

*Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA*

MODELIZACIÓN Y CONTRASTE EXPERIMENTAL DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE MADERA LAMINADA MEDIANTE ENSAYOS INDIRECTOS

Trabajo realizado por:

Christian González Iglesias

Dirigido:

Ignacio Lombillo Vozmediano

Ramón Sancibrián Herrera

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería
de Caminos, Canales y Puertos**

Santander, septiembre de 2025

TRABAJO FIN DE MASTER

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LA ELABORACIÓN DEL TRABAJO	4
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. PROPIEDADES DE LA MADERA.....	6
2.1.1. Composición y estructura interna de la madera.....	7
2.1.2. Propiedades físicas y mecánicas	14
2.1.3. Durabilidad y procesos de degradación.....	22
2.2. MADERA LAMINADA.....	26
2.2.1. Tipología y clasificaciones	29
2.2.2. Proceso de fabricación	35
2.2.3. Características: ventajas, limitaciones.....	40
2.3. ANÁLISIS ULTRASÓNICO	42
2.3.1. Principios básicos del ultrasonido en materiales	44
2.3.2. Generación de ondas ultrasónicas	50
2.3.3. Métodos de ensayo	52
2.4. MÉTODOS NUMÉRICOS	56
2.4.1. Fundamentos del Método de los Elementos Finitos (MEF).....	58
2.4.2. Principios básicos del MEF aplicado a la propagación de ondas.....	61
3. MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	65
3.1. MATERIALES Y EQUIPOS	65
3.1.1. Descripción de las muestras	65
3.1.1. Equipos y herramientas de ensayo	66
3.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	71
3.2.1. Preparación y caracterización de las muestras	72
3.2.2. Diseño del ensayo ultrasónico.....	73
3.2.3. Modelado computacional.....	75

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	86
4.1. VALIDACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL	86
4.1.1. Comparación entre resultados experimentales y simulados	86
4.1.2. Evaluación del ajuste del modelo	90
4.2. ANÁLISIS PARAMÉTRICO	91
4.3. INFLUENCIA DE DEFECTOS: FISURA TRANSVERSAL	92
4.3.1. Análisis numérico	92
4.3.2. Comparativa numérico-experimental	103
4.4. INFLUENCIA DE DEFECTOS: NUDOS	108
4.4.1. Análisis numérico	108
4.4.2. Comparativa numérico-experimental	115
4.5. INFLUENCIA DE DEFECTOS: DELAMINACIÓN	120
4.6. INFLUENCIA DE DEFECTOS: ATAQUE BIÓTICO	124
4.6.1. Análisis numérico	124
4.6.2. Comparativa numérico-experimental	128
4.7. INFLUENCIA DE LA ORTOTROPÍA	132
4.8. INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DEL CANTO	139
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	140
5.1. CONCLUSIONES PRINCIPALES	140
5.2. CONTRIBUCIONES DEL TRABAJO	141
5.3. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	143
5.4. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	144
6. BIBLIOGRAFÍA	146
ANEXO I	149
ANEXO II	177

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. N° de publicaciones según la base de datos Web of Science relacionadas con dos conjuntos de palabras clave: A) finite AND element AND method; B) wave AND propagation (Žak, 2024).....	2
Figura 2. Diagrama de flujo del trabajo.....	4
Figura 3. Anatomía del árbol.....	9
Figura 4. Estructura macroscópica y planos de corte (Blaß y Sandhaas, 2017).	10
Figura 5. Estructura esquemática conífera (izq.) y frondosa (der.)(Blaß y Sandhaas, 2017). 11	
Figura 6. Estructura de la pared celular (Blaß y Sandhaas, 2017).....	11
Figura 7. Estructura microscópica del abeto (izq.) y roble (der.) (Blaß y Sandhaas, 2017). ..	13
Figura 8. Resistencia mecánica en función del contenido en humedad (Vignote, 2014).....	15
Figura 9. Figuras esquemáticas de la influencia de la densidad (Blaß y Sandhaas, 2017). ..	17
Figura 10. Relación velocidad de propagación y dirección de la fibra (Acuña et al., 2007). ..	20
Figura 11. Carga (arriba) y deformación por fluencia (abajo) (Blaß y Sandhaas, 2017).	20
Figura 12. Efecto del ángulo α en la resistencia: a) f_t y b) f_c (Blaß y Sandhaas, 2017).....	21
Figura 13. Viga Hetzer. Patente N.º 125895 (Müller, 2000).....	26
Figura 14. Test del edificio del FPL (Müller, 2000).	28
Figura 15. Museo Jurásico de Asturias (Santos, 2005).....	29
Figura 16. a) Laminación horizontal; b) Laminación vertical (How et al., 2016).	31
Figura 17. Ejemplo de combinación de láminas (UNE-EN 14080, 2022).	32
Figura 18. Perfil tipo de un empalme por unión dentada (UNE-EN 14080, 2022)	33
Figura 19. a) Unión horizontal; b) Unión vertical (How et al., 2016).	33
Figura 20. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de la madera laminada encolada (U.S. Environmental Protection Agency, 2010).	36
Figura 21. Secado de la madera al aire (Techlam, 2020).....	37
Figura 22. Selección de tablas (izq.) y control de calidad (der.) (Techlam, 2020).....	37
Figura 23. Aplicación de adhesivo (izq.) y unión de los extremos (der.) (Techlam, 2020).....	38

Figura 24. Aplicación del adhesivo en peine (izq.) y prensado (der.) (Techlam, 2020).	39
Figura 25. Mecanizado final de la pieza (izq.) y lijado (der.) (Techlam, 2020).	40
Figura 26. R. Fessenden y el oscilador Fessenden (Kaproth-Joslin et al., 2015).	43
Figura 27. Amplitud y periodo de una onda (UPENN, 2013).	44
Figura 28. Reflexión y refracción de una onda que incide oblicuamente en la interfaz entre dos materiales (Krautkrämer y Krautkämmer, 1983).	46
Figura 29. Disminución de la amplitud de onda para diferentes grados de atenuación (Krautkrämer y Krautkämmer, 1983).	46
Figura 30. Interferencia de ondas (Medina, 2013).	47
Figura 31. Ondas longitudinales (Krautkrämer y Krautkämmer, 1983).	48
Figura 32. Ondas transversales (Krautkrämer y Krautkämmer, 1983).	49
Figura 33. Ondas de Rayleigh (Krautkrämer y Krautkämmer, 1983).	49
Figura 34. Tipos de ondas (izq.) y curvas de tiempo de viaje (der.) (MIT, 2008).	50
Figura 35. a) Efecto piezoeléctrico directo; b) Efecto inverso (Rödel y Li, 2018).	51
Figura 36. Diagrama de equipo ultrasónico (Cabrera-López y Velasco-Medina, 2011).	52
Figura 37. Método de resonancia (Medina, 2013).	53
Figura 38. Configuración de los transductores en método de transmisión (Medina, 2013). ..	54
Figura 39. Ejemplo de determinación de la velocidad de propagación a partir de ensayo por el método indirecto (UNE-EN 12504, 2022).	55
Figura 40. Representaciones esquemáticas obtenidas por el método pulso-eco (Krautkrämer y Krautkämmer, 1983).	56
Figura 41. Concepto de discretización y ensamblaje de un modelo numérico 1D de formado por 4 EF tipo barra, con polinomios de segundo grado (Žak, 2024).	61
Figura 42. GANN Hydromette RTU 600 (GANN, 2025).	68
Figura 43. Clavija: M20 (izq.), M18 (centro) y MH 34 (der.) (GANN, 2025).	68
Figura 44. Transductores con acoplador trapecial (Fakopp, 2025).	69
Figura 45. Componentes del resistógrafo IML-RESI PD-Series (IML, 2024).	71
Figura 46. Útiles de corte y marcado empleados.	72
Figura 47. Simulación de ataque biótico mediante perforaciones con resistógrafo.	73

Figura 48. Método de ensayo A (arriba) y B (abajo).....	74
Figura 49. Geometría del acoplador.	75
Figura 50. Geometría del modelo para una separación de 20 cm.	76
Figura 51. Geometría del modelo en 3D para una separación de 20 cm.	77
Figura 52. Introducción de fisura en el modelo para una separación de 20 cm.	77
Figura 53. Introducción de nudo (izq.) y delaminación (der.) con una separación de 20 cm.	78
Figura 54. Distribución de 50 cavidades circulares empleado para simular ataque biótico.	78
Figura 55. Distribución de 100 cavidades circulares empleado para simular ataque biótico.	79
Figura 56. Introducción de ataque biótico en el modelo para una separación de 20 cm.	79
Figura 57. Parámetros físicos y mecánicos de la muestra de madera de abeto (izq.) y pino silvestre (der.) considerando un medio isótropo.	80
Figura 58. Parámetros físicos y mecánicos de la muestra de madera de pino silvestre considerando un medio ortótropo.	80
Figura 59. Señal eléctrica de activación del transductor emisor.....	81
Figura 60. Pulso de voltaje del transductor emisor.	82
Figura 61. Contorno de aplicación del pulso ultrasónico.....	82
Figura 62. Condición de apoyo (izq.) y material piezoeléctrico (der.).	83
Figura 63. Tierra (izq.), terminal de voltaje (centro) y terminal de carga (der.).	83
Figura 64. Puntos de referencia considerados.	83
Figura 65. Definición de la malla de elementos finitos para una separación de 20 cm.	84
Figura 66. Configuración del estudio para una separación de 20 cm.....	85
Figura 67. Muestra de madera de abeto D047.	87
Figura 68. Modelo como un medio continuo (izq.) y considerando las interfases (der.).	87
Figura 69. Diferencias relativas de los modelos frente a los resultados experimentales.	88
Figura 70. Representación de los tiempos de vuelo experimentales y simulados.	89
Figura 71. Comparativa entre velocidad de propagación experimental y simulada.	89
Figura 72. Fisura de H/6 de profundidad en: D/4 (izq.), D/3 (centro) y D/2 (der.).	92
Figura 73. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, para una fisura de profundidad H/6.	93

Figura 74. Fisura de H/4 de profundidad en: D/4 (izq.), D/3 (centro) y D/2 (der.).	94
Figura 75. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, para una fisura de profundidad H/4.	94
Figura 76. Fisura de H/3 de profundidad en: D/4 (izq.), D/3 (centro) y D/2 (der.).	95
Figura 77. Diferencia. relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, para una fisura de profundidad H/3.	95
Figura 78. Fisura de H/2 de profundidad en: D/4 (izq.), D/3 (centro) y D/2 (der.).	96
Figura 79. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, para fisura de profundidad H/2.	96
Figura 80. Dif. relativa en ToF, respecto al modelo sin defectos, para una fisura a 10 cm.	97
Figura 81. Velocidades de propagación para una fisura a 10 cm.	98
Figura 82. ToF para diferentes profundidades de fisura ubicada en D/2 en medio isótropo.	99
Figura 83. Velocidades de propagación para una fisura en D/2.	100
Figura 84. Dif. relativa en ToF, respecto al modelo sin defectos, para una fisura en D/2.	101
Figura 85. Instantáneas de propagación de ondas frente a fisura de profundidad H/4.	103
Figura 86. Ensayo en fisuras de profundidad H/3 (izq.) y H/2 (der.) a 10 cm.	104
Figura 87. Ensayo en fisuras de profundidad H/6 (izq.) y H/4 (der.) en D/2.	104
Figura 88. Dif. relativas en ToF, respecto a la probeta sin defectos, con fisura en D/2.	105
Figura 89. Velocidades de propagación para diferentes profundidades de fisura en D/2.	105
Figura 90. Dif. relativas en ToF, respecto a la probeta sin defectos, con fisura a 10 cm.	106
Figura 91. Velocidades de propagación para diferentes profundidades de fisura a 10 cm.	106
Figura 92. Nudo con centro en superficie en: D/4 (izq.), D/3 (centro) y D/2 (der.).	108
Figura 93. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, con un nudo con la superficie.	109
Figura 94. Nudo con centro en H/8 del espesor en: D/4 (izq.), D/3 (centro) y D/2 (der.).	109
Figura 95. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, con un nudo con centro en H/8.	110
Figura 96. Nudo con centro en H/6 del espesor en: D/4 (izq.), D/3 (centro) y D/2 (der.).	110

Figura 97. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, con un nudo con centro en $H/6$	111
Figura 98. Nudo con centro en $H/4$ del espesor en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.).	111
Figura 99. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, con un nudo con centro en $H/4$	112
Figura 100. Nudo con centro en $H/2$ del espesor en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.). ..	112
Figura 101. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, con un nudo con centro en $H/2$	113
Figura 102. Diferencia relativa del tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, para nudo ubicado en $D/2$	114
Figura 103. Instantáneas de propagación de ondas frente a nudo de profundidad $H/8$	115
Figura 104. Muestra de madera de abeto D051 con nudo (izq.) y detalle (der.).....	116
Figura 105. Ensayo experimental sobre muestra D051: separación de 15 cm (arriba) y 30 cm (debajo).....	116
Figura 106. Ensayo en muestra de madera de abeto D057 sin nudo (izq.) y detalle (der.).	117
Figura 107. Comparativa de ToF entre muestra D051 (con nudo) y D057 (sin nudo).	117
Figura 108. Modelo con nudo en superficie ($D/2$) para una separación de 30 cm.....	118
Figura 109. Comparativa de ToF entre muestra D051 (con nudo) y modelo.	119
Figura 110. Delaminación de ancho $D/2$ en: $0,4 \cdot H$ (izq.), $0,6 \cdot H$ (centro) y $0,8 \cdot H$ (der.).	120
Figura 111. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto del modelo de referencia sin defectos, con una delaminación de ancho $D/2$	121
Figura 112. Delaminación de ancho D en: $0,4 \cdot H$ (izq.), $0,6 \cdot H$ (centro) y $0,8 \cdot H$ (der.).	121
Figura 113. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto del modelo de referencia sin defectos, con una delaminación de ancho D	122
Figura 114. Instantáneas de propagación frente a delaminación con profundidad $0,4 \cdot H$	123
Figura 115. Ataque biótico ubicado en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.).....	124
Figura 116. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto del modelo de referencia sin defectos, de muestra con ataque biótico.	125
Figura 117. Ataque biótico ubicado a 10 cm del emisor.	125

Figura 118. Diferencia relativa en ToF, respecto del modelo de referencia sin defectos, con ataque biótico ubicado a 10 y 30 cm.	126
Figura 119. Velocidad de propagación con ataque biótico ubicado a 10 y 30 cm.....	126
Figura 120. Instantáneas de propagación de ondas frente a un ataque biótico.	128
Figura 121. Ensayo con ataque biótico en D/2. Separaciones de 10 (izq.) y 50 cm (der.)...	128
Figura 122. Ensayo con ataque biótico ubicado a 10 cm del transductor emisor. Separaciones de 10 (izq.) y 30 cm (der.).....	129
Figura 123. Comparativa de velocidades de propagación en la muestra D051 sana y con ataque biótico a ubicado a 10 cm del transductor emisor.	129
Figura 124. Tiempos de vuelo experimentales y simulados con ataque biótico a D/2.	130
Figura 125. Dif. relativa en ToF con respecto de muestra sana. Ataque biótico en D/2.....	130
Figura 126. Tiempos de vuelo experimentales y simulados con ataque biótico a 10 cm.....	131
Figura 127. Dif. relativa en ToF con respecto de muestra sana. Ataque biótico a 10 cm.....	131
Figura 128. Comparación de tiempos de vuelo considerando medio isótropo y ortótropo. .	132
Figura 129. Instantáneas de propagación de ondas en medio ortótropo.	135
Figura 130. Tiempos de vuelo registrados para diferentes profundidades de fisura ubicada en D/2 en medio ortótropo.....	135
Figura 131. Diferencia relativa en ToF con respecto a sus homólogos en medio isótropo. .	136
Figura 132. Instantáneas de propagación de ondas en medio ortótropo con fisura.	138
Figura 133. Variación en los tiempos de vuelo con respecto del caso base H = 17 cm.	139

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Compuestos químicos principales de la madera.	12
Tabla 2. Diferencias anatómicas y funcionales entre coníferas y frondosas.....	13
Tabla 3. Cambios relativos en las propiedades mecánicas de la madera con cada incremento del 1 % en el contenido de humedad (Blaß y Sandhaas, 2017).....	16
Tabla 4. Clases de uso de la madera según CTE DB SE-M (Ministerio de Fomento, 2019). 23	
Tabla 5. Niveles de protección según CTE DB SE-M (Ministerio de Fomento, 2019).	24
Tabla 6. Características de los hongos xilófagos.	24
Tabla 7. Propiedades de resistencia característica a tracción paralela a la fibra y rigidez para las clases T (MPa) y densidad (kg/m ³) de las tablas para madera laminada (UNE-EN 14080, 2022).	30
Tabla 8. Propiedades características de resistencia y rigidez (MPa) y densidad (kg/m ³) para madera laminada encolada homogénea (UNE-EN 14080, 2022).	32
Tabla 9. Clases de adhesivos (UNE-EN 301, 2023).	35
Tabla 10. Valores recomendados para la presión de prensado (UNE-EN 14080, 2022).	39
Tabla 11. Muestras disponibles ordenadas según especie, tratamiento y estado. Dimensiones y HEH tras acondicionamiento en cámara durante 2 meses (Bustamante Gutiérrez, 2025). 67	
Tabla 12. Especificaciones técnicas del equipo Fakopp Ultrasonic Timer.	70
Tabla 13. Resumen de ensayos experimentales y simulaciones realizadas.	74
Tabla 14. Tiempos de vuelo experimentales y simulados.	150
Tabla 15. Diferencias relativas en ToF respecto resultados experimentales.	150
Tabla 16. Velocidad de propagación experimental y simulada.	151
Tabla 17. Corrección de tiempo para el cálculo de la velocidad.	151
Tabla 18. Tiempos de vuelo para una fisura de profundidad H/6.	152
Tabla 19. Diferencia relativa en ToF para una fisura de profundidad H/6.	152
Tabla 20. Tiempos de vuelo para una fisura de profundidad H/4.	153
Tabla 21. Diferencia relativa en ToF para una fisura de profundidad H/4.	153
Tabla 22. Tiempos de vuelo para una fisura de profundidad H/3.	154

Tabla 23. Diferencia relativa en ToF para una fisura de profundidad H/3.	154
Tabla 24. Tiempos de vuelo para una fisura de profundidad H/2.	155
Tabla 25. Diferencia relativa en ToF para una fisura de profundidad H/2.	155
Tabla 26. Diferencia relativa en ToF para una fisura ubicada en D/2.	156
Tabla 27. Diferencia relativa en ToF para una fisura ubicada en D/3.	156
Tabla 28. Diferencia relativa en ToF para una fisura ubicada en D/4.	157
Tabla 29. Tiempos de vuelo experimentales para distintas profundidades de fisura ubicada a 10 cm del emisor.	158
Tabla 30. Diferencias relativas en tiempos de vuelo para distintas profundidades de fisura ubicada a 10 cm del emisor.	158
Tabla 31. Tiempos de vuelo experimentales para distintas profundidades de fisura ubicada en D/2.	159
Tabla 32. Diferencias relativas en tiempos de vuelo para distintas profundidades de fisura ubicada en D/2.	159
Tabla 33. Tiempos de vuelo para un nudo con centro en superficie.	160
Tabla 34. Diferencia relativa en ToF para un nudo con centro en superficie.	160
Tabla 35. Tiempos de vuelo para un nudo con centro en H/8.	161
Tabla 36. Diferencia relativa en ToF para un nudo con centro en H/8.	161
Tabla 37. Tiempos de vuelo para un nudo con centro en H/6.	162
Tabla 38. Diferencia relativa en ToF para un nudo con centro en H/6.	162
Tabla 39. Tiempos de vuelo para un nudo con centro en H/4.	163
Tabla 40. Diferencia relativa en ToF para un nudo con centro en H/4.	163
Tabla 41. Tiempos de vuelo para un nudo con centro en H/2.	164
Tabla 42. Diferencia relativa en ToF para un nudo con centro en H/2.	164
Tabla 43. Diferencia relativa en ToF para nudo ubicado en D/2.	165
Tabla 44. Diferencia relativa en ToF para nudo ubicado en D/3.	166
Tabla 45. Diferencia relativa en ToF para nudo ubicado en D/4.	167
Tabla 46. ToF muestras D041 (con nudo) y D057 (sin nudo).	168
Tabla 47. Diferencias relativas en ToF experimentales y simulados.	168

Tabla 48. Tiempos de vuelo para una delaminación de ancho D.	169
Tabla 49. Diferencia relativa en ToF para una delaminación de ancho D.	169
Tabla 50. Tiempos de vuelo para una delaminación de ancho D/2.	170
Tabla 51. Diferencia relativa en ToF para una delaminación de ancho D/2.	170
Tabla 52. ToF para ataque biótico ubicado en D/4, D/3 y D/2.	171
Tabla 53. Diferencia relativa en ToF para ataque biótico en D/4, D/3 y D/2.....	171
Tabla 54. ToF para ataque biótico ubicado a 10 y 30 cm.	172
Tabla 55. Diferencia relativa en ToF para ataque biótico a 10 y 30 cm.	172
Tabla 56. ToF experimentales y simulados para ataque biótico en D/2.	173
Tabla 57. Diferencias relativas en tiempos de vuelo experimentales y simulados para ataque biótico en D/2.	173
Tabla 58. ToF experimentales y simulados para ataque biótico en 10 cm.	174
Tabla 59. Diferencias relativas en tiempos de vuelo experimentales y simulados para ataque biótico en 10 cm.	174
Tabla 60. ToF para fisura en D/2 considerando medio ortótropo.	175
Tabla 61. Diferencia relativa en ToF para fisura ubicada en D/2 con respecto a su homólogo en medio isótropo.	175
Tabla 62. Tiempos de vuelo en función de la dimensión del canto.	176

RESUMEN

MODELIZACIÓN Y CONTRASTE EXPERIMENTAL DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE MADERA LAMINADA MEDIANTE ENSAYOS INDIRECTOS

Este Trabajo Fin de Máster desarrolla un estudio numérico combinado con un contraste experimental sobre la propagación de ondas ultrasónicas en elementos estructurales de madera laminada encolada, con el objetivo de profundizar en la evaluación del estado del material y la detección de defectos internos.

Para ello, se realizaron ensayos ultrasónicos indirectos en probetas de madera de abeto, sometidas a diferentes configuraciones y condiciones, incluyendo la presencia de defectos simulados como fisuras de distinta profundidad y posición, presencia de nudos, procesos de delaminación y cavidades representativas de un ataque biótico por insectos xilófagos.

Las mediciones se realizaron empleando el equipo Fakopp Ultrasonic Timer con transductores de 45 kHz y dos métodos de ensayo. Paralelamente, se desarrollaron modelos computacionales bidimensionales y tridimensionales en COMSOL Multiphysics que reproducen la geometría de las probetas, las propiedades ortótropas de la madera y la interacción onda-defecto, incorporando técnicas como condiciones de contorno absorbentes y parametrización completa de la geometría.

La comparación detallada de resultados experimentales y simulados mostró una correlación muy elevada ($R^2 \approx 1$) para probetas sanas y un comportamiento coherente frente a defectos, permitiendo cuantificar la sensibilidad del sistema ante variaciones de tamaño, posición y tipo de discontinuidad. Las fisuras profundas demostraron el mayor impacto en la transmisión de energía, mientras que los nudos y ataques bióticos presentaron efectos moderados. Además, el modelo permitió analizar escenarios complejos, como variaciones geométricas y patrones de defectos múltiples, lo que mostró ser una vía prometedora por su capacidad predictiva.

Este trabajo confirma que la combinación de ensayos ultrasónicos indirectos y modelización numérica es una herramienta robusta y con gran potencial para el diagnóstico estructural y el mantenimiento predictivo de elementos de madera laminada, fomentando su aplicación en construcción sostenible y extendiendo la vida útil de este material.

ABSTRACT

MODELING AND EXPERIMENTAL COMPARISON OF ULTRASONIC WAVE PROPAGATION IN GLULAM STRUCTURAL ELEMENTS USING INDIRECT TESTING

This Master's Thesis develops a numerical study combined with an experimental comparison on the propagation of ultrasonic waves in glued laminated timber structural elements, with the aim of further evaluating the condition of the material and detecting internal defects.

To this end, indirect ultrasonic tests were carried out on spruce wood test specimens, subjected to different configurations and conditions, including the presence of simulated defects such as cracks of varying depth and position, knots, delamination processes, and cavities representative of biotic attack by xylophagous insects.

The measurements were performed using Fakopp Ultrasonic Timer equipment with 45 kHz transducers and two test methods. At the same time, two-dimensional and three-dimensional computational models were developed in COMSOL Multiphysics that reproduce the geometry of the test specimens, the orthotropic properties of wood, and wave-defect interaction, incorporating techniques such as absorbing boundary conditions and complete parameterization of the geometry.

The detailed comparison of experimental and simulated results showed a very high correlation ($R^2 \approx 1$) for healthy specimens and consistent behavior in the presence of defects, allowing the sensitivity of the system to variations in size, position, and type of discontinuity to be quantified. Deep cracks had the greatest impact on energy transmission, while knots and biotic attacks had moderate effects. In addition, the model allowed for the analysis of complex scenarios, such as geometric variations and multiple defect patterns, which proved to be a promising avenue due to its predictive capacity.

This work confirms that the combination of indirect ultrasonic testing and numerical modeling is a robust tool with great potential for structural diagnosis and predictive maintenance of laminated wood elements, promoting its application in sustainable construction and extending the useful life of this material.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN

En las últimas décadas, el sector de la construcción ha atravesado una profunda transformación en búsqueda de soluciones estructurales más sostenibles, eficientes y respetuosas con el medio ambiente. En un contexto marcado por la crisis climática y la urgente necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la industria de la edificación se enfrenta a una creciente presión para adoptar materiales con menor impacto ambiental y procesos constructivos optimizados. Según datos del World Green Building Council (2019), se estima que el sector de la construcción es responsable de alrededor del 39% de las emisiones globales de CO₂, de las cuales un 11% procede directamente de los materiales de construcción y de los procesos asociados a su fabricación.

Ante esta realidad, la madera laminada encolada, conocida internacionalmente como glulam (del inglés *glued laminated timber*), se ha posicionado como una alternativa competitiva frente a soluciones tradicionales como el hormigón armado o el acero. Su desarrollo tecnológico permite aprovechar las propiedades mecánicas de la madera y adaptarlas a las exigencias estructurales contemporáneas mediante procesos industrializados. Esta tipología de madera estructural está formada por láminas unidas con adhesivos, lo que no solo optimiza el aprovechamiento del recurso forestal, sino que, además, ofrece otras ventajas interesantes, como una elevada relación resistencia-peso, gran versatilidad y resistencia al fuego.

A pesar de estas ventajas, la presencia de la madera industrializada en el sector de la edificación en España aún es limitada. De hecho, según datos de Mass Madera (2024), en 2022 representó alrededor del 1 % de la obra nueva de nuestro país.

Por un lado, esta cifra indica la necesidad de una mayor difusión o conocimiento de sus beneficios entre proyectistas, promotores y administraciones. Por otra parte, la consolidación de la madera laminada como material estructural requiere también de sistemas de evaluación y control que garanticen su seguridad y durabilidad a lo largo del tiempo. En este sentido, los métodos tradicionales de inspección, como la evaluación visual o los ensayos destructivos, presentan limitaciones notables: pueden ser subjetivos, costosos y, en muchos casos, insuficientes para identificar defectos internos que comprometan el desempeño estructural.

Ante esta situación, se hace cada vez más necesario el desarrollo y la aplicación de técnicas de diagnóstico avanzadas y precisas, capaces de asegurar la integridad estructural del material y de mejorar la eficiencia de los procesos de mantenimiento y rehabilitación.

En este contexto, durante las últimas décadas se ha registrado un notable incremento en las publicaciones científicas que incluyen palabras clave vinculadas tanto al método de los

elementos finitos como a la propagación de ondas (Figura 1), lo que refleja, por un lado, el interés creciente en el uso de herramientas numéricas y, por otra parte, en la necesidad de profundizar en la comprensión de los fenómenos asociados a la propagación de ondas, que sirven de base de los ensayos no destructivos como el análisis ultrasónico para la caracterización e inspección de estructuras.

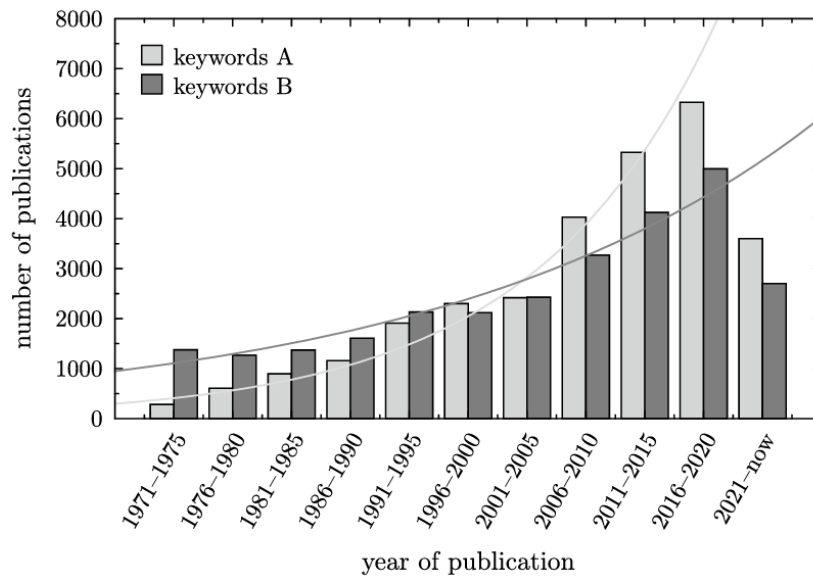


Figura 1. N° de publicaciones según la base de datos Web of Science relacionadas con dos conjuntos de palabras clave: A) finite AND element AND method; B) wave AND propagation (Žak, 2024).

En este marco, la madera laminada se presenta como una alternativa técnica y ambientalmente útil frente a los materiales convencionales, al combinar un buen desempeño estructural con criterios de sostenibilidad. La investigación en torno a su comportamiento resulta necesaria para consolidar su implementación en proyectos de ingeniería civil y arquitectura, con vistas a responder así a los desafíos ambientales y sociales actuales.

La motivación principal de este trabajo radica, por tanto, en la necesidad de profundizar en el estudio de la propagación ultrasónica en estructuras de madera laminada, explorando su potencial como material en la construcción contemporánea y en el diseño de las infraestructuras del futuro.

1.2. OBJETIVOS

Una vez definido el problema de investigación y su relevancia en el ámbito de estudio, resulta necesario establecer los objetivos que guiarán el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster. Estos objetivos representan las metas concretas que se pretenden alcanzar a través de la investigación. En este sentido, el presente TFM se centra en un objetivo general, que engloba el propósito principal del estudio, y en una serie de objetivos específicos, que desglosan las acciones necesarias para alcanzar dicha meta, esto es, responder a las preguntas planteadas en la investigación y contribuir al avance del conocimiento en esta área.

1.2.1. Objetivo general

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Máster está enfocado en el desarrollo y validación de un modelo de análisis ultrasónico para la evaluación estructural de madera laminada, combinando ensayos experimentales en laboratorio con simulaciones computacionales, con el fin de mejorar la detección de defectos y la caracterización del material.

1.2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo principal, se han definido una serie de objetivos específicos que permitirán estructurar el desarrollo del trabajo.

➤ **Revisión bibliográfica y marco teórico:**

- Análisis de las propiedades de la madera y en particular de la madera laminada.
- Análisis de los fundamentos del ultrasonido.
- Análisis de los métodos de modelado computacional.

