinales hacen un barrido del espesor completo de la viga, completando su recorrido en un **tiempo de vuelo**¹⁶ 43 μ s.

¹⁶ Se considera como **tiempo de vuelo** al tiempo que tarda la onda ultrasónica en recorrer la distancia entre emisor y receptor, siendo alcanzado el receptor por un frente de onda con suficiente energía como para excitarlo y que se active el registro de este tiempo en el equipo de medida. Las Figuras a continuación no muestran tiempos de vuelo sino instantes de tiempo en los que se capturó la imagen.

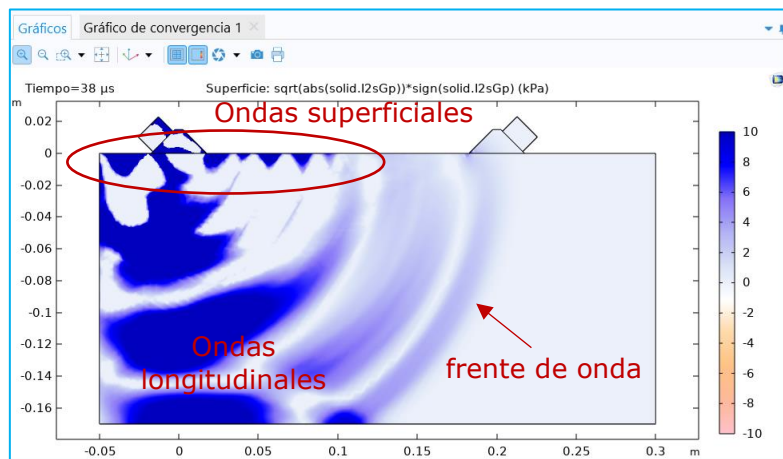


Figura 158. Simulación de ultrasonidos para transductores separados 20 cm, COMSOL.

II.- Separación entre transductores de 10 cm

Se plantea también una configuración para transductores con una distancia de separación de 10 cm, con el objetivo de visualizar el comportamiento de las ondas superficiales aumentando la influencia de la proximidad o cercanía del segundo transductor piezoeléctrico de aluminio.

En este caso, el mapa de colores no busca una diferenciación entre diferentes tipos de ondas ultrasónicas, sino que representa el campo de velocidades de la partícula, que se relaciona con la energía de la onda.

En la Figura 159, se muestra la vista superior de la muestra en dos instantes de tiempo de la simulación. Como parece lógico, el centro del transductor emisor, desde donde se emite la señal, es donde las ondas ultrasónicas parecen tener una mayor energía y, a medida que se van alejando de este, esta energía se va disipando.

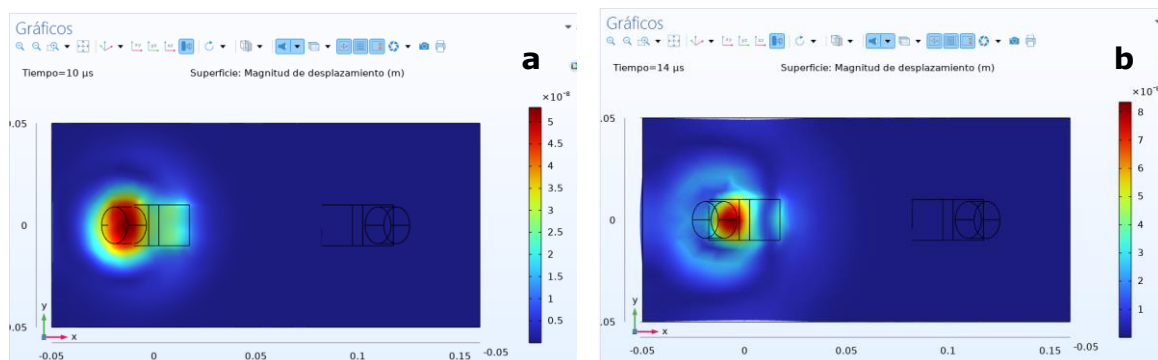
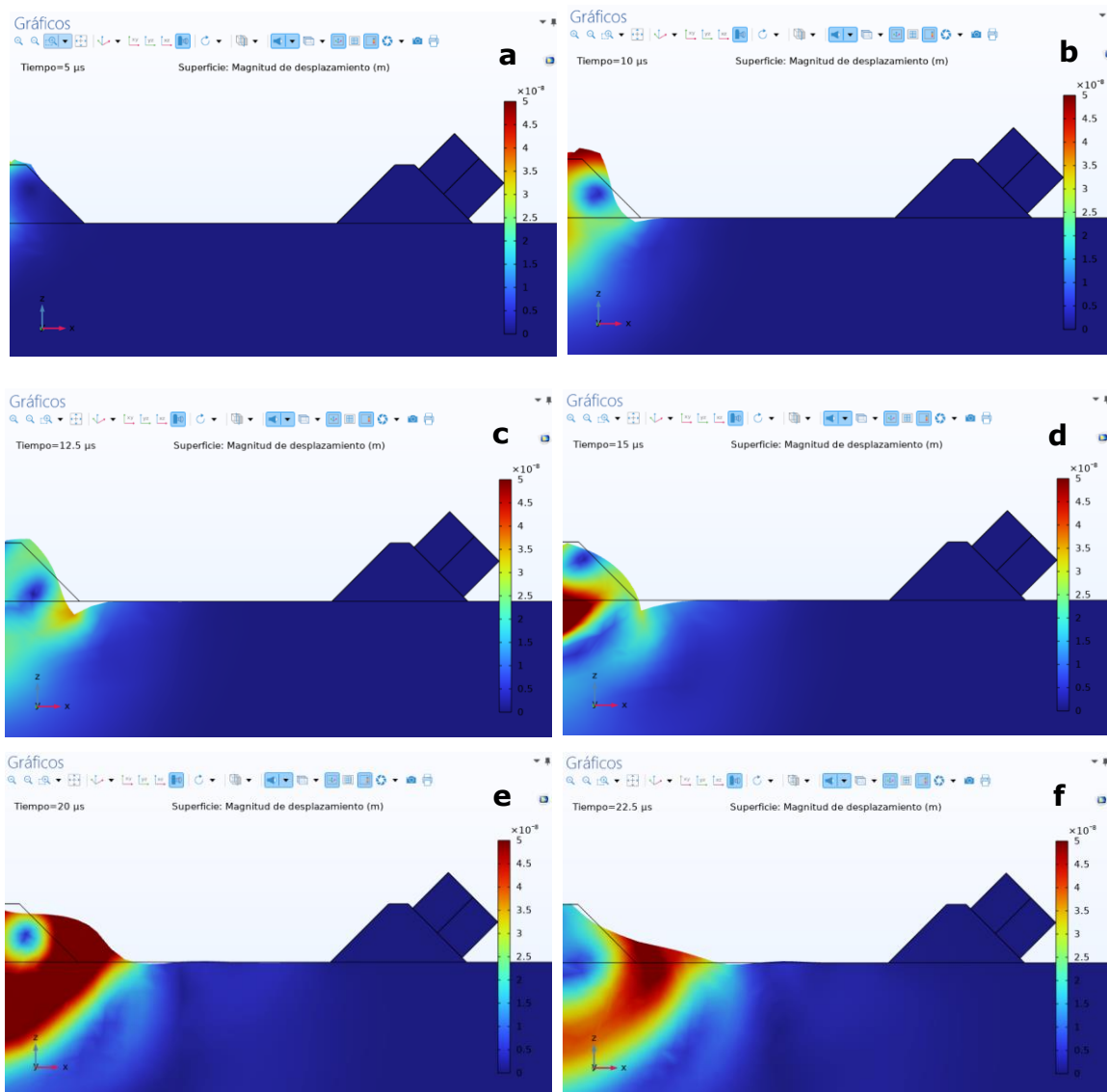


Figura 159. Vista superior de la muestra en los instantes de tiempo de (a) 10 y (b) 14 μ s.

Para observar con mayor claridad el desplazamiento y disipación de las ondas, se cumplimentan estas instantáneas con una serie de imágenes de la vista lateral de la muestra tomadas también en diferentes instantes de tiempo de la simulación, recogidas en la Figura 160.

Debido al espesor de la pieza, la proximidad entre transductores y la disipación de energía de las ondas, parece que, con esta separación de 10 cm, efectivamente, nos encontramos en esta zona sensible planteada para nuestra hipótesis, pero no podemos sacar nada en claro en cuanto a qué tipo de ondas llegan antes al transductor receptor o si se solapan ondas superficiales y longitudinales en su llegada al mismo.



h

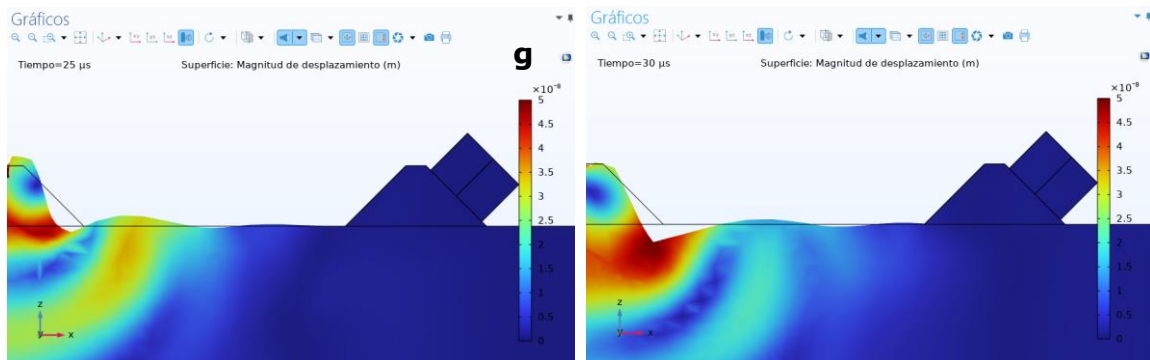


Figura 160. Vista lateral de la muestra en los instantes de tiempo de (a)5, (b)10, (c)12'5, (d)15, (e)20, (f)22'5, (g)25 y (h)30 μ s.

III.- Separación entre transductores de 5 cm

Finalmente, en la simulación para una configuración de transductores separados 5 cm, aunque no se aprecian con la misma claridad que en el caso de la separación de 20 cm, se percibe la presencia de ondas superficiales de menor amplitud que pareciera que podrían llegar de manera simultánea al receptor, o incluso con anterioridad, que el frente de onda de las ondas longitudinales, ver Figura 161. En esta situación, el tiempo de vuelo registrado fue de 14,6 μ s.

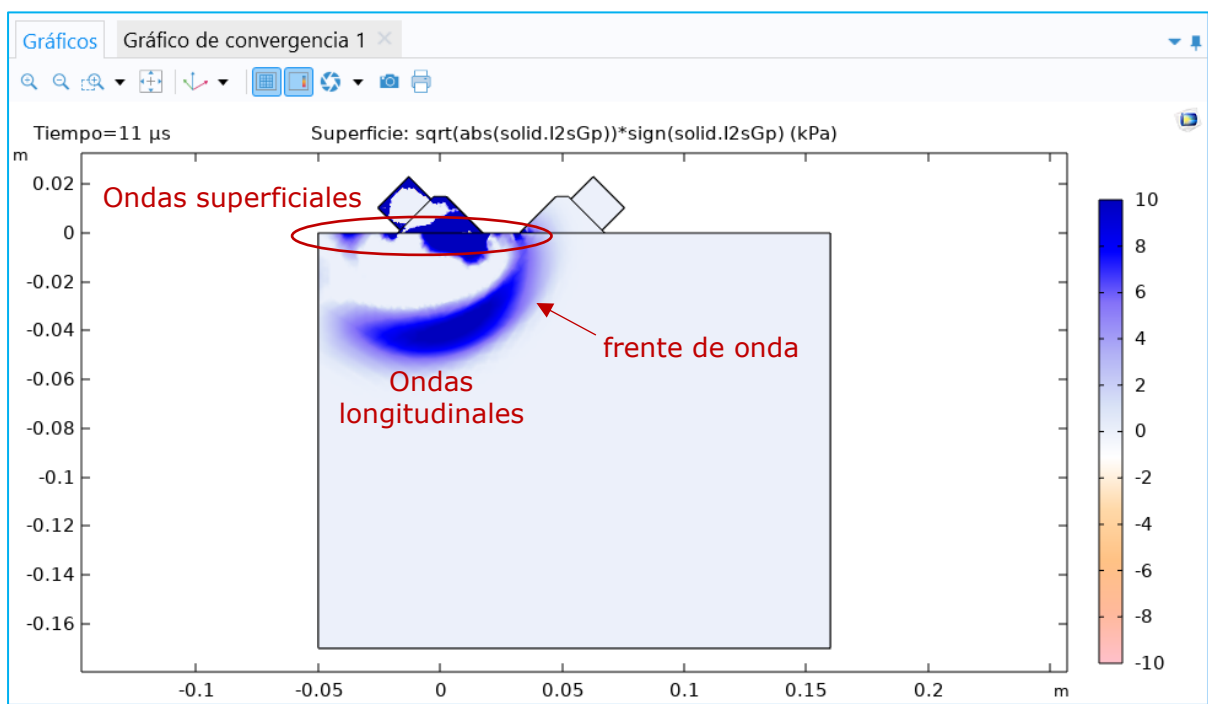


Figura 161. Simulación de ultrasonidos para transductores separados 5 cm, COMSOL.

Por otra parte, con el fin de visualizar en mayor profundidad la propagación de ondas superficiales en el caso de la separación próxima entre transductores (5

cm) se plantea y desarrolla un modelo 3D que representa el campo de desplazamiento de los transductores sobre la muestra (una parte de una viga de madera). En la Figura 162 puede observarse dicho modelo en 3 dimensiones. Se utilizó un mallado¹⁷ menos fino, Figura 162(b), para reducir el tiempo de cómputo en la simulación, no obstante, manteniendo una precisión suficiente.

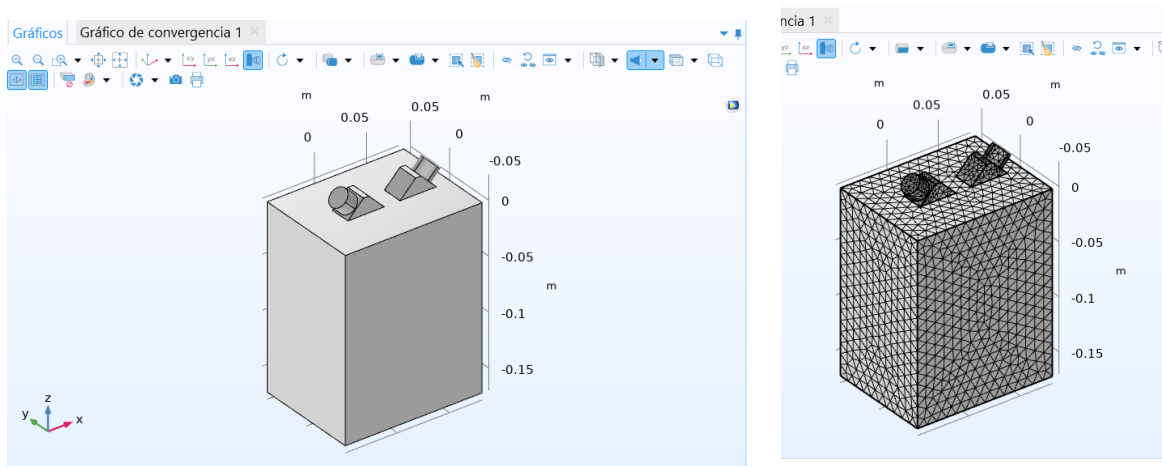


Figura 162. Modelo 3D del campo de desplazamientos de los transductores ajustando la distancia de separación a 5 cm. (a) sin mallado; (b) con mallado, COMSOL.

Desde una vista en planta, situados sobre la cara superior de la viga y los transductores, Figura 163, y otra vista lateral o de perfil, Figura 164, se obtienen las siguientes visualizaciones al simular las ondas superficiales.

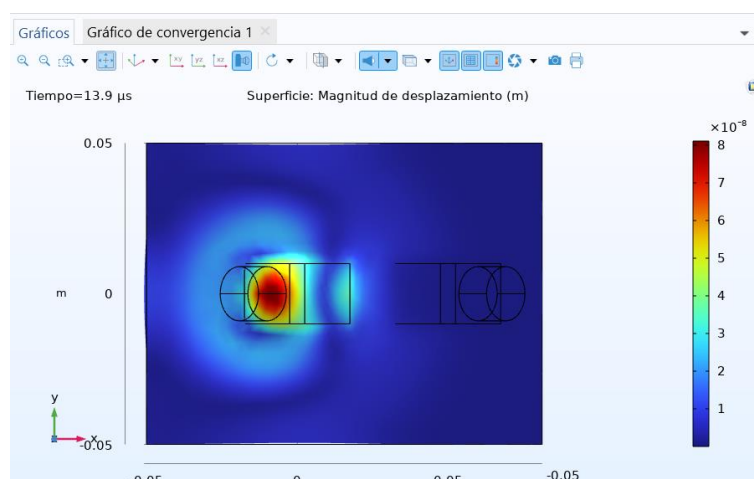


Figura 163. Simulación de ondas superficiales en vista de cara superior de la viga, COMSOL.

¹⁷ En las figuras 2D se utilizó un mallado triangular mientras que para las figuras 3D se hizo uso de un mallado tetraédrico. En cuanto al tamaño máximo del elemento de la muestra se ha definido en función de la longitud de onda de las ondas Rayleigh (por tener valores menores que las ondas longitudinales y transversales) quedando el modelo 2D limitado a 1/12 de la longitud de onda (aprox. 5mm) y el modelo 3D, a 1/6 de la longitud de onda (aprox. 1cm), por cuestiones de tiempo de cálculo en la simulación.

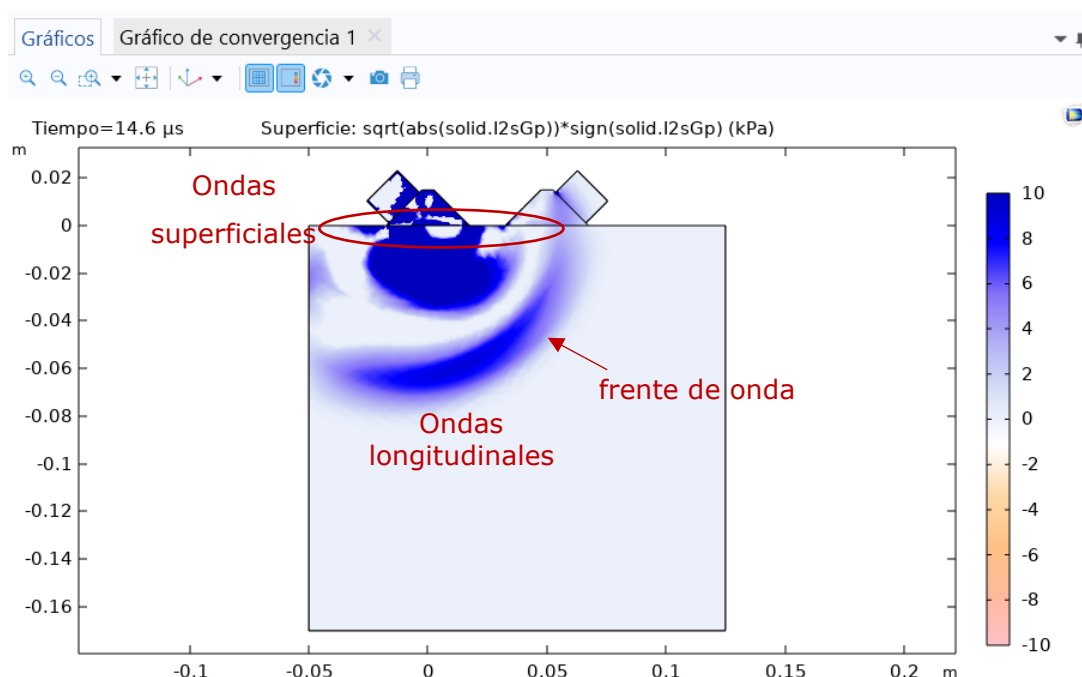


Figura 164. Simulación de ondas ultrasónicas en vista de cara lateral de la viga, COMSOL.

En la primera imagen, Figura 163, si bien se detecta la presencia de ondas superficiales, no se aprecia con claridad que dichas ondas hayan alcanzado el transductor receptor en el instante de 13,9 μ s para esta simulación. Comparándolo con lo que puede verse en la vista lateral de la Figura 164, pareciera que, en este caso, para cuando la onda superficial llega al receptor, la onda longitudinal ya lo está dejando atrás incluso, si observamos el movimiento de su frente de onda. Por lo tanto, desde un punto de vista teórico, no se justificaría la hipótesis planteada y exigiría, cuanto menos, un estudio más profundo del tema.

5.2.1.2 **Análisis de cómo los diferentes tipos de ondas ultrasónicas se propagan durante un ensayo**

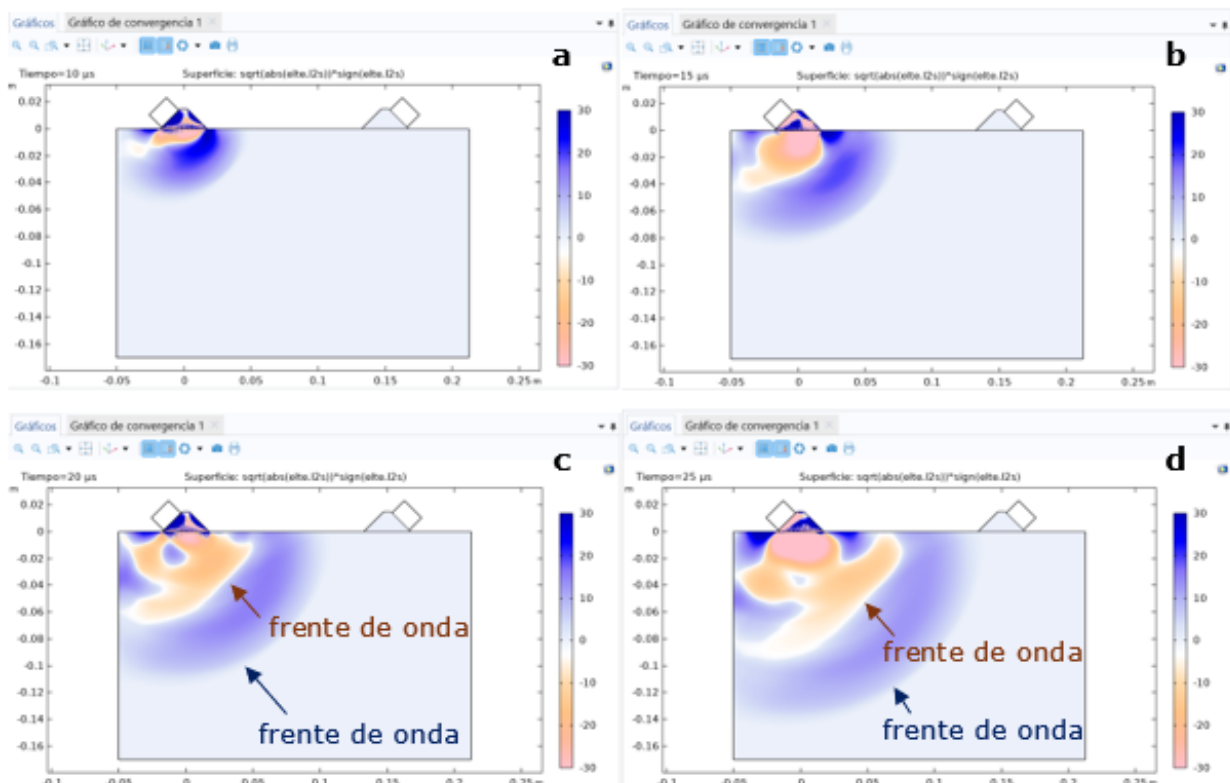
Para realizar este análisis, la distancia de separación entre transductores se fijó en 15 cm, con el objetivo de evitar las distorsiones en la propagación observadas para los tramos de separación de 5-10 cm entre transductores (ver apartado 5.2.1.1).

Así, seguidamente, se presentan las imágenes instantáneas de los momentos captados en la evolución temporal de la propagación de ondas ultrasónicas en la muestra modelada durante la simulación, correspondientes a los instantes de 10,

15, 20, 25 y 30 μs , respectivamente. En esta presentación de imágenes se busca distinguir, según la gama de colores, los diferentes tipos de ondas ultrasónicas que entran en juego durante el ensayo: En tonos azulados aparecen las ondas primarias, de compresión o longitudinales, mientras que, en tonos más bien anaranjados aparecerán representadas las ondas secundarias o transversales.

En la Figura 165(a) y la Figura 165(b), puede observarse la formación de las ondas longitudinales (primarias), seguido de las transversales (secundarias) pero, es en las siguientes imágenes, Figura 165(c) y Figura 165(d), donde empieza a apreciarse con mayor claridad los frentes de onda de ambos tipos de onda bien formados y diferenciados entre sí.