➤ **Diseño y realización de los ensayos ultrasónicos en laboratorio:**

- Selección de las técnicas de ensayo y los parámetros adecuados para la medición ultrasónica en madera laminada.
- Diseño y ejecución de pruebas experimentales en muestras con defectos simulados.

➤ **Desarrollo y validación de un modelo computacional:**

- Implementación de un modelo numérico para simular la propagación de ondas ultrasónicas en madera laminada.
- Validación del modelo con los datos experimentales obtenidos en el laboratorio, evaluando el grado de ajuste del modelo y su capacidad predictiva.

➤ **Análisis de resultados:**

- Comparación de los resultados experimentales con defectos simulados con las predicciones del modelo computacional.
- Evaluación paramétrica de la influencia de distintos factores en el comportamiento del sistema ante la propagación ultrasónica.

➤ **Conclusiones:**

- Determinación de la viabilidad del método propuesto para su aplicación en estructuras de madera laminada.
- Propuesta de mejoras y posibles líneas de investigación.

1.3. METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LA ELABORACIÓN DEL TRABAJO

En búsqueda de ofrecer una visión clara y ordenada de la metodología empleada en este estudio, se ha elaborado una representación gráfica que permite visualizar de manera secuencial cada una de las fases del proceso investigativo. Este esquema, presentado a continuación en la Figura 2, refleja la progresión lógica entre las diferentes actividades realizadas, desde la formulación inicial del problema hasta la obtención de las conclusiones, facilitando la comprensión del camino recorrido durante el desarrollo del trabajo.

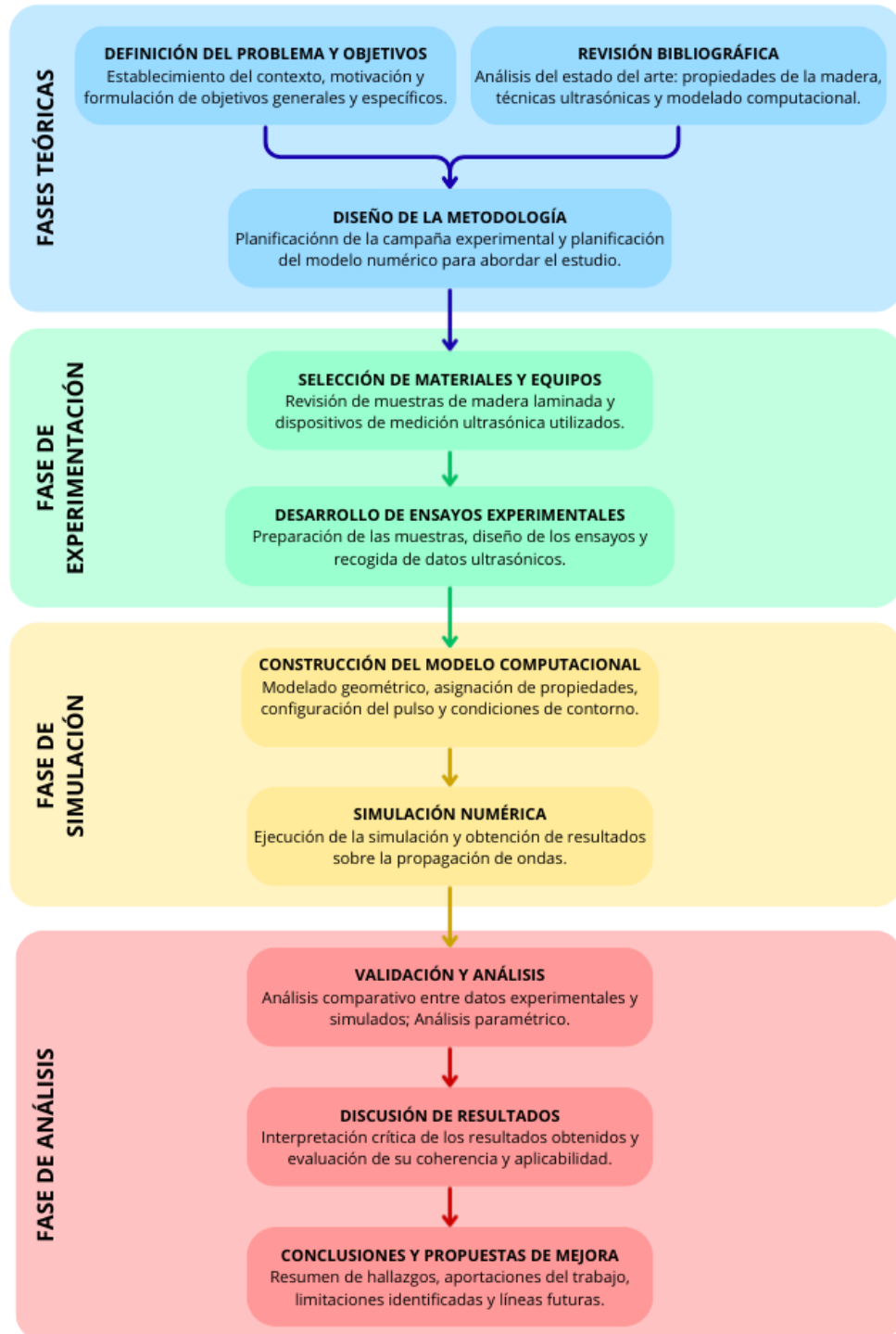


Figura 2. Diagrama de flujo del trabajo.

1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente Trabajo de Fin de Máster se ha estructurado en varios capítulos y apartados, organizados de manera secuencial para facilitar la comprensión y el seguimiento de la investigación. Esta estructura responde a la necesidad de presentar de forma coherente y ordenada los aspectos teóricos, metodológicos y prácticos que conforman el estudio. A continuación, se describe brevemente el contenido de cada capítulo:

➤ **Capítulo 1: Introducción**

En este capítulo se contextualiza el tema de investigación, justificando la importancia del análisis ultrasónico en estructuras de madera laminada y su impacto en la evaluación no destructiva de materiales. Se presentan los objetivos generales y específicos que guían el trabajo y se desglosa la organización del documento.

➤ **Capítulo 2: Marco teórico**

Se realiza una revisión exhaustiva de la literatura existente, proporcionando las bases conceptuales y técnicas necesarias para la comprensión del problema de investigación y de la metodología propuesta.

➤ **Capítulo 3: Materiales y metodología experimental**

En este capítulo se describen los materiales y equipos de ensayo utilizados durante el desarrollo de la fase experimental. Además, se detalla la metodología empleada para realizar las pruebas ultrasónicas y el desarrollo del modelo computacional.

➤ **Capítulo 4: Resultados y análisis**

A lo largo de este apartado se presentan los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y la validación del modelo computacional. Se analiza la influencia de defectos habituales en este tipo de estructuras, discutiendo las implicaciones y limitaciones del estudio.

➤ **Capítulo 5: Conclusiones y trabajo futuro**

Se sintetizan los hallazgos más relevantes del trabajo, se reflexiona sobre su contribución al campo de estudio y se proponen posibles líneas de investigación futura que podrían ampliar o profundizar los resultados obtenidos.

➤ **Capítulo 6: Bibliografía**

Se recopilan todas las fuentes consultadas durante la elaboración del trabajo, siguiendo el formato de citación APA.

2. MARCO TEÓRICO

El análisis de la madera como material estructural ha evolucionado notablemente en las últimas décadas, impulsado tanto por una mejor comprensión de sus propiedades físico-mecánicas como por el desarrollo de tecnologías avanzadas de evaluación no destructiva, como el análisis ultrasónico (Acuña et al., 2006; Balmori et al., 2016; Sharma & Shukla, 2012). Esta evolución ha permitido optimizar el uso de la madera en la construcción de estructuras más eficientes, seguras y sostenibles (Asdrubali et al., 2017).

El presente capítulo tiene como objetivo proporcionar un marco teórico para el desarrollo del trabajo, abordando los aspectos fundamentales que permiten comprender las bases conceptuales de este material en el contexto de la ingeniería estructural.

En primer lugar, se analizan las propiedades de la madera, profundizando en su composición interna, comportamiento mecánico y durabilidad. Posteriormente, se estudia la madera laminada como producto tecnológico, donde se verán apartados relativos a su clasificación, proceso de fabricación, propiedades específicas y aplicaciones estructurales. A continuación, se introduce el análisis ultrasónico como una técnica eficaz para la caracterización no destructiva de la madera, que permite una evaluación precisa de sus propiedades sin afectar su integridad (Acuña et al., 2006).

Finalmente, se aborda el modelado computacional como herramienta de simulación del comportamiento mecánico y acústico de la madera laminada, lo que permite comprender el comportamiento bajo diferentes condiciones y escenarios. En este sentido, la integración entre ensayos experimentales y simulación numérica constituye un enfoque novedoso para el análisis estructural moderno.

2.1. PROPIEDADES DE LA MADERA

La madera es un material natural ampliamente utilizado y prácticamente irremplazable a lo largo de la historia hasta la segunda mitad del siglo XIX (Asdrubali et al., 2017) debido a sus propiedades mecánicas, ligereza y facilidad para tanto su obtención como su transformación.

A partir de la década de 1970, ha experimentado un renovado interés gracias a su sostenibilidad y gran versatilidad (Asdrubali et al., 2017). Sin embargo, su naturaleza compleja, heterogénea y anisótropa (Balmori et al., 2016) presenta desafíos significativos para su análisis y modelado, particularmente en aplicaciones estructurales.

Este apartado tiene como objetivo explorar la composición y estructura de la madera, desglosando los componentes principales que la conforman y analizando cómo su organización interna influye directamente en sus propiedades físico-mecánicas.

2.1.1. Composición y estructura interna de la madera

La madera, como material estructural natural (Asdrubali et al., 2017), presenta una complejidad morfológica y funcional que influye directamente en su comportamiento mecánico, higroscópico y durabilidad (Blaß & Sandhaas, 2017; Dinwoodie, 2000). Luego, a diferencia de los materiales artificiales y homogéneos, su estructura celular anisótropa es el resultado de procesos biológicos y condiciones ambientales (Blaß & Sandhaas, 2017), lo que le confiere propiedades que varían según factores biológicos, ambientales y evolutivos.

Este apartado aborda los distintos niveles de análisis de la madera desde una perspectiva anatómica, iniciando con la estructura general del árbol y la diferenciación funcional de sus tejidos, para luego profundizar en los tipos celulares, las diferencias entre especies (coníferas y frondosas) y los principales compuestos que conforman su tejido leñoso.

El objetivo de este apartado es establecer una base sólida para comprender cómo la morfología de la madera condiciona su comportamiento estructural.

Organización general del árbol

En cuanto a la estructura del árbol, éste se divide principalmente en tres partes: las raíces, el tronco y las ramas. El tronco, que es el componente más importante para la producción de madera, cumple varias funciones, más allá de soportar la copa. Por un lado, transporta agua desde las raíces hacia las hojas y, por otra parte, distribuye los nutrientes desde la copa hacia las raíces, almacenándolos si no son utilizados inmediatamente (Blaß & Sandhaas, 2017).

El tronco es un elemento que crece tanto longitudinalmente como en su perímetro, y está compuesto por una estructura celular predominantemente axial (Dinwoodie, 2000), complementada por una pequeña proporción de células radiales, que permiten el transporte transversal de agua y nutrientes (Blaß & Sandhaas, 2017). Además, se organiza internamente en varias capas que resultan especialmente relevantes para entender la estructura física de la madera (Figura 3). Estas capas son:

- **Corteza exterior:** capa externa, formada principalmente por células muertas, que protege al árbol frente a las agresiones ambientales (Blaß & Sandhaas, 2017), como la deshidratación, los organismos patógenos y la radiación UV.
- **Corteza interna (floema):** situada bajo la corteza, es parte del sistema vascular del árbol, cuya función principal consiste en la conducción de los nutrientes y productos de la fotosíntesis desde las hojas hacia otras partes del árbol (Blaß & Sandhaas, 2017). A diferencia de la corteza exterior, el floema está compuesto por células vivas que forman tubos a través de los cuales circula la savia (Blaß & Sandhaas, 2017).

- **Cambium:** capa especialmente delgada de células meristemáticas ubicada entre el floema y el xilema (Blaß & Sandhaas, 2017). Es responsable del crecimiento secundario del árbol, generando nuevas células hacia el interior (xilema) y hacia el exterior (floema), lo que provoca el engrosamiento anual del tronco.
- **Xilema (madera):** constituye la mayor parte del tronco. Está formada por células muertas lignificadas que forman largos tubos cuya función principal es transportar agua y minerales desde las raíces hacia las hojas (Blaß & Sandhaas, 2017). El xilema se divide en dos zonas:
 - **Albura (sapwood):** la madera más reciente, de color más claro y con mayor contenido de agua que el duramen (Blaß & Sandhaas, 2017). Es la parte más externa del xilema, también conocida como "madera blanca" o "madera viva". Se caracteriza por ser la parte más activa del tronco en términos de transporte de agua y nutrientes (Dinwoodie, 2000) y, además, también actúa como almacén de reservas (Blaß & Sandhaas, 2017). A medida que el árbol envejece, la albura se va desplazando hacia el interior, y una nueva capa de albura se forma cada año, dando lugar al crecimiento radial del árbol.
 - **Duramen (heartwood):** formada por el crecimiento del xilema en edad adulta, es la parte más interna del xilema, conocida como "madera muerta" o "madera dura". A medida que el árbol envejece, la albura externa se muere y se llena de sustancia extractivas, convirtiéndose en duramen, un tejido que pierde su capacidad para conducir agua (Dinwoodie, 2000), pero que es mucho más denso, duro y resistente a la descomposición (Blaß & Sandhaas, 2017). Esta capa es la que generalmente se utiliza en la industria de la madera debido a su durabilidad.
- **Médula (pith):** localizada en el centro del tronco, está compuesta por células parenquimáticas. Su función principal es abastecer de agua a los tejidos jóvenes en desarrollo. En muchas especies, esta estructura se degrada prematuramente (Blaß & Sandhaas, 2017).
- **Anillos de crecimiento:** la actividad del cambium varía a lo largo del año, dando lugar a la formación de anillos de crecimiento visibles en una sección transversal del tronco (Blaß & Sandhaas, 2017). Estos anillos proporcionan información valiosa sobre la edad del árbol y las condiciones climáticas que ha experimentado a lo largo de su vida.
 - **Madera temprana (earlywood):** Se forma al inicio del ciclo vegetativo, contiene células de pared delgada con gran volumen de poro y color claro (Blaß & Sandhaas, 2017).

- **Madera tardía (*latewood*):** Se forma en la fase final del crecimiento estacional. Está compuesta por células con paredes más gruesas y menor volumen de poro, lo que le confiere mayor densidad y color oscuro (Blaß & Sandhaas, 2017).

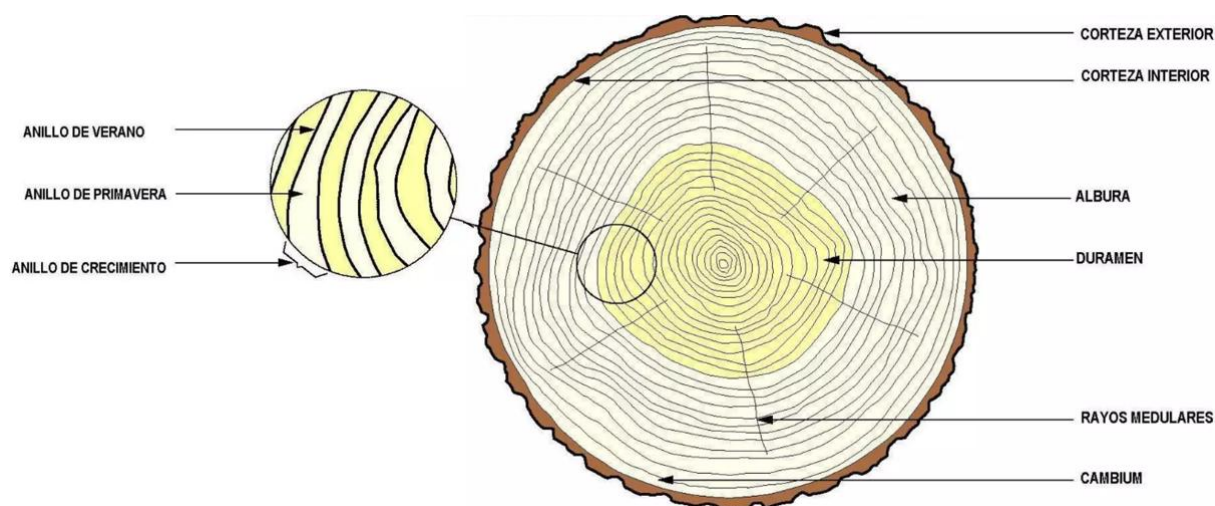


Figura 3. Anatomía del árbol.

Niveles de análisis anatómico de la madera

La madera puede analizarse en distintos niveles jerárquicos, desde la escala macroscópica hasta la química, que permiten comprender sus propiedades físicas y mecánicas.

- **Nivel macroscópico:** comprende aquellas estructuras visibles a simple vista o con una lupa de mano. En esta escala se pueden identificar fácilmente algunos de los elementos vistos anteriormente, tales como los anillos de crecimiento anual, la albura y el duramen, además de los radios leñosos (o rayos medulares), los nudos, la médula y la corteza residual.

En el análisis de este nivel es posible distinguir según los tres planos principales de corte de la madera (Figura 4):

- **Sección transversal:** perpendicular al eje longitudinal del tronco. Permite observar los anillos de crecimiento, la médula, la albura y el duramen. También revela la textura general y la presencia de nudos.
- **Sección radial:** realizado a lo largo de un radio del tronco, pasando por la médula. Muestra las células dispuestas axialmente y permite observar claramente los rayos leñosos.
- **Sección tangencial:** paralelo a la superficie del tronco. Muestra los anillos de crecimiento en forma de líneas onduladas o elípticas y expone de forma menos evidente los radios.

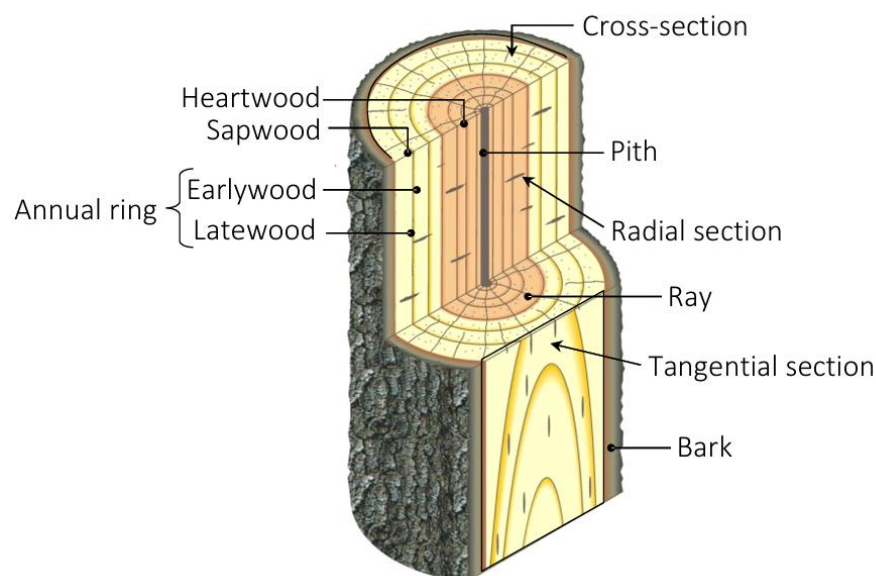


Figura 4. Estructura macroscópica y planos de corte (Blaß y Sandhaas, 2017).

- **Nivel mesoscópico:** en este nivel se estudian las estructuras organizadas a escala intermedia, como los anillos de crecimiento anuales. Cada anillo se forma por la actividad estacional del cámbium y se compone de dos partes diferenciadas, como se ha visto en el apartado anterior.

La proporción y la forma de estos dos tipos de madera (madera temprana y tardía, o *earlywood* y *latewood*) dependen de la especie y de las condiciones de crecimiento (Blaß & Sandhaas, 2017; Dinwoodie, 2000). Por ejemplo, un árbol con acceso constante a agua y nutrientes generará una mayor proporción de madera temprana, mientras que la escasez hídrica aumentará la densidad de la madera tardía.

- **Nivel microscópico:** este nivel implica el análisis de las células individuales que componen la madera. Las especies leñosas se dividen en dos grupos principales: coníferas (maderas blandas) y frondosas (maderas duras), y sus diferencias estructurales se hacen evidentes a nivel microscópico (Figura 5).
- **Coníferas:** están compuestas casi en su totalidad por traqueidas (90-95 %), según indica Dinwoodie (2000), que cumplen funciones de soporte mecánico y transporte de agua. Presentan además células de parénquima longitudinal y radios leñosos simples (Blaß & Sandhaas, 2017).
 - **Frondosas:** poseen una estructura celular más compleja. Tienen vasos grandes y visibles encargados exclusivamente del transporte de agua, fibras especializadas para resistencia estructural y una red densa de células de parénquima axial y radial (Blaß & Sandhaas, 2017).

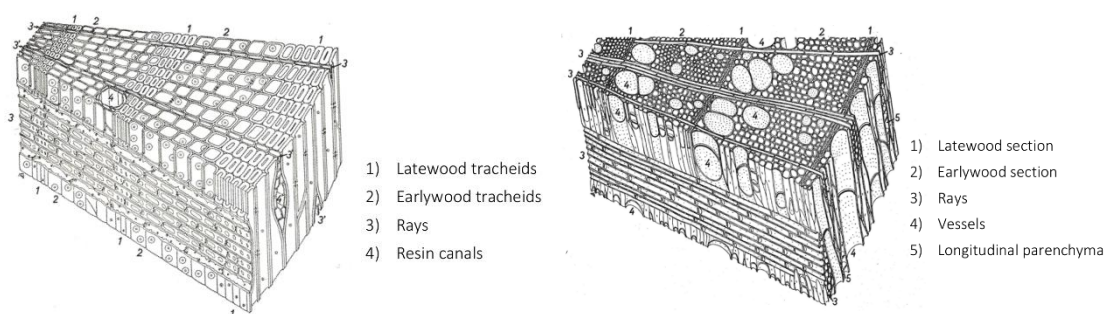


Figura 5. Estructura esquemática conífera (izq.) y frondosa (der.) (Blaß y Sandhaas, 2017)

La disposición y forma de las células en este nivel explican muchos comportamientos anisótropos de la madera. Por ejemplo, la rigidez y resistencia mecánica son significativamente mayores en dirección longitudinal que en dirección transversal (Blaß & Sandhaas, 2017). Más adelante se explorarán con mayor detalle las principales diferencias entre ambos grupos.

- **Nivel submicroscópico:** se centra en la pared celular y su estructura interna. Las paredes celulares están formadas por varias capas: lámina media, pared primaria y pared secundaria (S1, S2, S3) (Blaß & Sandhaas, 2017; Dinwoodie, 2000), como se muestra en la Figura 6.

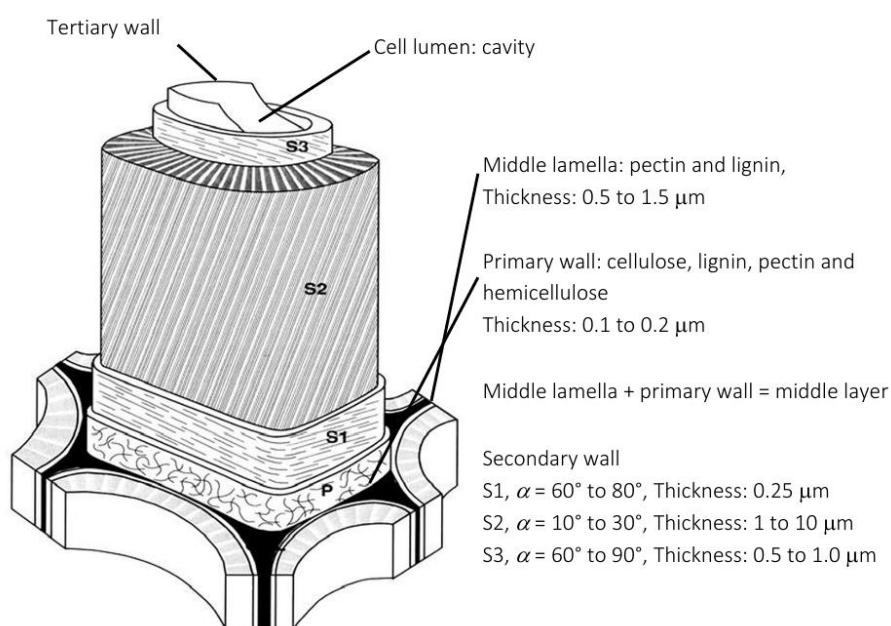


Figura 6. Estructura de la pared celular (Blaß y Sandhaas, 2017).

Cada una de estas capas presenta una orientación distinta de las microfibrillas de celulosa, especialmente en la capa S2, que es la más gruesa y la que más influencia tiene en la resistencia a tracción longitudinal (Blaß & Sandhaas, 2017). La disposición helicoidal de estas microfibrillas actúa como un refuerzo que proporciona rigidez axial al conjunto (Dinwoodie, 2000).

Además, la porosidad interna y la capacidad de las paredes celulares para absorber agua dependen de esta organización estructural, lo que afecta directamente al comportamiento higroscópico y dimensional de la madera ante cambios de humedad (Blaß & Sandhaas, 2017).

- **Nivel químico:** finalmente, en el nivel químico se consideran los componentes moleculares que constituyen la madera. La madera se compone principalmente de tres polímeros orgánicos que constituyen su estructura celular (Blaß & Sandhaas, 2017; Dinwoodie, 2000), los cuales se describen en la Tabla 1, presentada a continuación:

Tabla 1. Compuestos químicos principales de la madera.

Componente	Descripción
Celulosa 40-50 % del peso	Polímero lineal de glucosa, caracterizado por su elevada resistencia a la tracción. Sus moléculas se organizan en fibrillas que confieren resistencia axial a la pared celular vegetal. Naturaleza hidrófila, derivada de los numerosos grupos hidroxilo (-OH) (Blaß & Sandhaas, 2017).
Hemicelulosa 20-30 % del peso	Se distinguen por su estructura ramificada, que les permite formar enlaces con otras moléculas para reforzar la pared celular vegetal (Dinwoodie, 2000). Esta red molecular confiere rigidez y resistencia a la presión externa ejercida por las células adyacentes. Regulan la permeabilidad de la membrana celular controlando la absorción y liberación de agua y actúan como elementos de la matriz y sellante (Blaß & Sandhaas, 2017).
Lignina 15-30 % del peso	Polímero que proporciona resistencia a la compresión, además de actuar como un elemento rígido para las fibrillas celulares (Dinwoodie, 2000). Protege la pared celular contra la entrada de agua por sus propiedades hidrófobas (Blaß & Sandhaas, 2017).

En menor proporción¹, la madera contiene extractivos como, por ejemplo, resinas, ceras o aceites, que influyen tanto en sus características estéticas, como en la resistencia al ataque de agentes externos o en la durabilidad de la madera (Blaß & Sandhaas, 2017).

Diferencias anatómicas y funcionales entre coníferas y frondosas

La madera procede de dos grandes grupos de plantas: las gimnospermas (coníferas o *softwoods*) y las angiospermas (frondosas o *hardwoods*). Ambos tipos presentan diferencias anatómicas y funcionales notables (Figura 7), que condicionan sus propiedades físicas, mecánicas y sus aplicaciones industriales.

A continuación, en la Tabla 2 se sintetizan las principales diferencias entre las maderas de coníferas y frondosas, a partir de la información consultada en Blaß & Sandhaas (2017) y Dinwoodie (2000):

¹ Según Dinwoodie (2000), en torno al 3-5 % del peso total.

Capítulo 2: Marco teórico

Tabla 2. Diferencias anatómicas y funcionales entre coníferas y frondosas.

Característica	Coníferas (Gimnospermas)	Frondosas (Angiospermas)
Estructura celular	Dominada por traqueidas (90-95 % del volumen) que combinan soporte y conducción.	Presencia de vasos grandes para conducción, fibras especializadas y abundante parénquima.
Porosidad/ Textura	Estructura uniforme, sin vasos visibles.	Más variada, con poros visibles, textura heterogénea.
Densidad	Generalmente menor, más ligeras y fáciles de trabajar. Menor contenido de paredes celulares.	Más densas y resistentes a impactos y desgaste, debido a mayor fracción de pared celular.
Distribución de células radiales	Radios más simples, normalmente de una sola fila de células.	Radios multiseriados, de varias células de ancho, con formas más complejas.
Crecimiento	Rápido, anillos de crecimiento bien definidos, con transición marcada entre madera temprana y tardía.	Más lento, anillos menos marcados y más variables, según la especie y condiciones ambientales.
Ejemplos comunes	<i>Picea abies</i> (abeto), <i>Pinus sylvestris</i> (pino silvestre), <i>Larix decidua</i> (alerce).	<i>Quercus robur</i> (roble), <i>Fagus sylvatica</i> (haya), <i>Acer spp.</i> (arce).
Usos principales	Construcción ligera, carpintería estructural, fabricación de tableros y pasta de papel.	Pisos, mobiliario de alta calidad, carpintería expuesta, estructuras sometidas a desgaste.

A la vista de la Tabla 2 podemos concluir que, por un lado, las coníferas destacan principalmente por su uniformidad, mayor ligereza y facilidad de uso, mientras que, por otro lado, las frondosas, con su complejidad estructural, son preferidas en contextos que demandan una elevada resistencia estructural.

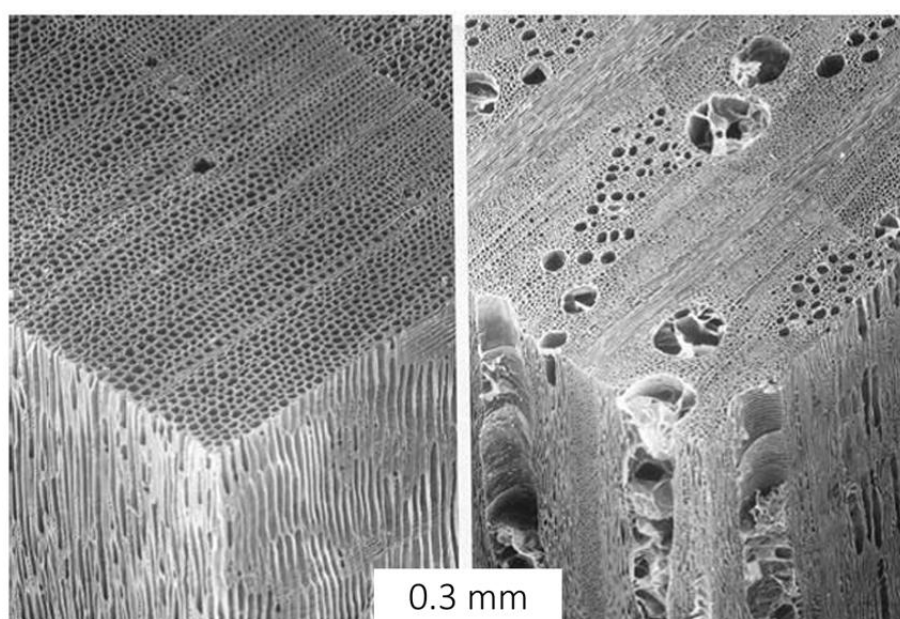


Figura 7. Estructura microscópica del abeto (izq.) y roble (der.) (Blaß y Sandhaas, 2017).

2.1.2. Propiedades físicas y mecánicas

El conocimiento detallado de las propiedades físicas y mecánicas de la madera resulta necesario para la caracterización estructural de elementos contruidos con este material, así como para la correcta interpretación de las técnicas de ensayo no destructivo.