En la Figura 165(e), correspondiente al instante de 30 μs , se intuye la propagación de las ondas superficiales (de tipo Rayleigh) en la parte superior de la muestra, siendo identificables por tener un color azulado de una tonalidad más oscura que la presentada por las ondas longitudinales.



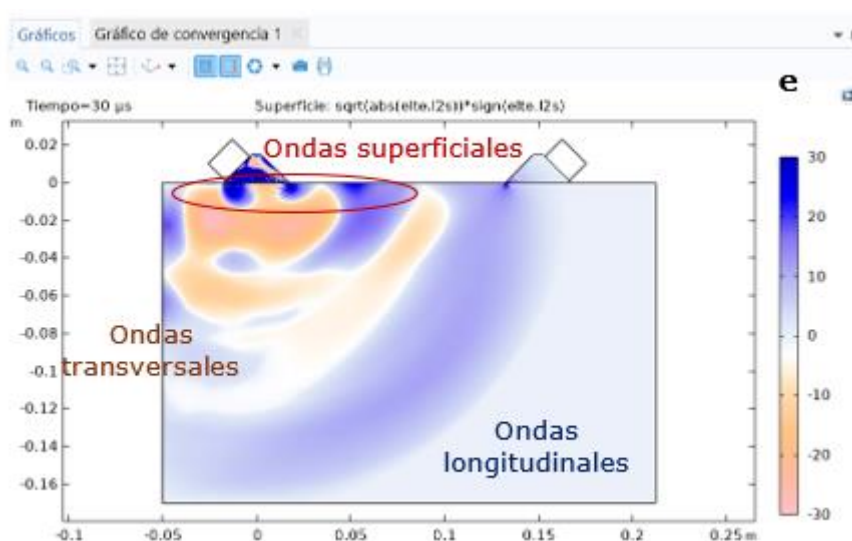


Figura 165. Simulación de ondas ultrasónicas para una configuración con distancia de 15 cm entre transductores e instantes de tiempos de vuelo de 10 μ s (a), 15 μ s (b), (20 μ s), 25 (μ s) y 30 (μ s).

Cabe referir que, como bien se expuso en el apartado 2.8.3, en referencia a los diferentes tipos de ondas ultrasónicas, sus formas de propagación y velocidades; queda demostrado que las ondas longitudinales se desplazan a mayor velocidad que las transversales y que las superficiales, respectivamente y en ese orden, así como las direcciones y sentidos de movimiento de cada tipo de onda ultrasónica.

5.2.1.3 Influencia que tiene el espesor de la viga

Debido a que el canto de la viga influye en la distancia recorrida por el frente de onda de las ondas longitudinales, en este apartado se trata de valorar la influencia de dicho parámetro reduciendo el espesor de las vigas ensayadas, habitualmente de 17 cm, a 4 cm de canto.

A modo ilustrativo, se muestran cuatro imágenes instantáneas del recorrido que describen las ondas desde su salida del transductor emisor hasta su llegada al receptor Figura 166(d). Puede visualizarse el instante en que el frente de onda alcanza el fondo de la muestra Figura 166(a), su rebote Figura 166(b) y la propagación de la onda a lo largo de la muestra Figura 166(c).

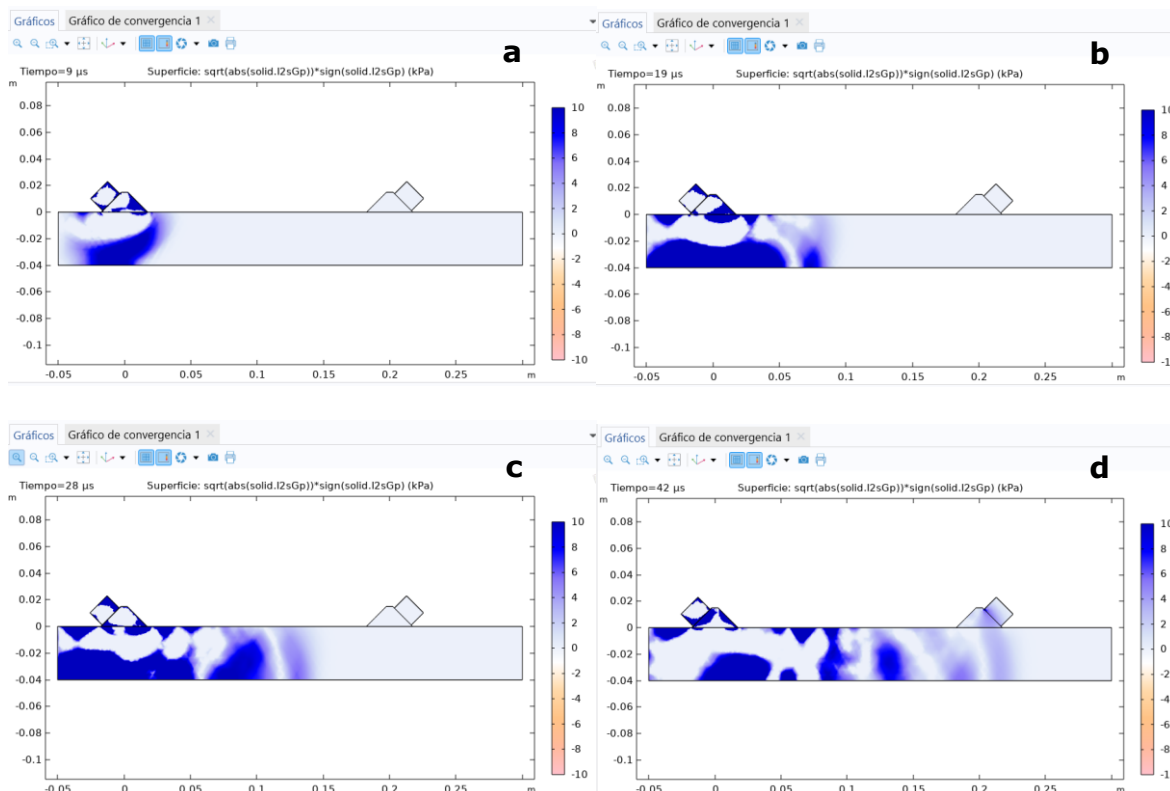


Figura 166. Simulación de ondas ultrasónicas en una viga muestra de 4 cm de espesor con una distancia de separación entre transductores de 10 cm.

Como puede apreciarse en la Figura 166, el hecho de reducir el espesor tiene como resultado que las ondas longitudinales lleguen antes al fondo, desplazándose más rápido y llegando antes al receptor que si la distancia entre transductores fuera la misma, pero con espesores mayores, aunque no sin generar numerosos rebotes a lo largo de su desplazamiento en el interior de la viga.

5.3 Acondicionamiento higrotérmico y tendencia al equilibrio higroscópico (HEH)

Como hemos visto al finalizar la Fase 3 referente al acondicionamiento higrotérmico de las vigas de madera encolada, los resultados que se obtuvieron no fueron lo que se esperaban desde un inicio. Pareciera haberse llegado a un punto en el que las vigas tienden a un equilibrio higroscópico (HEH) alrededor del 17,0%-17,5%, alejado del 12% de contenido de humedad en la madera que se esperaba en base al ábaco de Kollmann.

Esto pudiera deberse a que dicho ábaco, planteado para las diferentes especies de madera, originalmente no contemplaba su aplicación sobre madera que no fuera maciza aserrada. Kollmann realizó sus estudios sobre maderas macizas aserradas directamente del tronco y libres de adhesivos, con el objetivo de otorgar a carpinteros, arquitectos e ingenieros una herramienta con la que poder predecir el movimiento de estas maderas en servicio, según variara la humedad ambiental, pero, al centrarse en los defectos naturales en la madera aserrada, no llegó a integrar variantes con madera laminada y adhesivos.

Por otra parte, los valores calculados para las variaciones de peso en las vigas, consecuencia del intercambio de humedad con el entorno parecen no tener una correspondencia directa con los valores registrados de las variaciones en el contenido de humedad de las vigas de madera encolada, Tabla 23. Pese a que hay una tendencia general a experimentar un incremento de peso a medida que la variación de humedad aumenta, Figura 167, no crecen o disminuyen en la misma proporción en todos los casos por igual. Ello apunta a que, además de haber intercambios de humedad con el entorno, es posible que haya redistribuciones de agua en el interior de las propias vigas. Se produciría, por una parte, un intercambio de humedad entre las láminas más externas y el entorno (en nuestro caso aumentando el contenido de humedad) y, por otra, una redistribución de humedad en las láminas internas de las vigas (manteniéndose este otro peso en contenido de humedad).

Para completar lo expuesto, se exponen los factores que podrían explicar esta diferencia entre los valores alcanzados durante el tiempo de acondicionamiento de las vigas dentro de la cámara climática en contraposición con lo esperado según

el ábaco de Kollmann. Estos factores pueden clasificarse entre factores internos de las propias vigas, y factores externos y experimentales.

Tabla 23. Variación del contenido de humedad y del peso de las probetas desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición.

Especie	Tratamiento	Sana/Sumergida	Clase resistente	Cód.	Δ humedad (%)	Δ peso (g)
Pino silvestre	Sin tratamiento	Sanas	GL18	D066	+0,93	+50
			GL24	D071	+0,66	+20
			GL28	D079	+0,59	+50
		Sumergidas	GL18	D064	+0,57	+50
			GL24	D070	+0,22	+30
			GL28	D076	+0,74	+25
	Tanalizado	Sanas	GL18	D037	+1,08	+50
			GL24	D023	+0,87	+50
			GL28	D031	+1,03	+30
		Sumergidas	GL18	D035	+0,70	+50
			GL24	D024	+0,51	0
			GL28	D029	+0,51	+25
Abeto	-	Sanas	GL18	D047	+1,44	+50
			GL24	D051	+1,24	+50
			GL28	D059	+0,91	+50
		Sumergidas	GL18	D042	+1,26	+100
			GL24	D050	+0,80	+50
			GL28	D058	+0,90	+50

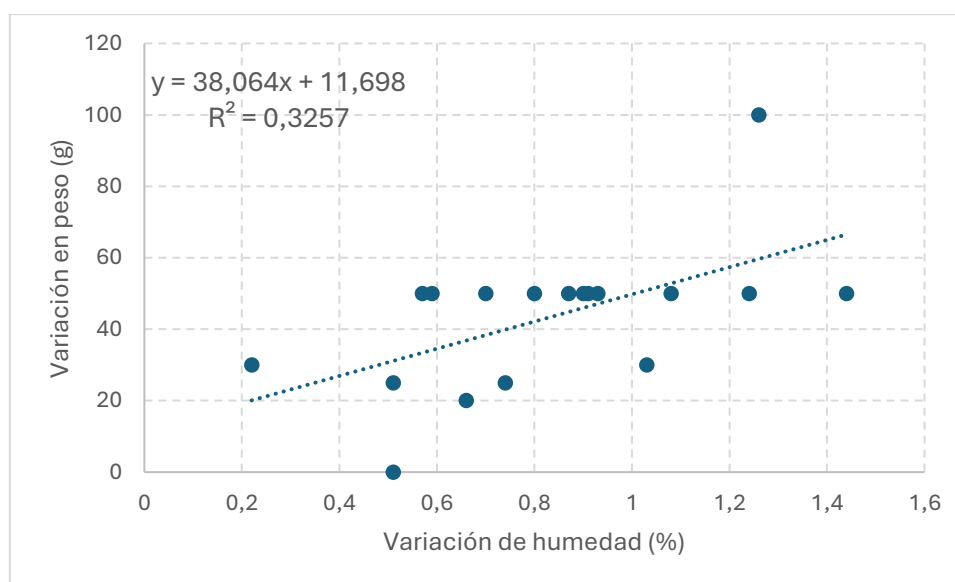


Figura 167. Relación entre la variación del contenido de humedad y del peso de las probetas desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición.

Factores internos de las vigas de madera encolada

1. Gradientes iniciales de humedad en el proceso de fabricación: al no tratarse de vigas de madera aserrada, si no de vigas de madera encolada, en el proceso de fabricación, las láminas que conforman dichas vigas pueden tener ligeras diferencias de humedad entre sí al ser encoladas, lo que puede generar que tanto los gradientes de humedad como la humedad promedio de la viga laminada encolada queden desplazados respecto a los valores teóricos.
2. Espesor y composición de las láminas de madera: al estar en contacto con la circulación de aire, las láminas externas de las vigas GLULAM responden más rápido a las condiciones ambientales que las láminas internas, realizando las láminas superficiales el intercambio de humedad con el entorno mucho antes que las láminas situadas en el núcleo de la viga.
3. Efecto de los adhesivos: según el tipo de adhesivo empleado para la unión entre las láminas de las vigas GLULAM, la difusión del vapor¹⁸ puede verse obstaculizada en mayor o menor medida. Profundizando un poco más en este punto, se observa que la influencia de los adhesivos en la difusión de vapor de agua supone un aspecto clave en la comprensión de las diferencias higroscópicas observadas entre la madera aserrada y la madera encolada. Diversos estudios han demostrado que el uso de adhesivos introduce discontinuidades que pueden actuar como membranas o barreras parciales en el intercambio de humedad, modificando el equilibrio alcanzado para piezas de madera aserradas de las mismas especies.

En Mannes et al. (2014), mediante el uso de técnicas avanzadas de radiografía de neutrones, se observa que los "glutin-based wood adhesives"¹⁹ históricamente empleados modifican significativamente la difusión de vapor en las juntas encoladas, reduciendo la tasa de sorción y redistribuyendo el gradiente de humedad en la madera.

¹⁸ Difusión de vapor de agua: es el movimiento de las moléculas de agua en estado gaseoso a través de un material sólido poroso, impulsado por una diferencia de presión de vapor entre dos zonas.

¹⁹ Adhesivos para madera los cuales están conformados a base de gluten como componente principal o aglutinante (que proporciona las propiedades adhesivas naturales para unir piezas de madera).

En Zinad, O. & Csiha, C. (2024), se han recopilado una revisión sistemática de evidencias que confirman que distintos tipos de adhesivos modernos empleados en productos como son la madera laminada cruzada o contralaminada (CLT), muy semejante a la madera laminada encolada (GLULAM), presentan comportamientos variables frente al paso del vapor. Esto contribuye a explicar por qué el contenido de humedad de estos materiales puede apartarse de las predicciones que se obtienen en base al uso de modelos clásicos como el ábaco de Kollmann.

Factores externos y experimentales

1. Tiempo de exposición en la cámara climática: tiempo al que nos referimos también como tiempo o período de acondicionamiento higrotérmico de la madera y que comprende desde que se introducen las piezas de madera en la cámara climática hasta que estas alcanzan el equilibrio higroscópico. El equilibrio higroscópico no es instantáneo; para piezas de grandes secciones o espesores puede tardar meses o incluso años en completarse el proceso de acondicionamiento. **Es posible que las vigas de este proyecto aún estén en proceso de ajuste higroscópico.**
2. Aparición de bolsas de vapor de humedad y/o microclimas en la cámara: aunque se fijaron los parámetros en 20°C y 65% HR, podrían existir pequeñas fluctuaciones locales de temperatura o humedad relativa en zonas concretas de la cámara climática (cerca de los ventiladores, paredes, suelos; zonas no uniformes o más alejadas de los aparatos de medida que controlan las condiciones internas de la cámara), lo que podría elevar el punto de equilibrio higroscópico.

Esta hipótesis se comprobó utilizando para ello un dispositivo de registro de parámetros higrotérmicos en la cámara climática: el Datalogger de temperatura y humedad: Testo 175 H1

Con este instrumento se realizaron dos pruebas:

- En primer lugar, aunque durante la instalación de la cámara climática, la empresa instaladora ya realizó las verificaciones pertinentes y emitió su certificado de conformidad, se comprobaron las condiciones de temperatura y humedad relativa en varios puntos del interior de la cámara climática, cotejando estos valores con los mostrados en el panel

de mando exterior (valores que registran los aparatos de medida de la instalación de la cámara climática).

Se presenta un esquema ilustrativo de las posiciones en las cuales se realizaron medidas con el instrumento Testo 175 H1, ver Figura 168, y, sobre el mismo, se muestran los valores medidos para cada posición. En los instantes para los cuales se realizó este registro de valores, figuraban en las pantallas del panel de mando externo los valores de 61,0% de humedad relativa y 19,1°C de temperatura. Esto permite entrever que podría haber un pequeño desajuste entre los valores reales de las condiciones higrotérmicas de la atmósfera interna de la cámara climática y los valores mostrados por pantalla en el panel de mando exterior. Si nos ajustamos estrictamente a las medidas registradas en el interior de la cámara, las condiciones de la atmósfera interior parecen uniformes, por lo que podrían descartarse la aparición de microclimas o formación de bolsas de vapor de agua en el interior de la cámara climática. Además, estos valores, se ajustan bastante a los parámetros de temperatura y humedad fijados en el panel de mando exterior (20°C y 65% HR).

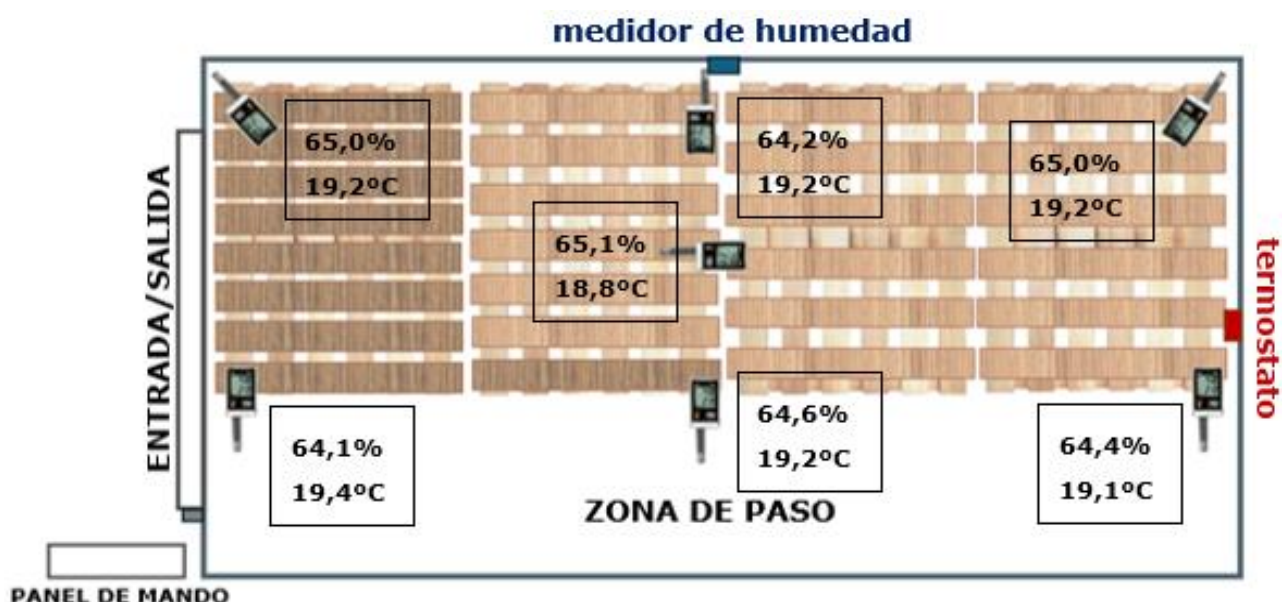


Figura 168. Posiciones de colocación del Testo 175 H1 en el interior de la cámara climática.

Posteriormente, se dejó el dispositivo Testo 175 H1 colocado sobre las vigas de madera, en la zona central de la cámara climática, registrando los valores de la atmósfera interior, ya que en el panel de mando sólo aparecen valores instantáneos. Los valores registrados pueden observarse en la Figura 169 y la Figura 170.

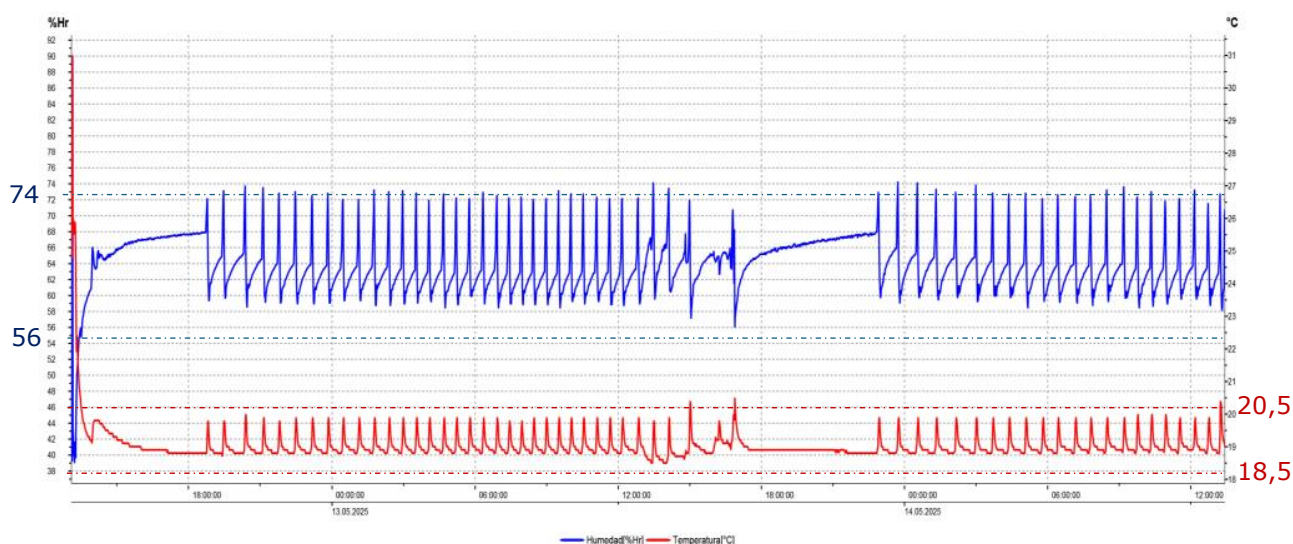


Figura 169. Registro de datos Testo 175 H1 del 12/05/2025 al 14/05/2025.

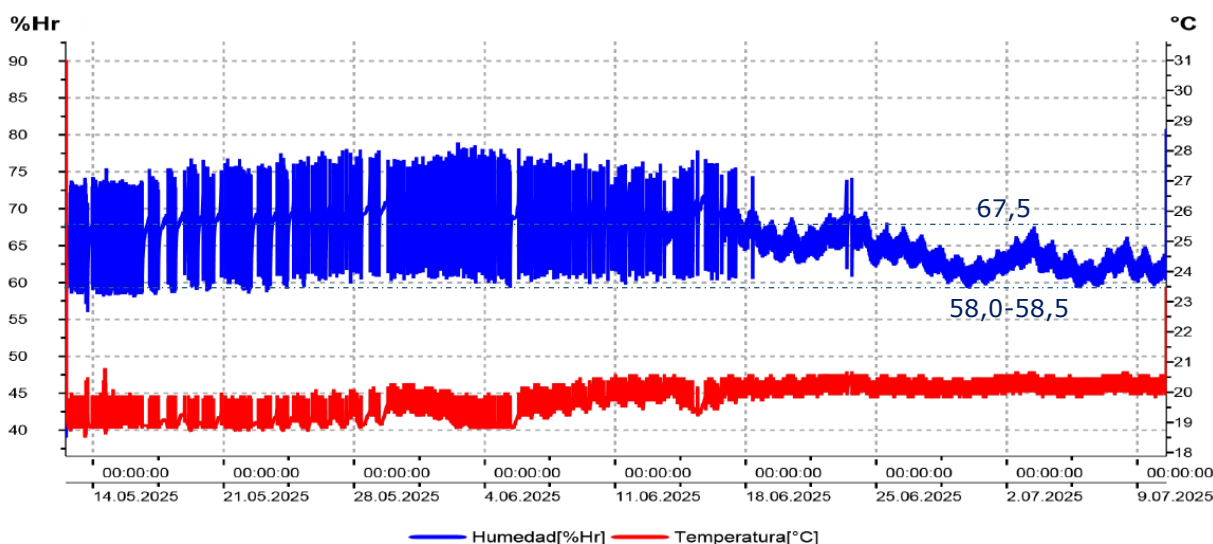


Figura 170. Registro de datos Testo 175 H1 del 12/05/2025 al 10/07/2025.

Como puede apreciarse, los parámetros registrados no son estables, sino que sufren oscilaciones tanto en temperatura como en humedad relativa lo que provoca la constante activación y desactivación de los sistemas de calentamiento-enfriamiento (evaporador de doble flujo con calentadores de aletas cuadradas, Figura 84) y humidificación-

deshumidificación, Figura 85(c), para equilibrar la atmósfera hasta los parámetros higrotérmicos establecidos, lo que también intensifica la acción y efecto de la histéresis²⁰ en la madera. Gráficamente parece que, a medida que pasa el tiempo, estas oscilaciones van disminuyendo su amplitud, ver Figura 170.