A diferencia de materiales homogéneos e isótropos, la madera presenta un comportamiento altamente anisótropo y heterogéneo (Balmori et al., 2016; Blaß & Sandhaas, 2017; Dinwoodie, 2000), condicionado por factores naturales como la dirección de las fibras, el crecimiento del árbol, la especie utilizada, el contenido de humedad o la presencia de defectos inherentes.

Por lo tanto, en el contexto del análisis ultrasónico, resulta indispensable comprender cómo estas propiedades afectan a la propagación de las ondas acústicas a través del material (Acuña et al., 2006; Balmori et al., 2016). Características como la densidad, el contenido de humedad o la anisotropía influyen directamente en la velocidad de propagación, la atenuación y la dispersión de las ondas (Blaß & Sandhaas, 2017), condicionando la sensibilidad y la precisión del método de evaluación.

A continuación, se describen las principales propiedades físicas y mecánicas de la madera relevantes tanto desde el punto de vista estructural como para la aplicación del método ultrasónico.

Contenido en humedad

La humedad en la madera constituye uno de los factores más determinantes en sus propiedades físicas y mecánicas (Blaß & Sandhaas, 2017). Dada su naturaleza higroscópica (Asdrubali et al., 2017), la madera es capaz de absorber y liberar agua en función del entorno que la rodea. Esta capacidad, sin embargo, no se limita solo a la superficie externa, sino que abarca todo su volumen celular. Por ello, el contenido de humedad no solo influye superficialmente, sino que, además, afecta a la integridad estructural interna del material.

La organización estructural de la madera implica que el contenido de humedad condiciona casi todas sus propiedades (Blaß & Sandhaas, 2017; Dinwoodie, 2000). Este efecto es particularmente significativo al descender por debajo del punto de saturación de las fibras (*fiber saturation point*, FSP), que se da, dependiendo de la especie, entre el 25 y el 35 %. En dicho punto, las paredes celulares están saturadas, pero los lúmenes (cavidades internas de las células) aún no contienen agua libre (Blaß & Sandhaas, 2017). Es precisamente en esta franja, por debajo del FSP, cuando los cambios en la humedad afectan notablemente las características físicas y mecánicas:

- **Disminución de rigidez y resistencia:** Al aumentar la humedad, las cadenas de celulosa dentro de las paredes celulares se separan. Según Dinwoodie (2000), en condiciones de secado absoluto (esto es, un estado anhidro), estas cadenas están estrechamente empaquetadas, generando fuerzas de enlace intermoleculares fuertes. Sin embargo, según Blaß & Sandhaas (2017) cuando el agua se infiltra en las cavidades intermicelares e interfibrilares, dichas fuerzas de atracción disminuyen, debilitando las uniones de hidrógeno y, con ello, la rigidez y resistencia del material (ver Figura 8).

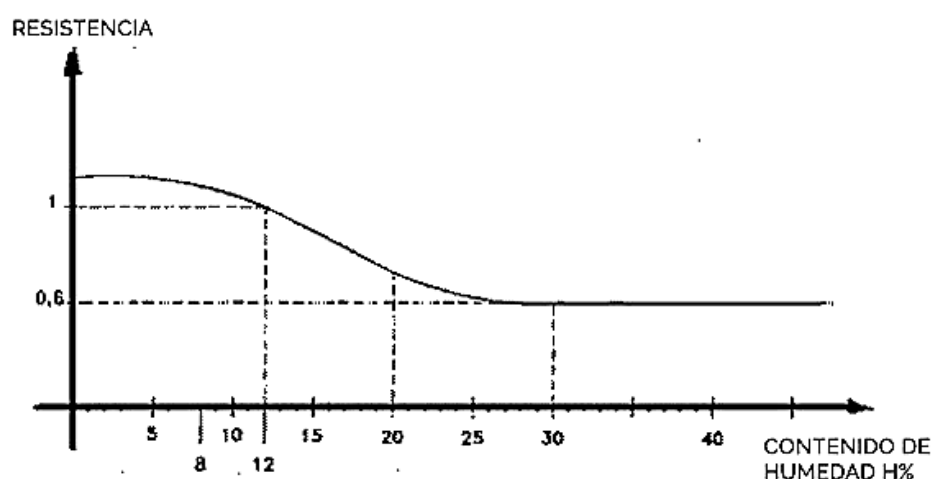


Figura 8. Resistencia mecánica en función del contenido en humedad (Vignote, 2014).

- **Aumento de la deformación por fluencia (creep):** las cargas aplicadas sobre un elemento de madera con alto contenido de humedad inducen una mayor deformación a largo plazo (Blaß & Sandhaas, 2017). Esto es especialmente relevante en elementos estructurales sometidos a solicitaciones prolongadas en el tiempo, donde la resistencia de la madera es menor que en cargas a corto plazo (Asdrubali et al., 2017).
- **Incremento de la conductividad térmica:** a mayor contenido en humedad, mayor es la capacidad de la madera para conducir calor (Asdrubali et al., 2017). Esta característica puede influir en el diseño térmico de los elementos constructivos.
- **Mayor susceptibilidad al ataque fúngico:** un contenido en humedad superior al 20% crea condiciones ideales para el desarrollo de hongos xilófagos (Asdrubali et al., 2017), lo que puede comprometer gravemente la durabilidad del material.

En Blaß & Sandhaas (2017) se cuantifican los cambios relativos que se producen en las propiedades mecánicas de la madera por cada incremento del 1 % en contenido de humedad, tomando como referencia un 12 % de contenido de humedad, como se muestra en la Tabla 3. Estas relaciones muestran claramente que las propiedades mecánicas, especialmente las de compresión, son particularmente sensibles al contenido de humedad.

Tabla 3. Cambios relativos en las propiedades mecánicas de la madera con cada incremento del 1 % en el contenido de humedad (Blaß y Sandhaas, 2017).

Property	Change
Compressive strength parallel to the grain	6%
Compressive strength perpendicular to the grain	5%
Bending strength	4%
Tensile strength parallel to the grain	2.5%
Tensile strength perpendicular to the grain	2%
Shear	2.5%
Modulus of elasticity (MOE) parallel to the grain	1.5%

Por otra parte, cuando se supera el punto de saturación de la fibra, los cambios en la humedad ya no afectan las propiedades mecánicas (Vignote, 2014), pero sí inducen una acumulación de agua libre en las cavidades celulares (Blaß & Sandhaas, 2017). Luego, bajo condiciones de alta temperatura y humedad, la madera se vuelve más maleable, lo que puede ser aprovechado, por ejemplo, en procesos de curvado al vapor.

Además, la anisotropía de la madera genera deformaciones diferenciales según la dirección. Las deformaciones por humedad (expansión o contracción) en dirección longitudinal son prácticamente insignificantes (≈ 0.01 % por cada 1 % de cambio en contenido de humedad) (Blaß & Sandhaas, 2017), mientras que en dirección perpendicular (radial/tangencial) pueden alcanzar valores por encima de 0.24 % por cada 1 % (Blaß & Sandhaas, 2017).

Estas deformaciones pueden inducir tensiones internas cuando la expansión está restringida, por ejemplo, por uniones mecánicas, o pueden provocar fendas por secado.

Densidad

La densidad es una de las propiedades físicas básicas de la madera, ya que influye directamente en su comportamiento mecánico, térmico y en su durabilidad (Blaß & Sandhaas, 2017). En esencia, la densidad describe la relación entre la masa y el volumen de la madera, pero debido a la estructura celular del material y su capacidad para absorber agua, según Blaß & Sandhaas (2017), esta propiedad se expresa y analiza bajo distintas formas y condiciones de humedad.

Podemos encontrar, por un lado, la densidad seca (*oven-dry density*), que sería aquella cuyo contenido en humedad es nulo y, por otro lado, más frecuentemente, la densidad de la madera referida a un contenido en humedad del 12 % (Dinwoodie, 2000).

La densidad de la madera depende en gran medida de la especie arbórea, el ritmo de crecimiento del árbol, en particular del ancho de los anillos anuales, y de la proporción entre madera temprana y tardía (Blaß & Sandhaas, 2017; Dinwoodie, 2000). Según estos autores,

en coníferas, un mayor ancho del anillo de crecimiento suele corresponder a una mayor proporción de madera temprana, lo que da lugar a densidades más bajas, mientras que anillos más estrechos tienden a contener más madera tardía, lo que eleva la densidad.

Por otra parte, Blaß & Sandhaas (2017) señala que la densidad de la madera sin defectos presenta una fuerte correlación con la rigidez (módulo de Young) y la resistencia mecánica (Figura 9).

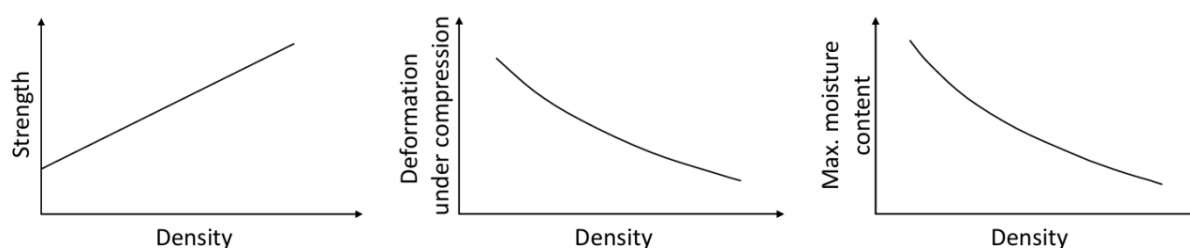


Figura 9. Figuras esquemáticas de la influencia de la densidad (Blaß y Sandhaas, 2017).

En términos cuantitativos, Blaß & Sandhaas (2017) muestra un rango representativo de densidades para distintas especies, que varía típicamente entre 350-500 y 500-750 kg/m³ para maderas de coníferas y frondosas, respectivamente. No obstante, en especies tropicales densas, como el azobe (*Lophira alata*), se alcanzan valores mucho más altos, hasta 1000-1200 kg/m³ (Dinwoodie, 2000).

Por otra parte, la densidad también refleja la heterogeneidad interna de la madera. Por ejemplo, la orientación de las fibras, presencia de nudos y otras irregularidades afectan localmente a la densidad del material (Blaß & Sandhaas, 2017).

Porosidad

La porosidad de la madera se define como la fracción volumétrica del lumen celular (Blaß & Sandhaas, 2017), esto es, la proporción de volumen ocupado por los huecos o cavidades en relación con el volumen total del material. Esta característica de la madera tiene una influencia determinante en su densidad, su comportamiento frente a la humedad y, por ende, en sus propiedades mecánicas.

Desde un punto de vista estructural, la madera es un material capilar-poroso compuesto por una red de células alargadas con paredes de celulosa, hemicelulosa y lignina. Como se ha visto en el apartado anterior, la densidad seca de la madera (*oven-dry density*) oscila generalmente entre 350 y 750 kg/m³, dependiendo de la especie, mientras que la densidad del material sólido de la pared celular es de aproximadamente 1500 kg/m³ (Blaß & Sandhaas, 2017; Dinwoodie, 2000). Es en esta diferencia donde se aprecia la alta porosidad del material, que puede variar desde aproximadamente un 50 % hasta un 80 % del volumen (Blaß & Sandhaas, 2017).

En términos funcionales, esta porosidad convierte a la madera en un sistema altamente higroscópico y permeable (Asdrubali et al., 2017). Puede absorber vapor de agua del ambiente por difusión y líquidos como agua o adhesivos por capilaridad (Blaß & Sandhaas, 2017). Esta capacidad está directamente vinculada a su estructura celular abierta y a su extensa superficie interna (Dinwoodie, 2000).

La porosidad también influye de manera indirecta en las propiedades mecánicas, dado que la mayoría de estas se correlacionan positivamente con la densidad (Blaß & Sandhaas, 2017). Así, maderas más densas (menor porosidad) tienden a presentar mayores valores de resistencia y rigidez. No obstante, este comportamiento puede variar incluso dentro de una misma especie, debido a factores como la proporción entre madera temprana y tardía, las condiciones locales de crecimiento o el ancho de los anillos anuales (Dinwoodie, 2000).

Desde el punto de vista de la caracterización mediante análisis ultrasónico, la porosidad es un parámetro que afecta directamente la velocidad de propagación de las ondas dentro del material (Blaß & Sandhaas, 2017). Zonas con mayor porosidad (y, por tanto, menor densidad) presentarán menores velocidades de propagación, permitiendo inferir la calidad estructural del elemento analizado.

Propiedades termofísicas

Una característica destacada de la madera consiste en que se trata de un material con baja conductividad térmica (Asdrubali et al., 2017), lo cual le confiere buenas propiedades aislantes.

Según Asdrubali et al. (2017), los valores típicos de conductividad térmica (λ) para maderas estructurales oscilan entre 0,12 a 0,30 W/(m·K) en dirección longitudinal (paralela a la fibra). Este comportamiento se debe en gran parte a su alta porosidad y a su estructura capilar, compuesta por aire, agua y una fracción relativamente pequeña de material sólido (Blaß & Sandhaas, 2017). En comparación, según Netto (2024) el acero tiene una conductividad térmica de entre 47 y 58 W/(m·K), es decir, unas 150 a 400 veces mayor. El hormigón se encuentra en valores en torno a 1,00 W/(m·K).

Esta baja conductividad permite que las estructuras de madera retarden la transmisión del calor entre ambientes interiores y exteriores y sean, por tanto, una opción interesante en cuanto a confort térmico y eficiencia energética. Así mismo, el bajo coeficiente térmico (Blaß & Sandhaas, 2017) explica que la madera no transmita fácilmente el calor por contacto, razón por la cual suele considerarse "cálida" al tacto.

Por otra parte, tanto la humedad como la densidad influyen directamente en la conductividad térmica de la madera (Blaß & Sandhaas, 2017):

- A mayor contenido de humedad, aumenta la conductividad térmica, ya que el agua posee una mayor capacidad para transferir calor que el aire (Blaß & Sandhaas, 2017).
- Igualmente, la densidad también está positivamente correlacionada con la conductividad térmica: las maderas más densas tienen más masa por unidad de volumen y, por tanto, una mayor conductividad térmica.

La madera también posee una alta capacidad calorífica específica comparada con otros materiales estructurales (Asdrubali et al., 2017). Esto significa que puede absorber una cantidad considerable de calor antes de experimentar un cambio significativo de temperatura lo que, en combinación con su baja conductividad, le otorga una baja difusividad térmica (Asdrubali et al., 2017), lo que significa que el calor penetra lentamente en su interior.

En la práctica, esto resulta útil en aplicaciones donde se requiere retardar el aumento de temperatura, como en la resistencia al fuego, donde la formación de una capa carbonizada superficial reduce significativamente la transmisión térmica al núcleo y ralentiza la degradación térmica del material restante. Además, según Blaß & Sandhaas (2017), la densidad también influye en la velocidad de combustión: maderas más densas tienden a presentar mejores desempeños ante el fuego desde el punto de vista estructural.

Anisotropía estructural

La madera es un material inherentemente anisótropo (Balmori et al., 2016), es decir, sus propiedades físicas y mecánicas varían significativamente según la dirección en que se apliquen las cargas o se evalúen sus características. Esta anisotropía se debe principalmente a la estructura alargada de sus células y a la orientación direccional de las paredes celulares, que responde al crecimiento natural del árbol (Blaß & Sandhaas, 2017).

Desde un punto de vista estructural, la anisotropía se manifiesta en las tres direcciones ortogonales principales del tronco: longitudinal, a lo largo del eje del tronco (paralela a las fibras), radial, perpendicular al eje, en dirección hacia o desde el centro, y tangencial, perpendicular a la fibra, tangente a los anillos de crecimiento.

Esta diferencia de comportamiento también se observa en su respuesta frente a la humedad: la hinchazón y contracción perpendicular a la fibra puede ser varias veces mayor que en la dirección longitudinal (Blaß & Sandhaas, 2017). Estas deformaciones diferenciales generan tensiones internas y posibles fisuras durante procesos como el secado.

Desde el punto de vista de la caracterización mediante ensayos ultrasónicos, la anisotropía tiene una repercusión directa sobre la velocidad de propagación de las ondas acústicas, que será mucho mayor en la dirección longitudinal que en las direcciones radial o tangencial, como se muestra en la Figura 10 (Blaß & Sandhaas, 2017).

Esto obliga a tener en cuenta la orientación del grano de la madera al interpretar los resultados del ensayo y modelar numéricamente el comportamiento del material (Acuña et al., 2007).

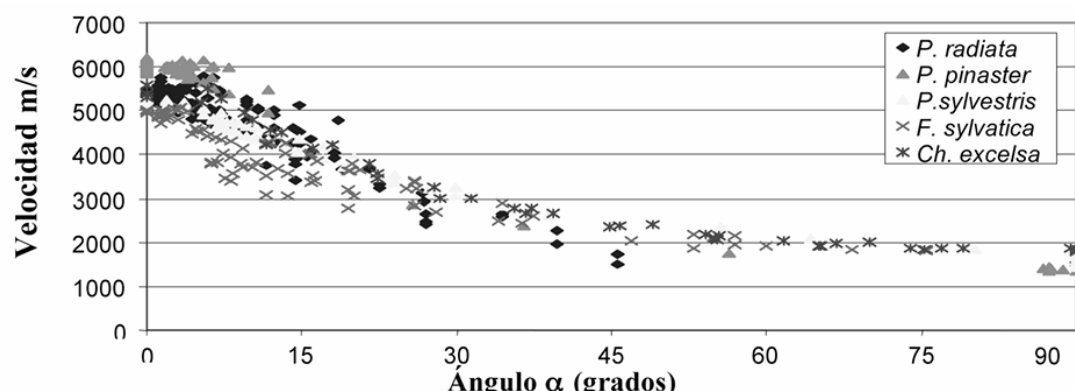


Figura 10. Relación velocidad de propagación y dirección de la fibra (Acuña et al., 2007).

Propiedades reológicas

Las propiedades reológicas describen el comportamiento de los materiales frente a la deformación en función del tiempo, bajo la acción de cargas constantes o cambios ambientales. En el caso de la madera, estas propiedades combinan tanto una respuesta elástica inmediata como una respuesta viscosa dependiente del tiempo, lo que le confiere un comportamiento viscoelástico (Blaß & Sandhaas, 2017). Este carácter viscoelástico se manifiesta especialmente en dos fenómenos clave: fluencia (*creep*) y relajación de tensiones (*relaxation*).

En primer lugar, la fluencia se define como el incremento progresivo de la deformación bajo una carga constante. Inicialmente, la madera responde con una deformación elástica instantánea, pero a lo largo del tiempo, bajo la misma carga, continúa deformándose lentamente (Blaß & Sandhaas, 2017). Esta deformación adicional no se recupera completamente al retirar la carga, ya que puede quedar una deformación permanente (denominado como U_{plast} en la Figura 11) que indica un daño microscópico interno.

Entre los factores que más influyen en el comportamiento por fluencia se encuentran: el contenido de humedad y sus variaciones, la duración de la carga, la temperatura ambiental o el nivel de tensión aplicado (Blaß & Sandhaas, 2017).

Según Blaß & Sandhaas (2017), un fenómeno particularmente relevante es la denominada fluencia mecano-absortiva, que agrupa los efectos combinados de la hinchazón, el

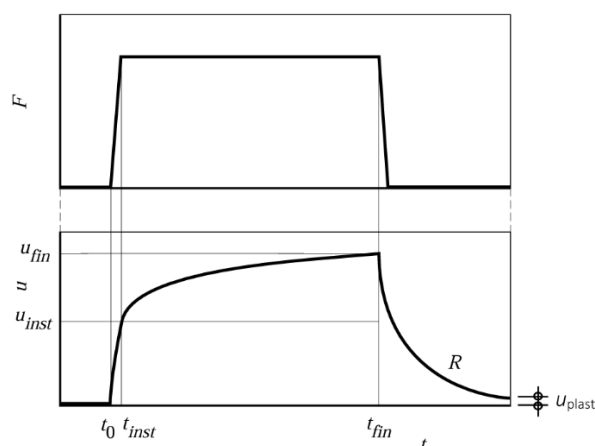


Figura 11. Carga (arriba) y deformación por fluencia (abajo) (Blaß y Sandhaas, 2017).

secado y la fluencia bajo cambios de humedad. La relevancia de este efecto reside en que puede amplificar significativamente las deformaciones y es especialmente importante en estructuras sometidas a condiciones climáticas variables.

Por otra parte, la relajación se refiere a la reducción gradual de las tensiones en el material cuando se mantiene una deformación constante a lo largo del tiempo. Este fenómeno es particularmente relevante en elementos pretensados (Blaß & Sandhaas, 2017) como, por ejemplo, en uniones con tornillos pretensados, donde puede ser necesario volver a tensar estos elementos debido a la pérdida de carga por efecto de la relajación, especialmente bajo cambios de humedad.

Propiedades mecánicas

La madera presenta una elevada resistencia a tracción paralela a la fibra ($f_{t,0}$), alcanzando valores de entre 10 y 35 MPa, para especies de pino y abeto (Blaß & Sandhaas, 2017). En esta dirección, la fractura se produce de manera frágil, prácticamente sin deformación plástica.

En cambio, la resistencia a tracción perpendicular a la fibra ($f_{t,90}$) es muy baja (Figura 12), del orden de 1 a 2 MPa, y está fuertemente influida por la existencia de fisuras previas y por el volumen de la probeta (Blaß & Sandhaas, 2017), lo que genera una marcada variabilidad.

Por otra parte, en cuanto a esfuerzos de compresión paralela a la fibra ($f_{c,0}$), la madera puede alcanzar valores de 25 a 40 MPa (Blaß & Sandhaas, 2017). La rotura no es brusca, sino que se produce con deformación plástica apreciable, debido al pandeo local de las fibras. En sentido perpendicular a la fibra ($f_{c,90}$), la resistencia es más reducida, con valores de entre 2 y 4 MPa (Blaß & Sandhaas, 2017) y se ve condicionada por el aplastamiento del tejido celular.

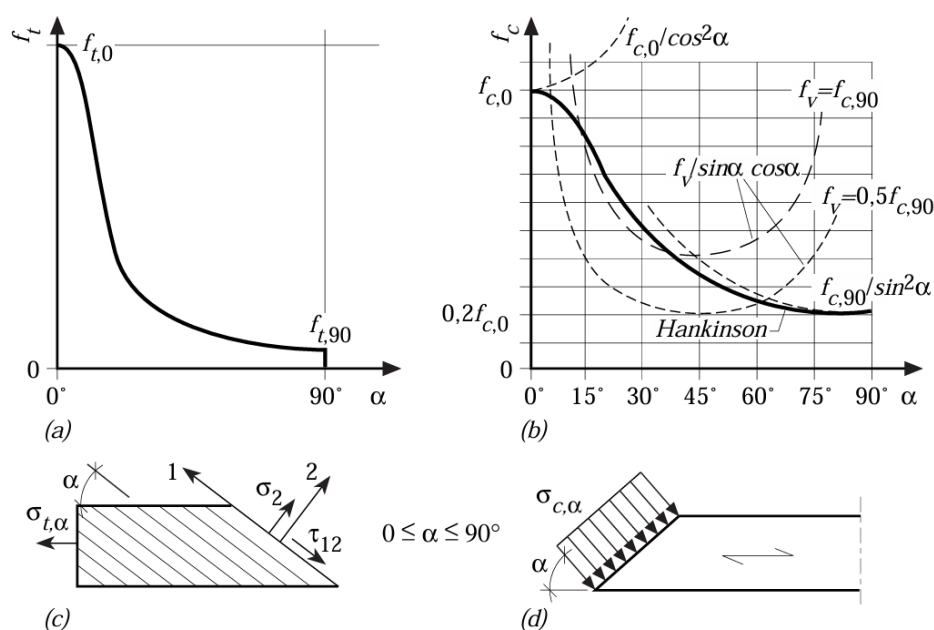


Figura 12. Efecto del ángulo α en la resistencia: a) f_t y b) f_c (Blaß y Sandhaas, 2017).

Luego, a la vista de lo expuesto, la madera es un material con un comportamiento notablemente bueno frente a los esfuerzos de flexión, que depende de la calidad del material y de las uniones entre fibras. Particularmente, en la madera laminada encolada puede superarse la resistencia a tracción de las láminas individuales gracias a los efectos de redistribución de tensiones entre las capas, produciendo un comportamiento estructural más favorable y una resistencia compuesta mayor que la suma de sus partes.

La resistencia al corte axial (f_v) es relativamente modesta, con valores típicos en torno a 3,5 MPa, y aún menores en el caso de hienda (f_h), que puede descender a 1 MPa o incluso menos (Blaß & Sandhaas, 2017). Esta propiedad adquiere relevancia en zonas de concentración de tensiones como uniones, apoyos o elementos con entalladuras.

El módulo de Young (E) presenta valores notablemente distintos según la dirección del esfuerzo. Paralelo a la fibra (E_0) puede alcanzar valores de entre 11.000 y 15.000 MPa, mientras que en dirección perpendicular (E_{90}) cae drásticamente hasta los 400-500 MPa (Blaß & Sandhaas, 2017).

El módulo de elasticidad transversal (G) también refleja la anisotropía estructural de la madera: en direcciones paralelas a la fibra, los valores típicos para madera laminada encolada rondan los 650 MPa, mientras que en perpendicular a la fibra puede ser del orden de 65 MPa (Blaß & Sandhaas, 2017).

2.1.3. Durabilidad y procesos de degradación

La durabilidad de la madera en estructuras se define como la capacidad del material para mantener sus propiedades físicas y mecánicas durante el periodo de servicio previsto, en condiciones normales de uso (Ministerio de Fomento, 2019). Esta durabilidad depende de múltiples factores, entre ellos la especie utilizada, las condiciones ambientales, el diseño constructivo y, cuando sea necesario, los tratamientos de protección aplicados (Blaß & Sandhaas, 2017; Dinwoodie, 2000).

El Código Técnico de la Edificación, en su Documento Básico SE-M, del Ministerio de Fomento (2019), establece que la durabilidad no debe entenderse únicamente como una propiedad intrínseca del material, sino también como una consecuencia del diseño y de la protección adoptada frente a agentes agresivos.

Luego, para garantizar la durabilidad de la madera es fundamental el empleo de maderas con una durabilidad natural tal que sea suficiente para mantener sus propiedades a lo largo de su vida útil o bien que hayan sido sometidas a un tratamiento de protección, y a la implementación de soluciones constructivas que limiten la acumulación de humedad, conocidas como protección por diseño.

En este sentido, la madera puede verse afectada por agentes bióticos (como hongos, insectos o bacterias), cuya acción está fuertemente condicionada por el contenido de humedad del material (Blaß & Sandhaas, 2017; Dinwoodie, 2000).

Para reducir los riesgos asociados, el DB-SE-M establece un sistema de clasificación denominado clases de uso, que relaciona las condiciones ambientales esperadas con la probabilidad de ataque biológico y, en consecuencia, con el nivel de protección requerido. En la Tabla 4 se sintetizan las clase de uso de la madera:

Tabla 4. Clases de uso de la madera según CTE DB SE-M (Ministerio de Fomento, 2019).

Clase de uso	Contenido de humedad	Condiciones de exposición	Ejemplos
1	< 20%	A cubierto, protegido de la intemperie y sin exposición a la humedad	Vigas y pilares en el interior de edificios
2	ocasionalmente > 20%	A cubierto, protegido de la intemperie, pero con posibilidad ocasional de humedad > 20%	Estructura de piscina cubierta, elementos próximos a conducciones
3.1	puede superar ocasionalmente el 20%	Al exterior, por encima del suelo y protegido contra exposición directa a la intemperie	Viga en voladizo protegida por albardilla ²
3.2	frecuentemente > 20%	Al exterior, por encima del suelo y sin protección contra la intemperie	Pilar a la intemperie sometido a lluvia directa o salpicaduras
4	> 20% (permanente)	En contacto con el suelo o con agua dulce	Pilotes o pilares en contacto directo con el terreno
5	> 20% (permanente)	En contacto permanente con agua salada	Construcciones en ambientes marinos

El nivel de protección especificado se basa en la norma UNE-EN 351-1 (2023), que trata sobre la durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Este nivel de protección se encuentra definido por la profundidad de penetración del tratamiento protector en la madera.

A continuación, en la Tabla 5, se detallan los requisitos mínimos exigidos por el DB-SE-M según la clase de uso a la que se encuentra sometido el elemento estructural de madera.

² Albardilla: remate en la parte superior para proteger el elemento de la lluvia y otras inclemencias meteorológicas.

Tabla 5. Niveles de protección según CTE DB SE-M (Ministerio de Fomento, 2019).

Clase de uso	Nivel de protección (NP)	Requisitos mínimos
1	NP1	Sin exigencias específicas. Todas las caras tratadas. Se recomienda tratamiento superficial insecticida.
2	NP1	Todas las caras tratadas. Requiere tratamiento superficial insecticida y fungicida.
3.1	NP2	Penetración mínima de 3 mm en la albura en todas las caras de la pieza.
3.2	NP3	Penetración mínima de 6 mm en la albura en todas las caras. Todas las caras tratadas.
4	NP4 o NP5	NP4: Penetración mínima de 25 mm en todas las caras. NP5: Penetración total en la albura.
5	NP6	Penetración total en la albura y al menos 6 mm en el duramen expuesto.

Procesos de degradación biológica

Entre los procesos de degradación habituales en madera, los hongos representan el principal agente biológico de degradación (Dinwoodie, 2000). En función de su acción sobre los componentes químicos de la madera, pueden distinguirse entre hongos cromógenos y de pudrición, siendo estos últimos especialmente relevantes por su efecto estructural. En la Tabla 6 se describen sus características principales.

Tabla 6. Características de los hongos xilófagos.

Tipo	Características
Mohos y hongos cromógenos	Se localizan en la superficie o en la albura, alimentándose de los azúcares presentes en las células radiales. Aunque provocan decoloración, su efecto estructural es mínimo.
Hongos de pudrición blanda	Se desarrollan en el interior de la pared celular y degradan principalmente la celulosa. La consistencia de la madera pasa a ser blanda, prácticamente gelatinosa.
Hongos de pudrición blanca	Atacan todos los componentes de la pared celular. Aunque inicialmente la madera también se oscurece, en fases avanzadas adquiere un tono más claro y una textura fibrosa sin llegar a desintegrarse por presión. Estos hongos suelen encontrarse en carpintería exterior.
Hongos de pudrición parda	Degradan principalmente la celulosa y las hemicelulosas, sin afectar a la lignina. Esta acción oscurece la madera, que acaba fragmentándose en cubos y desintegrándose con facilidad.

Ambos tipos de pudrición conllevan una importante pérdida de resistencia, incluso en las fases iniciales del ataque. La madera afectada puede perder hasta un 80% de su masa en seco.

Por otra parte, según Dinwoodie (2000) aunque todas las maderas son susceptibles a alguna forma de ataque entomológico, en la práctica solo una fracción de ellas en uso se ve afectada. El duramen suele ser más resistente que la albura (Dinwoodie, 2000), aunque algunas especies pueden verse comprometidas si existe un deterioro previo por ataque de hongos.

En regiones templadas, el ataque es comúnmente obra de larvas de insectos, que nacen de huevos depositados en fisuras superficiales y permanecen en el interior de la madera durante varios años, formando galerías características (Dinwoodie, 2000). En regiones tropicales, abundan las termitas, cuyos adultos consumen la madera y provocan daños severos. En este sentido, según Blaß & Sandhaas (2017), las especies tropicales, tienden a ser más duraderas que las europeas debido a su mayor contenido de extractivos, lo cual es una respuesta evolutiva a entornos con mayor presencia de plagas, como las mencionadas termitas.