3. Efecto del recubrimiento superficial: en casos en los que la madera haya recibido algún tratamiento protector (sellado, barniz, retardante de fuego, etc.), la película protectora formada podría estar ralentizando la desorción (secado) e incluso reteniendo más humedad. En el caso que nos ocupa, las vigas ensayadas no sufrieron tratamiento superficial salvo las de pino silvestre tanalizado.

Factores teórico-metodológicos

1. Limitación del modelo propuesto por Kollmann: como se comentó anteriormente, el ábaco de Kollmann fue desarrollado empíricamente para madera aserrada y sin encolar; por tanto, no contempla particularidades propias de materiales compuestos derivados de la madera.
2. Especie de madera utilizada en las láminas: el ábaco de Kollman presenta valores medios pero distintas especies pueden presentar ligeras variaciones y desviaciones respecto a la curva general. Hay propiedades de la madera como la densidad, porosidad, proporción de madera temprana/tardía que no sólo depende de la especie de madera sino también de la zona y las condiciones de crecimiento a las que haya estado sometidos los árboles de los que se han extraído las maderas.
3. Método de medición del contenido de humedad de la madera: hay métodos, como el resistivo/capacitivo, basados en resistencias eléctricas como el xilohigrómetro usado en este proyecto, que pueden sobreestimar el porcentaje de humedad en maderas encoladas debido a las interfases entre láminas. Una opción más fiable, aunque a su vez destructiva, es el método de secado en horno/estufa (UNE-EN 13183-1:2002), proceso consistente

²⁰ Histéresis en la madera se refiere a la humedad que la madera absorbe (sorción) y libera (desorción) en comparación con la humedad ambiente. Cuando un material higroscópico como la madera se expone a un ciclo de humedad, no vuelve al mismo estado de humedad al pasar del aire húmedo al seco y viceversa.

en calentar la madera hasta que alcance un peso constante. La pérdida de humedad puede cuantificarse comparando el peso de la madera antes de aplicar el procedimiento con el peso de la madera después del secado (SKZ Industrial, 2025).

5.4 Estudio de la afección a la velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas de la inmersión prolongada a la que fueron sometidas las vigas sumergidas

Con base en los ensayos realizados y con vista de atender el objetivo específico nº 6, es decir, estudiar si la inmersión prolongada de las vigas que fueron sumergidas ha podido afectar a la velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas, en lo que sigue se realiza una **comparación de velocidades de transmisión/propagación de ondas ultrasónicas según especie de madera**.

Para ello, se muestra una representación gráfica de las velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas obtenidas para cada una de las vigas de madera estudiadas en la Fase 2 mediante los ensayos por ultrasonidos, pero esta vez, agrupadas por especies y en grupos de vigas sanas y vigas sumergidas para poder realizar un análisis comparativo de los datos obtenidos.

Es importante anotar que, debido a la naturaleza del material de ensayo de este proyecto estudiado para esta fase (una viga de cada especie con y sin tratamiento, sana y sumergida; una clase resistente para cada caso, tres clases resistentes en total), la muestra solo sirve para hacer comparaciones individuales a nivel de agrupación y no podría aplicarse a buscar generalidades en vigas de madera encolada, para lo cual se necesitaría analizar una muestra mucho mayor.

Cabe resaltar que las velocidades presentadas en las gráficas han sido corregidas al 12% de contenido de humedad utilizando el método de Steiger (1995).

5.4.1 Velocidad de propagación en vigas de pino silvestre sin tratamiento

Vigas sanas

En la Figura 171 se representan las velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sanas de madera de pino silvestre sin tratamiento de diferente clase resistente. En promedio, se obtienen unas velocidades de 4969,67 m/s para GL18 (D066), 5501,35 m/s para GL24 (D071), y 5181,12 m/s para GL28 (D079). Se aprecia que la probeta correspondiente la clase resistente GL24 alcanza mayor velocidad, seguida de la de clase resistente GL28, y con menor velocidad la correspondiente a la CL18, seguramente por el mayor número de defectos e irregularidades que presenta la madera de esta clase resistente.

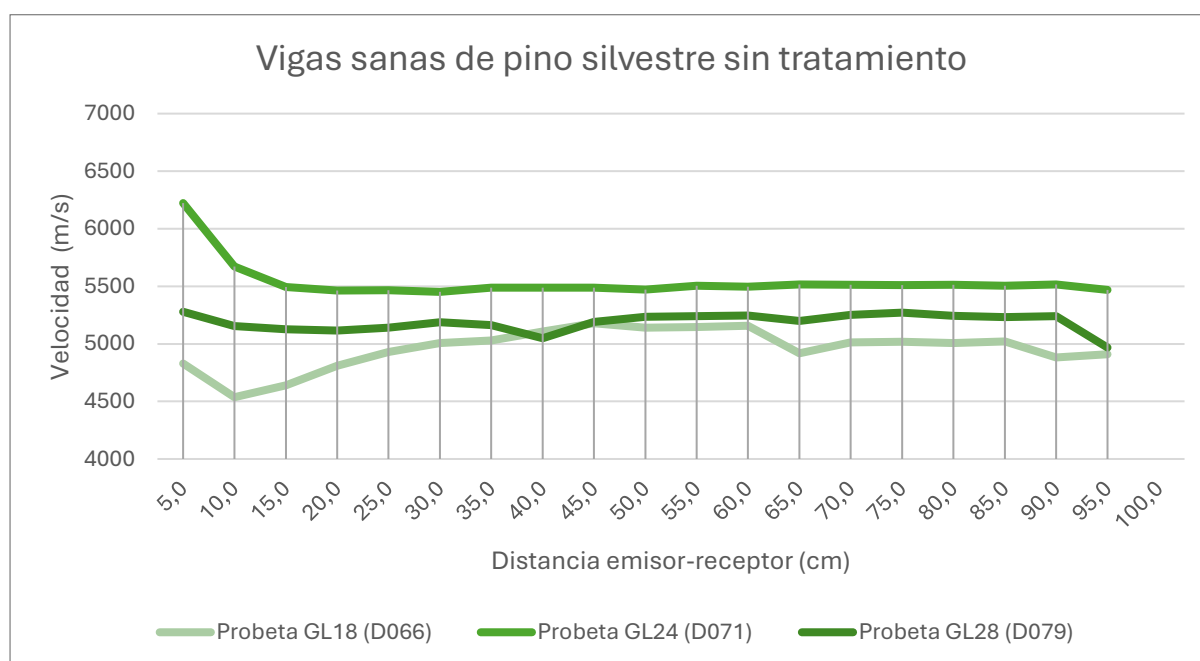


Figura 171. Comparación de velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sanas de madera de pino silvestre sin tratamiento de diferente clase resistente.

Vigas sumergidas

En la Figura 172 se representan las velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sumergidas de madera de pino silvestre sin tratamiento de diferente clase resistente. En promedio, se obtienen unas velocidades de 4982,91 m/s en D070 (GL24), 4874,77 m/s en D064 (GL18) y 4812,99 m/s (GL28).

Si comparamos por pares los valores de velocidades promedio de las vigas sanas con los de las vigas sumergidas, en función de su clase resistente, en las vigas sumergidas de pino silvestre sin tratamiento se han experimentado los siguientes decrementos en comparación con las velocidades calculadas en las vigas sanas: (GL18) 94,9 m/s; (GL24) 518,44 m/s; (GL28) 368,13 m/s.

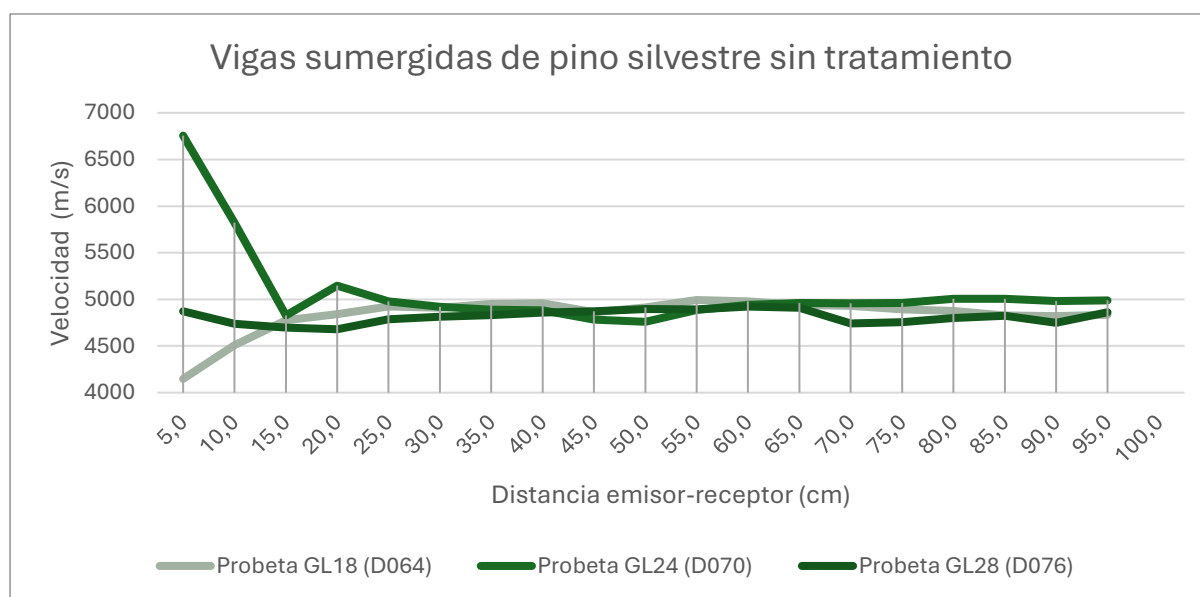


Figura 172. Comparación de velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sumergidas de madera de pino silvestre sin tratamiento de diferente clase resistente.

5.4.2 Velocidad de propagación en vigas de pino silvestre tanalizado

Vigas sanas

En la Figura 173 se representan las velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sanas de madera de pino silvestre tanalizado de diferente clase resistente. En promedio, se obtienen unas velocidades de 6206,34 m/s en D023 (GL24); 5670,69 m/s en D031 (GL28); y, 5188,17 m/s en D037 (GL18).

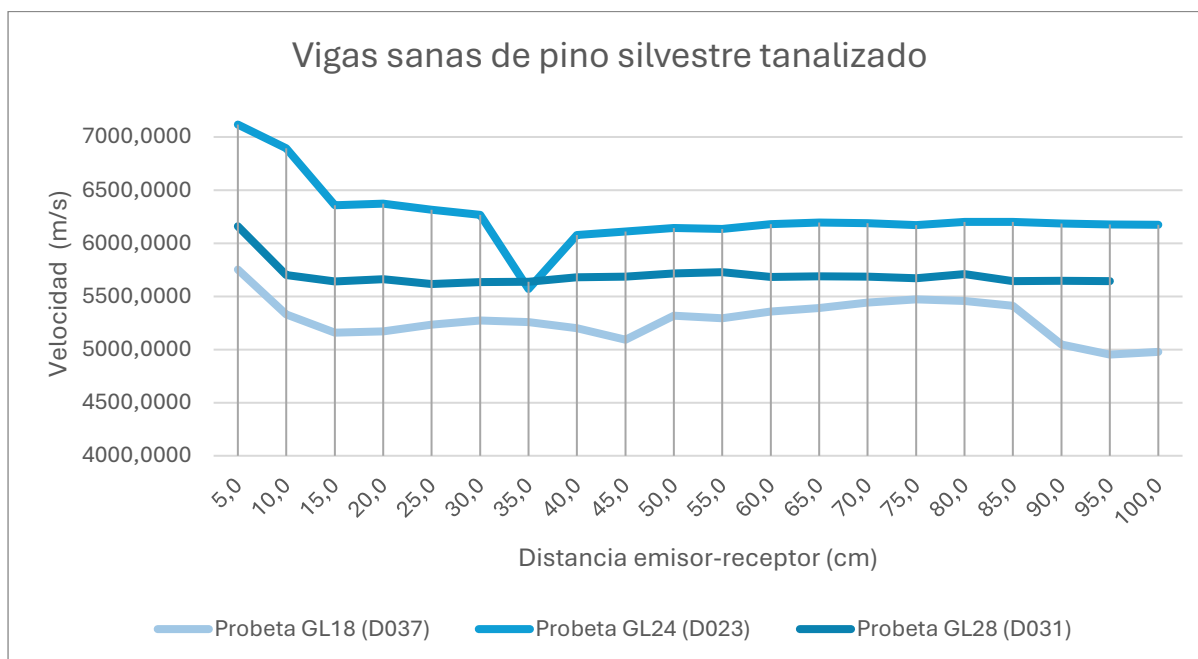


Figura 173. Comparación de velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sanas de madera de pino silvestre tanalizado de diferente clase resistente.

Vigas sumergidas

En la Figura 174 se representan las velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sumergidas de madera de pino silvestre tanalizado de diferente clase resistente. En promedio, se obtienen unas velocidades de 6279,65 m/s en D029 (GL28); 5881,89 m/s en D024 (GL24); y, 4569,11 m/s en D035 (GL18).

En las vigas de pino silvestre, tanto tanalizado como sin tratamiento, puede observarse una tendencia a que las velocidades de propagación más bajas se den en las vigas de clase resistente GL18.

Si volvemos a realizar una comparación de los valores de velocidades promedio de las vigas sanas con los de las vigas sumergidas, en función de su clase resistente, en las vigas sumergidas de pino silvestre tanalizado se han experimentado los siguientes decrementos en comparación con las velocidades calculadas en las vigas sanas: (GL18) 619,06 m/s; (GL24) 324,45 m/s; (GL28) - 608,96 m/s, en este caso es un incremento.

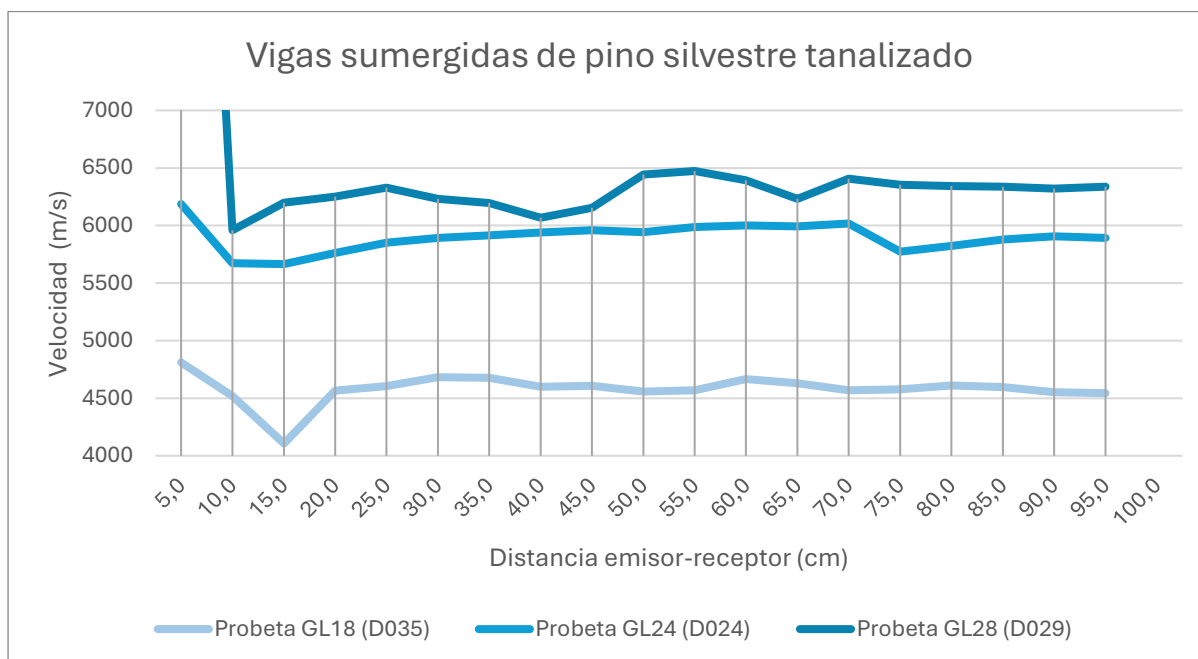


Figura 174. Comparación de velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sumergidas de madera de pino silvestre tanalizado de diferente clase resistente.

5.4.3 Velocidad de propagación en vigas de abeto

Vigas sanas

En la Figura 175 se representan las velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sanas de madera de abeto de diferente clase resistente. En promedio, se obtienen unas velocidades de 5722,85 m/s en D059 (GL28); 5538,34 m/s en D047 (GL18); y, 5273,24 m/s en D051 (GL24), ordenadas de mayor a menor.

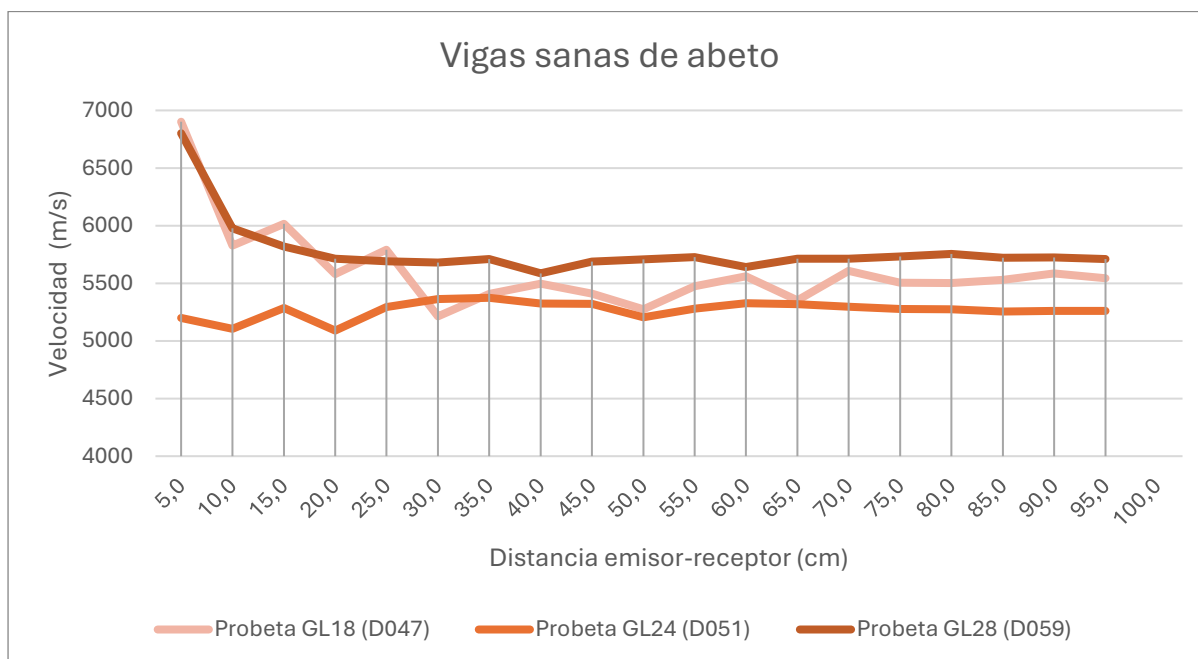


Figura 175. Comparación de velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sanas de madera de abeto de diferente clase resistente.

Vigas sumergidas

Por último, en la Figura 176 se representan las velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sumergidas de madera de abeto de diferente clase resistente. En promedio, se obtienen unas velocidades de 5496,78 m/s en D058 (GL28); 5205,35 m/s en D042 (GL18); y, 5141,43 m/s en (GL24).

En el caso de las vigas de abeto, al realizar la comparación de los valores de velocidades promedio de las vigas sanas con los de las vigas sumergidas, en función de su clase resistente, en las vigas sumergidas abeto se han experimentado los siguientes decrementos en comparación con las velocidades calculadas en las vigas sanas: (GL18) 332,99 m/s; (GL24) 131,81 m/s; (GL28) 226,07 m/s, en este caso es un incremento.

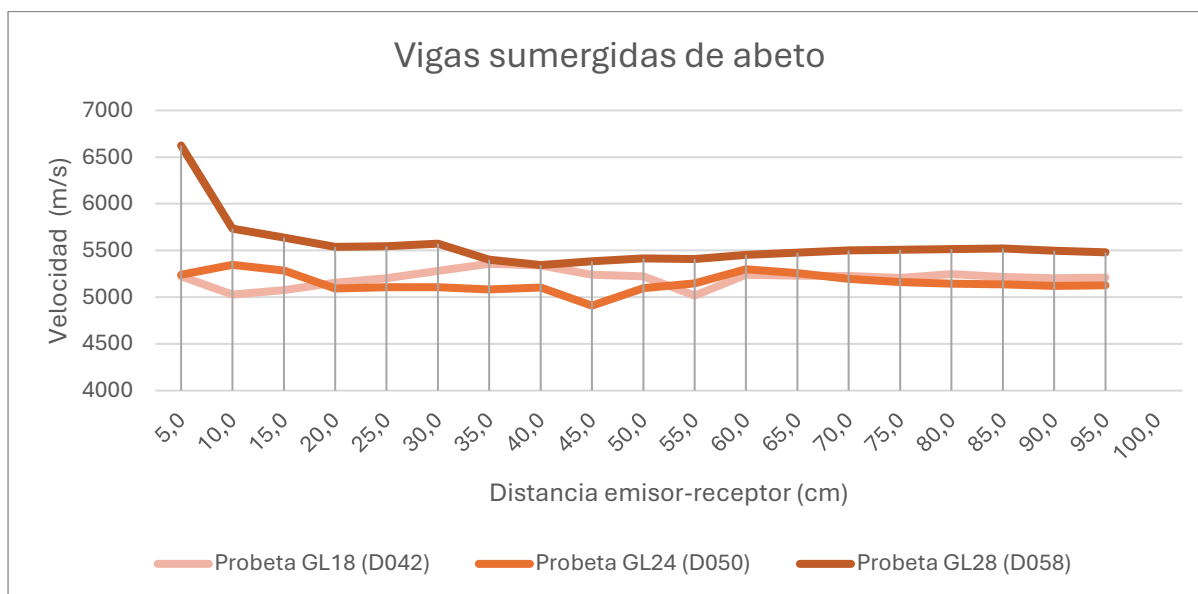


Figura 176. Comparación de velocidades de propagación de onda ultrasónica en vigas sumergidas de madera de abeto de diferente clase resistente.

Como puede observarse, **en general, las vigas sumergidas han experimentado una caída en las velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas con respecto a las vigas sanas de madera laminada encolada**, por lo que, respondiendo al último objetivo específico de estudio de este proyecto, podría afirmarse que la inmersión prolongada de vigas de madera encolada ha podido afectar a su velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas.

5.5 Análisis de la influencia del tratamiento de tanalizado en la velocidad de transmisión de la onda ultrasónica

Finalmente, con el objetivo de estudiar si el tratamiento de tanalizado tiene algún tipo de influencia en la velocidad de transmisión de la madera de pino silvestre (objetivo específico nº 5) se plantea la

Tabla 24 en la que se presentan las velocidades de propagación promedio de las ondas ultrasónicas.

Tabla 24. Velocidades de propagación promedio para vigas de madera laminada encolada de madera de pino silvestre con y sin tanalizado.

Pino silvestre sin tratamiento		Pino silvestre tanalizado	
sanas	sumergidas	sanas	sumergidas
D066 (GL18)	D064 (GL18)	D037 (GL18)	D035 (GL18)
4969,67 m/s	4874,77 m/s	5188,17 m/s	4569,11 m/s
D071 (GL24)	D070 (GL24)	D023 (GL24)	D024 (GL24)
5501,35 m/s	4982,91 m/s	6206,34 m/s	5881,89 m/s
D079 (GL28)	D076 (GL28)	D031 (GL28)	D029 (GL28)
5181,12 m/s	4812,99 m/s	5670,69 m/s	6279,65 m/s

En este caso, la comparación por pares se realizará según su estado (sanas o sumergidas) y clase resistente (GL18, GL24 o GL28). De esta forma, los pares y sus diferencias quedarán de la siguiente manera:

Vigas sanas

- (GL18) D066-D037: $\Delta v = 218,50 \text{ m/s}$
- (GL24) D071-D023: $\Delta v = 704,99 \text{ m/s}$
- (GL28) D079-D031: $\Delta v = 489,57 \text{ m/s}$

Vigas sumergidas

- (GL18) D064-D035: $\Delta v = -305,66 \text{ m/s}$
- (GL24) D070-D024: $\Delta v = 898,98 \text{ m/s}$
- (GL28) D076-D029: $\Delta v = 1466,66 \text{ m/s}$

Según los resultados obtenidos y la comparación por pares realizada, parece que **el tratamiento de tanalizado tiene influencia sobre la velocidad de propagación ultrasónica**, desplazándose las ondas, en general, más rápido en aquellas vigas de pino silvestre que recibieron el tratamiento de tanalizado que en las vigas de pino silvestre que carecen del mismo. Este efecto, se hace incluso más notorio en las vigas sumergidas del proyecto; es decir, aquellas que se habían sometido a un largo período de inmersión en un tanque de agua.

6 CONCLUSIONES

6.1 Detección y localización de defectos

Se ha validado la eficacia del método de ensayo y del equipo de ultrasonidos empleado para la detección y localización de defectos superficiales en las capas externas de vigas de madera laminada encolada, confirmando la correspondencia entre las anomalías identificadas mediante inspección visual y las registradas gráficamente por ultrasonidos, lo que evidencia la capacidad del sistema para identificar con precisión la posición de dichos defectos en las primeras capas del material.

Ahora bien, como se ha visto durante la campaña experimental hay diversos factores a tener en cuenta:

- Las velocidades de propagación de ondas ultrasónicas corregidas al 12% del contenido de humedad por métodos diferentes como son el de Sandoz (1993) y Steiger (1995) arrojan resultados muy similares.
- Para distancias de separación entre transductores estimadas entre 5 y 15 cm puede haber interferencias no deseadas que camuflen la detección de defectos en estos tramos de las vigas y puedan empañar los resultados obtenidos mediante el ensayo de ultrasonidos, siendo necesaria una inspección visual para cotejar y comprobar la veracidad de los mismos, lo que sólo sería efectivo en caso de defectos superficiales.
- El análisis numérico mediante simulación con software no se puede aseverar que arroje resultados concluyentes que verifiquen la hipótesis planteada por lo que requiere, cuanto menos, un estudio más profundo y amplio.
- Cuando los defectos se presentan alejados de la alineación definida por los transductores, si su tamaño es pequeño (unos 15 mm o menor) su presencia puede no afectar a la propagación de la onda ultrasónica y, por consiguiente, la gráfica de velocidades no presentaría alteraciones o picos, no pudiendo detectar dichas anomalías.
- Los defectos de tamaño grande pueden enmascarar la presencia de defectos de menor tamaño en caso de situarse próximos entre sí.

- Las coloraciones no se detectan gráficamente mediante el ensayo de ultrasonidos, es necesaria una inspección visual de la superficie de la viga afectada. No obstante, en principio, dichas coloraciones no suponen peligro alguno para la madera (salvo que pueda deberse a la acción biótica por hongos xilófagos, aspecto que no ha sido estudiado en el presente proyecto).

6.2 Acondicionamiento higrotérmico

Las diferencias observadas entre el contenido de humedad en equilibrio higroscópico (HEH) medido experimentalmente en las vigas de madera encolada y los valores teóricos estimados mediante el uso del ábaco de Kollmann pueden explicarse por una combinación de factores tanto internos como externos.

Entre ellos cabe destacar, por un lado, la propia naturaleza la madera laminada encolada, en la que la presencia de adhesivos puede alterar la difusión de vapor y modificar los tiempos de sorción y desorción de humedad de la madera; y, por otro, las variaciones inherentes al material base (la propia madera), como diferencias en la densidad, orientación de la fibras u homogeneidad de las láminas.

A estos aspectos se suman influencias derivadas de las condiciones experimentales del proceso de acondicionamiento, tales como fluctuaciones no registradas en el microclima de la atmósfera interna de la cámara climática, la duración de la exposición o la historia higrotérmica previa experimentada por las vigas.

Todo ello, pone de manifiesto que el comportamiento higroscópico de la madera laminada no responde de manera estricta a los modelos simplificados de la madera maciza aserrada; en consecuencia, resulta imprescindible interpretar los valores experimentales con cautela y enmarcarlos en un análisis comparativo más amplio con respecto a las referencias bibliográficas tradicionales.

6.3 Afección a la velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas por la inmersión prolongada

Se ha comprobado que, en general, las vigas sumergidas han experimentado una caída en las velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas con respecto a las vigas sanas de madera laminada encolada, por lo que, respondiendo al último objetivo específico de estudio de este proyecto, podría afirmarse que la inmersión prolongada de vigas de madera encolada ha podido afectar a su velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas.

6.4 Análisis la influencia del tratamiento de tanalizado en la velocidad de transmisión de la onda ultrasónica

Según los resultados obtenidos, parece que el tratamiento de tanalizado tiene influencia sobre la velocidad de propagación ultrasónica, desplazándose las ondas, en general, más rápido en aquellas vigas de pino silvestre que recibieron el tratamiento de tanalizado que en las vigas de pino silvestre que carecen del mismo. Este efecto, se hace incluso más notorio en las vigas sumergidas del proyecto; es decir, aquellas que se habían sometido a un largo período de inmersión en un tanque de agua.

6.5 Trabajos futuros

Para seguir en esta línea de estudio, se propone realizar ensayos de ultrasonidos sobre las mismas vigas utilizadas en este proyecto, con el objetivo de comprobar si los agujeros que dejaron los clavos del xilohigrómetro durante las múltiples medidas de humedad han podido dar lugar a un “defecto” detectable gráficamente.

Por otra parte, se propone realizar o simular ataques bióticos²¹ controlados sobre zonas concretas de las vigas de madera, utilizando organismos xilófagos vivos o, en su defecto, algún tipo de alteración mecánica o producto químico que pueda

²¹ Ataque biótico: interacción negativa entre organismos vivos donde uno de ellos causa enfermedad o daño al otro.

simular su acción, para posteriormente hacer uso de equipos de ultrasonidos y evaluar si dichos equipos son capaces de detectar los defectos generados y en qué medida.

Continuar con la simulación numérica, considerando modelos ortótropos más sofisticados que asemejen más las muestras modeladas a las muestras reales.

Por último, se propone investigar con base a un equipo que esté más en la línea de los equipos utilizados en soldadura; un equipo que vaya más allá y no sólo detecte la presencia de defectos sino con el que también se pueda evaluarlos: de qué tamaño es el defecto, a qué profundidad se encuentra, etc. Técnicas como el impacto-eco o el georradar podrían dar información en esa dirección. Además, se podría complementar el estudio mediante el corte del material para la posterior comprobación visual directa de los resultados obtenidos mediante las técnicas empleadas.

6.6 Relación del TFG con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La madera laminada encolada se ha consolidado como una alternativa estructural eficiente y sostenible en el ámbito de la construcción moderna. Este material, compuesto por láminas de madera encoladas longitudinalmente, no solo permite crear estructuras de gran resistencia y estabilidad, sino que también contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático, al actuar como sumidero de carbono y requerir menor consumo energético durante su fabricación en comparación con materiales tradicionales como el acero o el hormigón.

El empleo de métodos de evaluación no destructivos, como los tratados en este TFM, para el diagnóstico de estructuras de madera laminada representa un enfoque alineado con la sostenibilidad, al permitir la inspección y el mantenimiento de construcciones sin comprometer su integridad física. Estos métodos reducen los residuos y prolongan la vida útil de las construcciones, lo cual contribuye a una gestión más eficiente de los recursos naturales.

La integración del uso de madera laminada encolada y las tecnologías de diagnóstico no destructivo se vincula directamente con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre los que destacan, Figura 177:

- **ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura):** Promueve infraestructuras resilientes y sostenibles mediante el uso de materiales innovadores y tecnologías avanzadas de mantenimiento.
- **ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles):** Fomenta la construcción de edificaciones seguras, accesibles y sostenibles, en consonancia con prácticas de urbanismo ecológico.
- **ODS 12 (Producción y consumo responsables):** Incentiva el uso eficiente de los recursos y la reducción del impacto ambiental en el ciclo de vida de los materiales.
- **ODS 13 (Acción por el clima):** La madera como recurso renovable captura CO₂, y su uso en sustitución de materiales con alta huella de carbono apoya la lucha contra el cambio climático.



Figura 177. Objetivos de Desarrollo Sostenible en los que destaca el empleo de madera laminada.

En conclusión, la aplicación de madera laminada en construcción, complementada con métodos de diagnóstico no destructivos, representa una práctica que no solo responde a los estándares técnicos actuales, sino que además se alinea plenamente con los principios de sostenibilidad promovidos por los ODS, aportando valor tanto ambiental como social y económico.

REFERENCIAS

Acosta, I. (s.f.-a). *¿Cuál es la resistencia a la tracción de la madera?* MADERIA.es <https://maderia.es/cual-es-la-resistencia-a-la-traccion-de-la-madera/>

Acosta, I. (s.f.-b). *¿Cuáles son las propiedades mecánicas de la madera?* MADERIA.es <https://maderia.es/cuales-son-las-propiedades-mecanicas-de-la-madera/>

Aguilar, J. & Guzowski, E. (2011). Madera. *En Capítulo 3 de Materiales y materias primas*. Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica de la República de Argentina. <https://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/madera.pdf>

A&C Diseño Arquitectónico, (22 de marzo de 2022). *Aprendamos sobre materiales – Tipos de madera*. <https://aycdisenoarq.com/tipos-materiales/>

AEIM (s.f.). *Clasificación de las maderas según su dureza*. Asociación Española del Comercio e Industria de la Madera. <https://www.aeim.org/index.php/clasificacion-de-maderas-comerciales-segun-sus-caracteristicas/clasificacion-de-maderas-comerciales-segun-sus-caracteristicas-2/>

AITIM (18 de Julio de 2011). *Información general: Madera Laminada Encolada*. Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera. https://infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_126_Madera%20Laminada%20Encolada_18.07.2011.pdf

Área Tecnología (s.f.). *La madera y propiedades de la madera*. <https://www.areatecnologia.com/materiales/madera.html>

Balmori, J. A., Acuña, L. & Basterra, L. A. (2016). *Estudio de la influencia de la dirección de la fibra en la velocidad de propagación de ultrasonidos (FAKOPP) en madera estructural de "Pinus sylvestris L." y "Pinus Radiata D. Don."* <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/17525>

Boschiero, A. T. (2009). *Caracterização da estrutura anatómica do lenho, dos anéis de crescimento e dos canais de resina de árvores de Pinus caribaea var. Hondurensis Barr. Et. Golf*. [Dissertação para obtenção do título de Mestre em Recursos Florestais, Universidad de São Paulo].

Cáceres, J. M. (s.f.). *Ensayos no destructivos: Ultrasonidos*. [Prácticas de Laboratorio, Ciencia y Tecnología de los Materiales, Universidad de La Laguna]. https://jmcacer.webs.ull.es/CTMat/Practicas%20Laboratorio_archivos/USonidos

Çengel Y., Boles M. & Kanoğlu M. (2015). *Thermodynamics An Engineering Approach (9th edition)*. McGrawHill Education.

Ecoinventos (26 de marzo de 2025). *Investigadores chinos desarrollan método para crear madera con una resistencia ultra alta que podría competir con el metal, sin necesidad de procesos intensivos en energía*. <https://ecoinventos.com/investigadores-chinos-desarrollan-metodo-para-crear-madera-con-una-resistencia-ultra-alta-que-podria-competir-con-el-metal/#comments>

Esteban, M. (2003). *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructura de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.1404>

Estévez, C. (22 de marzo de 2019). *Sándalo, aroma de maderas de la India*. ABANUC. <https://abanuc.com/en/blogs/aromas-de-autor/el-sandalo-aroma-de-maderas-de-la-india>

FAKOPP. (s.f.). *UltraSonic Timer*. <https://fakopp.com/en/product/ultrasonic/>

Fernández-Golfín Seco, J. I. & Conde García, M. (2007). *Manual técnico de secado de maderas*. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho (AITIM).

Fitchen, J. (1986). *Building construction before mechanization*. MIT Press.

Forest Products Laboratory (FPL) (2010). *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*. Forest Service. United States Department of Agriculture.

Forehand, L. (s.f.). History and Properties of Wood and Lumber. *En Building Construction and Materials: An Open Educational Resource Textbook*. Pressbooks. https://lbcc.pressbooks.pub/buildingconstruction/chapter/history-and-properties-of-wood-and-lumber/?utm_source=chatgpt.com

García, D. (2020). *Técnicas de propagación de ondas ultrasónicas aplicadas a estructuras de madera laminada*. [Proyecto de Fin de Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales, Universidad de Cantabria]. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/19498>

Gallardo, V. & Robles, X. (2011). *Determinación experimental del comportamiento higrotérmico de ocho especies de maderas*. [Proyecto de Final de Carrera en Arquitectura Técnica, Universidad Politécnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/13355>

GEMCO Energy (2025). *Requirement On Raw Materials For Making Pellets*. <http://www.gemcopelletmills.com/requirement-on-raw-materials.html>

Geology Science (27 de noviembre de 2023). *Ondas sísmicas*. <https://es.geologyscience.com/Peligros-Naturales/terremotos/ondas-s%C3%ADsmicas/>

Greemap (17 de marzo de 2020). *Propiedades de la madera*. <https://greemap.es/maderas/propiedades-de-la-madera/#Dureza>

Guindeo Casaús, A. & García Esteban, L. (1991). *Fatiga higroscópica y dimensional de la madera*. *Materiales De Construcción*, 41(221), 115–119. <https://doi.org/10.3989/mc.1991.v41.i221.757>

Huang D., Li J., Li S., Hu J., Cao Z., Guo Y., Ding Y., Zhu M. & Chen Y. (2025). *Self-densified super-strong wood*. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2025.03.001>

Íñiguez, G. (2007). *Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.415>

Kósten Art (2024). *Tipos de cortes de madera*.
<https://kostenart.com.ar/tipos-de-cortes-de-madera/>

Liu, T. (14 de octubre de 2024). *Evolución de la madera en construcción: de la Edad Media al Siglo XXI*. Amusement Logic.
<https://amusementlogic.es/articulos/evolucion-de-la-madera-en-la-construccion-de-la-edad-media-al-siglo-xxi>

Maderea (8 de octubre de 2015). *iMadera! Al microscopio*.
<https://www.maderea.es/madera-al-microscopio/>

Maderame (s.f.). *Partes de la Madera y sus Funciones*.
<https://maderame.com/partes-madera/>

Maderas Menur (10 de mayo de 2018). *La madera transparente y la súper madera*. <https://www.maderasmenur.com/materiales-que-quieren-cambiar-la-arquitectura-la-madera-transparente-y-la-super-madera/>

Maderas Menur (20 de mayo de 2018). *Tipos de cortes de madera: Miniguía para conocer más de su proceso de fabricación*.
<https://www.maderasmenur.com/tipos-de-cortes-de-los-troncos-para-obtener-distintas-apariencias-y-utilidades-en-la-madera/>

Maderas Menur (12 de diciembre de 2018). *Científicos desarrollan una madera igual de resistente que el acero*.
<https://www.maderasmenur.com/cientificos-desarrollan-una-madera-igual-de-resistente-que-el-acero/>

Maderas Menur (13 de octubre de 2019). *Conoce la madera tratada oleotérmicamente*. <https://www.maderasmenur.com/conoce-la-madera-tratada-oleotermicamente/>

Mantilla, E. V. (s.f.). *Constituição e Estrutura da Madeira. En Estruturas usáís de madeira*. <https://www.passeidireto.com/arquivo/35594031/estruturas-de-madeira>

Mannes, D., Sanabria, S., Funk, M., Wimmer, R., Kranitz, K. & Niemz, P. (2014). *Water vapour diffusion through historically relevant gluten-based wood adhesives with sorption measurements and neutron radiography*. Wood Science and Technology, 48, 591-609. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-014-0626-3>

Menvar del Caribe (s.f.). *Partes de la madera y sus funciones*. Maderas MENVAR del Caribe. <https://menvardelcaribe.com/novedades/partes-de-la-madera-y-sus-funciones/>

Morales, E. (2003). *MADERA AL EXTERIOR: Humedad de equilibrio higroscópico y sus valores característicos*. Boletín de Información Técnica Nº226. Universidad de Sevilla. https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_935_15644.pdf

Naturallywood (2022). *Mass timber and taller wood construction*. <https://www.naturallywood.com/topics/mass-timber/>

Oposinet (s.f.). *Temario de tecnología-Tema 36 – La madera, clasificación y propiedades*. <https://www.oposinet.com/temario-de-tecnologia/temario-4-tecnologia/tema-36-la-madera-clasificacin-y-propiedades-4/#:~:text=Seg%C3%BAn%20la%20dureza%2C%20las%20maderas,tilo%2C%20sauce%2C%20balsa>

Romero A. & Medina G. (s.f.). Información práctica sobre madera aserrada. En *Directorio de la Madera 2016* (pp. 166-169). Asociación Española del Comercio e Industria de la Madera (AEIM).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2017). Norma Oficial Mexicana NOM-056-SCT2-2016, *Para durmientes de madera*. https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6582/sct2a13_C/sct2a13_C.html

Sevilla, R. (2018). *La madera laminada en la arquitectura: del Antiguo Egipto al CNC*. [Proyecto de Fin de Grado en Fundamentos de la Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/54403/>

SKZ Industrial (2025). *Medidor de humedad vs método de secado en horno: ¿cuál es más eficiente?* <https://www.skztester.com/es/blog/Moisture-Meter-vs-Oven-Drying-Method-Which-Is-More-Efficient>

Svantek Academy (s.f.). *Definición, características y uso de las ondas sonoras en acústica*. <https://svantek.com/es/academia/onda-de-sonido/>

Swedish Wood (s.f.). *Structural elements*. <https://www.swedishwood.com/building-with-wood/construction/wood-and-wood-based-products/structural-elements/>

TECNO Y TIC (18 de diciembre de 2011). *Hendibilidad*. <https://aliciadiazcobo.wordpress.com/2011/12/18/hendibilidad/#:~:text=Propiedad%20que%20presenta%20la%20madera,:%20Olmo%2C%20arce%20y%20abetul>

Umlandt, M.; Jiménez, V.; Benítez, F.; Pan, E.; Medina, J.C.; Ruiz, A.; Fernández, L. & Ludueña Mayo, A. (2022). *Fundamentos teórico-prácticos de las propiedades físicas y mecánicas de la madera*. [Cátedra de propiedades físicas y mecánicas de la madera, Universidad Nacional de Santiago del Estero]. <https://fcf.unse.edu.ar/index.php/portfolio/sd-47-fundamentos-teoricos-practicos-de-las-propiedades-fisicas-y-mecanicas-de-la-madera/>

Universidad de Burgos (s.f.). *Historia de la madera*. <https://historiamateriales.ubuinvestiga.es/madera/>

Unterwieser, H. & Schickhofer, G. (2011). *Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency- and ultrasonic runtime measurement*. European Journal of Wood and Wood Products, Springer Verlag, 2010, 69 (2), pp. 171-181. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00594483>

Vignote, S. & González, V. (1995). El mercado de la madera en España. En *Producción Maderera en España*. (pp. 44-55). Universidad Politécnica de Madrid. https://pficyl.es/sites/default/files/biblioteca/documentos/produccion_maderera_en_espana.pdf

Vignote, S. & Martínez, I. (2017). *Madera aserrada II: Defectos y alteraciones*. Universidad Politécnica de Madrid. https://www.researchgate.net/profile/Santiago-Pena-5/publication/311924422_MADERA_ASERRADA_ii_DEFECTOS_Y_ALTERACIONES/links/58639c7808ae8fce490b6841/MADERA-ASERRADA-ii-DEFECTOS-Y-ALTERACIONES.pdf

Wiedenhoeft, A. (2011). *Identificación de las Especies Maderables de Centroamérica*. USDA Forest Service, Madison, Wisconsin USA.

Zinad, O. & Csilla, C. (2024). *Review of water diffusion through wood adhesive layer*. Journal of the Korean Wood Science and Technology. https://www.researchgate.net/publication/382716237_Review_on_Water_Vapor_Diffusion_through_Wood_Adhesive_Layer

NORMATIVA

UNE. (s.f.). Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Clases resistentes y determinación de los valores característicos (UNE-EN 1194).

UNE. (2022). Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos (UNE-EN 14080:2022).

UNE. (s.f.). Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia (UNE-EN 14081-1/2/3).

UNE. (2014). Madera maciza estructural con empalmes por unión dentada. Requisitos de prestación y requisitos mínimos de fabricación (UNE-EN 15497:2014).

UNE. (2013). Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Clases de uso: definiciones, aplicación a la madera maciza y a los productos derivados de la madera (UNE-EN 335:2013).

Ministerio de Fomento. (s.f.). Código Técnico de Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural para Estructuras de Madera (CTE DB-SE-M).

UNE. (s.f.). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa (UNE-EN 13183-1).

UNE. (1995). Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 2: guía de la durabilidad natural y de la impregnabilidad de especies de madera seleccionadas por su importancia en Europa (UNE-EN 350-2:1995). Es sustituida por la siguiente:

UNE. (2016). Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Ensayos y clasificación de la resistencia a los agentes biológicos de la madera y de los productos derivados de la madera (UNE-EN 350:2016).

UNE. (2002). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica (UNE-EN 13183-2:2002).

UNE. (2011). Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas (UNE-EN 408:2011+A1:2012).

UNE. (2016). Madera estructural. Clases resistentes (UNE-EN 338:2016).

ANEXO I: Registro fotográfico del estado inicial de las probetas de madera



Figura 178. Estado inicial de la viga GLULAM sana D066 de pino silvestre sin tratamiento (GL18).



Figura 179. Estado inicial de la viga GLULAM sana D071 de pino silvestre sin tratamiento (GL24).



Figura 180. Estado inicial de la viga GLULAM sana D079 de pino silvestre sin tratamiento (GL28).



Figura 181. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D064 de pino silvestre sin tratamiento (GL18).



Figura 182. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D070 de pino silvestre sin tratamiento (GL24).



Figura 183. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D076 de pino silvestre sin tratamiento (GL28).

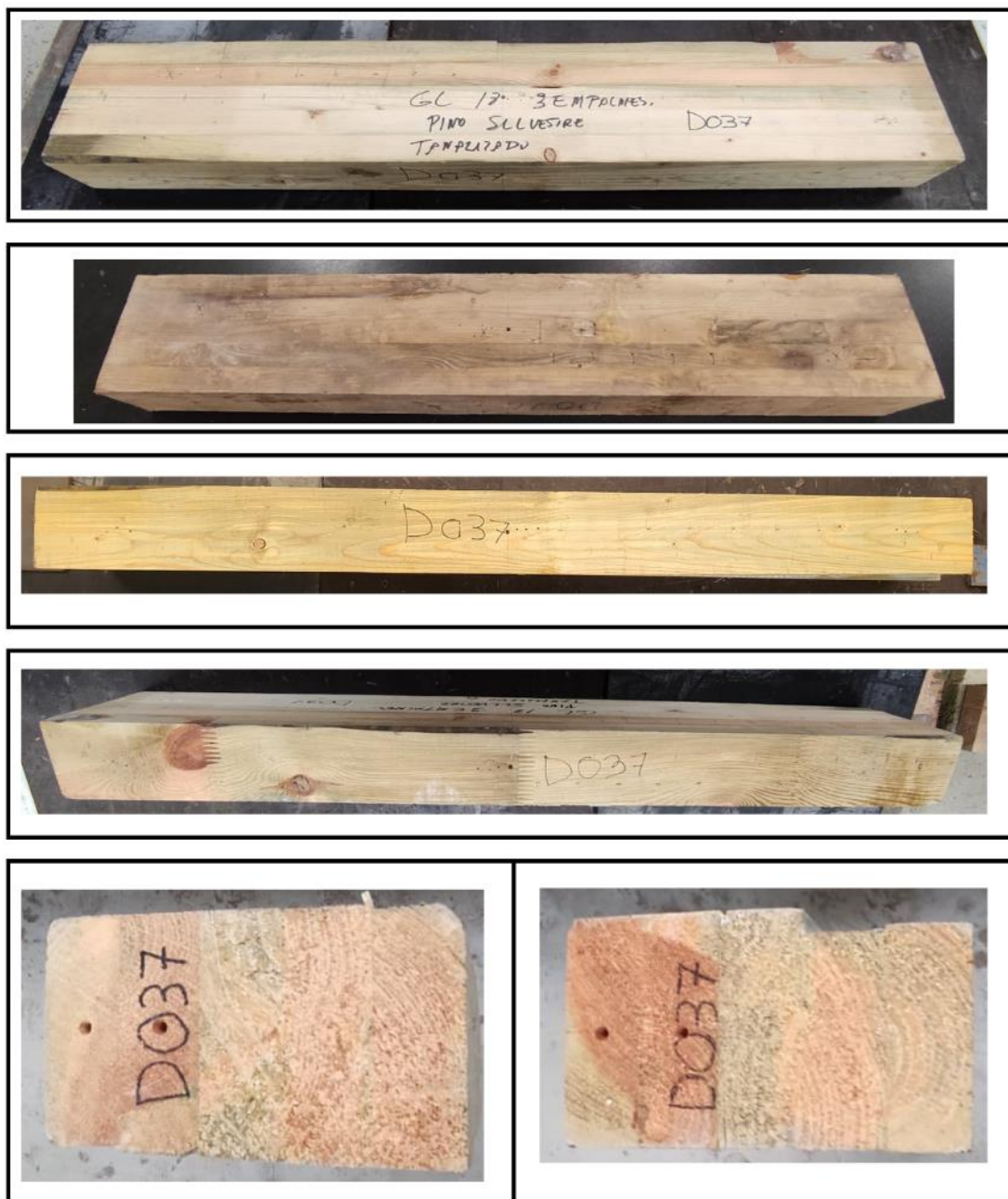


Figura 184. Estado inicial de la viga GLULAM sana D037 de pino silvestre tanalizado (GL18).