Por último, en ambientes salinos, la madera está expuesta al ataque de organismos marinos como el *Teredo* (gusano de barco) y la *Limnoria*. Estos organismos son especialmente activos en aguas tropicales, aunque también suponen un riesgo en climas templados (Dinwoodie, 2000). Existen algunas especies de madera que presentan un duramen intrínsecamente resistente a estos agentes, aunque son pocas, entre las que Dinwoodie (2000) destaca algunas especies africanas como el azobe (*Lophira alata*) u okan (*Cylicodiscus gabunensis*) o asiáticas como el pyinkado (*Xylia xylocarpa*).

Procesos de degradación fisicoquímica

En primer lugar, la exposición prolongada a la luz solar provoca cambios en la coloración de la madera y un deterioro progresivo de los componentes de la pared celular, especialmente la lignina, por efecto de los rayos UV, y la celulosa, por acortamiento de las cadenas poliméricas (Dinwoodie, 2000). A este efecto se le conoce como fotodegradación y da lugar a una pérdida de la integridad superficial.

Por otra parte, como se vio en el capítulo 2.1.2, la exposición prolongada a temperaturas elevadas reduce la resistencia y, especialmente, la tenacidad de la madera. Según Dinwoodie (2000), a 120 °C durante un lapso de un mes, se observa una pérdida del 10% en la resistencia. A largo plazo, incluso temperaturas moderadas (65 °C) pueden inducir procesos de degradación, empezando por las hemicelulosas, seguidas de la celulosa y la lignina.

Por último, aunque la madera es generalmente resistente a muchos compuestos químicos, puede degradarse por la acción de álcalis, que disuelven la lignina y hemicelulosas (Dinwoodie, 2000). Además, los entornos húmedos con elementos férricos, como clavos o pernos, pueden inducir una degradación hidrolítica y decoloración oscura, fenómeno conocido como "enfermedad del clavo". Este efecto electroquímico puede reducir la resistencia mecánica de la madera (Ministerio de Fomento, 2019).

2.2. MADERA LAMINADA

Durante varios siglos, la viga simple de madera maciza fue una solución estructural plenamente eficaz para resistir esfuerzos de flexión (Müller, 2000). Su capacidad podía incrementarse para cubrir mayores luces o soportar cargas superiores, bien reduciendo la distancia entre vigas o bien aumentando su sección transversal.

En este sentido, la unión de dos o más piezas de madera para formar una sección compuesta representó el primer paso hacia la optimización del comportamiento estructural (Müller, 2000), al permitir una mejora en el rendimiento sin un aumento proporcional en el uso de material.

Historia y desarrollo de la madera laminada

La historia de la madera laminada encolada como tal comienza a finales del siglo XIX. En 1901, el ingeniero alemán Otto Karl Friedrich Hetzer (1846-1911) patentó en Suiza un método para fabricar vigas rectas mediante la unión de láminas de madera con adhesivos (Figura 13), marcando, según Müller (2000), el inicio formal de la técnica.

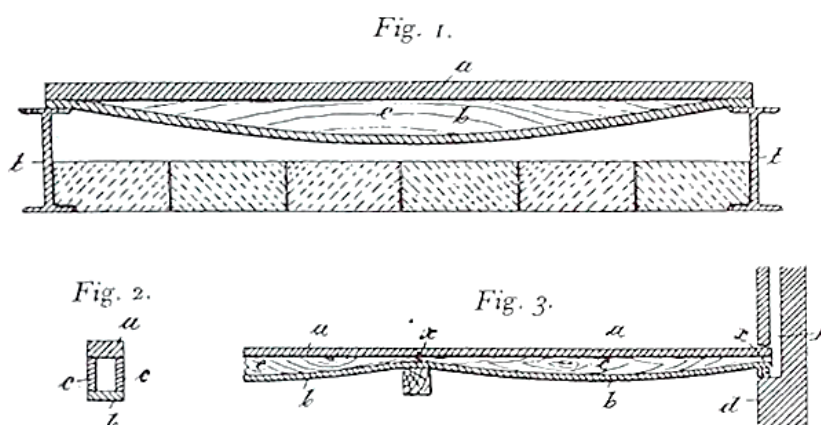


Figura 13. Viga Hetzer. Patente N.º 125895 (Müller, 2000).

Aunque esta patente fue el primer reconocimiento legal, la utilización de vigas "Hetzer" ya se había implementado desde 1890, por ejemplo, en el edificio del Reichstag en Berlín (Rhude, 1996). La innovación alcanzó un nuevo nivel en 1906 cuando Hetzer obtuvo una nueva patente en Alemania, esta vez para construcciones curvas (Müller, 2000), lo que permitió la fabricación de pórticos y arcos de madera con grandes luces.

El método fue exhibido con éxito en la Exposición Universal de Bruselas de 1910, con una estructura de 43 metros de luz, alcanzando un récord no superado hasta los años 30, y en la Exposición Internacional de Materiales de Construcción de Leipzig en 1913, recibiendo en ambas exposiciones importantes premios (Müller, 2000). De esta manera, el sistema se popularizó rápidamente en varios países como Austria-Hungría, Dinamarca o los países escandinavos. Según Rhude (1996), el éxito fue tal que, para el año 1920, solo en Suiza existían más de 200 edificaciones con vigas o arcos de madera laminada.

En los inicios de la técnica se utilizaban adhesivos a base de caseína (Jeska & Pascha, 2014). Aunque estos eran resistentes al agua, presentaban una baja capacidad para soportar esfuerzos cortantes. Como resultado, tal y como indica Jeska & Pascha (2014), muchas de las uniones realizadas con este tipo de cola experimentaban fallos de adherencia debido a las tensiones internas propias del material.

Este problema fue superado con la aparición, en 1928, de adhesivos sintéticos de curado en frío, como el *Kaurit*, formulado a partir de urea-formaldehído. Según Jeska & Pascha (2014), estos nuevos productos ofrecían una mayor resistencia mecánica, buena estabilidad frente a la humedad, un coste reducido y una aplicación relativamente sencilla. La incorporación de estas resinas sintéticas representó un avance decisivo en términos de durabilidad, contribuyendo a la expansión del uso de la madera laminada en estructuras arquitectónicas a gran escala (Jeska & Pascha, 2014).

Por otra parte, el paso de la tecnología al continente americano se dio gracias a Max Hanisch (1882-1950), un arquitecto e ingeniero alemán que había trabajado directamente con Hetzer. Según Müller (2000), tras emigrar a Estados Unidos en 1923, Hanisch pasó varios años estudiando el entorno técnico y económico del país antes de poder aplicar sus conocimientos.

El primer gran proyecto en América fue el gimnasio escolar de Peshtigo, Wisconsin, en 1934. Para ello, Hanisch fundó junto con sus hijos y los hermanos Thompson la empresa *Unit Structures, Inc.*, utilizando las instalaciones de una fábrica de embarcaciones en Peshtigo para fabricar las piezas laminadas (Müller, 2000). La obra, inicialmente rechazada por las autoridades debido a la falta de precedentes en el país, fue aprobada solo después de reforzar los arcos con elementos metálicos, aunque posteriormente se demostró que no eran necesarios. En cuanto al aspecto económico, según Rhude (1996), el presupuesto de la estructura de madera laminada era un 5 % inferior a su equivalente metálica.

El Laboratorio de Productos Forestales (FPL por sus siglas en inglés, *Forest Product Laboratory*), jugó un papel decisivo en la aceptación técnica de esta tecnología (Rhude, 1996). Estaban interesados en la construir un nuevo edificio del laboratorio empleando esta tecnología, por lo que *Unit Structures* fue contratada para ello. Se realizaron pruebas de carga a escala real (Figura 14) con sacos de arena con un peso total de 31.500 libras (14.288 kg). Pese a exceder esta carga en un 50 % las especificaciones de cálculo, las deformaciones resultantes fueron muy satisfactorias, demostrando la resistencia y fiabilidad de las estructuras de madera laminada (Rhude, 1996).

Estos resultados, publicados finalmente en el boletín técnico N.º 691 del Departamento de Agricultura de Estados Unidos en 1939, validaron el uso del material ante arquitectos, ingenieros y entes gubernamentales.

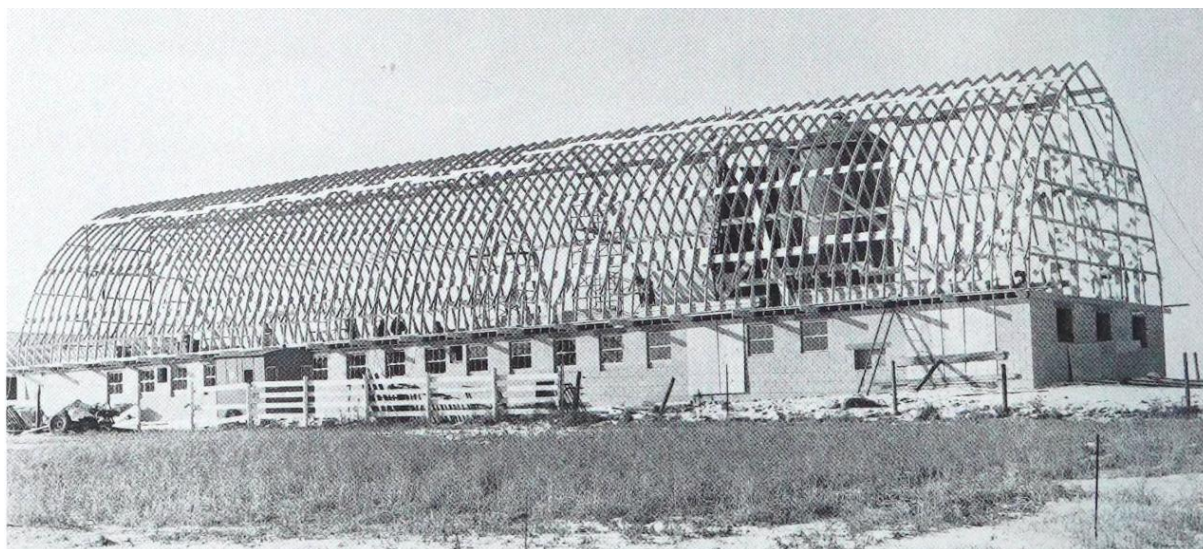


Figura 14. Test del edificio del FPL (Müller, 2000).

La Segunda Guerra Mundial aceleró aún más su uso, debido a las restricciones sobre el acero. Para dar una idea, según indica Rhude (1996), se estima que, en 1942, se ahorraron más de 800 millones de libras (alrededor de 363.880 toneladas) de acero empleando madera. En 1944, A.N. Carter publicó un artículo en la revista *Scientific American* que decía “*Few materials have played a greater or more versatile role in America's war construction program than wood*” [pocos materiales han jugado un papel más importante o versátil en el programa de construcción de la guerra en América que la madera].

La tecnología se expandió hacia la costa oeste de Estados Unidos gracias a empresas como *Timber Structures Inc.* y *Summerbell Roof Structures*, que se convirtieron en licenciatarias del sistema de *Unit Structures*. Durante la guerra, según explica Rhude (1996), estas firmas participaron en proyectos de hangares y almacenes militares, consolidando la madera laminada como una alternativa viable al acero.

En 1952, se fundó el *American Institute of Timber Construction* (AITC) para estandarizar la producción y promover las ventajas del material. A partir de este punto, la madera laminada encolada dejó de ser una innovación para convertirse en una práctica industrial consolidada. De esta manera, en 1995 había aproximadamente 30 fabricantes de madera laminada encolada para estructuras en Estados Unidos, la mayoría de los cuales formaban parte del AITC (Rhude, 1996).

La estructura de madera laminada encolada más antigua de España data de 1967, según Tellechea (1999). Es a partir de principios de los años 80, cuando el uso de la madera laminada encolada como elemento estructural comienza a experimentar un desarrollo notable en nuestro país.

La planta original de Peshtigo continúa fabricando el producto bajo el nombre de *Sentinel Structures, Inc.* La primera gran estructura de madera laminada, el gimnasio escolar de Peshtigo, estuvo a punto de ser demolido en los años 80 para una ampliación del colegio. Sin embargo, un defensor local de la construcción con madera laminada lideró una campaña para salvarlo, destacando la importancia histórica de sus arcos. Finalmente, el proyecto de ampliación fue modificado e integró el gimnasio en el nuevo diseño, convirtiéndolo en una biblioteca. Los arcos se conservaron intactos y, más de 60 años después de su construcción, la estructura sigue en uso y cumpliendo su función (Rhude, 1996).

Respecto a la actualidad, una obra notable que utiliza esta tecnología fue construida durante la década de los 2000. Se trata de la cubierta del Centro Pompidou-Metz, en la que se utilizaron en torno a 18.000 metros lineales de madera laminada (Chilton & Tang, 2016). La estructura tiene forma hexagonal, con lados de 52 metros y una superficie de alrededor de 7,000 m² en planta. Su entramado de madera crea un diseño de formas hexagonales que se asemeja a los tejidos de los sombreros tradicionales chinos (Chilton & Tang, 2016).

Dentro del territorio español, destaca el Museo del Jurásico de Asturias, ubicado entre Colunga y Lastres (Figura 15). Esta estructura representa la contrahuella tridáctila de dinosaurio. La cubierta de madera está formada por tres bóvedas, cuyas luces van desde los 40 metros en el caso de las laterales hasta los 60 metros en el caso de la bóveda central (Santos, 2005).



Figura 15. Museo Jurásico de Asturias (Santos, 2005)

2.2.1. Tipología y clasificaciones

La madera laminada estructural presenta una notable diversidad tipológica, derivada tanto de los métodos de fabricación como de las normativas aplicables y de las especies utilizadas. Según How et al. (2016), esta diversidad permite adaptar el material a una gran variedad de exigencias estructurales y arquitectónicas.

En este apartado se sistematizan las principales clasificaciones técnicas aplicables a la madera laminada con uso estructural, atendiendo a criterios normativos, constructivos y funcionales.

Clasificación de las tablas que conforman la pieza

La madera laminada encolada para usos estructurales se fabrica mediante la unión adhesiva de múltiples láminas. Estas láminas, previamente clasificadas por su resistencia mecánica y propiedades físicas, se ensamblan para formar un único elemento estructural de mayores dimensiones.

En este contexto, la normativa europea define esta clasificación en diversas clases resistentes para las láminas que conforman el elemento final, conocidas como clases T, cada una con propiedades mecánicas características asociadas, tales como la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad longitudinal y la densidad media.

En la Tabla 7 se recogen los valores característicos establecidos para cada una de estas clases T, tal y como son definidas en la norma UNE-EN 14080:2022.

Tabla 7. Propiedades de resistencia característica a tracción paralela a la fibra y rigidez para las clases T (MPa) y densidad (kg/m³) de las tablas para madera laminada (UNE-EN 14080, 2022).

Clase de resistencia T de las tablas ^a	$f_{t,0,l,k}$	$E_{t,0,l,medio}$	$\rho_{l,k}$
T8 (C14)	8	7 000	290
T9	9	7 500	300
T10 (C16)	10	8 000	310
T11 (C18)	11	9 000	320
T12 (C20)	12	9.500	330
T13 (C22)	13	10 000	340
T14 (C24)	14	11 000	350
T14,5	14,5	11 000	350
T15	15	11 500	360
T16 (C27)	16	11 500	370
T18 (C30)	18	12 000	380
T21 (C35)	21	13 000	390
T22	22	13 000	390
T24 (C40)	24	13 500	400
T26	26	14 000	410
T27 (C45)	27	15 000	410
T28	28	15 000	420
T30 (C50)	30	15 500	430
^a Las clases C conformes con la Norma EN 338:2009 cumplen como mínimo los valores indicados para las clases T correspondientes.			

Clasificación según la orientación de las láminas

La disposición de las láminas varía en función de su aplicación final. En este sentido, se distinguen dos tipos de vigas laminadas: la viga laminada horizontalmente y la viga laminada verticalmente.

La configuración horizontal es la más habitual en la mayoría de las aplicaciones de construcción. En este caso, las láminas se colocan de forma paralela al plano horizontal del elemento. Por otra parte, las vigas laminadas verticalmente se emplean en casos específicos donde el diseño del elemento requiere una geometría curva en planta (How et al., 2016).

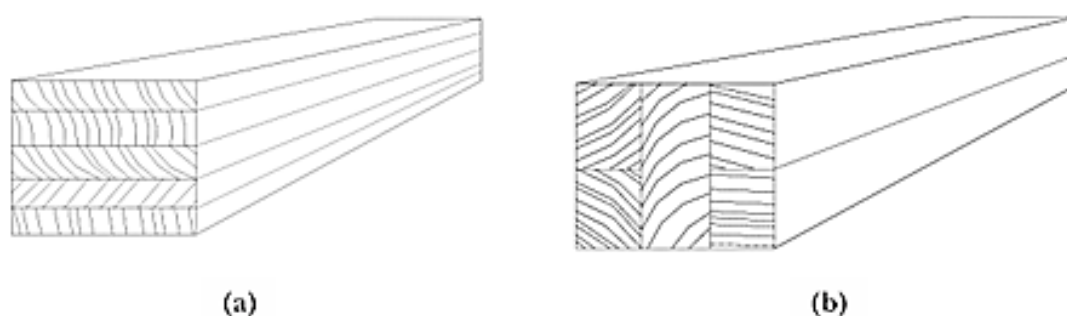


Figura 16. a) Laminación horizontal; b) Laminación vertical (How et al., 2016).

Clasificación según la homogeneidad de las clases resistentes de las láminas

En función de la distribución de las clases resistentes dentro de la sección transversal, la madera laminada encolada puede clasificarse en dos tipos: homogénea y combinada. Esta distinción tiene implicaciones directas tanto en el comportamiento estructural del elemento como en su diseño según la normativa UNE-EN 14080:2022.

- **Madera laminada encolada homogénea:** se compone exclusivamente de láminas pertenecientes a una misma clase resistente o a un perfil resistente definido por el fabricante (UNE-EN 14080, 2022). Esta configuración se caracteriza por una distribución uniforme de propiedades mecánicas en toda la sección, simplificando los cálculos estructurales y facilitando la predicción del comportamiento frente a esfuerzos.
- **Madera laminada encolada combinada:** en este caso, la sección está formada por láminas de diferentes clases resistentes, organizadas estratégicamente para optimizar el aprovechamiento estructural del material (UNE-EN 14080, 2022). Las láminas exteriores, que suelen estar sometidas a mayores tensiones, se seleccionan de clases resistentes superiores, mientras que las interiores pueden pertenecer a clases inferiores o adaptadas según el diseño del fabricante. Esta solución permite un equilibrio eficiente entre prestaciones mecánicas y consumo de recursos.

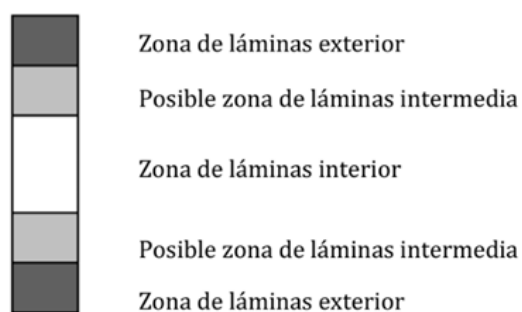


Figura 17. Ejemplo de combinación de láminas (UNE-EN 14080, 2022).

En este sentido, la mencionada normativa UNE-EN 14080:2022, regula los requisitos para la fabricación y clasificación de la madera laminada encolada y, además, establece las propiedades mecánicas y físicas características que deben considerarse en el diseño estructural. En la siguiente tabla se recogen los valores característicos de resistencia (flexión, tracción y compresión), rigidez (módulos elásticos longitudinal y transversal) y densidad, expresados en unidades del Sistema Internacional (MPa y kg/m³), para las distintas clases resistentes de madera laminada homogénea definidas en dicha norma.

Tabla 8. Propiedades características de resistencia y rigidez (MPa) y densidad (kg/m³) para madera laminada encolada homogénea (UNE-EN 14080, 2022).

Propiedad	Símbolo	Clase resistente de madera laminada encolada						
		GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
Resistencia a flexión	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Resistencia a tracción	$f_{t,0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Resistencia a compresión	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Resistencia a esfuerzo cortante (cortadura y torsión)	$f_{v,g,k}$	3,5						
Resistencia al cortante de rodadura	$f_{r,g,k}$	1,2						
Modulo de elasticidad	$E_{0,g,mean}$	8 400	10 500	11 500	12 100	12 600	13 600	14 200
	$E_{0,g,05}$	7 000	8 800	9 600	10 100	10 500	11 300	11 800
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Módulo de elasticidad transversal	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	540						
Módulo de cortante de rodadura	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Densidad	$\rho_{g,k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{g,mean}$	370	410	420	445	460	480	490

Clasificación según la disposición de la unión dentada o *finger-joint*

Las uniones dentadas, conocidas como *finger-joints*, consisten en un empalme de los extremos de piezas de madera. Este sistema se basa en un mecanizado las testas de ambas piezas, en las que se practican múltiples entalladuras afiladas, simétricas y de geometría idéntica, generalmente mediante una fresa de dentado múltiple (UNE-EN 14080, 2022). Posteriormente, son encoladas, obteniendo elementos estructuralmente continuos de mayor longitud a partir de piezas más cortas.

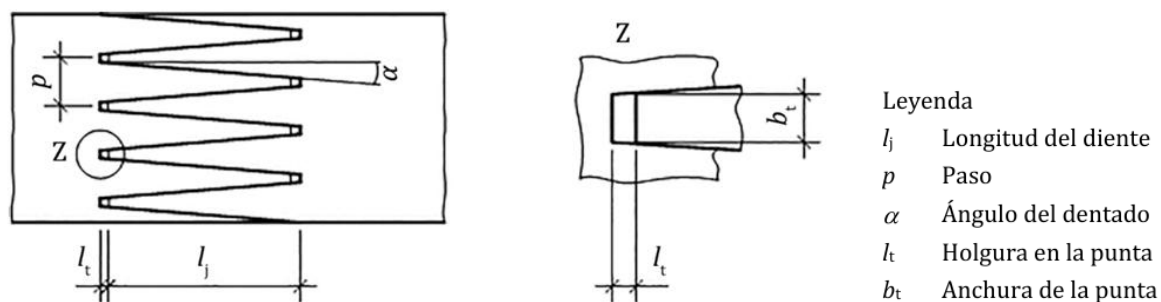


Figura 18. Perfil tipo de un empalme por unión dentada (UNE-EN 14080, 2022)

En función de la orientación del perfil dentado con respecto al eje longitudinal del elemento, se distinguen dos configuraciones principales: la unión horizontal y la unión vertical.

Las uniones horizontales suelen emplearse en la fabricación de mobiliario, donde el perfil en zigzag queda oculto para ofrecer una superficie más homogénea. En cambio, las uniones verticales son más estables y se prefieren generalmente para la construcción de elementos estructurales (How et al., 2016).

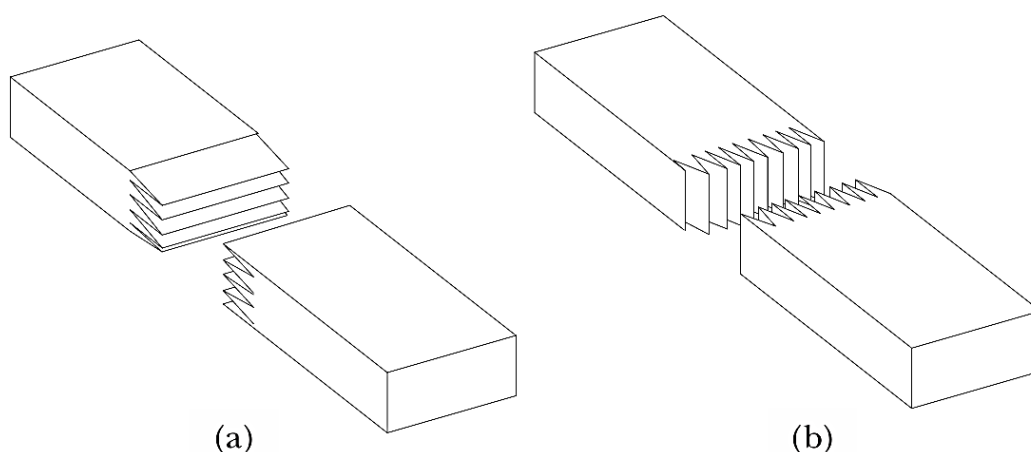


Figura 19. a) Unión horizontal; b) Unión vertical (How et al., 2016).

Clasificación según el tipo de adhesivo empleado

Los adhesivos empleados en estructuras de madera deben garantizar un nivel de resistencia y durabilidad suficiente para conservar la cohesión de las uniones a lo largo de toda la vida útil de la estructura, en las condiciones ambientales previstas para la clase de servicio³ correspondiente (UNE-EN 301, 2023).

En función de su comportamiento frente a distintas exposiciones ambientales, la norma UNE-EN 301 clasifica estos adhesivos en dos tipos principales:

- **Tipo I:** aquellos que son aptos para ser utilizados en estructuras ubicadas en clases de servicio 1, 2 y 3, es decir, desde ambientes interiores secos hasta condiciones exteriores moderadamente expuestas.
- **Tipo II:** aquellos limitados exclusivamente a aplicaciones en clase de servicio 1, correspondiente a ambientes interiores secos y estables.

Además de esta clasificación por tipo, los adhesivos son agrupados en tres categorías de aplicación, definidas en función del tipo de unión y del modo en que se transmite el esfuerzo:

- **Uso general (GP, *General Purpose*):** adhesivos versátiles que pueden emplearse tanto en encolado plano entre láminas, como en uniones dentadas estándar y de grandes dimensiones.
- **Uniones dentadas (FJ, *Finger-Jointing*):** específicamente desarrollados para uniones tipo *finger-joint* entre piezas estructurales de madera.
- **Relleno de holguras (GF, *Gap Filling*):** indicados para uniones donde existan tolerancias o discontinuidades, especialmente en encolados longitudinales en la dirección de la fibra, como ocurre en elementos en bloque. Esta categoría puede solaparse con GP y FJ si el adhesivo ha sido formulado adecuadamente, sin necesidad de ensayos adicionales (UNE-EN 301, 2023).

³ No debe confundirse la *clase de servicio* con la *clase de uso* expuesta en el apartado 2.1.3. Según la norma UNE-EN 301, las clases de servicio se definen como:

- Clase de servicio 1: Condiciones climáticas donde los materiales presentan un contenido de humedad correspondiente a una temperatura de 20 °C y a una humedad relativa del aire que solo supera el 65 % durante unas pocas semanas al año.
- Clase de servicio 2: Condiciones climáticas similares a los de la clase de servicio 1, pero con una humedad relativa del aire que supera el 85 % durante unas pocas semanas al año.
- Clase de servicio 3: Condiciones climáticas donde los materiales alcanzan contenidos de humedad superiores a los de la clase de servicio 2.

El sistema de clasificación se completa con trece clases normalizadas de adhesivos estructurales, cada una con su correspondiente código de designación, que quedan recogidas en la Tabla 9.

Tabla 9. Clases de adhesivos (UNE-EN 301, 2023).

Clase de adhesivo (Código de designación)	Área de aplicación	Temperatura máxima de ensayo ^c °C	Espesor máximo de la línea de encolado		Clases de servicio ^a
			Ensayo mm	Uso mm	
	Encolado entre láminas y en uniones dentadas para uso general				
EN 301 I 70 GP 0,6M	Fines generales	70	1,0	0,6 ^d	1, 2, 3
EN 301 I 70 GP 0,3S	Fines generales	70	1,0	0,3	1, 2, 3
	Uso especial				
EN 301 I 90 GF 1,5M	Relleno de holguras	90	2,0	1,5	1, 2, 3
EN 301 I 90 GP 0,6M	Fines generales	90	1,0	0,6 ^d	1, 2, 3
EN 301 I 90 GP 0,3S	Fines generales	90	1,0	0,3	1, 2, 3
EN 301 I 90 FJ 0,1M	Uniones dentadas	90	0,3	0,1	1, 2, 3
EN 301 I 90 FJ 0,1S	Uniones dentadas	90	0,3	0,1	1, 2, 3
EN 301 I 70 FJ 0,1M	Uniones dentadas	70	0,3	0,1	1, 2, 3
EN 301 I 70 FJ 0,1S	Uniones dentadas	70	0,3	0,1	1, 2, 3
EN 301 II 50 GP 0,6M	Fines generales	^b	1,0	0,6 ^d	1
EN 301 II 50 GP 0,3S	Fines generales	^b	1,0	0,3	1
EN 301 II 50 FJ 0,1M	Uniones dentadas	^b	0,3	0,1	1
EN 301 II 50 FJ 0,1S	Uniones dentadas	^b	0,3	0,1	1
^a La aplicación de los tipos de adhesivos en las diferentes clases de servicio puede verse limitada por las reglamentaciones nacionales aplicables al lugar de uso final de las estructuras de madera pegadas. ^b Si la temperatura máxima de utilización es de 50 °C, no es necesario realizar el ensayo. ^c Ensayo realizado conforme a la Norma EN 302-8.					

2.2.2. Proceso de fabricación

Este apartado describe las etapas del proceso de fabricación de la madera laminada encolada. Según la U.S. Environmental Protection Agency (2010), el proceso de fabricación de este material se divide en cuatro etapas principales: (1) secado y clasificación de la madera; (2) unión de los extremos para formar láminas más largas; (3) encolado de las láminas por sus caras; y (4) acabado y conformación del producto final.

En la Figura 20 se esquematiza el diagrama de flujo del proceso de fabricación.

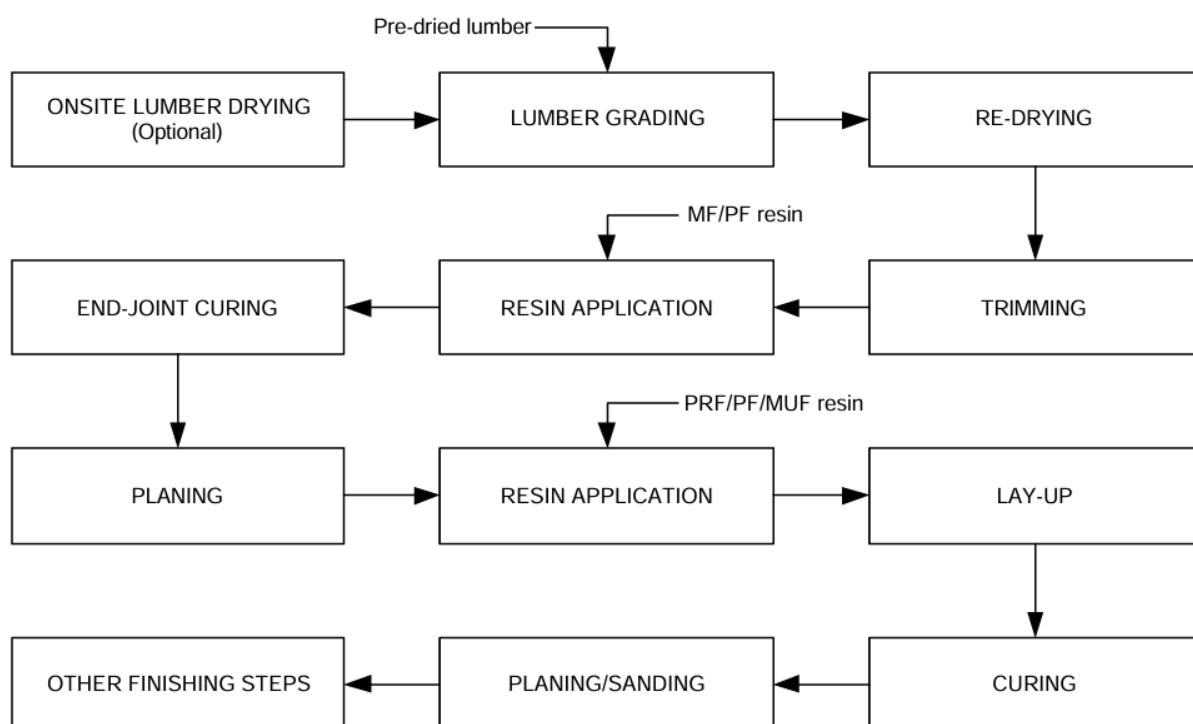


Figura 20. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de la madera laminada encolada (U.S. Environmental Protection Agency, 2010).