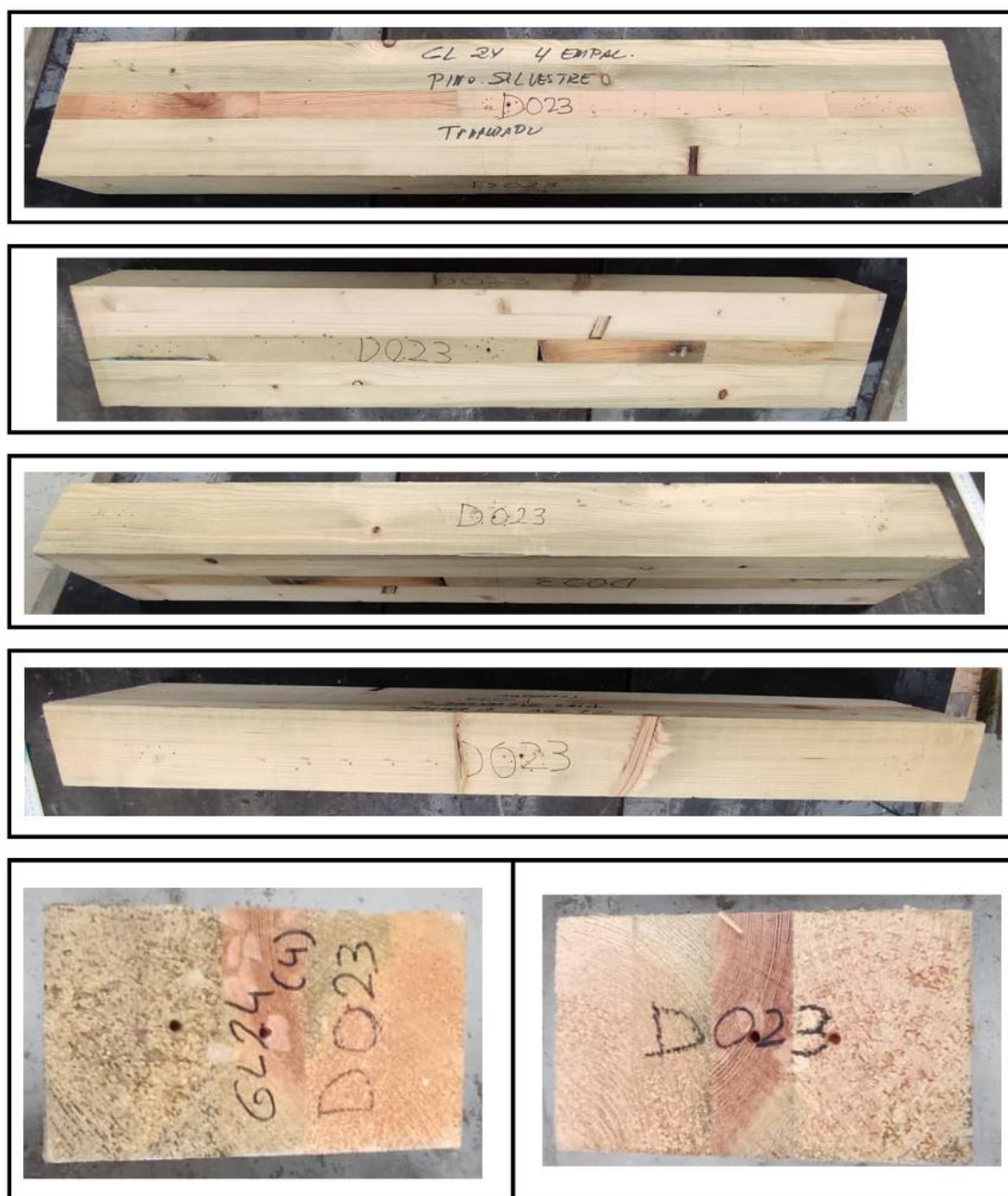


Figura 185. Estado inicial de la viga GLULAM sana D023 de pino silvestre tanalizado (GL24).



Figura 186. Estado inicial de la viga GLULAM sana D031 de pino silvestre tanalizado (GL28).



Figura 187. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D035 de pino silvestre tanalizado (GL18).



Figura 188. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D024 de pino silvestre tanalizado (GL24).



Figura 189. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D029 de pino silvestre tanalizado (GL28).



Figura 190. Estado inicial de la viga GLULAM sana D047 de abeto (GL18).



Figura 191. Estado inicial de la viga GLULAM sana D051 de abeto (GL24).



Figura 192. Estado inicial de la viga GLULAM sana D059 de abeto (GL28).



Figura 193. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D042 de abeto (GL18).



Figura 194. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D050 de abeto (GL24).



Figura 195. Estado inicial de la viga GLULAM sumergida D058 de abeto (GL28).

ANEXO II: Vigas sanas añadidas en Fase 3

Para no empañar el análisis comparativo por pares inicial (viga sana-viga sumergida), se ha decidido dedicar este anexo II separado para los datos y el análisis de las 9 vigas sanas que se añadieron al comienzo de la Fase 3 para su acondicionamiento higrotérmico junto a las 18 vigas de madera que se vienen estudiando desde el comienzo del proyecto,

Tabla 25. Resumen de datos iniciales de las probetas adicionales incluidas en la Fase 3.

Id. Probeta	Especie	Clase	Empalmes	Dimensiones
D048	Abeto sin tratamiento (Sano)	GL18	0	978x205x101
D057		GL24	0	1050x180x102
D063		GL28	0	1047x225x100
D067	Pino Silvestre sin tratamiento (Sano)	GL18	2	1050x170x101
D073		GL24	2	1050x170x101
D078		GL28	3	1050x170x100
D039	Pino Silvestre Tanalizado (Sano)	GL18	1	1049x170x99
D027		GL24	1	1048x170x99
D030		GL28	4	1050x170x98

Evolución del contenido de humedad en vigas sanas de pino silvestre sin tratamiento

Viga sana D067 (pino silvestre sin tratamiento – GL18)

En la viga D067 puede observarse una diferencia del 0,20% en el contenido de humedad, Figura 196, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su equilibrio higrotérmico (HEH) próximo o entre los valores de 15,81% y 16,16% de contenido de humedad.

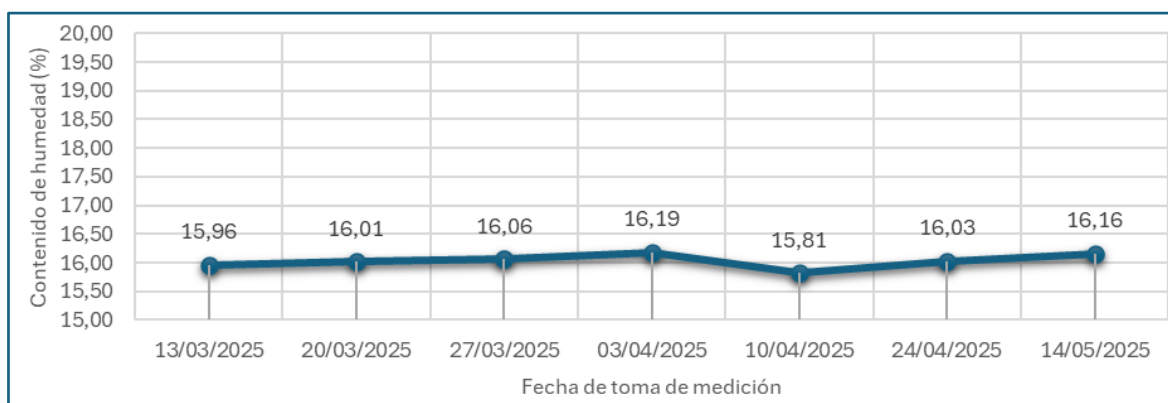


Figura 196. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D067 de madera de pino silvestre sin tratamiento de clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.

Viga sana D073 (pino silvestre sin tratamiento – GL24)

En la viga D073 puede observarse una diferencia del -0,43% en el contenido de humedad, Figura 197, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,14% y 17,41% de contenido de humedad.

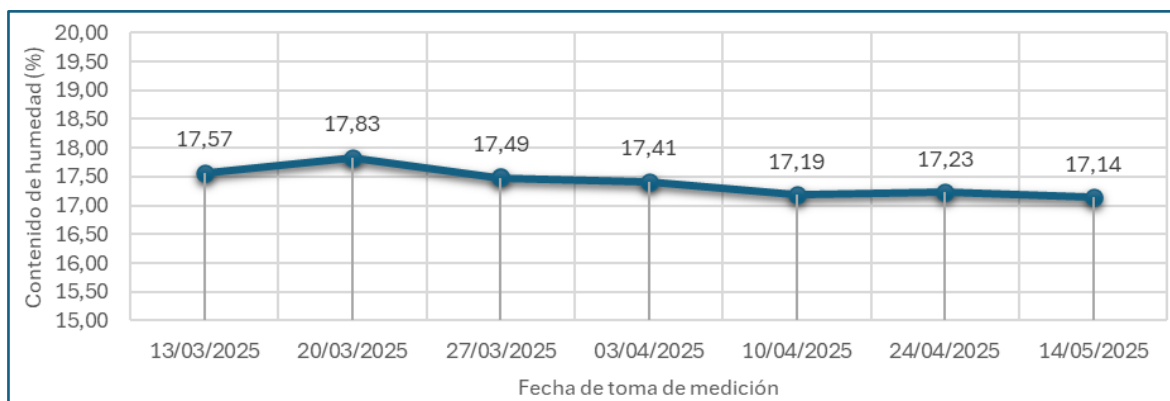


Figura 197. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D073 de madera de pino silvestre sin tratamiento de clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.

Viga sana D078 (pino silvestre sin tratamiento – GL28)

En la viga D078 puede observarse una diferencia del -0,25% en el contenido de humedad, Figura 198, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 16,53% y 16,83% de contenido de humedad.

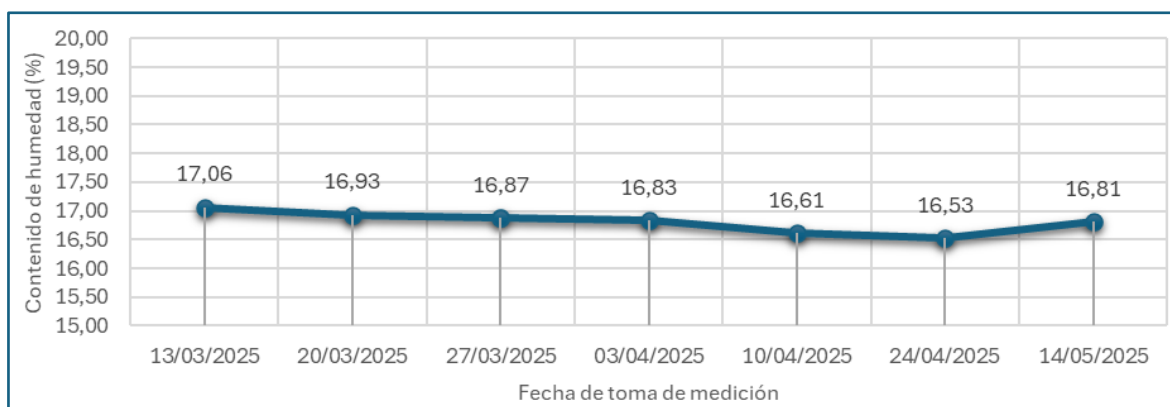


Figura 198. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D078 de madera de pino silvestre sin tratamiento de clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.

Evolución del contenido de humedad en vigas sanas de pino silvestre tanalizado

Viga sana D039 (pino silvestre tanalizado – GL18)

En la viga D039 puede observarse una diferencia del -0,19% en el contenido de humedad, Figura 199, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 16,87% y 17,13% de contenido de humedad.

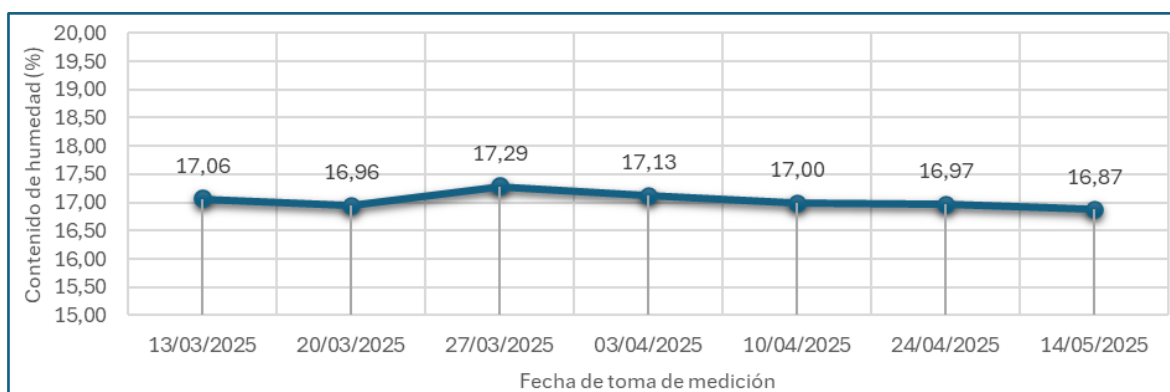


Figura 199. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D039 de madera de pino silvestre tanalizado de clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.

Viga sana D027 (pino silvestre tanalizado – GL24)

En la viga D027 puede observarse una diferencia del -0,43% en el contenido de humedad, Figura 200, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,53% y 17,64% de contenido de humedad.

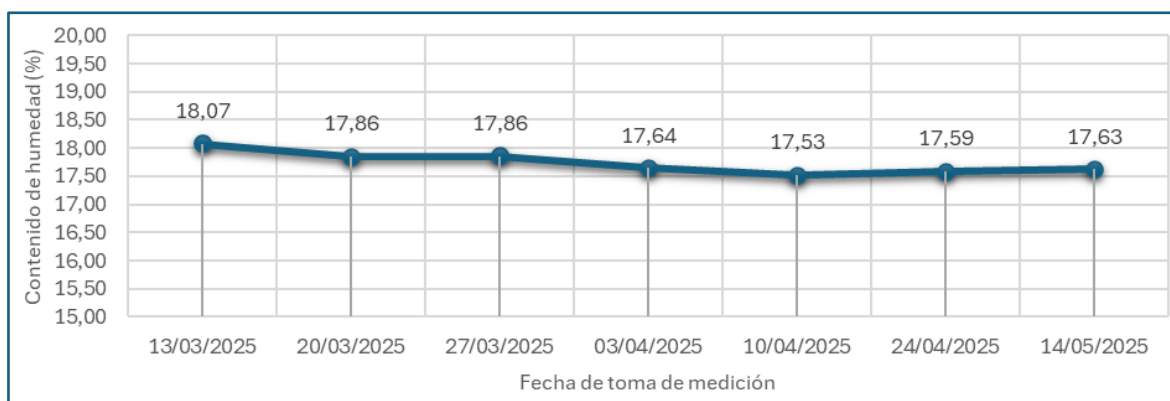


Figura 200. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D027 de madera de pino silvestre tanalizado de clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.

Viga sana D030 (pino silvestre tanalizado – GL28)

En la viga D030 puede observarse una diferencia del -0,32% en el contenido de humedad, Figura 201, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 17,56% y 17,67% de contenido de humedad.

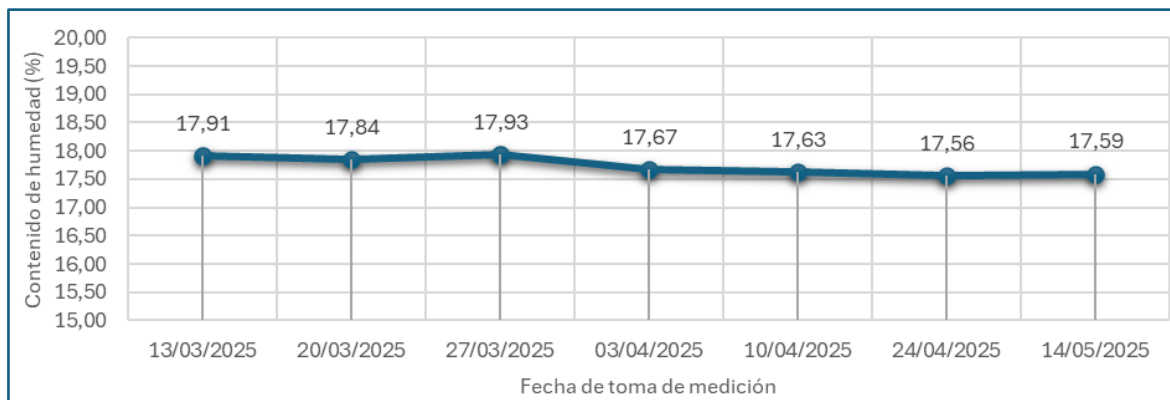


Figura 201. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D030 de madera de pino silvestre tanalizado de clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.

Evolución del contenido de humedad en vigas sanas de abeto

Viga sana D048 (abeto – GL18)

En la viga D048 puede observarse una diferencia del -0,25% en el contenido de humedad, Figura 202, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 15,84% y 16,20% de contenido de humedad.

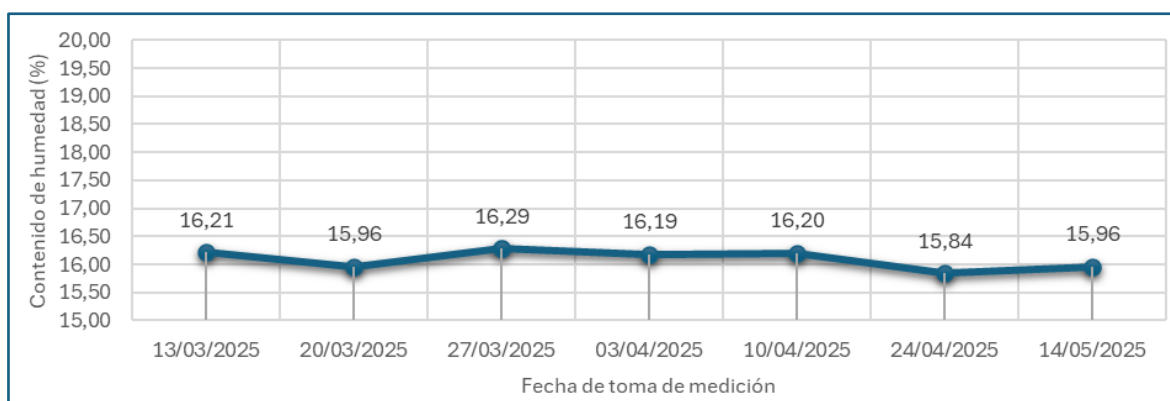


Figura 202. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D048 de madera de abeto de clase resistente GL18 a lo largo del tiempo.

Viga sana D057 (abeto – GL24)

En la viga D057 puede observarse una diferencia del -0,28% en el contenido de humedad, Figura 203, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 16,74% y 17,10% de contenido de humedad.

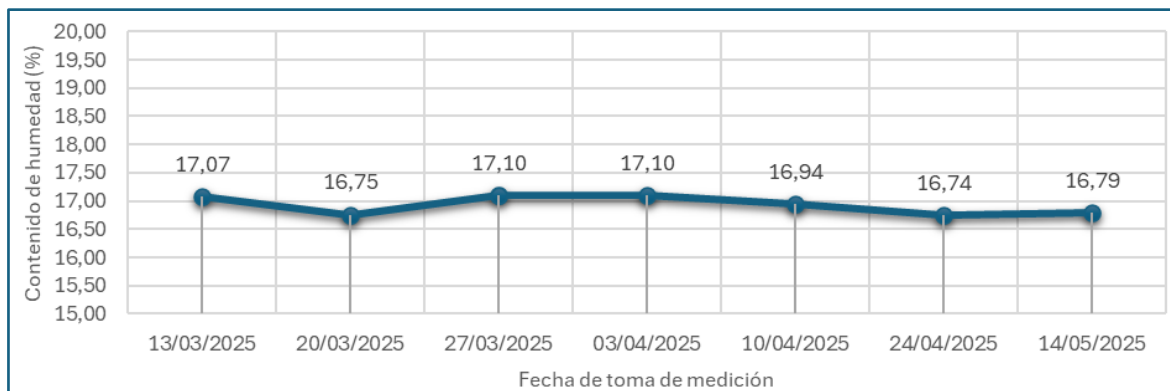


Figura 203. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D057 de madera de abeto de clase resistente GL24 a lo largo del tiempo.

Viga sana D063 (abeto – GL28)

En la viga D063 puede observarse una diferencia del -0,39% en el contenido de humedad, Figura 204, desde su entrada en la cámara climática hasta su última medición. La madera de esta viga parece tener su HEH próximo o entre los valores de 16,36% y 16,54% de contenido de humedad.

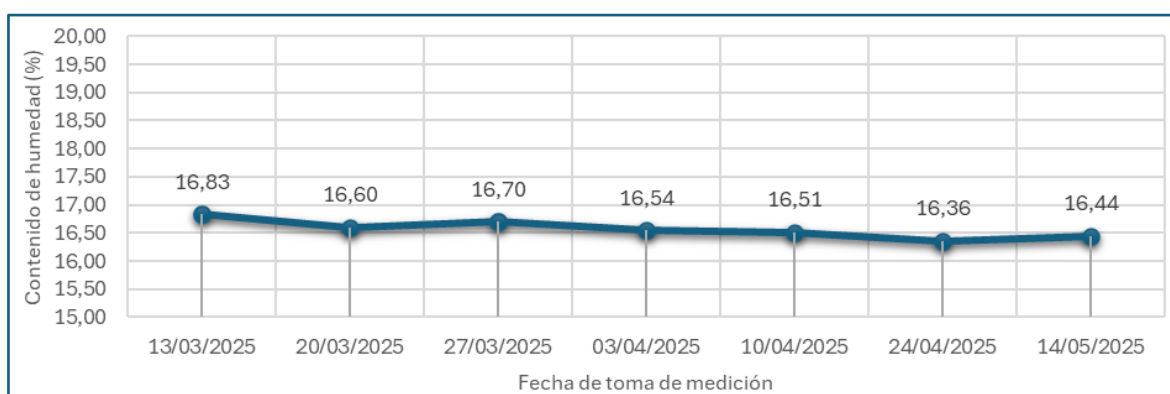


Figura 204. Evolución del contenido de humedad en la viga sana D063 de madera de abeto de clase resistente GL28 a lo largo del tiempo.

ANEXO III: Base de datos de gráficas Fase 2

Este anexo recoge la toma de medidas de distancia entre transductores/palpadores y el contenido de humedad (%) medido con el xilohigrómetro en cada una de las marcas sobre las cuales se colocan los transductores, así como los cálculos de velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas entre los transductores piezoeléctricos colocados en sus diversas posiciones sobre las numerosas vigas de madera estudiadas durante la realización de este Proyecto.

Los tiempos de vuelo recogidos en estas tablas son valores promedio de 10 lecturas del equipo de ultrasonidos para cada una de las posiciones indicadas. La posición viene indicada por la colocación del segundo palpador (receptor) que será móvil, mientras que el primero (emisor) será fijo y tomado como el "origen" de distancias. Así, para el intervalo 0-1, de 5 cm, el emisor estará colocado sobre la marca 0 y el receptor sobre la marca 1 y la distancia entre palpadores se irá aumentando, desplazando el receptor entre las marcas posteriores.

Mediante representación en gráficos de dispersión de los tiempos de vuelo promedio y realizando la recta de regresión de estos puntos, se obtiene la **corrección de tiempo** necesaria para el cálculo de velocidades (primera columna de velocidades de las tablas).

Pero además de la corrección de tiempo es necesario realizar una corrección del contenido de humedad al 12%, ya que cada viga de madera presenta un contenido de humedad diferente y si no realizamos este paso, los datos no serían directamente comparables entre sí. Recordemos que para hacer esta corrección se nos presentan dos alternativas: la planteada por Steiger en 1995 o la que planteó Sandoz en 1993. En las tablas se ha realizado el cálculo empleando ambos métodos para observar de primera mano la diferencia en cada caso.

NOTA: Entre 25-30 cm es la distancia entre transductores que recomienda el manual. En las tablas, esta franja se destaca en otro color para tenerla como una referencia visual. Como ya hemos comprobado en la Fase 1, podemos realizar los ensayos a lo largo de la longitud completa de la viga sin incurrir en un error de cálculo que se deba tener en cuenta.

Tabla 26. Tabla de datos viga sana D066 de madera de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL18, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μ s)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	15,1		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	15,5	13,69	4739,1119	4828,6840	4840,6119
Punto 2	10,0	16,0	25,66	4440,3987	4536,5741	4556,3987
Punto 3	15,0	16,2	36,20	4537,1365	4640,4325	4658,9365
Punto 4	20,0	16,3	45,68	4701,4022	4811,0459	4826,1022
Punto 5	25,0	16,2	55,00	4820,6246	4930,3747	4942,4246
Punto 6	30,0	16,3	64,46	4892,3280	5006,4244	5017,0280
Punto 7	35,0	16,3	74,36	4914,3154	5028,9246	5039,0154
Punto 8	40,0	16,5	83,36	4986,2566	5108,0844	5116,7566
Punto 9	45,0	16,3	92,06	5060,7003	5178,7234	5185,4003
Punto 10	50,0	16,4	102,75	5019,5512	5139,4020	5147,1512
Punto 11	55,0	16,2	112,44	5031,9989	5146,5614	5153,7989
Punto 12	60,0	15,6	121,72	5059,8539	5158,2737	5164,2539
Punto 13	65,0	16,2	138,29	4809,4532	4918,9490	4931,2532
Punto 14	70,0	15,7	145,56	4915,0228	5013,3343	5022,3228
Punto 15	75,0	16,2	155,99	4906,7553	5018,4664	5028,5553
Punto 16	80,0	16,0	166,39	4900,4444	5006,5840	5016,4444
Punto 17	85,0	15,9	175,96	4918,3980	5022,2070	5031,4980
Punto 18	90,0	15,7	191,21	4785,4395	4881,1590	4892,7395
Punto 19	95,0	15,4	200,23	4820,1207	4908,5732	4918,7207
Promedios->				4862,2333	4969,6719	4980,4889

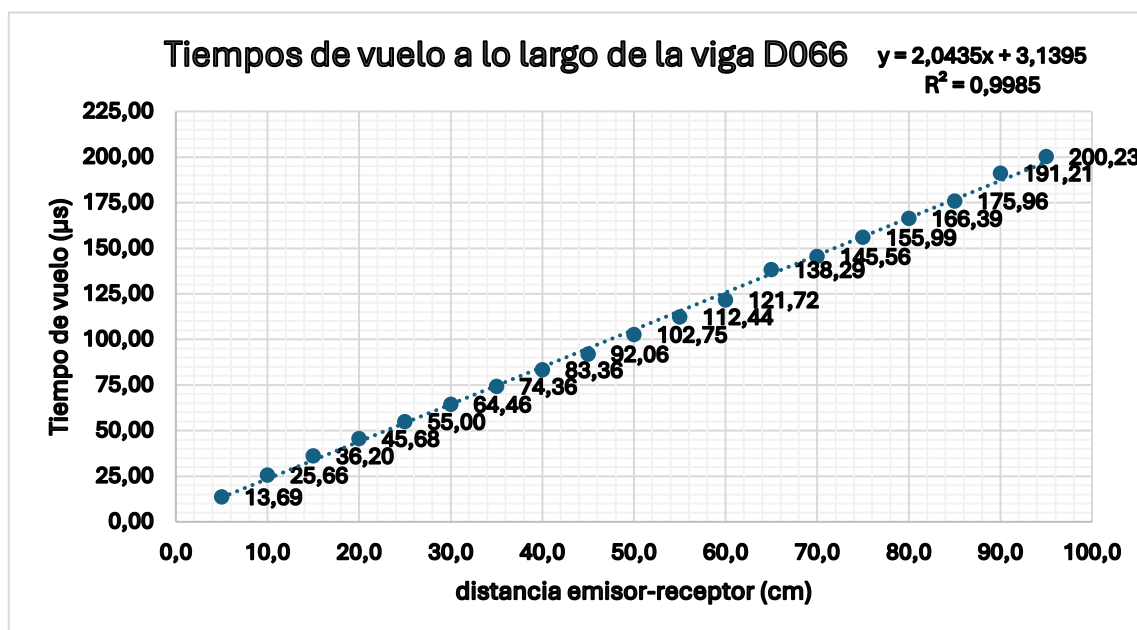


Figura 205. Gráfico de dispersión para viga sana D066 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL18.

Tabla 27. Tabla de datos viga sana D071 de madera de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL24, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μ s)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	15,1		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	15,7	14,41	6100,9835	6223,0168	6208,2835
Punto 2	10,0	15,9	24,22	5553,8894	5671,1113	5666,9894
Punto 3	15,0	15,9	34,10	5379,1590	5492,6929	5492,2590
Punto 4	20,0	16,2	43,66	5341,1100	5462,7099	5462,9100
Punto 5	25,0	16,5	53,07	5335,5643	5465,9267	5466,0643
Punto 6	30,0	16,5	62,59	5321,4700	5451,4880	5451,9700
Punto 7	35,0	16,7	71,63	5350,4221	5487,1059	5486,7221
Punto 8	40,0	17,0	81,07	5343,6359	5489,0969	5488,6359
Punto 9	45,0	17,0	90,45	5342,1721	5487,5933	5487,1721
Punto 10	50,0	17,0	100,10	5325,6417	5470,6129	5470,6417
Punto 11	55,0	17,0	108,82	5360,3417	5506,2575	5505,3417
Punto 12	60,0	17,1	118,41	5347,8128	5496,3800	5495,7128
Punto 13	65,0	17,0	127,29	5368,5555	5514,6949	5513,5555
Punto 14	70,0	17,0	136,67	5365,8185	5511,8834	5510,8185
Punto 15	75,0	16,9	145,92	5368,4396	5511,5752	5510,5396
Punto 16	80,0	16,6	154,93	5379,4025	5513,8297	5512,8025
Punto 17	85,0	16,3	164,25	5378,5418	5503,9774	5503,2418
Punto 18	90,0	16,3	173,14	5391,6300	5517,3709	5516,3300
Punto 19	95,0	15,5	183,17	5368,5844	5470,0539	5470,0844
Promedios->				5367,8995	5501,3534	5500,6551

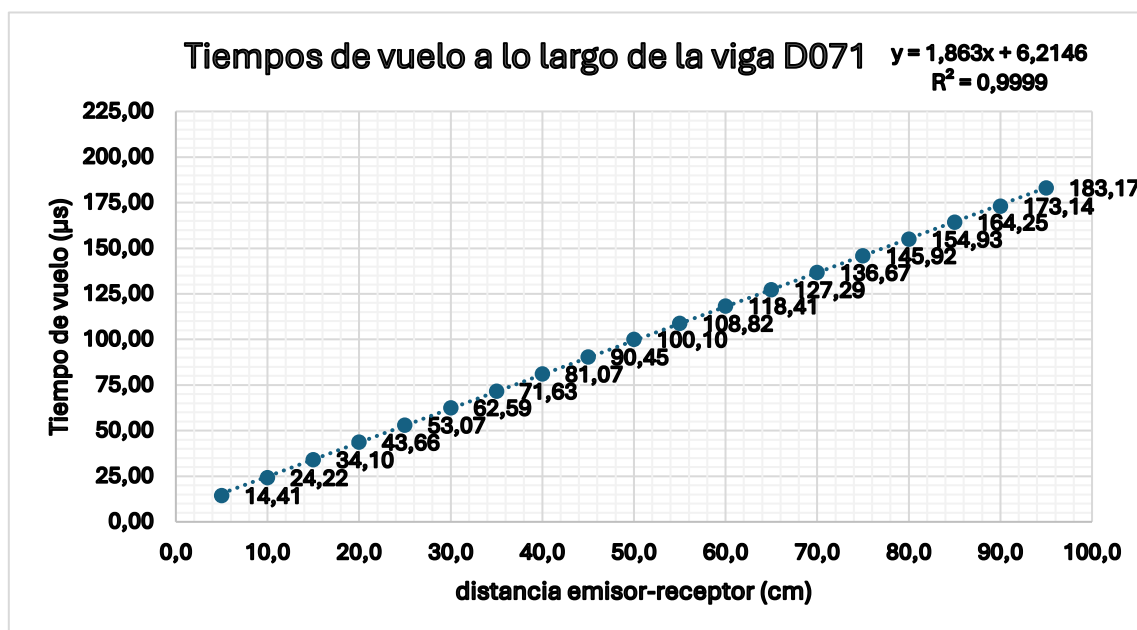


Figura 206. Gráfico de dispersión para viga sana D071 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL24.

Tabla 28. Tabla de datos viga sana D079 de madera de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL28, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	14,9		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	15,2	14,01	5189,2520	5278,7801	5282,0520
Punto 2	10,0	15,2	24,11	5067,0626	5154,4826	5159,8626
Punto 3	15,0	15,2	34,14	5039,4251	5126,3683	5132,2251
Punto 4	20,0	15,3	44,16	5026,9823	5116,4694	5122,6823
Punto 5	25,0	15,0	53,79	5059,1618	5140,9022	5146,1618
Punto 6	30,0	15,0	63,15	5104,1849	5186,6527	5191,1849
Punto 7	35,0	14,8	73,18	5086,8174	5163,4429	5168,0174
Punto 8	40,0	15,0	84,86	4969,8516	5050,1490	5056,8516
Punto 9	45,0	15,1	92,52	5105,2070	5190,4867	5195,1070
Punto 10	50,0	15,0	101,41	5152,7640	5236,0167	5239,7640
Punto 11	55,0	15,2	111,13	5151,9690	5240,8539	5244,7690
Punto 12	60,0	15,1	120,67	5159,2799	5245,4628	5249,1799
Punto 13	65,0	15,1	131,46	5114,6749	5200,1128	5204,5749
Punto 14	70,0	15,1	139,90	5165,0873	5251,3672	5254,9873
Punto 15	75,0	15,0	148,97	5186,8906	5270,6946	5273,8906
Punto 16	80,0	14,9	159,30	5163,7789	5244,3851	5247,8789
Punto 17	85,0	14,5	168,98	5163,8677	5233,2078	5236,3677
Punto 18	90,0	14,5	178,40	5171,6618	5241,1065	5244,1618
Punto 19	95,0	15,0	198,69	4888,9614	4967,9518	4975,9614
Promedios->				5098,7571	5181,1174	5185,7571

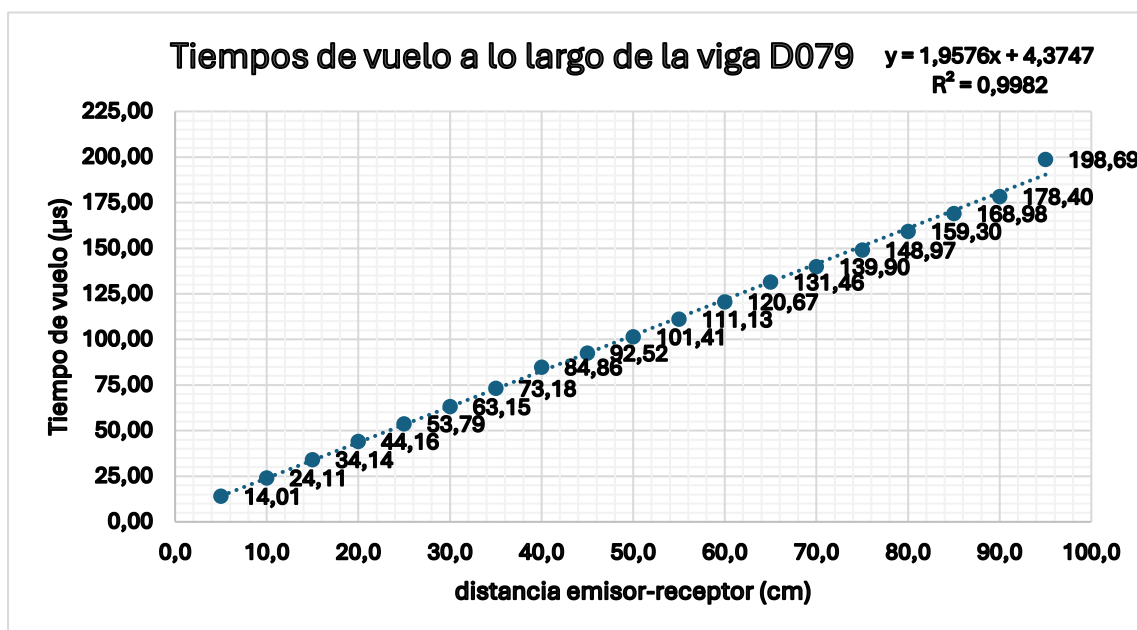


Figura 207. Gráfico de dispersión para viga sana D079 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL28.

Tabla 29. Tabla de datos viga sumergida D064 de madera de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL18, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μ s)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	15,6		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	15,5	13,43	4070,8988	4147,8412	4172,3988
Punto 2	10,0	16,4	23,85	4404,8400	4510,0136	4532,4400
Punto 3	15,0	16,4	33,31	4663,8456	4775,2033	4791,4456
Punto 4	20,0	16,7	43,52	4720,0648	4840,6452	4856,3648
Punto 5	25,0	16,8	53,23	4800,0952	4925,3973	4939,2952
Punto 6	30,0	16,7	63,81	4787,5676	4909,8726	4923,8676
Punto 7	35,0	16,9	73,72	4822,7767	4951,3636	4964,8767
Punto 8	40,0	16,6	83,83	4837,7948	4958,6876	4971,1948
Punto 9	45,0	16,6	96,00	4744,2181	4862,7725	4877,6181
Punto 10	50,0	16,7	105,47	4792,8391	4915,2787	4929,1391
Punto 11	55,0	17,0	114,29	4861,1350	4993,4618	5006,1350
Punto 12	60,0	16,8	124,80	4852,3157	4978,9810	4991,5157
Punto 13	65,0	16,7	136,06	4817,9447	4941,0256	4954,2447
Punto 14	70,0	16,8	146,85	4804,3167	4929,7291	4943,5167
Punto 15	75,0	16,8	158,38	4770,0123	4894,5291	4909,2123
Punto 16	80,0	16,7	169,45	4753,3516	4874,7824	4889,6516
Punto 17	85,0	16,5	181,47	4713,7819	4828,9524	4844,2819
Punto 18	90,0	16,0	191,92	4717,6660	4819,8468	4833,6660
Punto 19	95,0	16,3	202,20	4725,1387	4835,3360	4849,8387
Promedios->				4754,9836	4874,7710	4889,3503

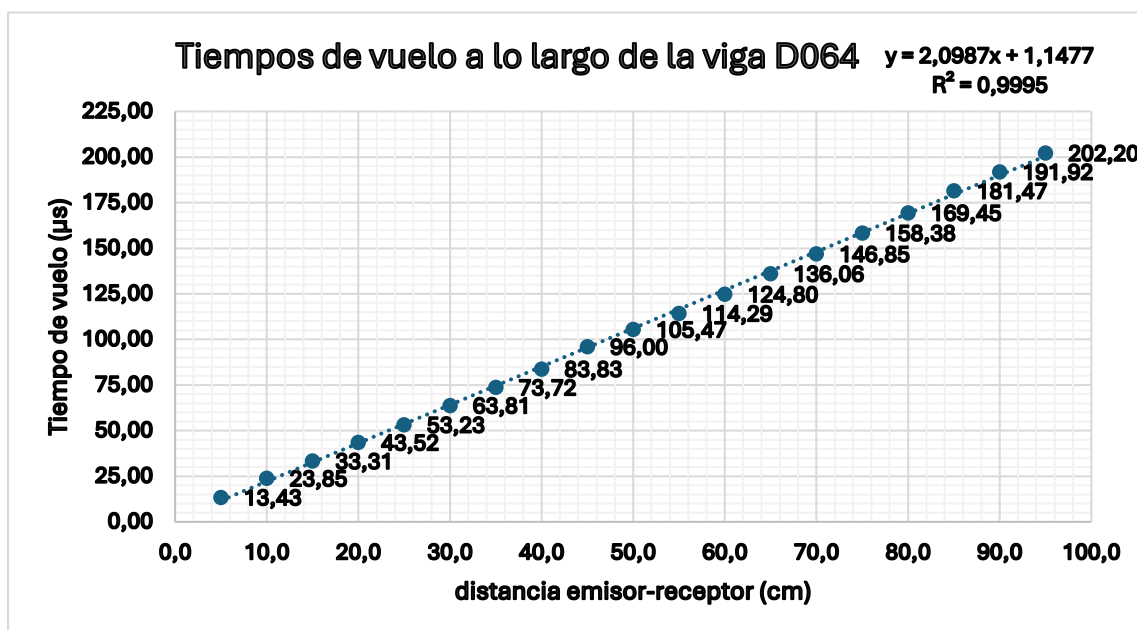


Figura 208. Gráfico de dispersión para viga sumergida D064 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL18.

Tabla 30. Tabla de datos viga sumergida D070 de madera de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL24, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μ s)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	16,1		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	16,6	16,21	6591,9578	6756,6858	6725,3578
Punto 2	10,0	16,8	26,25	5674,0808	5822,1975	5813,2808
Punto 3	15,0	16,8	40,51	4704,5540	4827,3621	4843,7540
Punto 4	20,0	16,9	48,51	5014,5422	5148,2420	5156,6422
Punto 5	25,0	17,1	60,25	4842,7088	4977,2437	4990,6088
Punto 6	30,0	17,0	71,26	4789,7308	4920,1138	4934,7308
Punto 7	35,0	17,0	82,18	4758,4088	4887,9392	4903,4088
Punto 8	40,0	16,9	92,76	4754,3205	4881,0822	4896,4205
Punto 9	45,0	17,0	105,30	4654,8193	4781,5298	4799,8193
Punto 10	50,0	16,6	116,30	4643,6466	4759,6878	4777,0466
Punto 11	55,0	16,9	124,22	4758,0324	4884,8931	4900,1324
Punto 12	60,0	17,2	133,51	4804,4585	4940,6221	4955,2585
Punto 13	65,0	17,3	143,46	4820,7425	4960,0709	4974,4425
Punto 14	70,0	17,1	153,72	4824,4586	4958,4865	4972,3586
Punto 15	75,0	16,7	163,67	4837,3365	4960,9128	4973,6365
Punto 16	80,0	17,0	172,80	4872,8788	5005,5252	5017,8788
Punto 17	85,0	16,6	182,69	4883,2613	5005,2903	5016,6613
Punto 18	90,0	16,7	193,92	4857,1459	4981,2283	4993,4459
Punto 19	95,0	16,7	203,87	4865,7065	4990,0076	5002,0065
			Promedios->	4853,3796	4982,9131	4995,6407

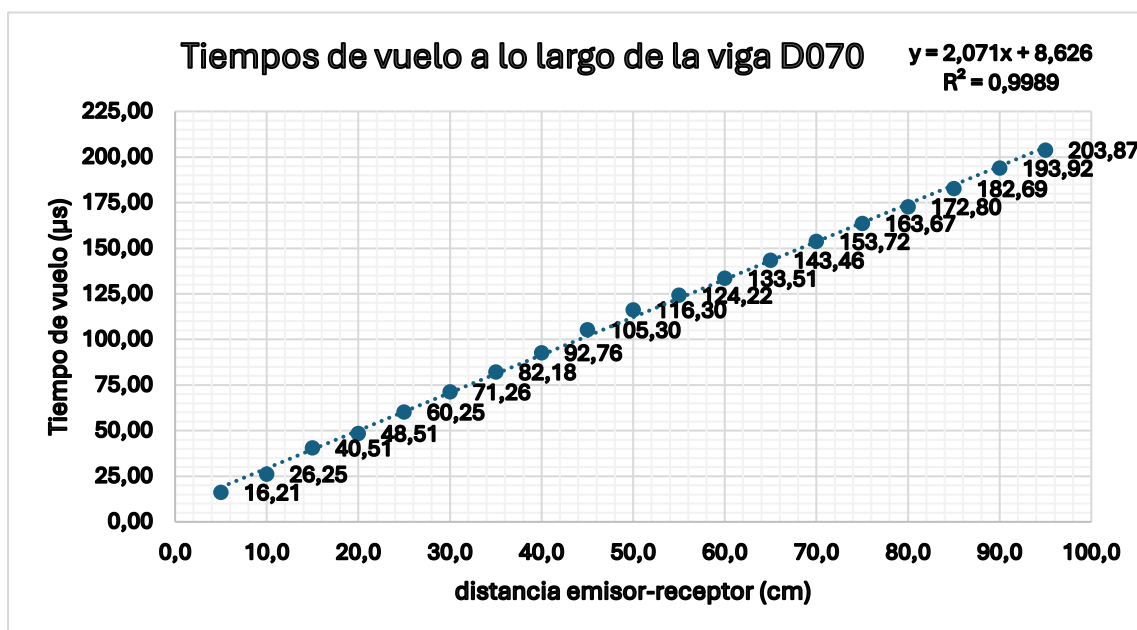


Figura 209. Gráfico de dispersión para viga sumergida D070 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL24.

Tabla 31. Tabla de datos viga sumergida D076 de madera de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL28, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μ s)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	15,9		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	16,5	14,11	4756,8308	4873,0531	4887,3308
Punto 2	10,0	16,6	25,23	4622,9520	4738,4761	4756,3520
Punto 3	15,0	16,6	36,33	4582,7834	4697,3037	4716,1834
Punto 4	20,0	16,7	47,43	4562,9597	4679,5267	4699,2597
Punto 5	25,0	16,9	57,21	4663,2047	4787,5370	4805,3047
Punto 6	30,0	16,7	67,53	4692,5445	4812,4219	4828,8445
Punto 7	35,0	16,6	77,86	4713,0938	4830,8704	4846,4938
Punto 8	40,0	16,8	88,10	4733,6606	4857,2285	4872,8606
Punto 9	45,0	16,9	98,39	4747,2761	4873,8500	4889,3761
Punto 10	50,0	16,9	108,45	4768,6626	4895,8067	4910,7626
Punto 11	55,0	16,7	118,89	4770,5289	4892,3985	4906,8289
Punto 12	60,0	16,9	128,72	4795,3504	4923,2061	4937,4504
Punto 13	65,0	16,7	139,39	4786,7609	4909,0452	4923,0609
Punto 14	70,0	16,2	154,54	4637,5675	4743,1500	4759,3675
Punto 15	75,0	16,7	165,28	4638,7582	4757,2616	4775,0582
Punto 16	80,0	16,9	174,71	4675,3222	4799,9777	4817,4222
Punto 17	85,0	16,4	184,05	4710,4148	4822,8844	4838,0148
Punto 18	90,0	16,2	197,40	4643,9341	4749,6616	4765,7341
Punto 19	95,0	16,6	203,82	4744,7523	4863,3200	4878,1523
			Promedios->	4693,9182	4812,9959	4829,2515

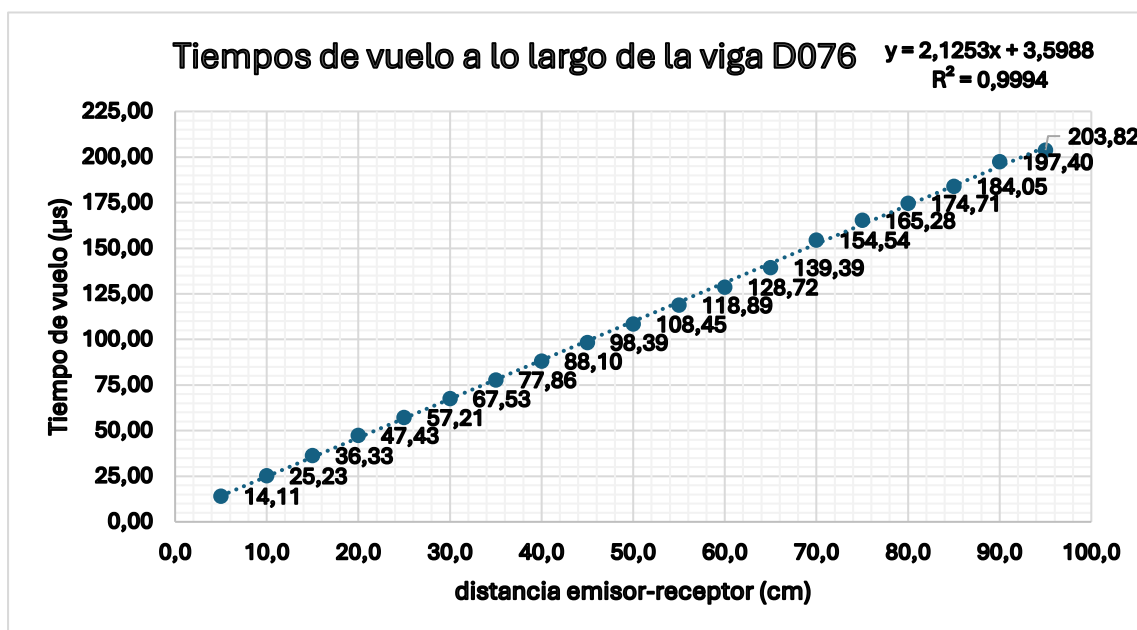


Figura 210. Gráfico de dispersión para viga sumergida D076 de pino silvestre sin tratamiento y de clase resistente GL28.