Preparación de las láminas: secado y clasificación de la madera

El proceso comienza con la selección de madera de alta calidad, entendida como aquella que presenta buenas características mecánicas, elevada homogeneidad y un comportamiento adecuado frente al encolado (Demkoff, 2003). Entre las especies más empleadas se encuentran el abeto, el alerce, la píce y el álamo (Kuzman et al., 2010).

Para garantizar una unión eficaz, las láminas deben presentar un contenido de humedad dentro de los rangos establecidos por la norma UNE-EN 14080:2022: entre el 6 % y el 15 % para maderas no tratadas, y entre el 11 % y el 18 % en el caso de aquellas que han sido sometidas a tratamientos protectores.

Para alcanzar estos valores, la madera se somete primero a un secado al aire (Figura 21) y, en algunos casos, a un secado en cámaras especializadas de acondicionamiento higrotérmico. Es necesario que la diferencia de humedad entre láminas contiguas no supere el 5 % (UNE-EN 14080, 2022), con el objetivo de evitar la aparición de tensiones internas no deseadas.

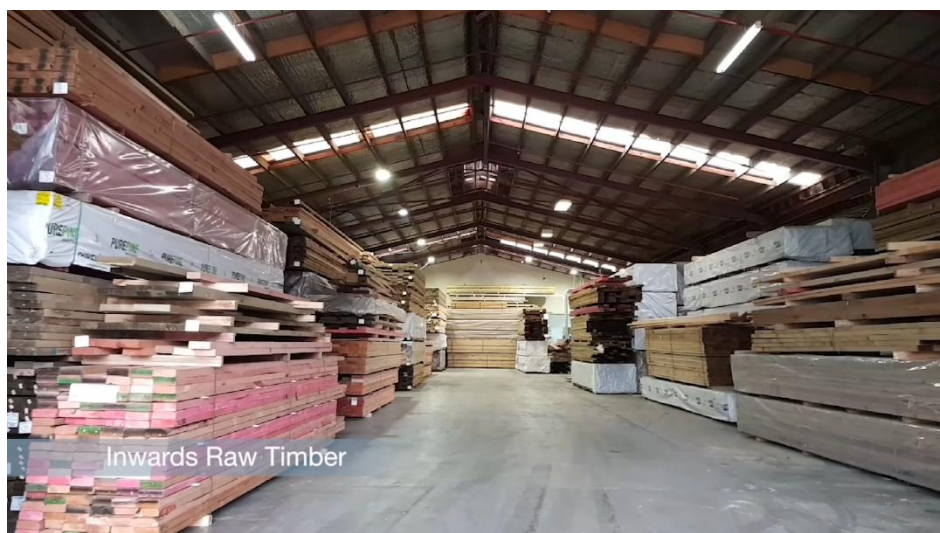


Figura 21. Secado de la madera al aire (Techlam, 2020).

Tras el secado, se procede a una inspección de las láminas (Figura 22, izq.), eliminando manual o mecánicamente aquellos defectos evidentes como nudos, fendas, fisuras o deformaciones (Demkoff, 2003). Antes del encolado, las piezas son clasificadas tanto visualmente como mediante ensayos no destructivos (Kuzman et al., 2010) (Figura 22, der.).

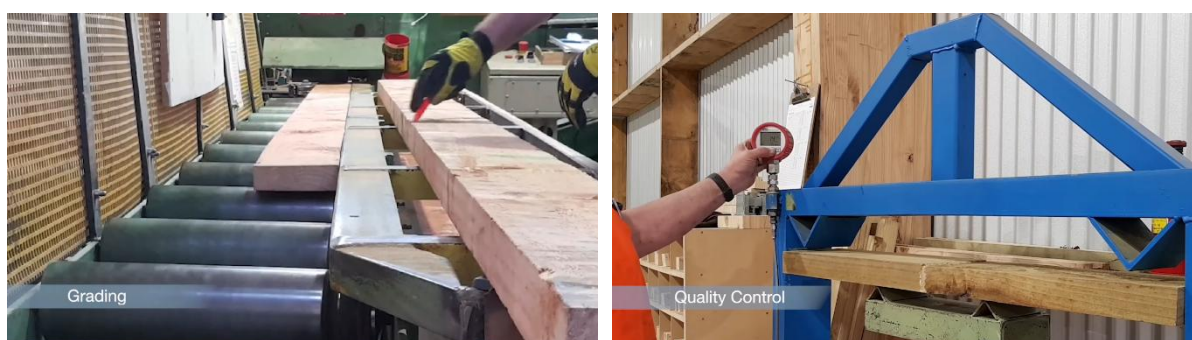


Figura 22. Selección de tablas (izq.) y control de calidad (der.) (Techlam, 2020).

Unión de los extremos

Para alcanzar las longitudes requeridas en vigas estructurales, las láminas se ensamblan mediante uniones dentadas (*finger joints*) (Figura 23). Estas entalladuras, según Moya et al. (2019), garantizan la correcta transmisión de esfuerzos y, por otra parte, evitan la desconexión por deslizamiento relativo de las piezas (Tellechea, 1999).

No obstante, según Moya et al. (2019), es deseable fabricar elementos estructurales con la menor cantidad posible de uniones dentadas, debido a la concentración de tensiones que ocurre en la zona cercana al diente.

De acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN 14080:2022, las uniones dentadas entre láminas deben ser encoladas en un plazo máximo de seis horas tras haberse realizado el mecanizado del perfil dentado. Es necesario señalar, tal y como hace Tellechea (1999), que

el adhesivo empleado en la unión de las testas puede ser diferente al utilizado para la unión de las láminas entre sí.

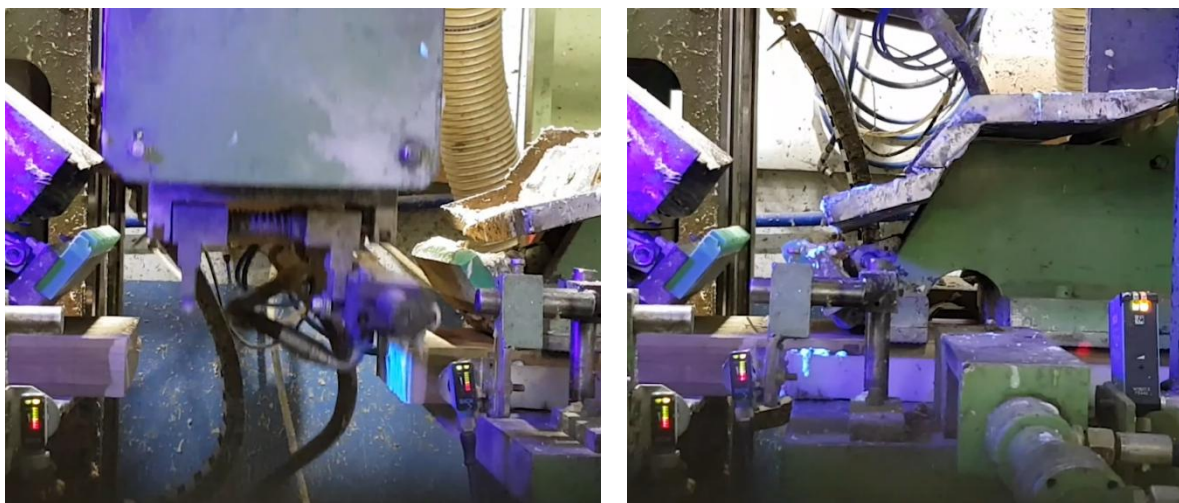


Figura 23. Aplicación de adhesivo (izq.) y unión de los extremos (der.) (Techlam, 2020).

A continuación, se procede al cepillado de las láminas, con el fin de calibrar el espesor de las láminas, obtener superficies completamente planas y eliminar las impurezas o partículas degradadas de la superficie que pudiesen disminuir la adherencia del adhesivo (Demkoff, 2003; Tellechea, 1999).

Encolado de las láminas

Las láminas ya cepilladas avanzan de forma continua a través de un sistema de aplicación, que puede ser en peine, rodillo o aerosol, entre otros, que deposita sobre una de sus caras la cantidad precisa de adhesivo necesaria para su unión (Figura 24, izq.). La dosificación del adhesivo por unidad de superficie se controla en tiempo real, y cualquier exceso es eliminado de manera inmediata (Tellechea, 1999).

Los adhesivos utilizados son sintéticos, diseñados para resistir variaciones térmicas, humedad y ataques biológicos. Según Moya et al. (2019), se utilizan principalmente resinas fenólicas o aminoplásticas como la urea-formaldehído (UF), melamina-formaldehído (MF) y melamina-urea-formaldehído (MUF), cumpliendo con normativas europeas como la UNE-EN 301. Se considera que el adhesivo no debe representar más del 1 % del volumen total del elemento (Kuzman et al., 2010).

Entonces se procede al apilado de las láminas, la lámina encolada por una de sus caras se coloca sobre la anterior, de modo que su cara sin encolar quede en contacto con la superficie adhesivada de la lámina precedente, formando progresivamente el elemento laminado completo según las dimensiones requeridas (Tellechea, 1999).

Finalmente, las láminas se someten a un proceso de prensado mediante equipos hidráulicos o neumáticos (Figura 24, der.). En el caso de piezas curvas o con geometrías especiales, se recurre al uso de moldes específicos que permiten conformar los elementos estructurales durante el prensado (Kuzman et al., 2010). La aplicación de la presión comienza en la zona central del elemento y se extiende de forma simétrica hacia los extremos, garantizando así una distribución homogénea. Este procedimiento debe realizarse con rapidez y eficacia, ya que las uniones encoladas deben quedar sometidas a presión en un tiempo máximo de una hora tras la aplicación del adhesivo (Tellechea, 1999).



Figura 24. Aplicación del adhesivo en peine (izq.) y prensado (der.) (Techlam, 2020).

La duración y temperatura de esta etapa varían en función del tipo de adhesivo utilizado (Demkoff, 2003). Además, la presión debe permanecer constante durante la polimerización del adhesivo (Tellechea, 1999). Estas variables gobiernan la integridad de la unión a largo plazo. La presión aplicada debe seleccionarse considerando la sección de las láminas, la especie de madera, el adhesivo empleado y el tratamiento requerido (Kuzman et al., 2010). En la Tabla 10 se presentan los valores recomendados para la presión de prensado.

Tabla 10. Valores recomendados para la presión de prensado (UNE-EN 14080, 2022).

Espesor de las láminas, t en mm	$t \leq 35$	$35 < t \leq 45$	$45 < t \leq 85$
Presión de prensado en N/mm ²	0,6 a 0,8	0,8 para láminas con ranuras 1,0 para láminas sin ranuras	0,8 a 1,0

Acabado y conformación del producto final

Tras el curado, las piezas son mecanizadas y calibradas según las dimensiones requeridas (Figura 25, izq.). Las piezas se fabrican inicialmente con una longitud superior a la requerida en el producto final. Este excedente permite realizar los ajustes necesarios durante las etapas finales del proceso, por lo que se deben recortar los extremos y conformarlos según las especificaciones del diseño (Tellechea, 1999).

Por otra parte, se procede al cepillado o lijado de las caras laterales para eliminar el exceso de adhesivo que haya podido salir de entre las láminas durante el prensado. Las caras

longitudinales pueden recibir también un lijado o cepillado ligero, en función del nivel de acabado estético requerido. Así mismo, según la U.S. Environmental Protection Agency (2010), los bordes o esquinas suelen redondearse para mejorar su aspecto y seguridad.

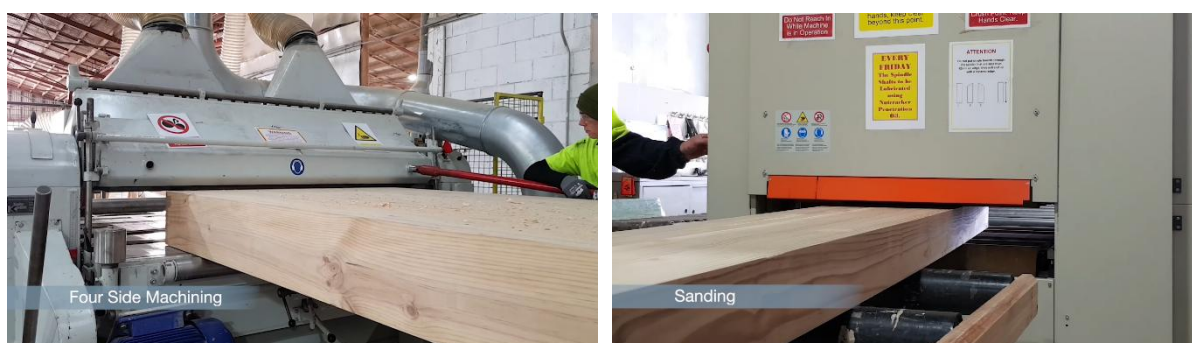


Figura 25. Mecanizado final de la pieza (izq.) y lijado (der.) (Techlam, 2020).

Para proteger la estructura de madera laminada encolada frente a la humedad, es habitual aplicar productos hidrófugos en su superficie. Estos compuestos líquidos forman una barrera que reduce la absorción de agua provocada por la exposición a agentes atmosféricos. De forma complementaria, y frecuentemente de manera simultánea, se aplica un tratamiento protector contra insectos xilófagos y hongos. Además, estos tratamientos pueden incorporar pigmentos o tintes que proporcionan a la pieza el tono deseado, completando así el acabado estético del elemento estructural (Tellechea, 1999).

2.2.3. Características: ventajas, limitaciones

Aunque a lo largo del documento se han ido exponiendo las diversas propiedades que convierten a la madera laminada encolada en una solución especialmente interesante para su uso en aplicaciones estructurales, tanto en edificaciones de mediana como de gran envergadura, en este apartado se sistematizan y desarrollan de forma más detallada sus principales ventajas y limitaciones. Esta recopilación permite ofrecer una visión global del material, integrando tanto sus cualidades técnicas, estéticas y medioambientales, como los aspectos que pueden condicionar su empleo en determinados contextos constructivos.

Ventajas

Una de las principales ventajas de la madera laminada encolada radica en su flexibilidad de diseño (Quesada et al., 2022). Gracias a su proceso de fabricación que, como ya se ha visto, incluye el *finger-jointing* de piezas de madera de pequeñas dimensiones, es posible curvar y adaptar los elementos a formas y longitudes específicas. Esta capacidad de personalización no solo facilita soluciones estructurales innovadoras, sino que también aporta un valor estético importante, especialmente en estructuras expuestas como vigas de cumbrera o cerchas curvas.

En términos estructurales, la madera laminada encolada presenta una excelente relación resistencia-peso. Su capacidad para soportar cargas de compresión y tracción supera la de otros productos de madera, y en muchos casos ofrece mayor durabilidad frente a otros materiales. De hecho, la madera laminada encolada puede adaptarse a esfuerzos variables sin sufrir daños estructurales, debido a su flexibilidad inherente, lo que puede resultar especialmente interesante en estructuras caracterizadas por su exposición a la fatiga estructural.

En términos económicos, según Petersen & Solberg (2005), las soluciones estructurales de madera laminada se encuentran en un rango de precios de $\pm 20\%$ con respecto de una solución similar construida en acero.

Otro aspecto destacable es su comportamiento frente al fuego. Al tratarse de un elemento de sección masiva, la madera genera una capa carbonizada durante la combustión que actúa como aislante térmico, ralentizando la propagación del fuego y reduciendo la velocidad de deterioro.

Por otra parte, desde una perspectiva medioambiental, la madera laminada ofrece una huella ecológica significativamente menor que otros materiales de construcción como el acero o el hormigón (Petersen & Solberg, 2005). Según Quesada et al. (2022), la madera utilizada en su fabricación secuestra dióxido de carbono durante su crecimiento y lo retiene durante toda la vida útil de la estructura. Además, al fabricarse con madera local, contribuye al desarrollo de la industria forestal regional y favorece la gestión sostenible de los recursos naturales.

La disponibilidad comercial en una amplia gama de dimensiones, con secciones que van desde los 45 mm hasta los 1800 mm y longitudes superiores a los 30 metros (Quesada et al., 2022), y ofrece una gran versatilidad para distintos usos estructurales, como vigas, columnas, arcos y cerchas. Así mismo, se puede fabricar con diferentes especies de madera, lo que permite una variación en texturas, colores y características visuales, adaptándose a criterios estéticos o arquitectónicos específicos.

Limitaciones

A pesar de sus múltiples beneficios, la madera laminada encolada presenta ciertas limitaciones que deben considerarse en el proceso de diseño y planificación.

En primer lugar, el coste asociado a su producción suele ser más elevado que el de otros productos de madera convencionales (Quesada et al., 2022). Esta diferencia de precio puede estar motivada tanto por el proceso de fabricación como por los requisitos de calidad de los materiales base y adhesivos empleados.

Otra limitación está relacionada con la disponibilidad del producto. En Estados Unidos, por ejemplo, el número de fabricantes es limitado, lo que puede restringir el acceso a ciertos mercados o incrementar los tiempos de suministro (Quesada et al., 2022).

Desde el punto de vista del comportamiento higrotérmico, la madera laminada muestra una menor resistencia a la humedad en comparación con el acero o el hormigón. Según Quesada et al. (2022), para mitigar esta desventaja, es habitual diseñar elementos con mayores secciones, lo que puede suponer un incremento en el uso de material y, por ende, en el coste total del proyecto.

Por último, la reparación de elementos de madera laminada encolada que hayan sufrido daño estructural puede resultar compleja. La intervención sobre estos componentes no siempre es sencilla ni económicamente viable, por lo que es necesario realizar una planificación cuidadosa desde las etapas iniciales del proyecto.

2.3. ANÁLISIS ULTRASÓNICO

El ultrasonido se define como una vibración acústica con frecuencia superior a 20 kHz, por encima del rango audible para el oído humano. Estas ondas se propagan a través de distintos medios materiales, incluyendo sólidos, líquidos y gases, permitiendo su aplicación en diversas áreas científicas e industriales (Medina, 2013).

En el ámbito de los ensayos no destructivos (END; o por sus siglas en inglés, NDT, *Nondestructive Testing*), los ultrasonidos desempeñan un papel especialmente relevante en la detección y caracterización de defectos en materiales y estructuras sin comprometer sus propiedades, integridad o utilidad final (Acuña et al., 2006).

Historia y desarrollo de la tecnología ultrasónica

La idea primaria del ultrasonido surge a finales del siglo XVIII, cuando el biólogo italiano Lazzaro Spallanzani (1729-1799) estudiaba como algunos animales nocturnos eran capaces de orientarse en la oscuridad. Al observar que los murciélagos podían desplazarse sin dificultad cuando se les privaba de la vista, pero perdían esta capacidad al despojarles del sentido auditivo, Spallanzani dedujo que estos animales dependían fundamentalmente del oído para percibir su entorno (Kaproth-Joslin et al., 2015). Así, propuso que estos animales utilizaban señales auditivas no perceptibles para el ser humano, anticipando, aunque sin saberlo, la futura comprensión del uso de ondas acústicas de alta frecuencia, lo que hoy conocemos como ultrasonido.

El descubrimiento del efecto piezoeléctrico, propiedad de algunos cristales, como el cuarzo, por los hermanos Jacques (1856-1941) y Pierre (1859-1906) Curie en la segunda mitad del siglo XIX permitió, por primera vez, la generación de ondas acústicas con frecuencias

superiores al rango audible por el ser humano, sentando las bases para el desarrollo de los transductores modernos.

El desarrollo del ultrasonido en ingeniería comenzó a principios del siglo XX con aplicaciones en detección submarina. Tras el hundimiento del Titanic en 1912, el ingeniero canadiense Reginald Fessenden (1866-1932) desarrolló uno de los primeros sistemas de detección de obstáculos basado en el ultrasonido. Adaptando un generador de código Morse submarino para funcionar como una sonda náutica, el dispositivo lograba detectar un iceberg a 2 millas (3,2 km) de distancia. No obstante, su emisión, continua y no intermitente, generaba interferencias que limitaron su uso comercial como sistema de prevención de colisiones (Kaproth-Joslin et al., 2015).



Figura 26. R. Fessenden y el oscilador Fessenden (Kaproth-Joslin et al., 2015).

Con el avance de la tecnología submarina durante la Primera Guerra Mundial, el físico francés Paul Langevin (1872-1946) desarrolló un transmisor-receptor de ondas sonoras de alta frecuencia, conocido como hidrófono, basado en cristales de cuarzo y el efecto piezoeléctrico. Este dispositivo, compuesto por pequeños cristales adheridos entre dos placas de acero, permitía detectar con claridad los ecos reflejados por submarinos sumergidos (Kaproth-Joslin et al., 2015). Las mejoras posteriores durante la Segunda Guerra Mundial dieron origen al desarrollo del sonar.

La idea de la aplicación de los ultrasonidos en ensayos no destructivos (END), surge a finales de la década de 1920, cuando el físico ruso Sergei Sokolov propuso una técnica para detectar defectos internos en metales (Martínez Rodríguez et al., 2007). No obstante, los dispositivos que desarrolló no eran prácticos debido a la baja resolución que poseían.

Poco después, en 1931, el científico alemán O. Mulhauser obtuvo la patente de un dispositivo que utilizaba ondas ultrasónicas con el fin de detectar defectos internos en materiales sólidos (Medina, 2013). Este dispositivo empleaba dos transductores colocados en extremos opuestos de la pieza a examinar.

En 1940, el físico estadounidense Floyd Firestone (1898-1986), aplicando esta tecnología, patentó un nuevo sistema de ultrasonido para inspección de materiales sólidos en *The Supersonic Reflectoscope, an Instrument for Inspecting the Interior of Solid Parts by Means of Sound Waves*. Este equipo utilizaba un único palpador como emisor y receptor, dando lugar a la técnica conocida como pulso-eco (Martínez Rodríguez et al., 2007).

Desde entonces, la tecnología ha avanzado logrando cada vez mejores especificaciones y expandiendo sus aplicaciones. Entre los investigadores más destacados en este campo se encuentran los hermanos de ascendencia alemana Josef (1913-2000) y Herbert Krautkrämer, cuyos trabajos fueron fundamentales para el surgimiento de una de las principales compañías a nivel mundial en la fabricación de equipos de inspección ultrasónica para aplicaciones industriales (Martínez Rodríguez et al., 2007).

2.3.1. Principios básicos del ultrasonido en materiales

El fundamento físico de la técnica del ultrasonido se basa en la propagación de ondas mecánicas de alta frecuencia a través de un medio, cuyas características afectan directamente al comportamiento de dichas ondas.

En este apartado se presentan los conceptos fundamentales relativos a la naturaleza de las ondas ultrasónicas, su modo de propagación en sólidos, los parámetros característicos de su interacción con los materiales y los fenómenos físicos asociados.

Parámetros característicos de las ondas

Las ondas ultrasónicas poseen diversas propiedades que determinan su comportamiento durante la propagación a través de diferentes materiales. Estas propiedades influyen directamente en la capacidad de penetración, resolución y sensibilidad del ensayo, así como en la interpretación de los resultados obtenidos.

Se describen a continuación los parámetros característicos de las ondas:

- **Amplitud:** máximo desplazamiento que experimenta una partícula desde su posición de equilibrio.
- **Periodo:** tiempo necesario para que una partícula realice un ciclo completo (Figura 27).

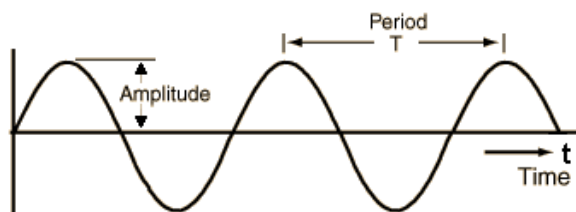


Figura 27. Amplitud y periodo de una onda (UPENN, 2013).

- **Frecuencia:** número de ciclos que realiza una onda por segundo, medido en hercios (Hz). Una frecuencia más alta permite una mejor resolución en la inspección, pero reduce la penetración en el material (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983). La expresión de la frecuencia de una onda es:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

donde:

f frecuencia.

T periodo.

- **Velocidad de propagación en el material:** depende de la densidad y compresibilidad del medio. A mayor separación de moléculas en un material, la transmisión del ultrasonido será más lenta.
- **Longitud de onda:** relacionada con la frecuencia (f) y la velocidad de propagación (c), se define como la distancia entre dos puntos equivalentes en un ciclo de onda. Viene dada por la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

La capacidad del método de ultrasonidos para detectar irregularidades en el material está directamente relacionada con la longitud de onda de la señal propagada. De esta manera, para que un defecto sea detectable, su tamaño debe ser generalmente igual o superior que la longitud de onda (Iñiguez, 2007).

- **Impedancia acústica:** representa la resistencia que ofrece un medio a la propagación de las ondas sonoras a través de él. Puede entenderse como un equivalente a la impedancia eléctrica, describiendo ambas un modo de disipación de energía. Puede expresarse como (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983):

$$Z = \frac{p}{c} \quad (2.3)$$

donde:

p presión sonora.

c velocidad de propagación en el medio.

- **Frente de onda:** conjunto de puntos que son alcanzados simultáneamente por una determinada onda.

Por otro lado, durante su propagación a través de un medio material, las ondas ultrasónicas se ven significativamente afectadas por las características físicas, mecánicas y estructurales del entorno en el que se transmiten (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983), produciéndose una serie de fenómenos físicos, tales como la reflexión, refracción, atenuación o dispersión, entre

otros, que influyen de manera directa en su comportamiento, modificando aspectos como la dirección, velocidad, amplitud o forma de la onda durante su trayecto a lo largo del medio analizado (Medina, 2013).

- **Reflexión:** cuando una onda ultrasónica encuentra una interfaz entre dos medios con diferentes impedancias acústicas, parte de la onda se refleja (Figura 28), lo que permite la detección de defectos internos (Medina, 2013).
- **Refracción:** la parte restante de la onda que no se ha reflejado penetra en el segundo medio y cambia de dirección debido a la diferencia en las velocidades del sonido entre ambos materiales. La dirección de las ondas reflejadas y transmitidas viene dada por la ley general de la refracción o ley de Snell (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983):

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2.4)$$

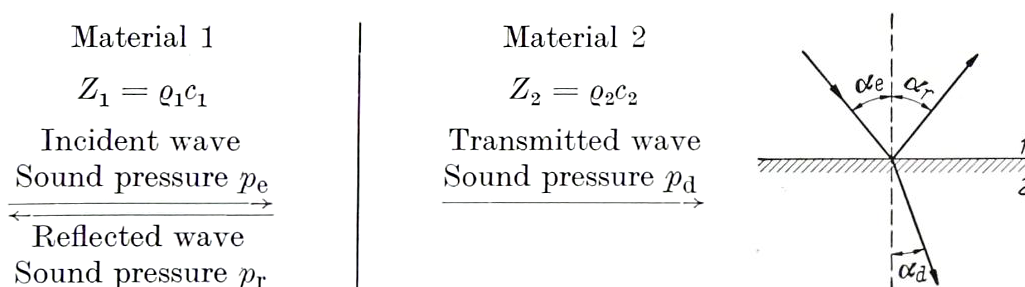


Figura 28. Reflexión y refracción de una onda que incide oblicuamente en la interfaz entre dos materiales (Krautkrämer y Krautkrämer, 1983).

- **Atenuación:** reducción de la amplitud de la onda sonora a medida que se propaga a través del material, causada por la absorción y dispersión. La atenuación aumenta con la frecuencia y la heterogeneidad del material (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983).

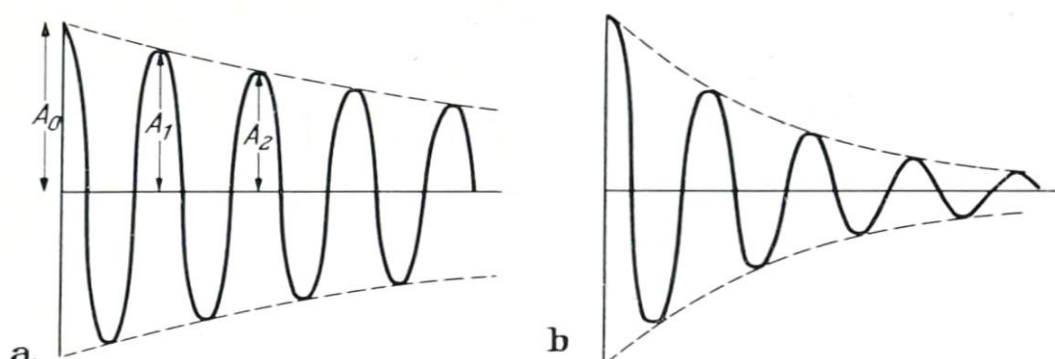


Figura 29. Disminución de la amplitud de onda para diferentes grados de atenuación (Krautkrämer y Krautkrämer, 1983).

- **Absorción:** es el proceso por el cual la energía de la onda ultrasónica se convierte en calor debido a la fricción interna y otras pérdidas viscoelásticas del material. Esta conversión depende de las propiedades del medio y contribuye a la atenuación a medida que la frecuencia aumenta (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983).
- **Dispersión:** ocurre cuando las ondas ultrasónicas interactúan con estructuras internas del material (como granos, inclusiones o huecos) que son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda, causando que la energía se propague en múltiples direcciones (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983). La dispersión contribuye a la atenuación y puede afectar la resolución de la inspección.

Como señala Krautkrämer & Krautkrämer (1983), ambas pérdidas (absorción y dispersión) limitan la eficacia de los ensayos en materiales, aunque lo hacen de formas diferentes.

Si bien la absorción reduce la energía transmitida y la amplitud de los ecos, este efecto puede compensarse aumentando el voltaje del transmisor y la amplificación o utilizando frecuencias más bajas. No obstante, la dispersión supone un desafío mayor: no solo debilita los ecos, sino que genera múltiples señales con diferentes tiempos de recorrido (conocidas como *grass*) que pueden ocultar los ecos verdaderos (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983).

En este caso, aumentar el voltaje o la amplificación no resulta útil, ya que también aumenta el *grass*. La única solución es usar frecuencias más bajas, lo que reduce la capacidad de detectar defectos pequeños.

- **Interferencia:** Este fenómeno ocurre cuando las ondas sonoras se generan al mismo tiempo desde diferentes puntos, (Figura 30) lo que provoca que una superposición y da lugar a una nueva onda, suma de las ondas originales (Medina, 2013).

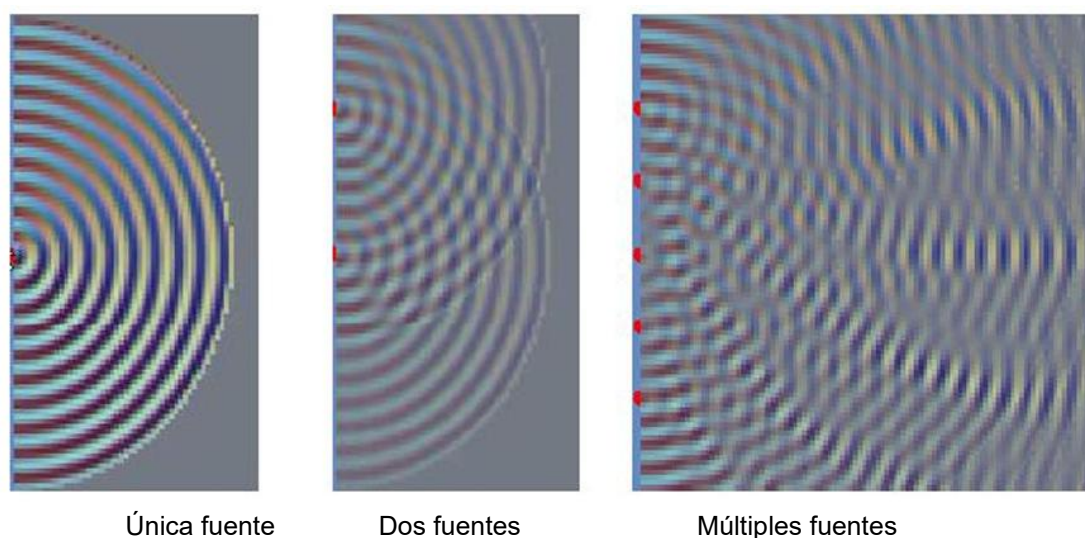


Figura 30. Interferencia de ondas (Medina, 2013).