Tabla 32. Tabla de datos viga sana D037 de madera de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL18, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	16,4		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	17,0	13,38	5074,0301	5212,1521	5219,0301
Punto 2	10,0	16,9	23,71	4954,3948	5086,4910	5096,4948
Punto 3	15,0	17,2	34,35	4866,3221	5004,2390	5017,1221
Punto 4	20,0	16,8	44,13	4925,6110	5054,1895	5064,8110
Punto 5	25,0	16,8	53,46	5006,5987	5137,2914	5145,7987
Punto 6	30,0	17,0	62,88	5054,4107	5191,9987	5199,4107
Punto 7	35,0	17,1	72,87	5047,2931	5187,5116	5195,1931
Punto 8	40,0	17,2	83,53	4999,7438	5141,4419	5150,5438
Punto 9	45,0	17,1	95,25	4906,0171	5042,3107	5053,9171
Punto 10	50,0	17,3	101,16	5121,1616	5269,1726	5274,8616
Punto 11	55,0	17,3	111,35	5100,9004	5248,3259	5254,6004
Punto 12	60,0	17,3	119,68	5165,5516	5314,8456	5319,2516
Punto 13	65,0	17,4	128,60	5196,9193	5350,0373	5353,5193
Punto 14	70,0	17,1	136,64	5258,6465	5404,7366	5406,5465
Punto 15	75,0	17,0	145,28	5290,8523	5434,8765	5435,8523
Punto 16	80,0	17,3	155,33	5269,9499	5422,2612	5423,6499
Punto 17	85,0	16,6	165,48	5248,4006	5379,5542	5381,8006
Punto 18	90,0	12,4	183,18	5009,6268	5020,2698	5021,2268
Punto 19	95,0	13,5	197,81	4889,7465	4928,9315	4933,2465
Punto 20	100,0	14,3	207,76	4896,3420	4956,7650	4963,0420
			Promedios->	5063,6047	5188,1711	5194,2573

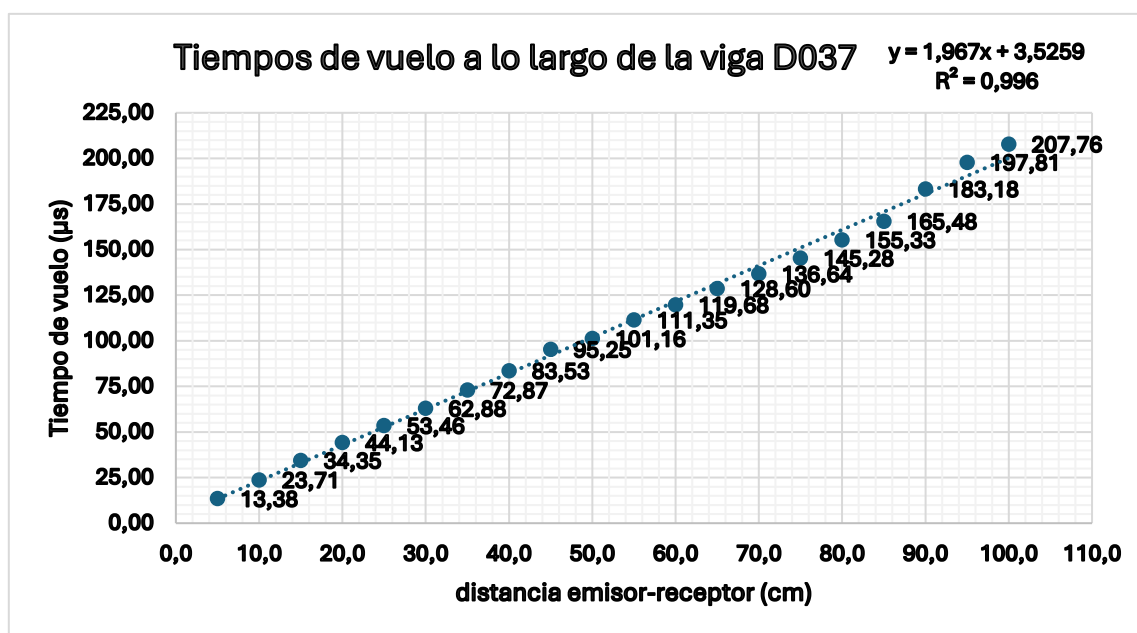


Figura 211. Gráfico de dispersión para viga sana D037 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL18.

Tabla 33. Tabla de datos viga sana D023 de madera de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL24, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	15,7		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	16,4	15,70	6951,0093	7116,9772	7078,6093
Punto 2	10,0	16,7	23,38	6723,5027	6895,2637	6859,8027
Punto 3	15,0	16,8	32,72	6194,9680	6356,6820	6334,1680
Punto 4	20,0	16,9	40,73	6206,7082	6372,1941	6348,8082
Punto 5	25,0	17,1	49,20	6143,5326	6314,2056	6291,4326
Punto 6	30,0	17,2	57,73	6094,6871	6267,4171	6245,4871
Punto 7	35,0	16,6	72,92	5433,6689	5569,4521	5567,0689
Punto 8	40,0	17,0	76,10	5917,7550	6078,8444	6062,7550
Punto 9	45,0	17,2	84,22	5943,4815	6111,9261	6094,2815
Punto 10	50,0	17,0	92,10	5981,3478	6144,1682	6126,3478
Punto 11	55,0	17,1	100,64	5969,6179	6135,4594	6117,5179
Punto 12	60,0	17,1	108,30	6012,4337	6179,4646	6160,3337
Punto 13	65,0	17,1	116,34	6027,8282	6195,2868	6175,7282
Punto 14	70,0	17,0	124,69	6024,9675	6188,9753	6169,9675
Punto 15	75,0	16,8	133,21	6014,2803	6171,2776	6153,4803
Punto 16	80,0	16,7	140,82	6046,2599	6200,7199	6182,5599
Punto 17	85,0	16,9	149,25	6039,3682	6200,3923	6181,4682
Punto 18	90,0	16,5	157,54	6038,9229	6186,4702	6169,4229
Punto 19	95,0	16,2	165,78	6040,4443	6177,9658	6162,2443
Punto 20	100,0	15,7	173,71	6053,1515	6174,2281	6160,4515
			Promedios->	6047,7329	6206,3365	6187,5435

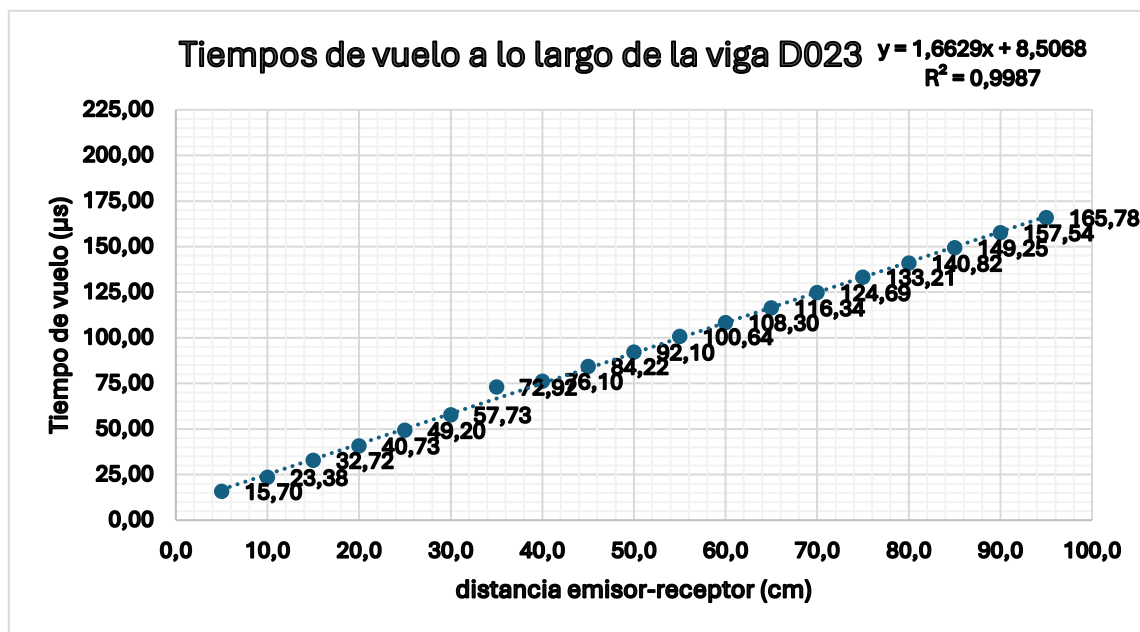


Figura 212. Gráfico de dispersión para viga sana D023 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL24.

Tabla 34. Tabla de datos viga sana D031 de madera de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL28, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	15,7		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	16,3	13,65	6019,6723	6160,0601	6144,3723
Punto 2	10,0	16,6	23,32	5562,9419	5701,9556	5696,3419
Punto 3	15,0	16,9	32,65	5493,2781	5639,7422	5635,3781
Punto 4	20,0	17,0	41,63	5511,7524	5661,7899	5656,7524
Punto 5	25,0	17,0	51,07	5467,3370	5616,1654	5612,3370
Punto 6	30,0	17,0	60,03	5485,8547	5635,1872	5630,8547
Punto 7	35,0	17,1	69,14	5486,2288	5638,6413	5634,1288
Punto 8	40,0	17,0	77,69	5528,9781	5679,4844	5673,9781
Punto 9	45,0	17,1	86,70	5531,2386	5684,9015	5679,1386
Punto 10	50,0	17,3	95,34	5555,7963	5716,3691	5709,4963
Punto 11	55,0	17,0	103,97	5576,6171	5728,4203	5721,6171
Punto 12	60,0	17,2	113,93	5525,5691	5682,1697	5676,3691
Punto 13	65,0	17,2	122,84	5532,0985	5688,8842	5682,8985
Punto 14	70,0	16,9	131,77	5536,8314	5684,4567	5678,9314
Punto 15	75,0	17,1	141,28	5517,2982	5670,5738	5665,1982
Punto 16	80,0	17,0	149,28	5558,0219	5709,3189	5703,0219
Punto 17	85,0	16,6	159,71	5506,3903	5643,9908	5639,7903
Punto 18	90,0	16,0	168,15	5528,0484	5647,7814	5644,0484
Punto 19	95,0	15,6	176,98	5534,9661	5642,6275	5639,3661
Promedios->				5524,4026	5670,6922	5665,5359

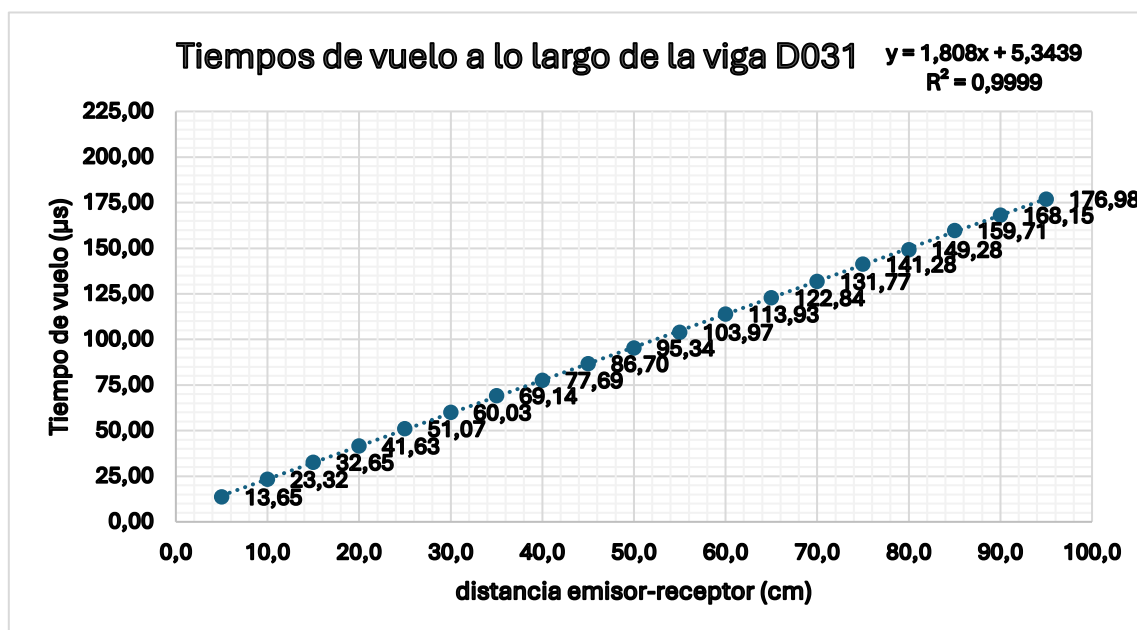


Figura 213. Gráfico de dispersión para viga sana D031 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL28.

Tabla 35. Tabla de datos viga sumergida D035 de madera de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL18, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μ s)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	15,0		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	16,0	14,37	4708,5856	4810,5697	4824,5856
Punto 2	10,0	16,3	26,39	4417,1757	4520,1909	4541,8757
Punto 3	15,0	16,1	41,09	4017,2581	4106,4922	4136,1581
Punto 4	20,0	16,7	48,66	4453,4602	4567,2299	4589,7602
Punto 5	25,0	17,0	59,50	4484,3934	4606,4647	4629,3934
Punto 6	30,0	16,9	69,52	4561,4264	4683,0451	4703,5264
Punto 7	35,0	16,6	80,43	4564,4891	4678,5522	4697,8891
Punto 8	40,0	17,2	93,17	4473,3272	4600,1062	4624,1272
Punto 9	45,0	17,1	104,10	4484,3541	4608,9336	4632,2541
Punto 10	50,0	17,0	116,46	4436,2069	4556,9665	4581,2069
Punto 11	55,0	16,8	127,28	4452,3994	4568,6252	4591,5994
Punto 12	60,0	17,2	135,99	4537,2428	4665,8332	4688,0428
Punto 13	65,0	17,2	148,08	4503,6025	4631,2395	4654,4025
Punto 14	70,0	16,8	160,92	4453,8073	4570,0699	4593,0073
Punto 15	75,0	17,3	172,32	4449,2193	4577,8100	4602,9193
Punto 16	80,0	17,5	182,50	4475,5520	4609,9315	4635,0520
Punto 17	85,0	16,8	193,53	4478,8962	4595,8137	4618,0962
Punto 18	90,0	16,2	205,90	4452,1637	4553,5252	4573,9637
Punto 19	95,0	16,6	218,08	4432,4400	4543,2033	4565,8400
Promedios->				4451,5230	4569,1129	4592,1730

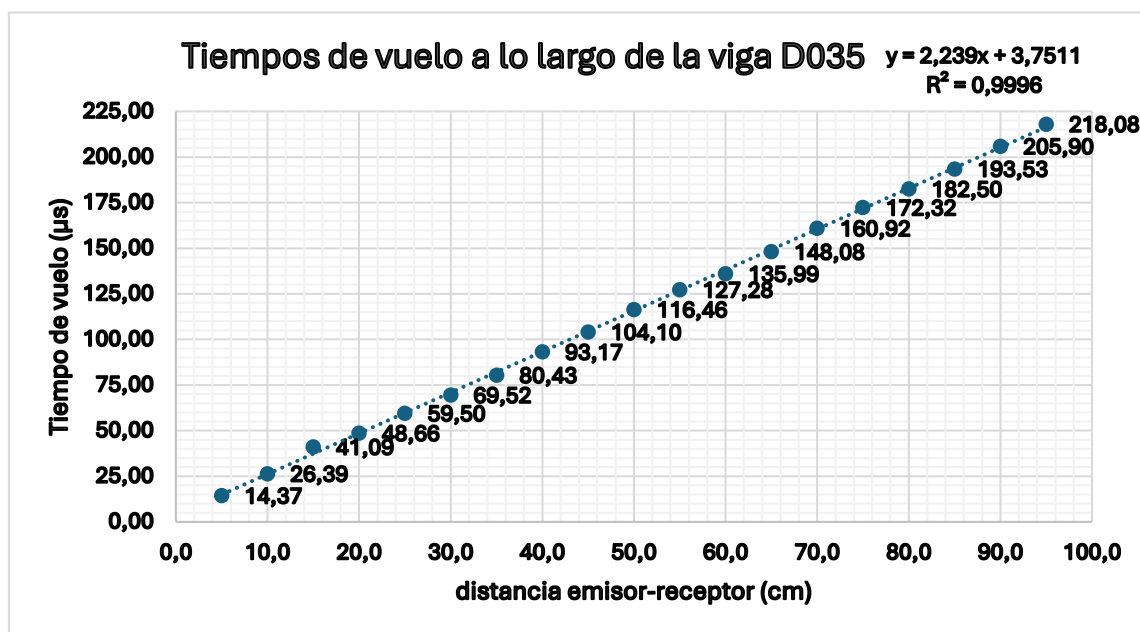


Figura 214. Gráfico de dispersión para viga sumergida D035 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL18.

Tabla 36. Tabla de datos viga sumergida D024 de madera de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL24, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μ s)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	16,3		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	16,5	13,28	6039,1579	6186,7110	6169,6579
Punto 2	10,0	16,7	23,08	5531,1876	5672,4893	5667,4876
Punto 3	15,0	16,6	32,14	5527,0401	5665,1566	5660,4401
Punto 4	20,0	16,7	40,59	5619,6666	5763,2286	5755,9666
Punto 5	25,0	16,8	48,85	5701,3453	5850,1737	5840,5453
Punto 6	30,0	16,8	57,25	5741,7037	5891,5857	5880,9037
Punto 7	35,0	16,9	65,74	5762,3318	5915,9695	5904,4318
Punto 8	40,0	17,0	74,18	5782,0764	5939,4725	5927,0764
Punto 9	45,0	17,3	82,68	5793,0491	5960,4790	5946,7491
Punto 10	50,0	17,4	91,61	5773,0521	5943,1449	5929,6521
Punto 11	55,0	18,0	99,87	5797,4498	5987,8638	5971,4498
Punto 12	60,0	18,2	108,36	5804,9929	6002,2260	5984,7929
Punto 13	65,0	18,2	117,14	5796,3622	5993,3021	5976,1622
Punto 14	70,0	18,3	125,32	5817,8530	6018,8214	6000,5530
Punto 15	75,0	18,2	139,36	5582,0475	5771,7058	5761,8475
Punto 16	80,0	18,0	146,93	5636,6092	5821,7406	5810,6092
Punto 17	85,0	17,4	153,88	5709,3229	5877,5381	5865,9229
Punto 18	90,0	16,3	160,90	5772,9573	5907,5913	5897,6573
Punto 19	95,0	16,4	170,10	5754,1128	5891,5027	5881,7128
Promedios->				5716,8422	5881,8884	5870,2200

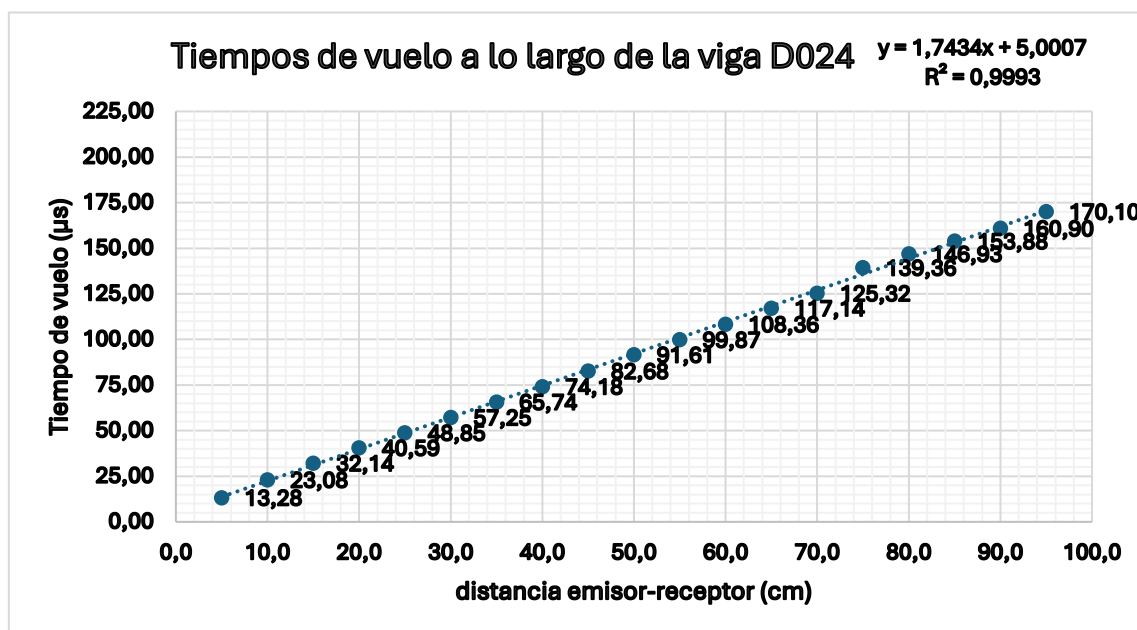


Figura 215. Gráfico de dispersión para viga sumergida D024 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL24.

Tabla 37. Tabla de datos viga sumergida D029 de madera de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL28, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μ s)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	16,6		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	16,5	13,07	13695,2532	14029,8655	13825,7532
Punto 2	10,0	16,3	26,59	5823,8066	5959,6264	5948,5066
Punto 3	15,0	16,7	34,24	6043,2942	6197,6783	6179,5942
Punto 4	20,0	16,6	42,21	6099,2531	6251,6688	6232,6531
Punto 5	25,0	16,5	49,88	6178,8047	6329,7697	6309,3047
Punto 6	30,0	16,9	58,84	6070,3063	6232,1554	6212,4063
Punto 7	35,0	17,1	67,47	6029,1916	6196,6881	6177,0916
Punto 8	40,0	16,8	77,05	5914,4563	6068,8477	6053,6563
Punto 9	45,0	16,9	84,48	5995,1320	6154,9767	6137,2320
Punto 10	50,0	17,0	89,12	6273,4549	6444,2269	6418,4549
Punto 11	55,0	17,0	96,69	6302,2153	6473,7702	6447,2153
Punto 12	60,0	16,7	105,68	6233,0604	6392,2924	6369,3604
Punto 13	65,0	17,0	116,57	6066,2113	6231,3419	6211,2113
Punto 14	70,0	17,1	121,71	6233,8088	6406,9897	6381,7088
Punto 15	75,0	16,9	130,62	6188,0729	6353,0619	6330,1729
Punto 16	80,0	16,6	138,71	6187,5971	6342,2205	6320,9971
Punto 17	85,0	16,4	146,72	6190,7824	6338,5986	6318,3824
Punto 18	90,0	16,5	155,28	6170,2622	6321,0185	6300,7622
Punto 19	95,0	16,5	162,95	6187,6795	6338,8613	6318,1795
Promedios->				6121,5216	6279,6552	6259,2716

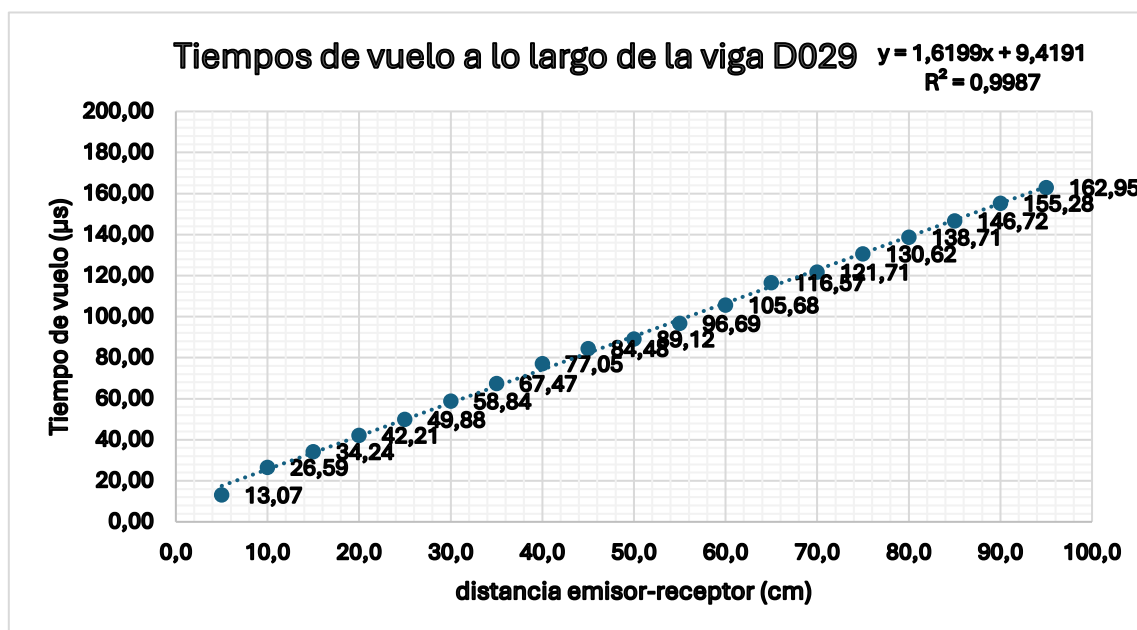


Figura 216. Gráfico de dispersión para viga sumergida D029 de pino silvestre tanalizado y de clase resistente GL28.

Tabla 38. Tabla de datos viga sana D047 de madera de abeto de clase resistente GL18, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	14,2		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	14,9	14,75	6795,7866	6901,8683	6879,8866
Punto 2	10,0	15,2	24,85	5728,1970	5827,0234	5820,9970
Punto 3	15,0	15,9	32,85	5892,1732	6016,5350	6005,2732
Punto 4	20,0	15,7	43,95	5470,8336	5580,2626	5578,1336
Punto 5	25,0	15,6	51,40	5680,8499	5791,3488	5785,2499
Punto 6	30,0	15,6	66,06	5113,5637	5213,0283	5217,9637
Punto 7	35,0	16,0	73,50	5294,4068	5409,0793	5410,4068
Punto 8	40,0	15,5	81,55	5393,9251	5495,8735	5495,4251
Punto 9	45,0	14,7	91,75	5334,4397	5411,8838	5412,7397
Punto 10	50,0	15,7	104,08	5171,2993	5274,7369	5278,5993
Punto 11	55,0	15,4	109,68	5377,0011	5475,6727	5475,6011
Punto 12	60,0	15,8	117,49	5449,7150	5561,7282	5559,9150
Punto 13	65,0	15,3	130,97	5259,8572	5353,4897	5355,5572
Punto 14	70,0	15,6	134,62	5501,9552	5608,9744	5606,3552
Punto 15	75,0	15,2	145,95	5412,9152	5506,3021	5505,7152
Punto 16	80,0	15,4	155,45	5403,3061	5502,4605	5501,9061
Punto 17	85,0	15,4	163,92	5430,3557	5530,0064	5528,9557
Punto 18	90,0	14,8	170,92	5503,6615	5586,5661	5584,8615
Punto 19	95,0	14,9	181,39	5459,8486	5545,0764	5543,9486
Promedios->				5437,6836	5538,3360	5537,0891

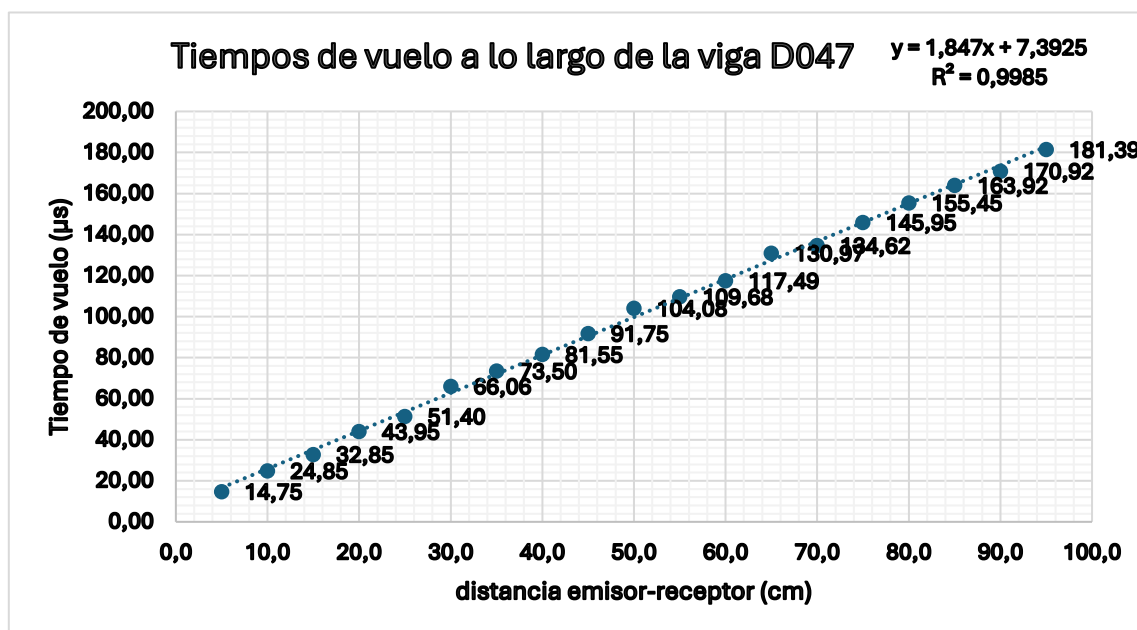


Figura 217. Gráfico de dispersión para viga sana D047 de abeto de clase resistente GL18.

Tabla 39. Tabla de datos viga sana D051 de madera de abeto de clase resistente GL24, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (µs)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	15,2		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	15,5	12,99	5103,5511	5200,0113	5205,0511
Punto 2	10,0	15,8	23,18	5003,2271	5106,0632	5113,4271
Punto 3	15,0	16,0	32,18	5174,7156	5286,7957	5290,7156
Punto 4	20,0	16,2	43,38	4976,7214	5090,0254	5098,5214
Punto 5	25,0	16,3	51,51	5174,1516	5294,8206	5298,8516
Punto 6	30,0	16,2	60,40	5244,1043	5363,4957	5365,9043
Punto 7	35,0	16,2	69,80	5254,6951	5374,3276	5376,4951
Punto 8	40,0	16,1	80,00	5207,8519	5323,5322	5326,7519
Punto 9	45,0	16,5	89,81	5195,2790	5322,2138	5325,7790
Punto 10	50,0	16,5	101,60	5080,9342	5205,0752	5211,4342
Punto 11	55,0	16,5	109,88	5155,2624	5281,2195	5285,7624
Punto 12	60,0	16,5	118,59	5199,4374	5326,4738	5329,9374
Punto 13	65,0	16,4	128,33	5194,3029	5318,3263	5321,9029
Punto 14	70,0	16,3	138,44	5175,8648	5296,5737	5300,5648
Punto 15	75,0	16,2	148,58	5158,6420	5276,0877	5280,4420
Punto 16	80,0	16,2	158,34	5156,3967	5273,7913	5278,1967
Punto 17	85,0	16,0	168,41	5144,7459	5256,1769	5260,7459
Punto 18	90,0	15,8	177,76	5155,6107	5261,5788	5265,8107
Punto 19	95,0	15,7	187,35	5158,6390	5261,8234	5265,9390
Promedios->				5156,1434	5273,2445	5277,6212

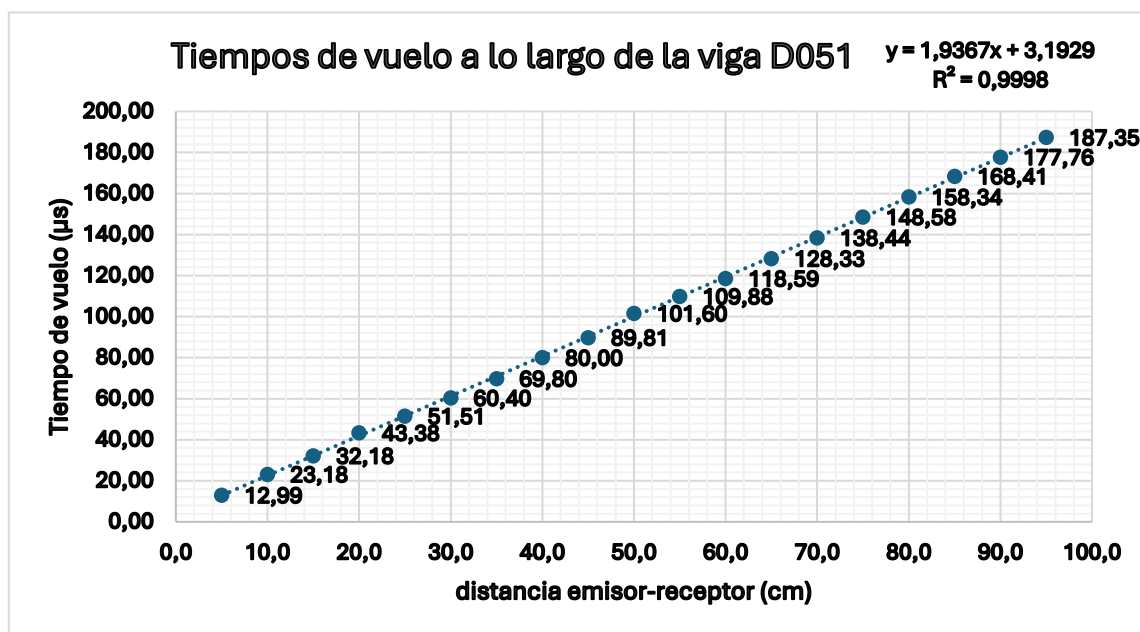


Figura 218. Gráfico de dispersión para viga sana D051 de abeto de clase resistente GL24.

Tabla 40. Tabla de datos viga sana D059 de madera de abeto de clase resistente GL28, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μ s)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	14,3		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	15,9	20,33	6661,3376	6801,9336	6774,4376
Punto 2	10,0	16,7	29,98	5828,8645	5977,7708	5965,1645
Punto 3	15,0	17,0	39,30	5665,5084	5819,7313	5810,5084
Punto 4	20,0	17,2	48,82	5556,1729	5713,6408	5706,9729
Punto 5	25,0	16,9	57,92	5543,7289	5691,5382	5685,8289
Punto 6	30,0	17,1	67,11	5526,2867	5679,8120	5674,1867
Punto 7	35,0	17,2	75,86	5552,3828	5709,7433	5703,1828
Punto 8	40,0	17,1	86,41	5435,8166	5586,8286	5583,7166
Punto 9	45,0	17,0	94,10	5536,6898	5687,4061	5681,6898
Punto 10	50,0	17,0	102,80	5557,0374	5708,3076	5702,0374
Punto 11	55,0	17,1	111,52	5572,6676	5727,4814	5720,5676
Punto 12	60,0	17,1	122,13	5489,1772	5641,6716	5637,0772
Punto 13	65,0	17,0	129,70	5561,4497	5712,8400	5706,4497
Punto 14	70,0	17,3	138,90	5552,2066	5712,6757	5705,9066
Punto 15	75,0	17,1	147,30	5577,2034	5732,1432	5725,1034
Punto 16	80,0	17,0	155,60	5603,1826	5755,7089	5748,1826
Punto 17	85,0	16,8	165,26	5576,1106	5721,6699	5715,3106
Punto 18	90,0	16,2	173,66	5595,7621	5723,1597	5717,5621
Punto 19	95,0	15,8	182,64	5594,2903	5709,2751	5704,4903
Promedios->				5573,5855	5722,8558	5716,3299

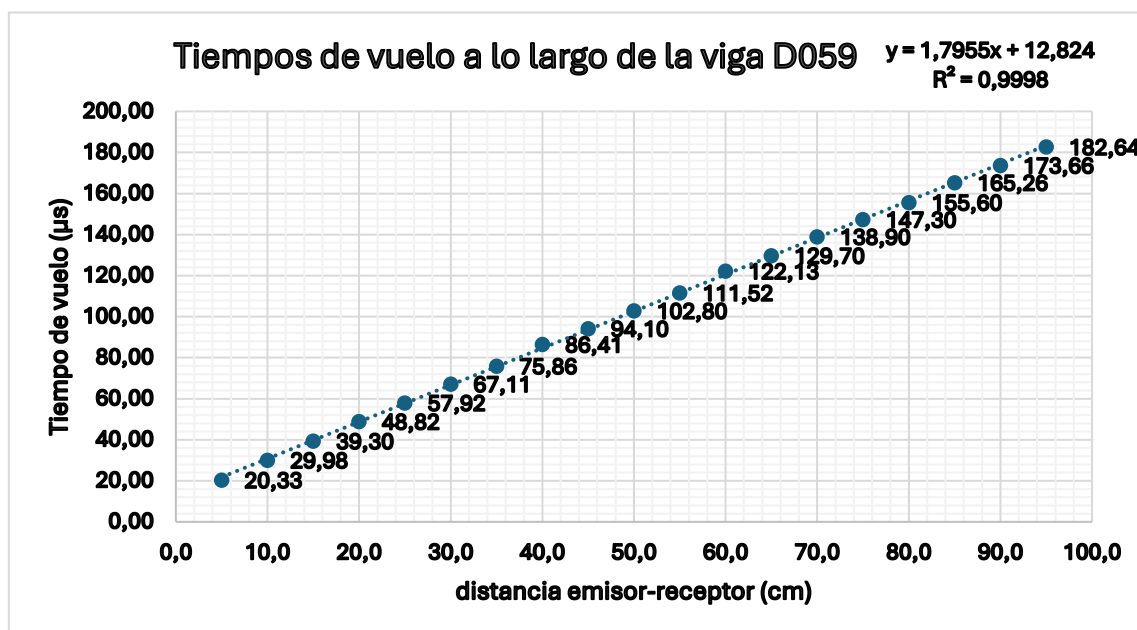


Figura 219. Gráfico de dispersión para viga sana D051 de abeto de clase resistente GL28.

Tabla 41. Tabla de datos viga sumergida D042 de madera de abeto de clase resistente GL18, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (µs)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	16,3		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	16,2	16,50	5107,1480	5223,4213	5228,9480
Punto 2	10,0	16,2	27,05	4916,3725	5028,3025	5038,1725
Punto 3	15,0	15,7	36,85	4976,7420	5076,2880	5084,0420
Punto 4	20,0	16,3	46,42	5036,4894	5153,9478	5161,1894
Punto 5	25,0	16,7	56,00	5072,0021	5201,5733	5208,3021
Punto 6	30,0	16,2	64,80	5164,3823	5281,9587	5286,1823
Punto 7	35,0	16,4	73,60	5232,4556	5357,3899	5360,0556
Punto 8	40,0	16,7	83,55	5205,6085	5338,5929	5341,9085
Punto 9	45,0	16,8	94,82	5107,2407	5240,5606	5246,4407
Punto 10	50,0	16,0	104,50	5112,9868	5223,7299	5228,9868
Punto 11	55,0	15,9	118,65	4913,3377	5017,0399	5026,4377
Punto 12	60,0	16,8	124,20	5106,8089	5240,1175	5246,0089
Punto 13	65,0	16,3	133,90	5110,4566	5229,6401	5235,1566
Punto 14	70,0	15,8	143,40	5121,0694	5226,3276	5231,2694
Punto 15	75,0	16,5	154,30	5081,6382	5205,7965	5212,1382
Punto 16	80,0	16,6	162,96	5119,9934	5247,9382	5253,3934
Punto 17	85,0	15,9	173,13	5107,5530	5215,3544	5220,6530
Punto 18	90,0	16,2	183,68	5085,6020	5201,3848	5207,4020
Punto 19	95,0	16,8	193,80	5077,7646	5210,3150	5216,9646
			Promedios->	5086,0280	5205,3476	5211,3724

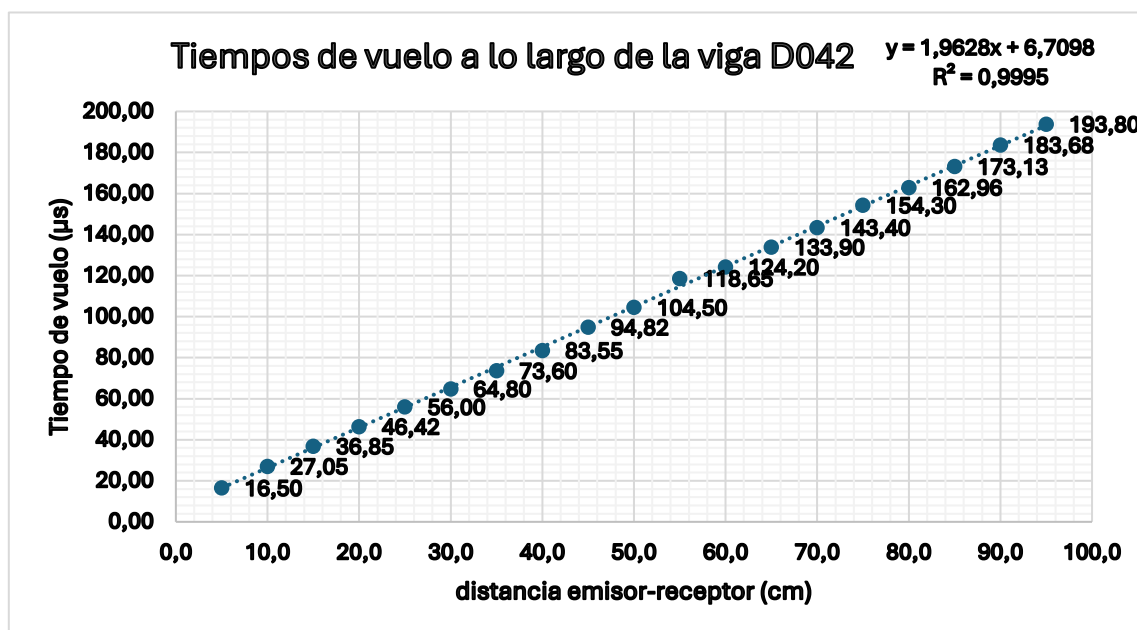


Figura 220. Gráfico de dispersión para viga sumergida D042 de abeto de clase resistente GL18.

Tabla 42. Tabla de datos viga sumergida D050 de madera de abeto de clase resistente GL24, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	16,3		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	16,6	13,67	5112,0040	5239,7491	5245,4040
Punto 2	10,0	16,5	23,05	5218,9615	5346,4750	5349,4615
Punto 3	15,0	16,4	32,94	5163,3512	5286,6356	5290,9512
Punto 4	20,0	16,5	44,13	4970,0678	5091,5000	5100,5678
Punto 5	25,0	17,0	54,18	4971,0783	5106,3978	5116,0783
Punto 6	30,0	16,7	64,13	4980,0053	5107,2263	5116,3053
Punto 7	35,0	16,5	74,42	4962,3640	5083,6081	5092,8640
Punto 8	40,0	16,8	84,32	4973,2130	5103,0342	5112,4130
Punto 9	45,0	17,3	98,20	4771,4527	4909,3565	4925,1527
Punto 10	50,0	16,5	104,40	4974,5848	5096,1275	5105,0848
Punto 11	55,0	16,5	113,33	5025,5435	5148,3312	5156,0435
Punto 12	60,0	17,0	120,23	5157,2577	5297,6453	5302,2577
Punto 13	65,0	17,0	130,85	5119,6865	5259,0513	5264,6865
Punto 14	70,0	16,6	141,95	5070,2263	5196,9273	5203,6263
Punto 15	75,0	16,9	153,02	5029,1388	5163,2279	5171,2388
Punto 16	80,0	17,1	163,68	5006,5429	5145,6293	5154,4429
Punto 17	85,0	17,0	173,82	5002,0332	5138,1954	5147,0332
Punto 18	90,0	17,0	184,45	4984,4678	5120,1519	5129,4678
Punto 19	95,0	17,6	194,88	4974,0590	5126,2047	5136,4590
			Promedios->	5019,6686	5151,4292	5159,6741

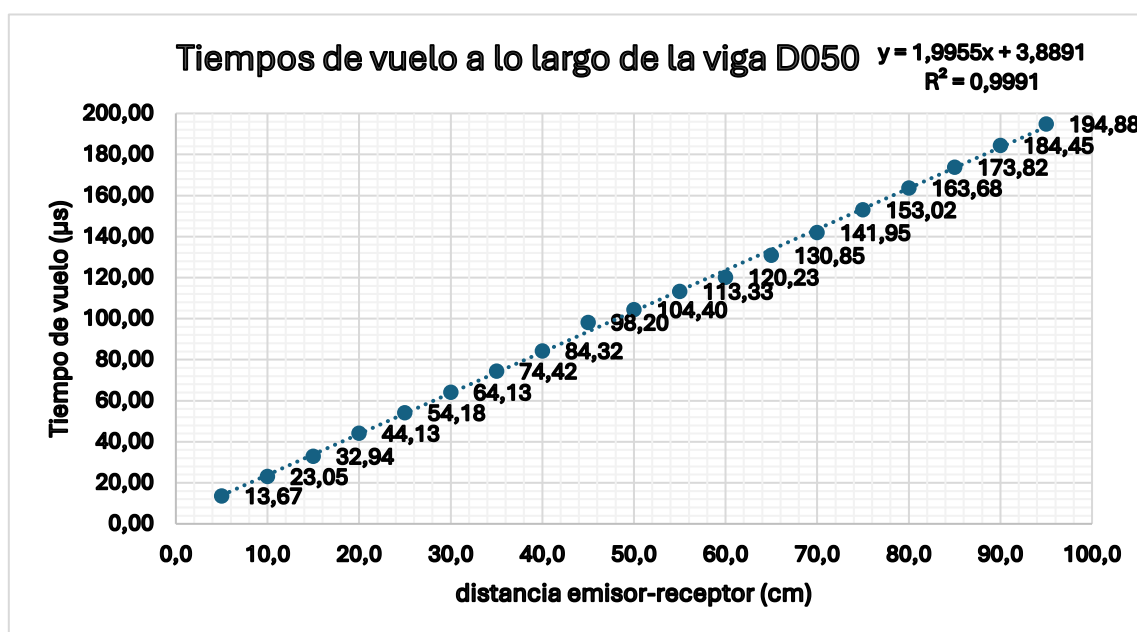


Figura 221. Gráfico de dispersión para viga sumergida D042 de abeto de clase resistente GL24.

Tabla 43. Tabla de datos viga sumergida D058 de madera de abeto de clase resistente GL28, con cálculo de velocidades con corrección de humedad al 12%.

	Distancia origen (cm)	Humedad (%)	Tiempo de vuelo (μs)	V(m/s)	V corregida (m/s)	V corregida (m/s)
Punto 0	0,0	17,8		(emisor)	Steiger, 1995	Sandoz, 1993
Punto 1	5,0	17,7	14,95	6424,0104	6624,1252	6589,3104
Punto 2	10,0	18,2	25,20	5545,2968	5733,7063	5725,0968
Punto 3	15,0	18,4	34,70	5447,9485	5639,2312	5633,5485
Punto 4	20,0	18,3	44,52	5354,2793	5539,2343	5536,9793
Punto 5	25,0	18,4	53,83	5357,5294	5545,6374	5543,1294
Punto 6	30,0	18,5	62,92	5380,8474	5572,8315	5569,3474
Punto 7	35,0	18,5	74,29	5214,2848	5400,3260	5402,7848
Punto 8	40,0	18,4	84,64	5163,0691	5344,3494	5348,6691
Punto 9	45,0	18,5	93,70	5200,3102	5385,8528	5388,8102
Punto 10	50,0	18,6	102,85	5225,5723	5414,9886	5416,9723
Punto 11	55,0	18,4	112,45	5224,0004	5407,4201	5409,6004
Punto 12	60,0	18,5	121,10	5266,2391	5454,1340	5454,7391
Punto 13	65,0	18,4	130,00	5291,7246	5477,5222	5477,3246
Punto 14	70,0	18,3	138,80	5317,8033	5501,4984	5500,5033
Punto 15	75,0	18,3	148,00	5325,4450	5509,4040	5508,1450
Punto 16	80,0	18,1	157,10	5335,7059	5513,9727	5512,6059
Punto 17	85,0	18,2	166,30	5341,4339	5522,9169	5521,2339
Punto 18	90,0	17,8	176,05	5329,1237	5498,1364	5497,3237
Punto 19	95,0	17,4	185,60	5324,1183	5480,9841	5480,7183
			Promedios->	5313,5962	5496,7859	5495,9740

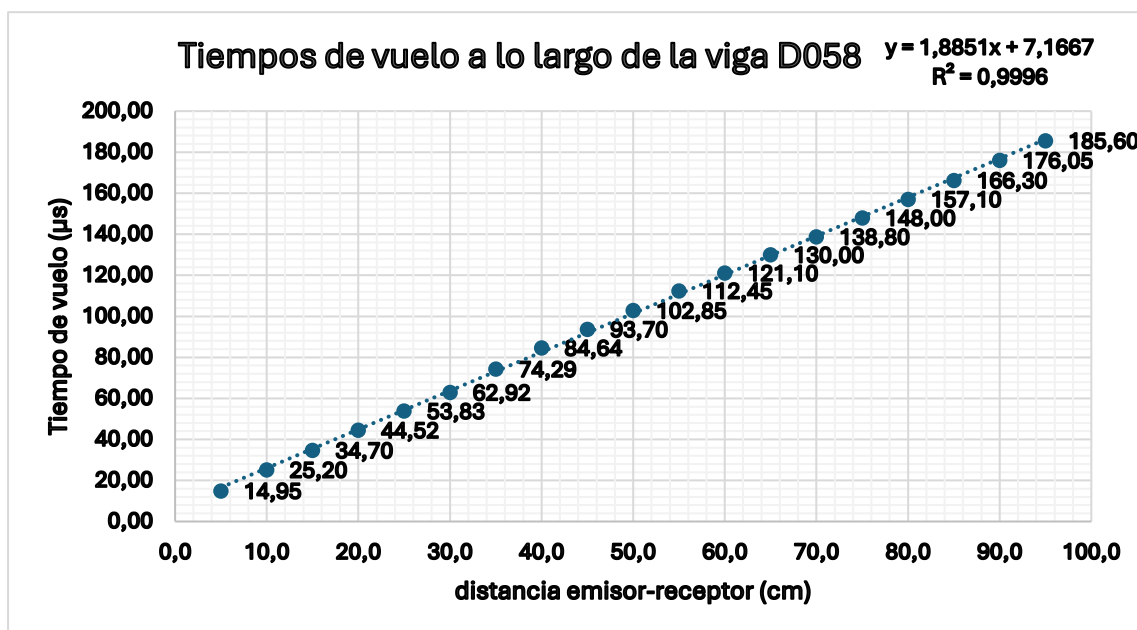


Figura 222. Gráfico de dispersión para viga sumergida D042 de abeto de clase resistente GL28.