Modos de propagación

En los materiales sólidos, las ondas pueden propagarse de diferentes maneras, dependiendo de la dirección de oscilación y propagación. Los principales modos de propagación incluyen:

- **Ondas longitudinales o de compresión (ondas P):** en este modo, las partículas del material vibran en la misma dirección que la propagación de la onda (Figura 31). Como señala Krautkrämer & Krautkrämer (1983), se caracterizan por su alta velocidad de propagación y son ampliamente utilizadas en ensayos no destructivos (END) debido a su capacidad de penetración y sensibilidad a discontinuidades internas.

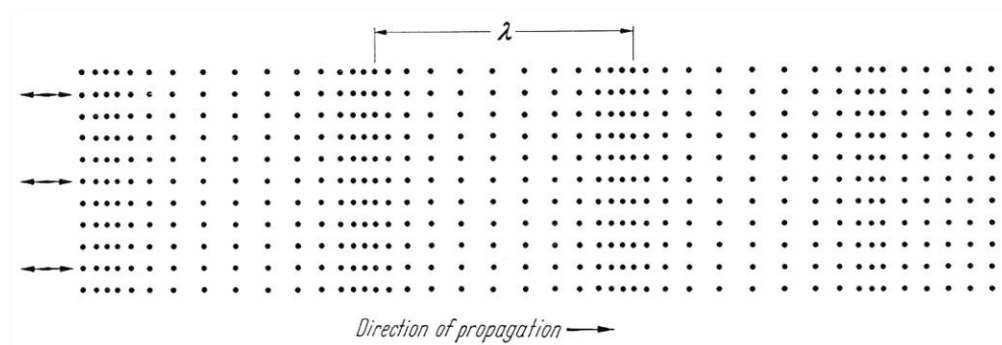


Figura 31. Ondas longitudinales (Krautkrämer y Krautkrämer, 1983).

La velocidad de propagación de las ondas longitudinales viene dada por la siguiente expresión (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983):

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2.5)$$

donde:

- c velocidad de propagación de la onda en el medio.
- E módulo de Young.
- μ coeficiente de Poisson.
- ρ densidad del medio.

No obstante, esta expresión asume un medio infinito, isótropo y elástico. En medios finitos, cuya dimensión transversal sea mucho menor que la longitud de la onda propagada, la velocidad de propagación puede expresarse como (Iñiguez, 2007):

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.6)$$

- **Ondas transversales o de corte (ondas S):** la vibración de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación (Figura 32). Dado que los líquidos y los gases son incapaces de transmitir esfuerzos cortantes, este tipo de ondas solo pueden propagarse medios sólidos (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983), por lo que resultan especialmente útiles para la evaluación de defectos en materiales.

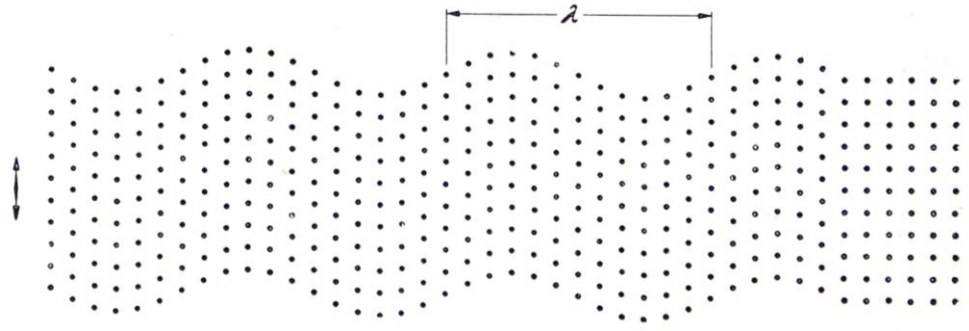


Figura 32. Ondas transversales (Krautkrämer y Krautkrämer, 1983).

Por otra parte, la velocidad de propagación de las ondas transversales en un medio elástico se puede calcular mediante la siguiente expresión (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983):

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.7)$$

donde:

G módulo de elasticidad transversal.

- **Ondas de Rayleigh:** se propagan a lo largo de la superficie del material (Figura 33) con una penetración equivalente a su longitud de onda (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983). Estas ondas son particularmente útiles para inspeccionar defectos superficiales o cercanos a la superficie como, por ejemplo, la presencia de fisuras.

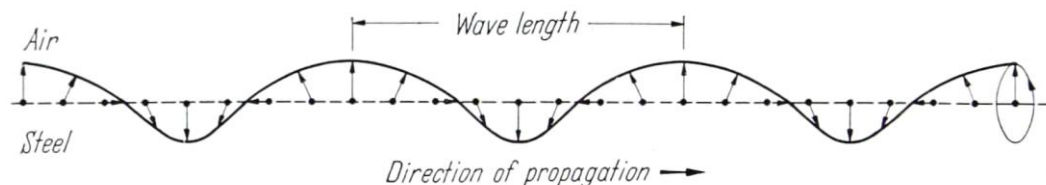


Figura 33. Ondas de Rayleigh (Krautkrämer y Krautkrämer, 1983).

En lo que respecta a las ondas superficiales, en concreto las ondas de Rayleigh, Krautkrämer & Krautkrämer (1983) las describen de forma aproximada mediante la expresión (2.8):

$$c_R = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1 + \mu)}} = c_T \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \quad (2.8)$$

donde:

c_R velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh en el medio.

c_T velocidad de propagación de las ondas transversales en el medio.

Cada uno de estos modos de propagación tiene aplicaciones específicas en los ensayos no destructivos, permitiendo detectar discontinuidades internas, grietas superficiales, problemas de adherencia y defectos en estructuras complejas (Krautkrämer & Krautkrämer, 1983).

Tipos de ondas en función de su trayectoria

Se distinguen tres tipos de ondas en función de la trayectoria que describen dentro del medio, como se muestra en la Figura 34 (MIT, 2008). En primer lugar, las ondas directas, que se propagan en línea recta desde el emisor hasta el receptor. En segundo lugar, las ondas reflejadas, que alcanzan una interfase dentro del medio, se reflejan en ella y posteriormente llegan al receptor. Finalmente, las ondas precursoras (*head waves*), que surgen cuando la onda incidente alcanza un ángulo crítico y se propagan a lo largo de la interfase entre dos medios con diferentes velocidades, emergiendo posteriormente hacia el receptor.

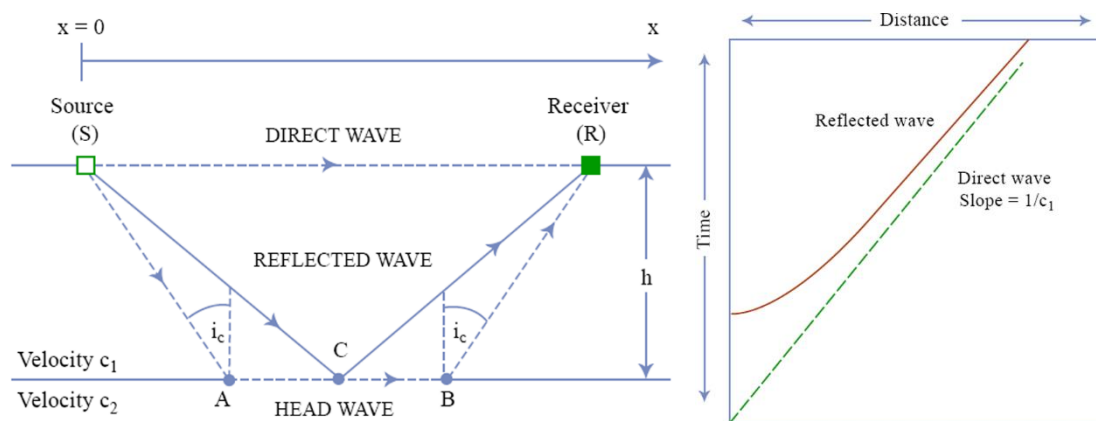


Figura 34. Tipos de ondas (izq.) y curvas de tiempo de viaje (der.) (MIT, 2008).

2.3.2. Generación de ondas ultrasónicas

El método más común para producir ondas ultrasónicas en materiales sólidos se basa en el uso del efecto piezoeléctrico (Martínez Rodríguez et al., 2007), aunque existen otras técnicas como el uso de transductores electromagnéticos (EMAT) y métodos láser.

Algunos cristales (como el cuarzo, la turmalina o materiales cerámicos como el titanato de bario) generan una carga eléctrica cuando se son sometidos a deformaciones mecánicas.

Este fenómeno es conocido como efecto piezoeléctrico directo y solo se manifiesta en ciertos cristales con una estructura cristalina específica: aquellos que carecen de centro de simetría (Martínez Rodríguez et al., 2007).

Por el contrario, el efecto inverso, más importante para la generación de ultrasonidos, se produce cuando la aplicación de un campo eléctrico alterno genera deformaciones mecánicas en el cristal, causando su vibración (Figura 35). Como indica Martínez Rodríguez et al. (2007), si la frecuencia del estímulo eléctrico coincide con una de las frecuencias naturales del cristal, se produce una amplificación significativa de las oscilaciones debido al fenómeno de resonancia.

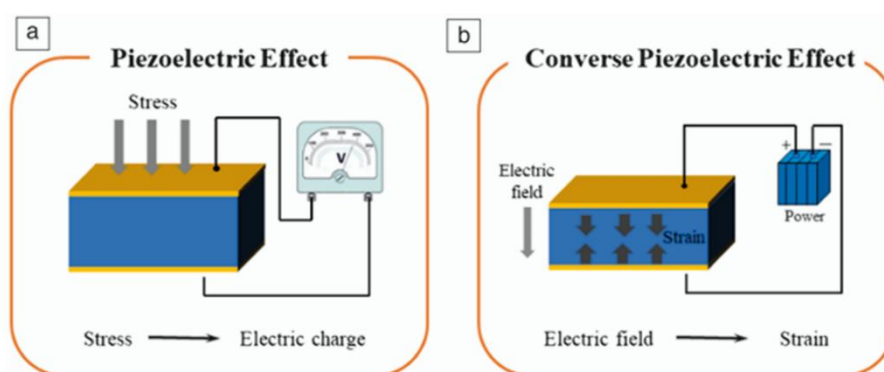


Figura 35. a) Efecto piezoeléctrico directo; b) Efecto inverso (Rödel y Li, 2018).

Componentes del equipo de generación de ondas ultrasónicas

Existe una gran variedad de equipos destinados a la generación de ultrasonidos y la elección de uno u otro depende principalmente de las características del material a evaluar y de las propiedades que se desean medir (Medina, 2013). Entre los factores que se deben considerar, se encuentran la frecuencia que va a ser empleada o la elección del sistema de transmisión. Por ejemplo, en aplicaciones con madera, que es un material dispersivo (Acuña et al., 2006), se emplean frecuencias ultrasónicas relativamente bajas, generalmente en el rango de 20 a 200 kHz. Según explica Acuña et al. (2006), este intervalo permite una mayor penetración de los impulsos y reduce la influencia de las heterogeneidades propias del material, mejorando así la eficacia de la medición.

En cualquier caso, la generación de ondas ultrasónicas requiere ciertos componentes fundamentales que permitan llevar a cabo los procesos mecánicos necesarios (Figura 36). De este modo, el equipo completo está constituido por los siguientes elementos (Cabrera-López & Velasco-Medina, 2011):

- Un generador electrónico que emita pulsos eléctricos de corta duración.
- Un transductor (o palpador) encargado de transformar esos pulsos eléctricos en ondas ultrasónicas.

- Un acoplador, si fuese necesario, que facilite la transmisión del haz ultrasónico hacia la pieza que se va a inspeccionar.
- Un transductor receptor (que puede ser el mismo utilizado para la emisión) que recoja las ondas ultrasónicas emitidas y las convierta nuevamente en señales eléctricas.
- Un módulo electrónico para amplificar y, si es necesario, demodular o procesar las señales provenientes del transductor.
- Un sistema de visualización que permita observar las respuestas del material, el cual puede estar basado en tubos de rayos catódicos, pantallas electroluminiscentes o de cristal líquido.
- Un temporizador electrónico o contador que regule el funcionamiento del sistema, actuando como referencia principal y coordinando todos los componentes.

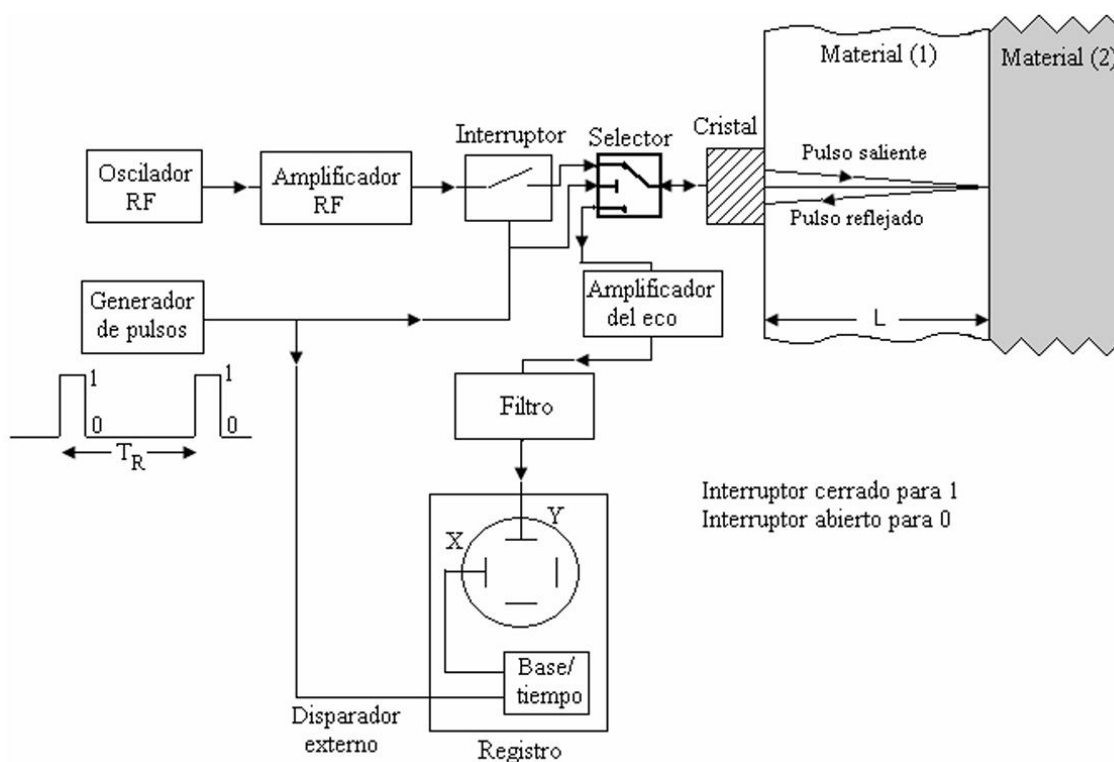


Figura 36. Diagrama de equipo ultrasónico (Cabrera-López y Velasco-Medina, 2011).

2.3.3. Métodos de ensayo

Tras haber expuesto y analizado en detalle los principios fundamentales que rigen el comportamiento y la generación de los ultrasonidos, en este apartado se procederá a presentar y describir de manera sistemática los métodos más relevantes, representativos y comúnmente empleados en la práctica para la inspección, evaluación y caracterización de materiales mediante esta técnica no destructiva.

Resonancia

El método de resonancia, basado en el uso de sonidos audibles, es probablemente uno de los más antiguos dentro de los ensayos no destructivos. Desde hace mucho tiempo se ha utilizado, según Krautkrämer & Krautkrämer (1983), por ejemplo, para identificar la presencia de grietas en recipientes cerámicos a través del sonido que emiten al ser golpeados.

El procedimiento mediante ultrasonidos se basa en la medición de la frecuencia de resonancia generada por reflexión, es decir, en la formación de ondas estacionarias dentro del material. Según Medina (2013), cuando un haz ultrasónico de excitación continua y amplio espectro de frecuencias se propaga a través de una muestra con superficies paralelas y espesor definido e , las ondas cuya semilongitud sea un submúltiplo de dicho espesor se superponen en fase, lo que provoca un refuerzo de estas frecuencias específicas. Al mismo tiempo, las demás frecuencias se atenúan. Este comportamiento da lugar al fenómeno de resonancia, manifestándose en la formación de ondas estacionarias dentro del material (Medina, 2013).

Como resultado, las oscilaciones características pueden describirse en función del número de semilongitudes de onda que caben dentro del espesor de la pieza (Figura 37). Por ejemplo, como indica Medina (2013), la oscilación fundamental, o de primer orden, corresponde a una semilongitud de onda ajustada al espesor total. De manera general, una oscilación característica de orden n se asocia a n semilongitudes de onda contenidas en dicho espesor.

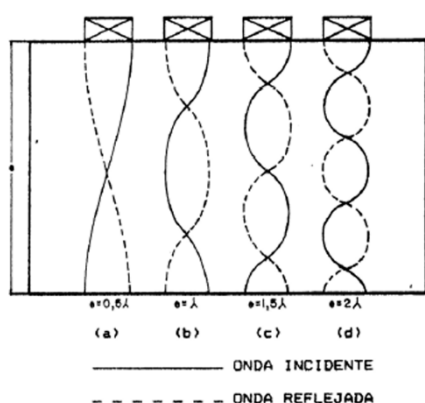


Figura 37. Método de resonancia (Medina, 2013).

$$e = \frac{n\lambda}{2} \quad (2.9)$$

donde:

e espesor.

n número de semilongitudes.

Esta técnica resulta especialmente útil para la medición de espesores en piezas que presentan superficies paralelas, ya que la resonancia se produce de manera más definida en estos casos (Medina, 2013).

Por otra parte, este tipo de ensayo no es el más apropiado para detectar discontinuidades, aunque puede ser útil en la detección de ciertas imperfecciones como las laminaciones en chapas. Así mismo, no es ideal para evaluar la pérdida de espesor causada por corrosión o degradación ambiental, salvo que el desgaste sea uniforme, señala Medina (2013). En casos

donde existen picaduras o cavidades generadas por corrosión o cavitación, la superficie pierde su condición de superficie plana reflectante, por lo que resulta más adecuado emplear técnicas basadas en el método pulso-eco (Medina, 2013).

Método de transmisión

Este método requiere necesariamente el uso de dos palpadores: uno emisor, que genera la señal ultrasónica, y otro receptor, encargado exclusivamente de captar la onda transmitida a través del material a inspeccionar.

Esta técnica permite medir la intensidad acústica que alcanza el receptor, la cual se ve reducida en presencia de un defecto (Basterra et al., 2009), debido a una reflexión parcial de la onda, o puede incluso anularse por completo si la reflexión es total (Medina, 2013).

Esta metodología puede aplicarse mediante tres configuraciones diferentes de ensayo (Figura 38), según las posiciones relativas de los transductores (Medina, 2013):

- **Directo:** los transductores se disponen enfrentados, en caras opuestas del elemento.
- **Semidirecto:** los transductores se disponen en caras adyacentes del elemento.
- **Indirecto:** los transductores se disponen en la misma cara del elemento.

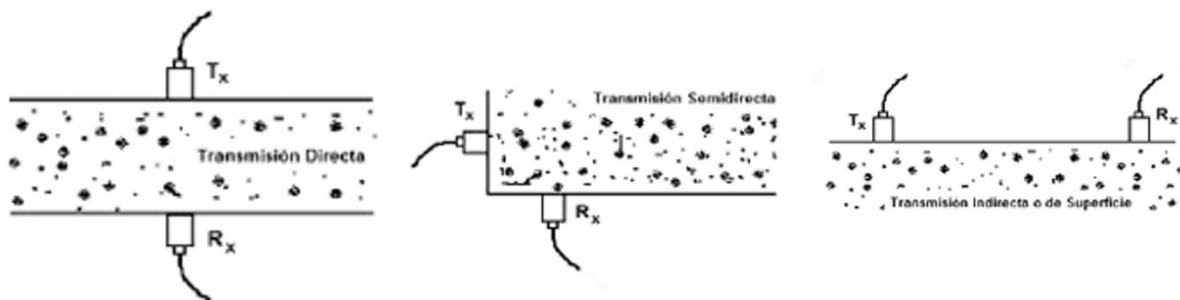


Figura 38. Configuración de los transductores en método de transmisión (Medina, 2013).

A partir de esta técnica, es posible determinar la velocidad de propagación evaluando el tiempo que tarda el primer frente de onda en recorrer la distancia entre emisor y receptor. Una vez conocida la distancia recorrida (s) y el tiempo (t) empleado en el trayecto, en el caso del método de transmisión directa es posible calcular la velocidad de propagación utilizando la siguiente expresión:

$$v = \frac{s}{t} \quad (2.10)$$

Por otra parte, en el método indirecto, el emisor y receptor se colocan en la misma superficie y se registran los tiempos de vuelo para varias distancias (Figura 39). Al representarlos en una gráfica, se obtiene una recta cuya pendiente corresponde a la relación t/s . Por tanto, la

velocidad de propagación en el medio puede obtenerse como el inverso de la pendiente de la recta obtenida ($\emptyset$).

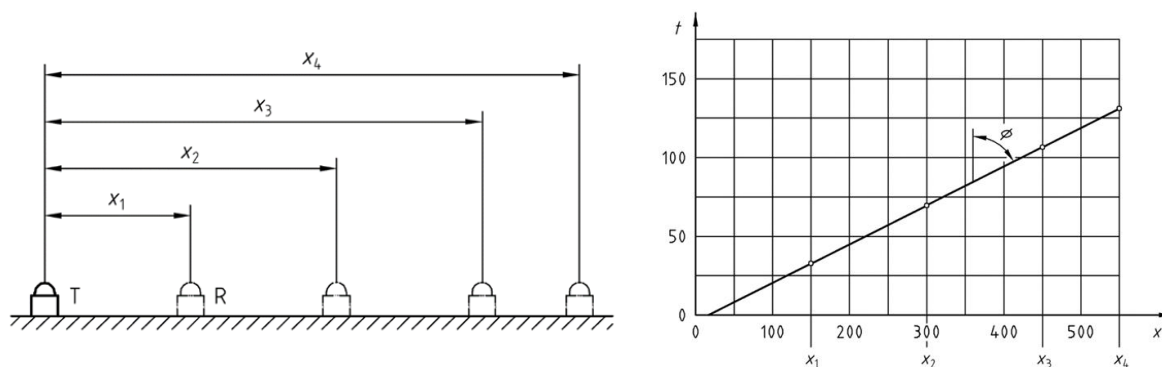


Figura 39. Ejemplo de determinación de la velocidad de propagación a partir de ensayo por el método indirecto (UNE-EN 12504, 2022).

Según Basterra et al. (2009), el método de transmisión directa suele ser el más conveniente y eficaz, tanto por la facilidad con la que se aplica como por la calidad de los resultados, ya que permite transmitir y recibir el máximo de energía de la onda. Sin embargo, en algunas situaciones, como en las inspecciones de estructuras existentes, las testas de la pieza no están accesibles, lo que hace imposible emplear este tipo de medición (Iñiguez, 2007).

Por otra parte, las mediciones semidirectas o indirectas resultan en ocasiones menos adecuadas, ya que la amplitud de la señal recibida es significativamente inferior que la obtenida en las lecturas directas. Esto se traduce en la recepción deficiente de la señal y un aumento del margen de error experimental (Esteban Herrero, 2003).

Método pulso-eco

Este método, descrito por Krautkrämer & Krautkrämer (1983), se basa en la emisión de un breve pulso ultrasónico que se propaga por el interior del material. Si la onda encuentra una interfaz, ya sea tras alcanzar el fondo del componente o bien tras una reflexión en una discontinuidad, parte de la energía acústica se refleja hacia la superficie, donde es detectada por el mismo palpador que la emitió. Estas ondas reflejadas son las denominadas como ecos.

El tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la recepción del eco, junto con la velocidad de propagación en el material, permite calcular la profundidad o distancia a la que se encuentra la interfaz reflectora. La expresión utilizada para su cálculo es (Medina, 2013):

$$d = \frac{ct}{2} \quad (2.11)$$

donde:

d distancia al reflector.

- c velocidad de propagación longitudinal en el medio.
- t tiempo de ida y vuelta de la onda.

Observando la Figura 40, es necesario señalar dos limitaciones importantes de esta técnica. En primer lugar, se aprecia que la detección de defectos es altamente dependiente de su orientación respecto a la dirección del haz ultrasónico.

Por otra parte, atendiendo a la última subfigura, se puede observar que este método es menos efectivo en materiales heterogéneos, o bien altamente atenuantes o con estructuras granulares gruesas, debido al *grass* generado, que distorsiona el resultado registrado y dificulta su correcta interpretación.

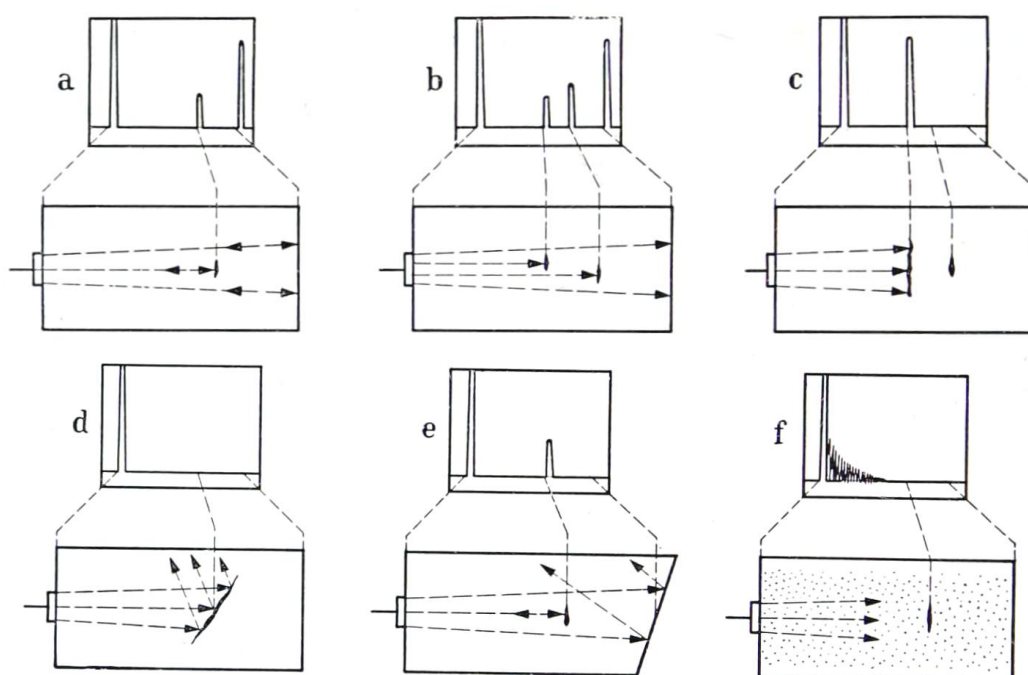


Figura 40. Representaciones esquemáticas obtenidas por el método pulso-eco (Krautkrämer y Krautkämmer, 1983).

2.4. MÉTODOS NUMÉRICOS

Desde tiempos remotos, el ser humano ha buscado comprender el comportamiento del mundo físico. Esta inquietud dio lugar, primero, a la filosofía y, con el tiempo, al desarrollo de la ciencia moderna. En ese proceso, las ondas y su propagación han despertado un interés constante en disciplinas como la acústica, la física, la mecánica y la ingeniería.

Es de esta manera en la que la necesidad de describir fenómenos complejos, como es el caso de la propagación de ondas acústicas en medios elásticos, ha llevado al desarrollo de métodos matemáticos y computacionales cada vez más avanzados. Entre ellos, el Método de los Elementos Finitos (MEF; en inglés FEM, *Finite Element Method*) ha emergido como una herramienta especialmente útil.

Historia y desarrollo del Método de los Elementos Finitos (FEM)

Según apunta Žak (2024), el desarrollo del Método de los Elementos Finitos no se produjo de manera súbita, sino que fue el resultado de una evolución progresiva que abarca más de dos siglos de avances en matemáticas, física e ingeniería.

Su origen conceptual puede rastrearse en los trabajos de grandes figuras como Euler (1707-1783), Lagrange (1736-1813), Bernoulli (1700-1782) o Cauchy (1789-1857), considerados pioneros en el estudio del comportamiento mecánico de medios continuos (Žak, 2024). Sin embargo, sus antecedentes más directos fueron Walther Ritz (1878-1909) y Boris Galerkin (1871-1945) quienes, a principios del siglo XX, sentaron las bases formales del método al proponer aproximaciones para resolver ecuaciones diferenciales con condiciones de contorno (Zienkiewicz & Taylor, 2005), estableciendo lo que hoy conocemos como formulación débil del problema.

El verdadero punto de inflexión llegó durante la década de 1940. En 1941, Alexander Hrennikoff (1896-1984) introdujo un enfoque basado en una analogía estructural de tipo reticulado para resolver problemas elásticos, mientras que en 1943 Richard Courant (1888-1972) propuso la subdivisión del dominio en subregiones triangulares (Žak, 2024). Aunque ambos métodos eran conceptualmente distintos, compartían una idea fundamental: dividir un dominio continuo en partes más simples, dentro de las cuales se podían realizar aproximaciones locales.

Durante las décadas siguientes, y especialmente a partir de los años 60 y 70, el MEF comenzó a consolidarse como una herramienta numérica de referencia (Zienkiewicz & Taylor, 2005). Este avance se vio favorecido por el desarrollo de los ordenadores y la creciente necesidad, en la industria y la investigación, de resolver problemas complejos en distintas áreas, como en estructuras, dinámica, transferencia de calor o propagación de ondas. Según apunta Žak (2024), en esta etapa fueron especialmente relevantes los trabajos de John Argyris (1913-2004), Ray Clough (1920-2016), Olgierd Zienkiewicz (1921-2009) y Philippe Ciarlet (1938-), quienes contribuyeron tanto a la formulación teórica como a la implementación práctica del método.

A partir de entonces, el MEF se integró progresivamente en el ámbito de la simulación computacional avanzada (Žak, 2024). El surgimiento de software especializado permitió su aplicación masiva en numerosos campos, desde la ingeniería civil hasta la aeroespacial, pasando por la biomecánica o la acústica. En paralelo, como explica Žak (2024), se desarrollaron variantes del método, como el Método Espectral en el Dominio de la Frecuencia (FD-SFEM) y el Método Espectral en el Dominio del Tiempo (TD-SFEM), orientadas a la resolución eficiente de problemas dinámicos de alta frecuencia.

En la actualidad, el MEF se ha convertido en una de las herramientas más utilizadas en el análisis numérico de estructuras y materiales (Zienkiewicz & Taylor, 2005). Su continuo desarrollo, tanto desde el punto de vista teórico como computacional, lo mantiene en una posición central dentro del conjunto de métodos numéricos aplicados en ingeniería.

2.4.1. Fundamentos del Método de los Elementos Finitos (MEF)

Planteamiento del problema físico: formulación fuerte

El punto de partida en el MEF es el planteamiento del problema físico en su forma fuerte (Zienkiewicz & Taylor, 2005), es decir, en forma de ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento del sistema. Por ejemplo, en el caso de la elasticidad lineal, se consideran las ecuaciones de equilibrio en un medio continuo, asociadas a las leyes de Hooke y las relaciones cinemáticas entre desplazamientos y deformaciones.

Estas ecuaciones, junto con las condiciones de contorno del problema (desplazamientos prescritos o fuerzas aplicadas), constituyen el modelo matemático del sistema (Zienkiewicz & Taylor, 2005). Sin embargo, resolver directamente estas ecuaciones en su forma diferencial es en general inviable para dominios con geometría arbitraria o con condiciones complejas.

Formulación débil del problema

Para permitir una aproximación numérica viable, se recurre a la formulación débil del problema (Žak, 2024), que consiste en integrar por partes las ecuaciones diferenciales y trasladar las derivadas a las funciones de peso. Esta formulación se obtiene mediante el principio del trabajo virtual (Zienkiewicz & Taylor, 2005), que establece que el trabajo interno realizado por los esfuerzos virtuales debe igualarse al trabajo externo aplicado sobre los desplazamientos virtuales compatibles.

La formulación débil no requiere que las funciones de aproximación tengan derivadas de orden superior continuas (Zienkiewicz & Taylor, 2005), lo cual habilita el uso de funciones de forma por tramos que son continuas, pero no necesariamente suaves en todo el dominio, relajando los requisitos de continuidad de la solución (Žak, 2024). Esta es uno de los pilares para la aplicabilidad del MEF.

Discretización del dominio

El siguiente paso consiste en la discretización del dominio físico en una malla de elementos finitos. Esta malla puede estar compuesta por elementos como triángulos, rectángulos, tetraedros u otras formas geométricas definidas según la dimensión del problema.

Cada elemento se define por sus nodos, y a través de ellos se interconecta con los elementos adyacentes. La elección de la forma del elemento y su número de nodos afecta directamente

la calidad de la aproximación (Zienkiewicz & Taylor, 2005). En la práctica, se busca un equilibrio entre precisión y eficiencia computacional (Žak, 2024).

Funciones de forma y aproximación de campos

En cada elemento, los desplazamientos (o variables primarias del problema) se aproximan mediante funciones de forma N_i , que interpolan los valores nodales dentro del elemento (Zienkiewicz & Taylor, 2005):

$$\mathbf{u}(x) \approx \sum_{i=1}^n N_i(x) u_i = \mathbf{N}(x) \mathbf{u} \quad (2.12)$$

donde:

$\mathbf{N}(x)$ vector de funciones de forma.

$\mathbf{u}$ vector de valores nodales de la variable aproximada.

Estas funciones de forma son elegidas de modo que sean iguales a uno en el nodo correspondiente y cero en los demás nodos del elemento (Žak, 2024). Para elementos triangulares o rectangulares, las funciones de forma pueden ser polinomios lineales o cuadráticos, según el orden del elemento. A partir de los desplazamientos aproximados, se derivan las deformaciones y los esfuerzos mediante las relaciones cinemáticas y constitutivas del problema.

Ensamblaje de matrices

Para cada elemento, se define su matriz de rigidez $\mathbf{K}^{(e)}$ mediante (Zienkiewicz & Taylor, 2005):

$$\mathbf{K}^{(e)} = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega \quad (2.13)$$

y su vector de cargas nodales equivalentes (Zienkiewicz & Taylor, 2005):

$$\mathbf{f}^{(e)} = \int \mathbf{N}^T \mathbf{b} d\Omega + \int \mathbf{N}^T \mathbf{t} d\Gamma \quad (2.14)$$

donde:

$\mathbf{D}$ matriz de rigidez constitutiva del material.

$\mathbf{B}$ matriz de derivadas de funciones de forma que relaciona los desplazamientos con las deformaciones.

$\mathbf{b}$ vector de fuerzas de volumen.

$\mathbf{t}$ vector de fuerzas de superficie en el contorno.

Una vez definida la relación entre fuerzas y desplazamientos en cada elemento (a través de su matriz de rigidez $K^{(e)}$), se procede a ensamblar el sistema global de ecuaciones (Žak, 2024), de tal manera que el problema continuo se transforma así en un sistema de ecuaciones algebraicas de la forma (Zienkiewicz & Taylor, 2005):

$$Ku = f \quad (2.15)$$

donde:

- K** matriz de rigidez global, obtenida por ensamblaje de todas las matrices elementales.
- u** vector de desplazamientos nodales globales.
- f** vector global de fuerzas nodales, incluyendo tanto las cargas aplicadas como las contribuciones equivalentes de cargas distribuidas.

Aplicación de condiciones de contorno

Para garantizar la unicidad de la solución, es necesario aplicar las condiciones de contorno del problema (Zienkiewicz & Taylor, 2005). Existen dos tipos de condiciones de contorno:

- **Condiciones esenciales:** desplazamientos prescritos (se imponen en **u**).
- **Condiciones naturales:** fuerzas aplicadas (se incorporan en **f**).

La aplicación de condiciones esenciales requiere modificar el sistema de ecuaciones, eliminando las filas y columnas correspondientes a los grados de libertad prescritos, o bien sustituyendo directamente los valores conocidos en el sistema (Žak, 2024).

Resolución del sistema

El sistema resultante de ecuaciones lineales se resuelve para obtener los desplazamientos nodales. A partir de estos, es posible calcular deformaciones y esfuerzos en cada elemento (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

La calidad de la solución depende del tipo de elemento, la malla utilizada y la correcta implementación de las condiciones de contorno (Žak, 2024).

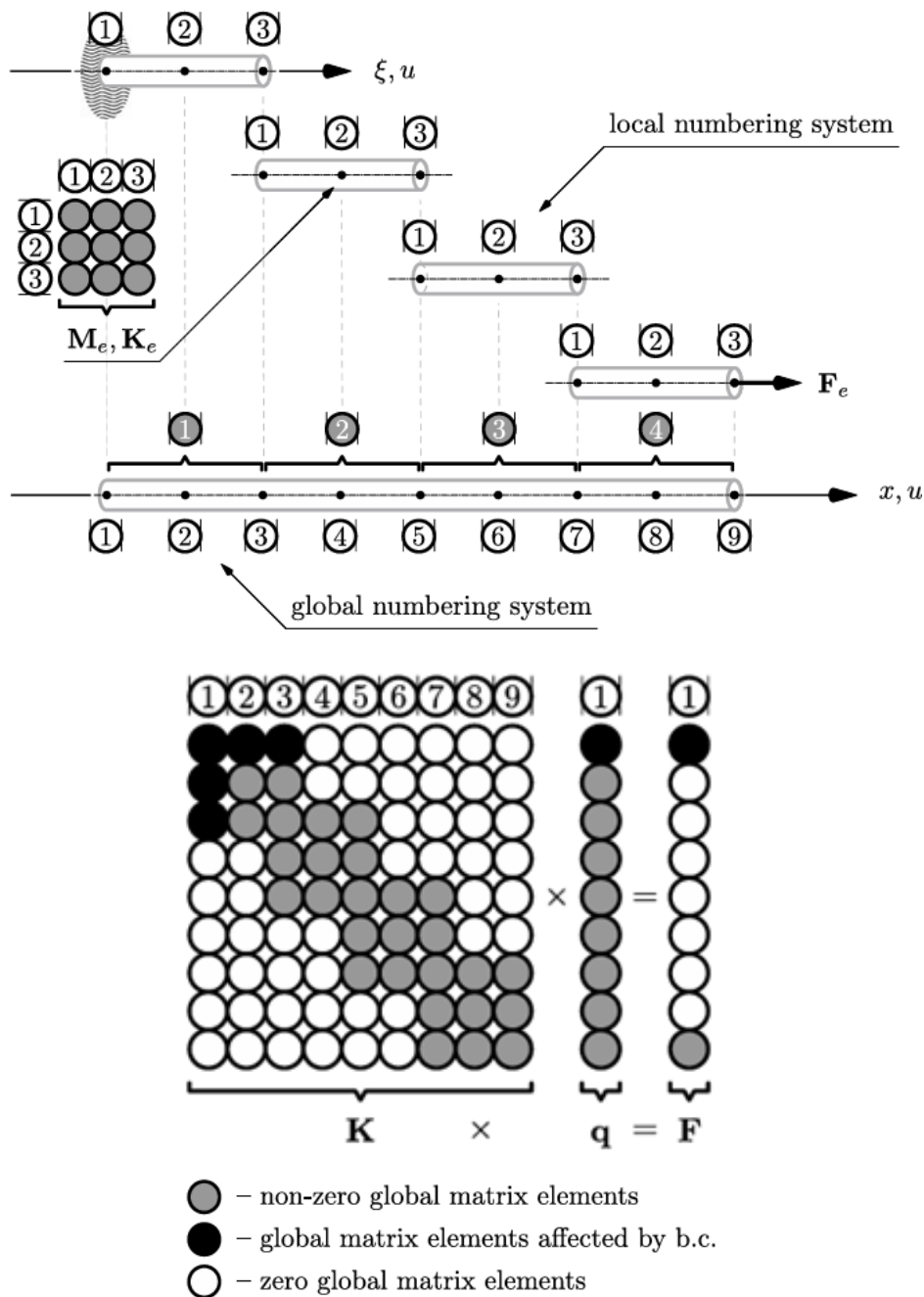


Figura 41. Concepto de discretización y ensamblaje de un modelo numérico 1D de formado por 4 EF tipo barra, con polinomios de segundo grado (Žak, 2024).

2.4.2. Principios básicos del MEF aplicado a la propagación de ondas

Una vez vistos los fundamentos generales del MEF, el presente apartado se enfoca en extender esos conceptos al análisis específico de la propagación de ondas en medios elásticos. Este fenómeno, de naturaleza transitoria y frecuentemente compleja, requiere un tratamiento numérico particular que combina los principios ya establecidos del MEF con formulaciones dinámicas y técnicas avanzadas de las condiciones de contorno.

Fundamentos físicos de la propagación de ondas

Las ondas mecánicas transportan energía a través de un medio elástico sin transporte neto de materia (Žak, 2024). Las ondas elásticas surgen de perturbaciones dinámicas que se transmiten a través del medio debido a las fuerzas internas de recuperación. Estas fuerzas elásticas, que no implican pérdida de energía en condiciones de deformaciones pequeñas (Žak, 2024), permiten el transporte de energía desde una región del dominio hacia otra, fenómeno que puede ser completamente descrito por las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales del movimiento (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

La ecuación de Navier-Cauchy describe el movimiento dinámico de un medio elástico tridimensional (Žak, 2024). Luego, la forma fuerte de la ecuación de movimiento para un medio elástico, sin disipación ni fuentes internas, está dada por (Žak, 2024):

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}^2}{\partial t^2} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F} \quad (2.16)$$

donde:

- ρ densidad del material.
- $\mathbf{u}$ vector de desplazamientos.
- ∇ operador Nabra.
- $\boldsymbol{\sigma}$ tensor de Cauchy o tensor de tensiones.
- $\mathbf{F}$ vector de fuerzas de volumen.

Formulación débil para ondas

Al introducir el principio de los trabajos virtuales, se obtiene la forma débil de la ecuación del movimiento, integrando sobre el dominio de cada elemento finito y aplicando integración por partes (Zienkiewicz & Taylor, 2005). Esto permite incorporar condiciones de contorno naturales (Žak, 2024) y obtener una base para el desarrollo numérico.

Como se ha visto en el capítulo anterior, la formulación débil es indispensable, ya que las soluciones de la propagación de ondas pueden presentar discontinuidades en dominios complejos (Žak, 2024), y el MEF se beneficia de funciones base locales que no requieren continuidad de derivadas de orden superior.

Discretización espaciotemporal

El dominio se divide en elementos geoméricamente simples (como triángulos en regiones 2D o tetraedros en espacios 3D) conectados a través de nodos. En cada uno de estos elementos, se define un campo de desplazamientos aproximado mediante funciones de forma.

En el estudio de la propagación de ondas, Žak (2024) destaca la relevancia del tamaño del elemento, ya que debe ser lo suficientemente pequeño para capturar la longitud de onda del fenómeno estudiado. Este requisito se conoce como criterio de resolución espacial (*Courant–Friedrichs–Lewy condition*; por sus siglas en inglés CFL) para evitar efectos numéricos como la dispersión artificial o la anisotropía numérica.

Según este criterio, el intervalo de tiempo crítico para un modelo de elementos finitos dependiente del tiempo viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta t_{CFL} = \frac{\Delta x}{c_L} \quad (2.17)$$

donde:

Δt_{CFL} intervalo de tiempo crítico.

Δx distancia de recorrido en el sentido longitudinal.

c_L velocidad de propagación longitudinal.

Estudios como el de Andrews (2014) y Ghose et al. (2010) indican que emplear un intervalo de tiempo equivalente al 10 % o menos del periodo de la onda resulta suficiente para obtener una adecuada precisión en los resultados del modelo.

En cuanto a las funciones de forma interpolan los desplazamientos nodales dentro del elemento, en problemas de propagación de ondas, es usual emplear funciones polinomiales. No obstante, según Žak (2024), en enfoques más avanzados, como el método espectral en el dominio del tiempo (TD-SFEM), se emplean polinomios ortogonales de alto orden o incluso funciones basadas en *splines* cúbicos (spFEM).

Formulación matricial

Las funciones de forma $\mathbf{N}(x)$ permiten interpolar los desplazamientos y derivadas dentro de cada elemento. La formulación matricial resultante de la forma débil incluye tres componentes fundamentales por cada elemento finito, obteniéndose un sistema dinámico discreto:

➤ **Matriz de rigidez:**

$$\mathbf{K}_e = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D}_e \mathbf{B} dV \quad (2.18)$$

➤ **Matriz de masa:**

$$\mathbf{M}_e = \int \mathbf{N}^T \rho \mathbf{N} dV \quad (2.19)$$

➤ **Vector de fuerzas:**

$$\mathbf{F}_e = \int \mathbf{N}^T \mathbf{f} dV \quad (2.20)$$

Una vez obtenidas las matrices $\mathbf{K}_e$, $\mathbf{M}_e$ y $\mathbf{F}_e$ para cada elemento, se ensamblan en las matrices globales $\mathbf{K}$, $\mathbf{M}$ y $\mathbf{F}$ mediante un proceso de agregación considerando la numeración local y global de los nodos. El ensamblaje se lleva a cabo utilizando funciones que asignan los grados de libertad locales a sus correspondientes posiciones globales.

Aplicación de condiciones de contorno

En la propagación de ondas, las condiciones de contorno no solo definen la excitación del sistema, sino que también pueden inducir reflexiones artificiales. Según Žak (2024), para dominios no acotados, algunas de las estrategias para solventar este problema consisten en:

- **Capas absorbentes (ALID; en inglés *Absorbing Layer with Increasing Damping*):** región que permite simular el recubrimiento del contorno con un material que atenúa la energía de las ondas elásticas.
- **Condiciones frontera no reflejantes (NRBC; en inglés *Non-Reflecting Boundary Conditions*):** estas técnicas permiten simular la propagación de ondas hacia el infinito sin retroreflexión numérica. Se trata de condiciones matemáticas impuestas directamente en los bordes del dominio, a diferencia de las capas absorbentes.

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Este capítulo describe los materiales, equipos y procedimientos empleados en el desarrollo de la campaña experimental, cuyo objetivo principal es el análisis experimental de elementos estructurales de madera laminada mediante técnicas de ultrasonido.

Estos resultados servirán para contrastar las simulaciones y analizar la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento de la madera laminada frente a la propagación de ondas ultrasónicas.

Por este motivo, se incluye una descripción detallada de los aspectos más relevantes de la campaña, con el fin de contextualizar adecuadamente los datos experimentales utilizados y garantizar la coherencia entre el modelo y las condiciones reales del ensayo.

En la primera sección, se detallan las características de las muestras utilizadas en la campaña experimental, incluyendo aspectos como la especie, geometría, condiciones higrotérmicas y criterios de selección. A continuación, se presenta el conjunto de equipos que fueron empleados para la aplicación de los ensayos ultrasónicos, incluyendo sus especificaciones técnicas y condiciones de uso.

La segunda sección está dedicada a la descripción de la metodología experimental seguida, con una descripción precisa de las fases del procedimiento, la disposición del sistema de medida, el protocolo de adquisición de datos y los criterios adoptados para su análisis. A partir de esta información, se expone de forma detallada el procedimiento seguido para la construcción del modelo computacional, el cual se alimenta de los datos experimentales previos y permite establecer tanto una comparación entre los resultados simulados y los obtenidos en laboratorio, como el análisis de otros comportamientos teóricos no abordados en la campaña experimental.

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1.1. Descripción de las muestras

El conjunto de muestras disponibles es el mismo que el empleado en el estudio de Bustamante Gutiérrez (2025), el cual está compuesto por un total de 27 especímenes de madera laminada. La selección de estas piezas responde al objetivo de evaluar la influencia de distintos factores como la especie, el tratamiento protector y el estado higrotérmico sobre la propagación de ondas ultrasónicas.

Las muestras se agrupan en varios conjuntos experimentales, organizados en función de la especie de la madera, el tipo de tratamiento aplicado y el estado de conservación. Los criterios de clasificación son los siguientes:

- **Especies:** se incluyen dos especies de coníferas ampliamente utilizadas en la industria de la construcción como el pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y abeto (*Abies alba*).
- **Tratamiento:** las muestras se dividen entre aquellas sin tratamiento y las que han sido tratadas con tanalita, un preservante empleado para mejorar la durabilidad frente a los agentes xilófagos y las condiciones ambientales adversas.
- **Estado:** se distingue entre sano y sumergido (procedente de una campaña anterior, con exposición prolongada a humedad y posible aparición de defectos internos como fisuras, delaminaciones o hinchamientos localizados).

En la Tabla 11, se muestra un resumen organizado del conjunto completo de las muestras disponibles, junto con sus dimensiones y la humedad de equilibrio higrotérmico (HEH). Para el contraste experimental, se seleccionaron las muestras D047, D051 y D057.

3.1.1. Equipos y herramientas de ensayo

En esta sección se describen los equipos e instrumentos utilizados para el análisis experimental de elementos estructurales de madera laminada mediante ultrasonidos. Cada uno de estos dispositivos desempeña una función en la obtención de los parámetros físicos y mecánicos que sirven de base tanto para el análisis experimental como para el desarrollo del modelo computacional.

Se detallan, en primer lugar, los equipos empleados para el control dimensional de las muestras, junto con los instrumentos utilizados para la medición del contenido de humedad. A continuación, se presenta el sistema de medida por ultrasonidos, incluyendo sus componentes principales y características técnicas. Por último, se describe la cámara de acondicionamiento atmosférico, destinada a mantener unas condiciones ambientales controladas y estables durante la preparación de las muestras.

Equipo de control dimensional

Para la determinación de las dimensiones de las muestras se emplearon reglas metálicas, las cuales permitieron realizar mediciones lineales con precisión de ± 1 mm, así como el posterior marcado de las probetas para el correcto posicionamiento y alineamiento de los transductores durante los ensayos.

Equipo de medida de humedad

Para la determinación del contenido de humedad de las muestras fue utilizado el equipo GANN Hydromette RTU 600 (Figura 42), un instrumento portátil de medición electrónica que

permite evaluar de forma rápida, precisa y no destructiva el estado higrométrico de elementos estructurales.

Tabla 11. Muestras disponibles ordenadas según especie, tratamiento y estado. Dimensiones y HEH tras acondicionamiento en cámara durante 2 meses (Bustamante Gutiérrez, 2025).

ID	Especie	Tratamiento	Estado	Clase	Dimensiones (mm)	HEH (%)
D066	Pino silvestre	Sin tratamiento	Sano	GL18	1049x172x100	16,79
D067				GL18	1050x170x101	16,16
D071				GL24	1049x172x100	17,10
D073				GL24	1050x170x101	17,14
D079				GL28	1049x171x100	15,69
D078				GL28	1050x170x100	16,81
D064			Sumergido	GL18	1050x172x100	17,04
D070				GL24	1049x172x100	17,06
D076				GL28	1048x172x100	17,30
D037	Pino silvestre	Tanalizado	Sano	GL18	1099x172x98	17,88
D039				GL18	1049x170x99	16,87
D023				GL24	1080x171x99	17,57
D027				GL24	1048x170x99	17,63
D030				GL28	1050x170x98	17,59
D031				GL28	1048x172x99	17,53
D035			Sumergido	GL18	1049x173x100	17,40
D024				GL24	1049x172x100	17,71
D029				GL28	1049x173x99	17,21
D047	Abeto	Sin tratamiento	Sano	GL18	1049x172x99	17,41
D048				GL18	978x205x101	15,96
D051				GL24	1049x173x100	17,07
D057				GL24	1050x180x102	16,79
D059				GL28	1048x172x98	17,34
D063				GL28	1047x225x100	16,44
D042			Sumergido	GL18	1049x227x100	17,26
D050				GL24	1048x172x98	17,34
D058				GL28	1050x172x99	17,17

El sistema de medición se basa en el principio de resistencia eléctrica, según el cual la conductividad de la madera varía de manera significativa con su contenido de humedad. El equipo incorpora un circuito de medición de alta sensibilidad que detecta esta variación y la traduce en un valor porcentual, representado como contenido de humedad en masa (c.d.h.). Además, cuenta con compensación automática de temperatura, lo que permite obtener mediciones corregidas incluso cuando la madera se encuentra a temperaturas entre -10°C y $+90^{\circ}\text{C}$.



Para la toma de datos en madera estructural se emplean distintos tipos de electrodos (Figura 43), siendo los más habituales los de clavija tipo M20, que permiten mediciones superficiales hasta una profundidad de unos 50 mm, y los electrodos de percusión tipo M18, más adecuados cuando se requiere una profundidad mayor, hasta aproximadamente 180 mm. En situaciones donde la humedad de la madera es muy elevada, como en piezas degradadas o en proceso de secado, se recurre al electrodo especial MH 34, capaz de registrar contenidos superiores al 100 % c.d.h., lo que corresponde a situaciones de saturación de fibras y agua libre.

Figura 42. GANN Hydromette RTU 600 (GANN, 2025).



Figura 43. Clavija: M20 (izq.), M18 (centro) y MH 34 (der.) (GANN, 2025).

El equipo incluye una base de datos con más de 80 curvas de calibración específicas por especie de madera (GANN, 2025), lo que permite adaptar las mediciones según las características propias del material evaluado. Esta funcionalidad es especialmente relevante en contextos donde se trabaja con distintas especies con comportamiento higroscópico diferenciado.

El valor medido se muestra en pantalla digital con una resolución de 0,1 %, permitiendo una lectura precisa e inmediata (GANN, 2025). La sencillez de uso, junto con su robustez y fiabilidad, hacen del RTU 600 una herramienta de referencia en la evaluación higrotérmica de estructuras de madera, siendo especialmente útil tanto en tareas de diagnóstico y conservación como en procesos de control de calidad durante el secado o montaje de piezas.

Equipo de medida por ultrasonidos

Para la caracterización no destructiva de la madera se ha empleado el equipo Fakopp Ultrasonic Timer, un dispositivo específicamente diseñado para la medición del tiempo de propagación de ondas ultrasónicas en medios lignocelulósicos. Este sistema permite estimar propiedades elásticas, detectar discontinuidades internas y valorar el estado estructural de piezas de madera, tanto en laboratorio como en condiciones in situ. El equipo se basa en el principio de transmisión del pulso ultrasónico entre dos puntos separados del material.

El sistema incorpora dos transductores piezoeléctricos: uno emisor y otro receptor. Ambos están diseñados para generar y captar ondas longitudinales a frecuencias características de entre 45 kHz. El transductor cuenta con un acoplador guía trapecial, compuesto de aluminio (Figura 44).

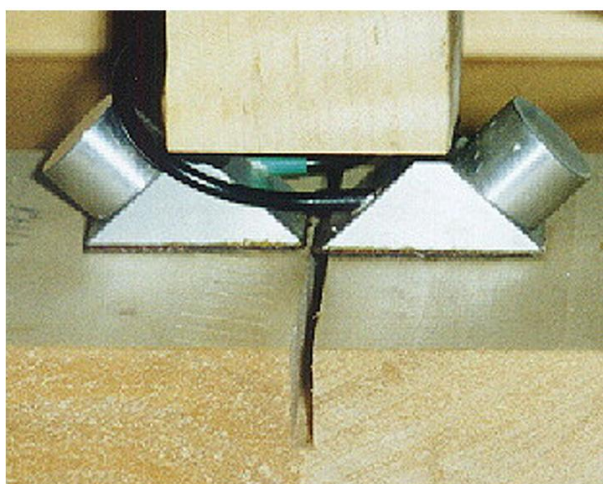


Figura 44. Transductores con acoplador trapecial (Fakopp, 2025).

Durante el transcurso de la campaña experimental, ambos transductores se colocan en extremos opuestos del trayecto de medición, permitiendo que el pulso emitido atravesase completamente la sección del material antes de ser detectado.

Por otra parte, el equipo cuenta con un generador de impulsos eléctricos, que emite un pulso cuadrado unipolar de aproximadamente 200 V y una duración de 60 μ s, a una frecuencia de repetición de 0,5 Hz (es decir, un pulso cada 2 segundos). Esta señal excita al transductor emisor, generando una onda ultrasónica que se propaga a través de la madera.

El transductor receptor capta la señal ultrasónica transmitida y la convierte nuevamente en una señal eléctrica. Esta es amplificada mediante un sistema con ganancia fija de 1000 $\times$ y posteriormente registrada por el temporizador interno del equipo, que mide el tiempo de tránsito con una resolución de $\pm 0,1 \mu$ s. El umbral de detección está fijado en 120 mV, lo que permite garantizar que solo se registre la llegada de señales suficientemente claras, minimizando interferencias.

El sistema central se encuentra alojado en una carcasa robusta con dimensiones aproximadas de $297 \times 106 \times 45$ mm y un peso total de 910 g, lo que lo hace portátil y apto para trabajos en campo. Funciona con una batería estándar de 9 V, lo que proporciona una autonomía adecuada para jornadas completas de ensayo. Las especificaciones técnica del equipo se recogen en la Tabla 12.

Tabla 12. Especificaciones técnicas del equipo Fakopp Ultrasonic Timer.

Parámetro	Especificación
Peso (incluyendo baterías)	910 g
Dimensiones (alto $\times$ ancho $\times$ fondo)	$297 \times 106 \times 45$ mm
Rango de frecuencia del temporizador	15 - 300 kHz
Resolución temporal	$\pm 0,1 \mu\text{s}$
Amplificación de señal	1000 $\times$
Valor umbral de detección	120 mV
Frecuencia del pulso de excitación	Un pulso cada 2 s (0,5 Hz)
Voltaje del pulso de excitación	200 V
Duración del pulso de excitación	60 μs
Forma del pulso	Uni-polar, forma cuadrada
Alimentación	Batería en bloque de 9 V
Potencia del temporizador	70 mW
Potencia de la unidad de excitación	120 mW
Frecuencia del transductor con guía triangular	45 kHz
Temperatura de funcionamiento y almacenamiento	0 - 35 °C

Cámara de acondicionamiento atmosférico

La cámara de acondicionamiento utilizada en esta campaña experimental se encuentra ubicada en el Laboratorio de Estructuras de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y está diseñada para mantener condiciones atmosféricas constantes y controladas, tanto de temperatura como de humedad relativa. De esta manera, se garantiza la estabilidad higrotérmica de las probetas antes de la realización de los ensayos.

La regulación de los parámetros ambientales se realiza mediante una consola de control situada en el exterior de la cámara, desde la cual se pueden programar y supervisar los valores deseados. Este sistema permite reproducir de forma precisa las condiciones de referencia establecidas, de tal manera que se minimiza la influencia de las variaciones ambientales sobre las propiedades físicas de la madera.

Equipo de corte

Para la simulación de defectos tipo fisura transversal en las muestras de madera laminada, se empleó una sierra manual de acero.

Resistógrafo IML-RESI PD-Series

El resistógrafo IML-RESI PD-Series (Figura 45) es un equipo diseñado para la evaluación no destructiva de la madera mediante la medición de la resistencia a la penetración de una broca calibrada. El dispositivo combina un motor con un sistema de registro digital que permite obtener un perfil continuo de densidad y dureza a lo largo de la sección de la probeta. El equipo es alimentado mediante una batería extraíble de 18 V.

La operación del equipo consiste en colocar la broca sobre la superficie de la madera y perforar la probeta mientras se registra la resistencia a la penetración, lo que permite identificar la localización y extensión de nudos u otras irregularidades internas.

No obstante, el equipo no fue utilizado con fines de diagnóstico. En cambio, se empleó para generar 50 galerías de 3 mm de diámetro, simulando el efecto de una agresión biótica causada por insectos xilófagos.

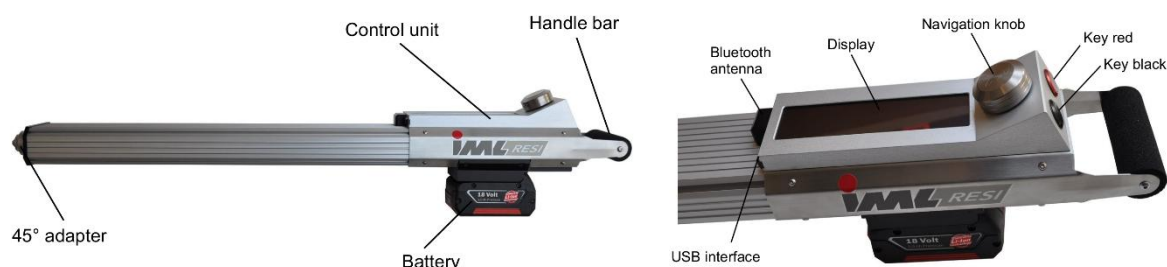


Figura 45. Componentes del resistógrafo IML-RESI PD-Series (IML, 2024).

3.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este apartado se detalla la metodología seguida para la realización de los ensayos experimentales y la construcción del modelo computacional, cuyo objetivo principal es analizar la respuesta de la madera laminada frente a la propagación de ondas ultrasónicas, tanto en condiciones libres de defectos como en presencia de discontinuidades internas.

Para este propósito, se describe la preparación y caracterización de las muestras, cuyas condiciones se consideran adecuadas y representativas para el ensayo. A continuación, se expone el diseño del ensayo ultrasónico indirecto, en el que se aplicaron dos metodologías de ensayo, y se registró el tiempo de vuelo de la señal en las distintas configuraciones.

Finalmente, se presenta el desarrollo del modelo computacional paso a paso, que reproduce las condiciones del ensayo y permite comparar los resultados experimentales con las simulaciones numéricas, evaluando así el comportamiento del material.

3.2.1. Preparación y caracterización de las muestras

Acondicionamiento higrotérmico

En primer lugar, durante la campaña experimental realizada por Bustamente Gutiérrez (2025), las muestras fueron introducidas en la cámara de acondicionamiento atmosférico, donde permanecieron durante un periodo de tiempo determinado, bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, con el objetivo de homogeneizar su contenido de humedad antes de los ensayos. Este proceso permite que todas las muestras partan de un estado similar, eliminando las posibles variaciones iniciales que puedan afectar a la reproducibilidad de los resultados.

Caracterización física y marcado

Finalizado el acondicionamiento, las muestras fueron extraídas y se procedió a su caracterización física inicial. Se midieron sus dimensiones con una regla milimetrada, registrando el largo, ancho y altura.

Posteriormente, se marcaron sobre cada muestra los puntos de medición donde se colocarían los transductores ultrasónicos. Estos puntos fueron distribuidos de forma sistemática y uniforme, en intervalos de 5 cm. En cada uno de estos puntos marcados se realizó una medición puntual del contenido en humedad de la muestra mediante el equipo GANN Hydromette RTU 600 (ver Tabla 11).

Simulación de defectos

Para la simulación de defectos tipo fisura transversal en las muestras de madera laminada, se empleó una sierra manual de acero (Figura 46). Previamente, se marcó la profundidad objetivo de la fisura en función del ensayo a realizar ($H/6$, $H/4$, $H/3$ y $H/2$, siendo H la altura total de la sección). Una vez definida la ubicación y profundidad del corte, se procedió a su ejecución manteniendo, en la medida de lo posible, la perpendicularidad respecto de la cara superior de la probeta, con el fin de obtener defectos estandarizados y reproducibles numéricamente.



Figura 46. Útiles de corte y marcado empleados.

Por otra parte, para simular un ataque biótico en las probetas, se empleó el resistógrafo IML-RESI PD-Series. Previamente, se delimitó el área destinada a representar la zona degradada, de dimensiones de 10×5 cm, con rotulador. A continuación, se realizaron 50 perforaciones pasantes en el ancho de la probeta, distribuidas aleatoriamente (Figura 47). Cada perforación se efectuó con un diámetro de 3 mm, replicando de manera aproximada el efecto de los agentes bióticos sobre la madera.



Figura 47. Simulación de ataque biótico mediante perforaciones con resistógrafo.

Una vez completado este proceso de preparación y caracterización, se procedió a la ejecución del ensayo ultrasónico propiamente dicho, cuyo procedimiento se detalla en el siguiente apartado.

3.2.2. Diseño del ensayo ultrasónico

El ensayo ultrasónico realizado en la campaña experimental ha consistido en un ensayo indirecto, en el que ambos transductores, emisor y receptor, se colocaron en la misma cara de la muestra. Para facilitar la transmisión y recepción de las ondas ultrasónicas, se utilizaron acopladores de geometría trapecial, cuya geometría se describe en el apartado 3.2.3.

Durante los ensayos, se aplicaron dos procedimientos distintos (Figura 48). El primero corresponde al método *convencional* (que denominaremos método A en adelante), en el cual los acopladores se colocan inicialmente a una distancia de 10 cm, aumentando esta separación en intervalos de 5 cm. En este caso, se mantiene constante la ubicación del emisor y se varía la posición del receptor, hasta alcanzar una distancia máxima de 50 cm entre transductores.

El segundo procedimiento corresponde al método *simétrico* (que denominaremos método B en adelante), en el que los acopladores se colocan inicialmente a una distancia de 5 cm, incrementándose esta separación en pasos de 5 cm. A diferencia del método A, en este caso se varía simultáneamente la posición de ambos transductores de manera simétrica con respecto del defecto, hasta alcanzar una distancia máxima de 50 cm entre transductores.

La frecuencia de operación empleada en todas las configuraciones fue de 45 kHz, valor adecuado para el tipo de material y dimensiones de la muestra.

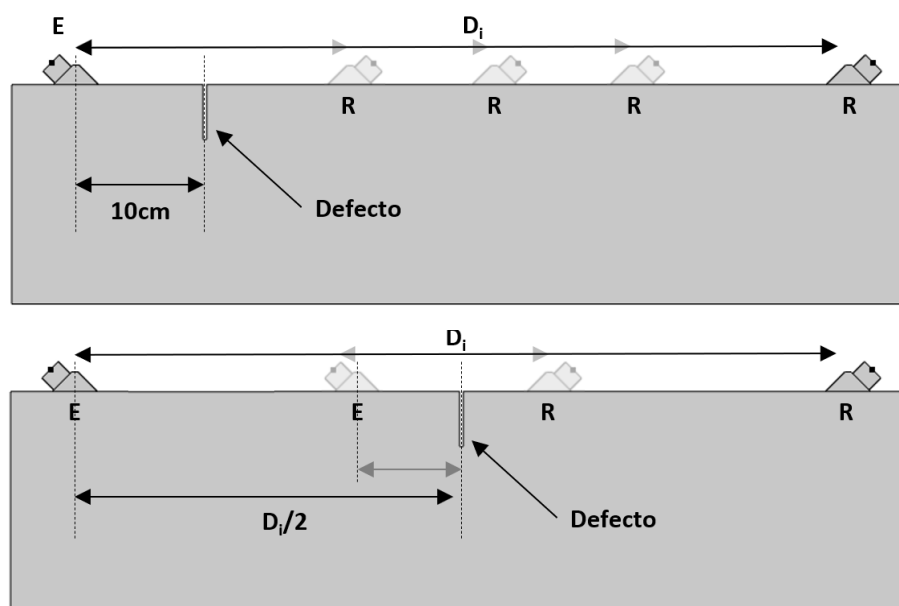


Figura 48. Método de ensayo A (arriba) y B (abajo).

La magnitud registrada en cada configuración fue el tiempo de vuelo (*Time of Flight*; por sus siglas en inglés, ToF) de la onda ultrasónica, medido entre el instante de emisión y el momento en que la señal alcanza el umbral en el transductor receptor. En la Tabla 13 se presenta el resumen de los ensayos experimentales y simulaciones numéricas realizadas en función del método utilizado.

Tabla 13. Resumen de ensayos experimentales y simulaciones realizadas.

Tipo de análisis	Ensayo experimental		Simulación numérica	
	Método A	Método B	Método A	Método B
Muestra sana	X	X	X	X
Muestra con fisura	X	X	X	X
Muestra con nudo		X		X
Muestra con delaminación				X
Muestra con ataque biótico	X	X	X	X

3.2.3. Modelado computacional

La resolución del problema de propagación ultrasónica se ha abordado mediante la modelización numérica empleando el software COMSOL Multiphysics. Este entorno permite representar con detalle las características físicas y geométricas del material, así como la propagación de ondas acústicas en el medio. En las siguientes secciones, se describen de manera ordenada los pasos seguidos para la construcción, parametrización y desarrollo del modelo computacional, que constituyen la base para la comparación con los resultados obtenidos en los ensayos experimentales.

Definición de la geometría

El primer paso del estudio ha consistido en la definición de las características geométricas del modelo. Se trata de un modelo bidimensional (2D) que representa la configuración física del sistema bajo análisis.

Por un lado, se ha considerado una muestra con forma rectangular, cuyas dimensiones son de 1050 mm de longitud y 170 mm de altura. Esta muestra constituye el cuerpo principal de madera laminada sobre el que se aplicarán las distintas simulaciones.

Por otro lado, se incorporan al modelo dos acopladores fabricados en aluminio, los cuales se sitúan en la parte superior de la muestra. La geometría de estos elementos se detalla en la Figura 49: tienen una forma trapezoidal, con una base inferior de 35 mm, una base superior de 5 mm y una altura total de 15 mm. Los lados inclinados del trapecio forman ángulos de 45° con la horizontal.

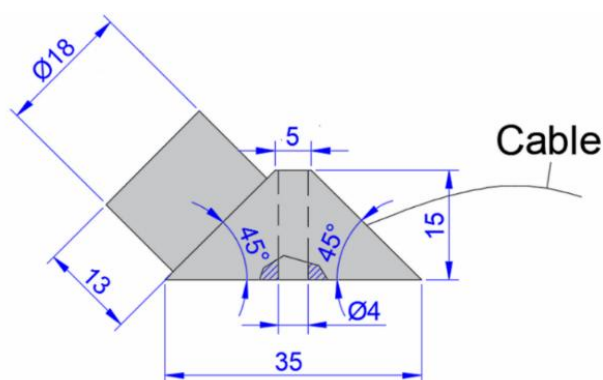


Figura 49. Geometría del acoplador.

Finalmente, se integran en el modelo los transductores ultrasónicos, uno emisor y otro receptor, modelados como un rectángulo de 18 mm de base y 13 mm de altura. Estos se colocan en las caras inclinadas de los acopladores, de manera que cada uno de ellos se sitúa en una pendiente opuesta, permitiendo la emisión y recepción de señales a través de la muestra.

Cabe destacar que la geometría completa del modelo ha sido parametrizada (Figura 50), lo cual ha permitido introducir variaciones de forma flexible durante el proceso de simulación. En particular, dado que el ensayo experimental se realizó tomando datos cada 5 cm, variando la posición de uno o de ambos acopladores, se ha ido modificando la distancia entre transductores mediante simples ajustes en la parametrización.

Esta parametrización permite que, al cambiar dicha distancia, tanto el acoplador como el transductor se desplacen automáticamente a la nueva posición. Sin embargo, es importante resaltar que, para cada nueva posición del transductor, es necesario ejecutar el programa de simulación de forma independiente, ya que cada configuración genera un conjunto único de resultados. Por tanto, se ha llevado a cabo una simulación por cada caso, replicando así fielmente el procedimiento experimental.

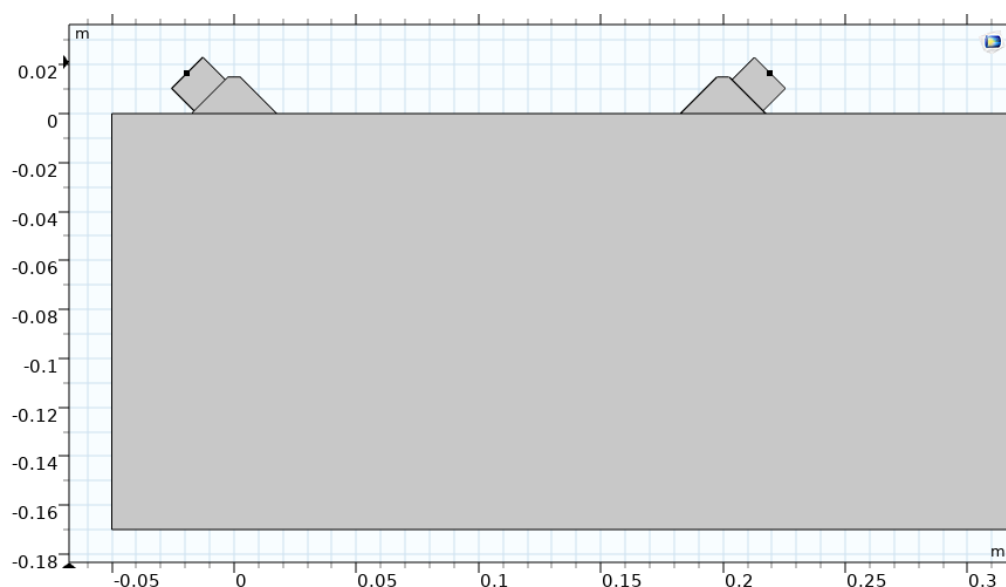


Figura 50. Geometría del modelo para una separación de 20 cm.

Paralelamente, se desarrolló un modelo con idénticas características, pero esta vez en tres dimensiones (Figura 51), con el objetivo de analizar la propagación de las ondas considerando una dimensión adicional. Esta ampliación del modelo permite reproducir de forma más realista el comportamiento físico del sistema, ya que incorpora efectos espaciales que no pueden captarse en un análisis bidimensional.

De este modo, se obtiene una representación más completa de los frentes de onda, así como de su interacción con la geometría y los materiales, lo que aporta un mayor nivel de precisión al estudio.

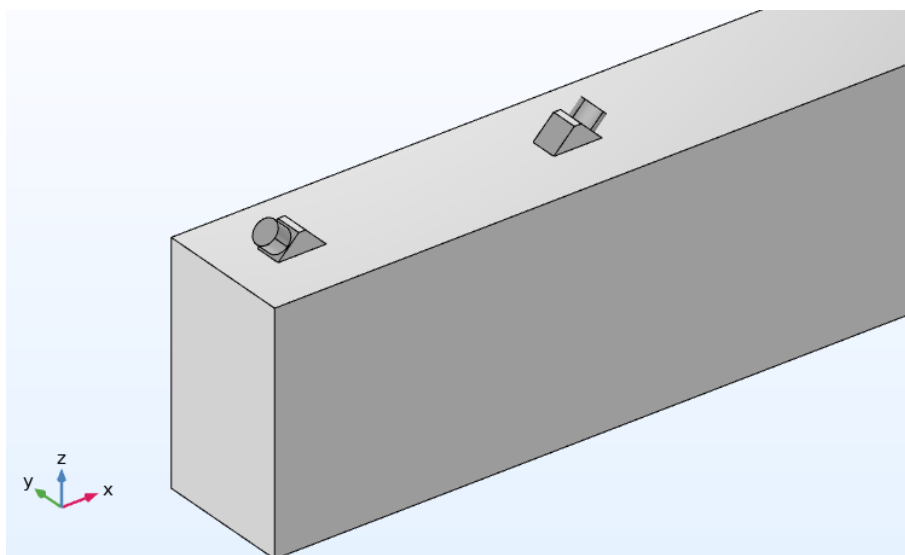


Figura 51. Geometría del modelo en 3D para una separación de 20 cm.

Simulación de defectos

Por otra parte, con el objetivo de analizar el comportamiento del material frente a la presencia de defectos internos, se han incorporado diferentes tipos de imperfecciones en la muestra simulada, tales como fisuras transversales, nudos, delaminaciones y degradación por ataque biótico.

En primer lugar, en el caso de las fisuras (Figura 52), se ha representado mediante la extracción de un área rectangular de 3 mm de espesor y altura variable, desde la cara superior de la muestra, emulando así una discontinuidad transversal dentro del material.

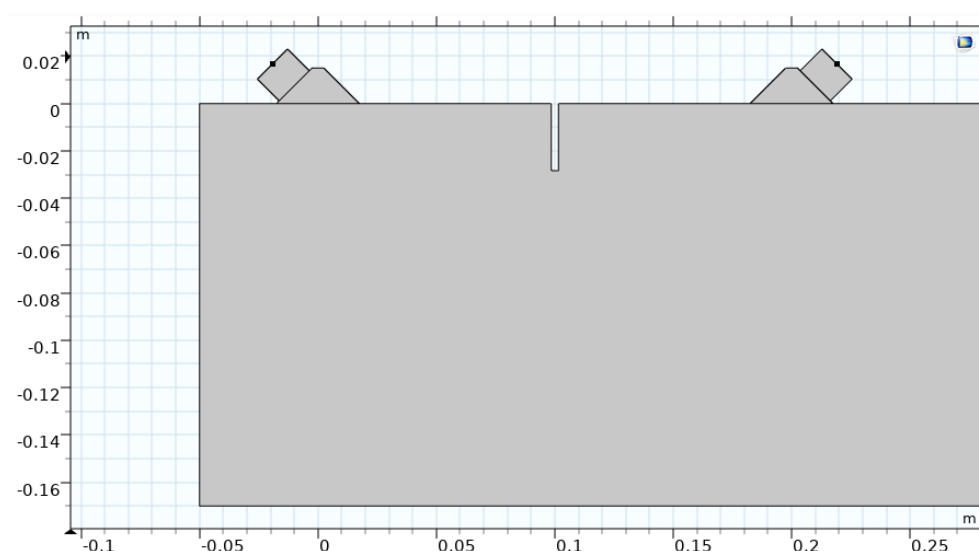


Figura 52. Introducción de fisura en el modelo para una separación de 20 cm.

Para simular un nudo (Figura 53, izquierda), se ha introducido una geometría circular de 3 cm de diámetro, representando una inclusión o heterogeneidad puntual con un material en cuya caracterización se ha reducido en un 30% el módulo de Young con respecto de la muestra.

Por su parte, la delaminación (Figura 53, derecha) se ha modelado extrayendo un área rectangular extremadamente delgado, con un espesor de 10 micras y una anchura variable, representando la pérdida del efecto del adhesivo entre dos láminas de la muestra.

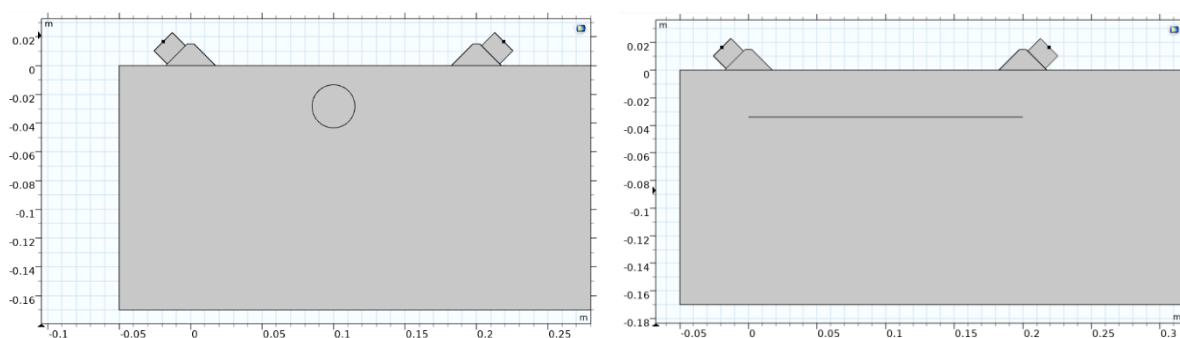


Figura 53. Introducción de nudo (izq.) y delaminación (der.) con una separación de 20 cm.

Por último, el proceso empleado para la simulación de una degradación asociada a un ataque biótico se estableció de manera análoga al procedimiento desarrollado experimentalmente, con el objetivo de reproducir sus condiciones. Así se optó por representarlo de manera simplificada mediante la extracción de 50 cavidades circulares, con diámetros de 3 mm, distribuidas aleatoriamente en un área rectangular de dimensiones 10×5 cm.

Este patrón de deterioro se generó a través de un script en Python (disponible en el Anexo II), codificado para ubicar los círculos dentro de la región definida, evitando solapamientos entre ellos, con el fin de representar una distribución realista.

El patrón resultante de la distribución aleatoria de las cavidades para el contraste numérico-experimental se muestra en la Figura 54.

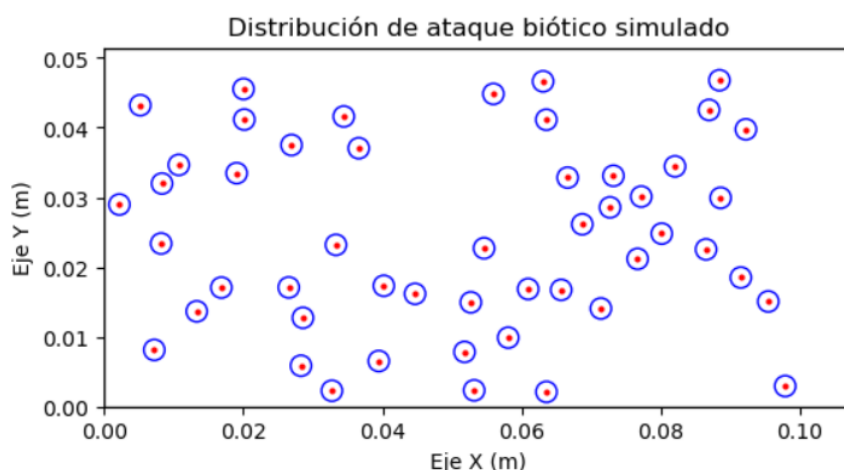


Figura 54. Distribución de 50 cavidades circulares empleado para simular ataque biótico.

Una vez generado el patrón de las cavidades, la geometría resultante fue exportada en formato DXF, para posteriormente importarlo en COMSOL Multiphysics para el análisis numérico.

De forma complementaria, con el propósito de estudiar un caso de mayor complejidad, se desarrolló un análisis numérico adicional en el que se extrajeron 100 cavidades circulares, con diámetros comprendidos entre 1 y 3 mm, distribuidas de manera aleatoria nuevamente en un área de 10 × 5 cm. En la Figura 55 se muestra el patrón resultante.

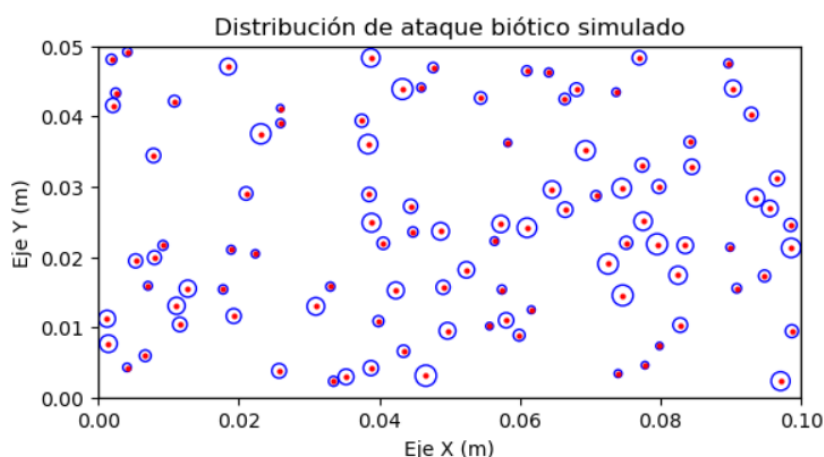


Figura 55. Distribución de 100 cavidades circulares empleado para simular ataque biótico.

Al igual que en el caso anterior, una vez definido el patrón de cavidades, la geometría resultante se exportó en formato DXF y posteriormente se importó en COMSOL Multiphysics para su análisis numérico. En la Figura 56 se muestra el modelo con el patrón de degradación biótica incorporado, para el caso de una separación entre transductores de 20 cm.

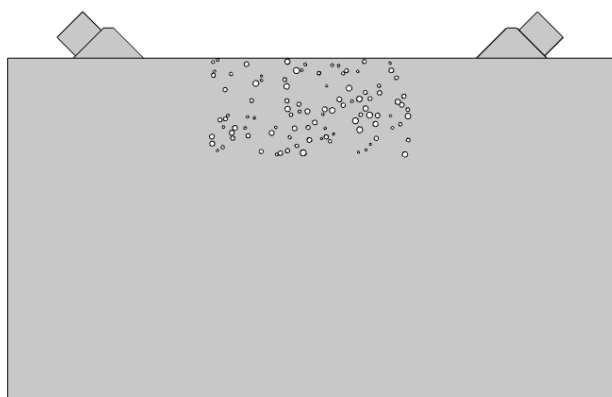


Figura 56. Introducción de ataque biótico en el modelo para una separación de 20 cm.

Los defectos se han introducido en distintas ubicaciones dentro de la muestra, variando su posición en función de la distancia relativa a los transductores utilizados en el ensayo. Se ha empleado esta estrategia con el fin de evaluar la influencia de la ubicación del defecto sobre la capacidad de detección y la respuesta obtenida por el sistema de medición.

Asignación de propiedades del material

El siguiente paso ha consistido en la asignación de las propiedades mecánicas del material. En una primera etapa, se ha considerado un comportamiento homogéneo e isotrópico, es decir,

Capítulo 3: Materiales y metodología experimental

con propiedades constantes e iguales en todas las direcciones. En la Figura 57 se muestran los parámetros empleados para este caso, utilizando el índice 0 para referirse a la muestra de madera laminada y el índice 1 para el aluminio. Para ello, se han empleado parámetros habituales en este tipo de materiales.

Ajustes				Ajustes			
Parámetros				Parámetros			
Etiqueta: Parámetros materiales				Etiqueta: Parámetros materiales			
▼ Parámetros				▼ Parámetros			
Nombre	Expresión	Valor	Descripción	Nombre	Expresión	Valor	Descripción
rho0	450[kg/m ³]	450 kg/m ³	Densidad de la muestra	rho0	500[kg/m ³]	500 kg/m ³	Densidad de la muestra
E0	10[GPa]	1E10 Pa	Módulo Young muestra	E0	11[GPa]	1.1E10 Pa	Módulo Young muestra
nu0	0.35	0.35	Coef. Poisson muestra	nu0	0.35	0.35	Coef. Poisson muestra
rho1	2700[kg/m ³]	2700 kg/m ³	Densidad acoplador	rho1	2700[kg/m ³]	2700 kg/m ³	Densidad acoplador
E1	70[GPa]	7E10 Pa	Módulo Young acoplador	E1	70[GPa]	7E10 Pa	Módulo Young acoplador
nu1	0.3	0.3	Coef. Poisson acoplador	nu1	0.3	0.3	Coef. Poisson acoplador
cL0	$\sqrt{E0*(1-nu0)/(rho0*(1+nu0)*...}$	5972 m/s	Long. muestra	cL0	$\sqrt{E0*(1-nu0)/(rho0*(1+nu0)*...}$	5942.1 m/s	Long. muestra
cT0	$\sqrt{E0/(2*rho0*(1+nu0))}$	2868.9 m/s	Transv. muestra	cT0	$\sqrt{E0/(2*rho0*(1+nu0))}$	2854.5 m/s	Transv. muestra
cR0	$cT0*(0.87 + 1.12*nu0)/(1 + nu0)$	2681.9 m/s	Rayleigh muestra	cR0	$cT0*(0.87 + 1.12*nu0)/(1 + nu0)$	2668.4 m/s	Rayleigh muestra
cL1	$\sqrt{E1*(1-nu1)/(rho1*(1+nu1)*...}$	5907.6 m/s	Long. acoplador	cL1	$\sqrt{E1*(1-nu1)/(rho1*(1+nu1)*...}$	5907.6 m/s	Long. acoplador
cT1	$\sqrt{E1/(2*rho1*(1+nu1))}$	3157.8 m/s	Trans. acoplador	cT1	$\sqrt{E1/(2*rho1*(1+nu1))}$	3157.8 m/s	Trans. acoplador
cR1	$cT1*(0.87 + 1.12*nu1)/(1 + nu1)$	2929.4 m/s	Rayleigh acoplador	cR1	$cT1*(0.87 + 1.12*nu1)/(1 + nu1)$	2929.4 m/s	Rayleigh acoplador

Figura 57. Parámetros físicos y mecánicos de la muestra de madera de abeto (izq.) y pino silvestre (der.) considerando un medio isótropo.

Posteriormente, con el fin de representar de forma más realista el comportamiento de la madera, se ha incorporado su naturaleza anisótropa, modelándola como un medio ortótropo.

En esta configuración, se han introducido distintos valores de propiedades elásticas según las tres direcciones ortogonales principales del material (longitudinal, radial y tangencial), tal como se recoge en la Figura 58. No obstante, para el aluminio, dadas sus características, se ha mantenido con las mismas propiedades isótropas utilizadas en el caso anterior.

Ajustes				Ajustes			
Parámetros				Parámetros			
Etiqueta: Parámetros materiales				Etiqueta: Parámetros materiales			
▼ Parámetros				▼ Parámetros			
Nombre	Expresión	Valor	Descripción	Nombre	Expresión	Valor	Descripción
rho0	500[kg/m ³]	500 kg/m ³	Densidad de la muestra	E1	70[GPa]	7E10 Pa	Módulo Young acoplador
E_mx	11[GPa]	1.1E10 Pa	MOE X	nu1	0.3	0.3	Coef. Poisson acoplador
E_my	0.84[GPa]	8.4E8 Pa	MOE Y	cL_mx	$\sqrt{E_mx*(1-nu_mx)/(rho0*(1+nu_mx))}$	5942.1 m/s	Vel. Long. muestra X
E_mz	0.84[GPa]	8.4E8 Pa	MOE Z	cL_my	$\sqrt{E_my*(1-nu_my)/(rho0*(1+nu_my))}$	1642 m/s	Vel. Long. muestra Y
nu_mx	0.35	0.35	Coef. Poisson muestra X	cT_mx	$\sqrt{E_mx/(2*rho0*(1+nu_mx))}$	2854.5 m/s	Vel. Transv. muestra X
nu_my	0.35	0.35	Coef. Poisson muestra Y	cT_my	$\sqrt{E_my/(2*rho0*(1+nu_my))}$	788.81 m/s	Vel. Transv. muestra Y
nu_mz	0.35	0.35	Coef. Poisson muestra Z	cR_mx	$cT_mx*(0.87 + 1.12*nu_mx)/(1 + nu_mx)$	2668.4 m/s	Rayleigh muestra X
rho1	2700[kg/m ³]	2700 kg/m ³	Densidad acoplador	cR_my	$cT_my*(0.87 + 1.12*nu_my)/(1 + nu_my)$	737.39 m/s	Rayleigh muestra Y
				cL1	$\sqrt{E1*(1-nu1)/(rho1*(1+nu1))}$	5907.6 m/s	Long. acoplador
				cT1	$\sqrt{E1/(2*rho1*(1+nu1))}$	3157.8 m/s	Trans. acoplador
				cR1	$cT1*(0.87 + 1.12*nu1)/(1 + nu1)$	2929.4 m/s	Rayleigh acoplador
				G_mx	$E_mx/(2*(1+nu_mx))$	4.0741E9 Pa	Modulo Cizalla muestra X
				G_my	$E_my/(2*(1+nu_my))$	3.1111E8 Pa	Modulo Cizalla muestra Y
				G_mz	$E_mz/(2*(1+nu_mz))$	3.1111E8 Pa	Modulo Cizalla muestra Z

Figura 58. Parámetros físicos y mecánicos de la muestra de madera de pino silvestre considerando un medio ortótropo.

Definición del pulso ultrasónico

Para llevar a cabo el modelado del pulso ultrasónico, se ha comenzado por representar la señal eléctrica que activa el transductor emisor. Esta señal consiste en una onda cuadrada, unipolar, con una amplitud de 200 V, aplicada durante un intervalo de 60 μ s.

La Figura 59 muestra la forma de esta señal eléctrica, utilizada como entrada para la simulación del comportamiento del transductor.

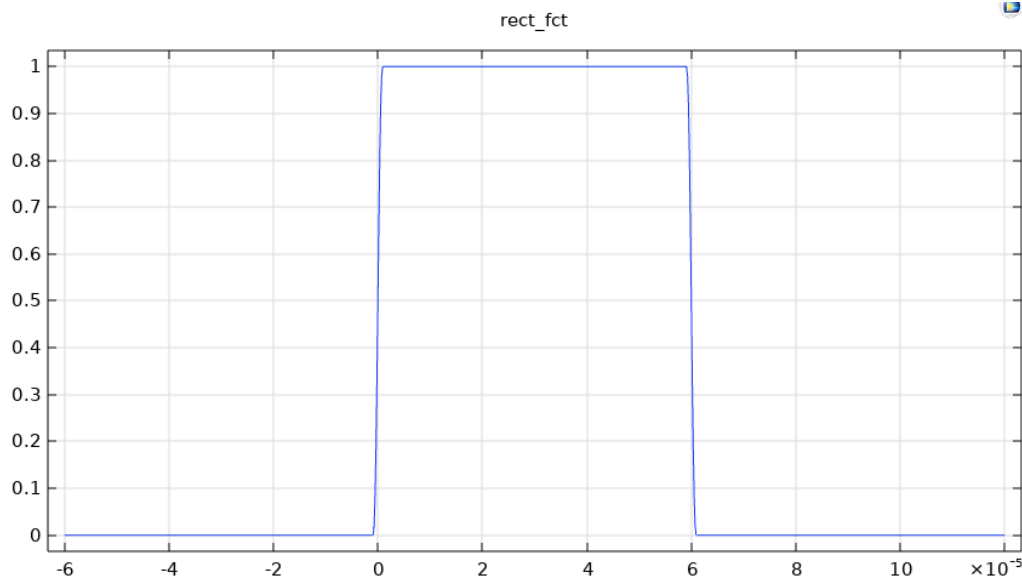


Figura 59. Señal eléctrica de activación del transductor emisor.

A continuación, se ha procedido al modelado del pulso de voltaje generado por el transductor, utilizando para ello la siguiente expresión:

$$V_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot \text{rect}(t) \quad (2.21)$$

donde:

V_0 voltaje aplicado.

f frecuencia de operación del transductor.

t tiempo, variable independiente.

$\text{rect}(t)$ señal unipolar rectangular descrita en la Figura 59.

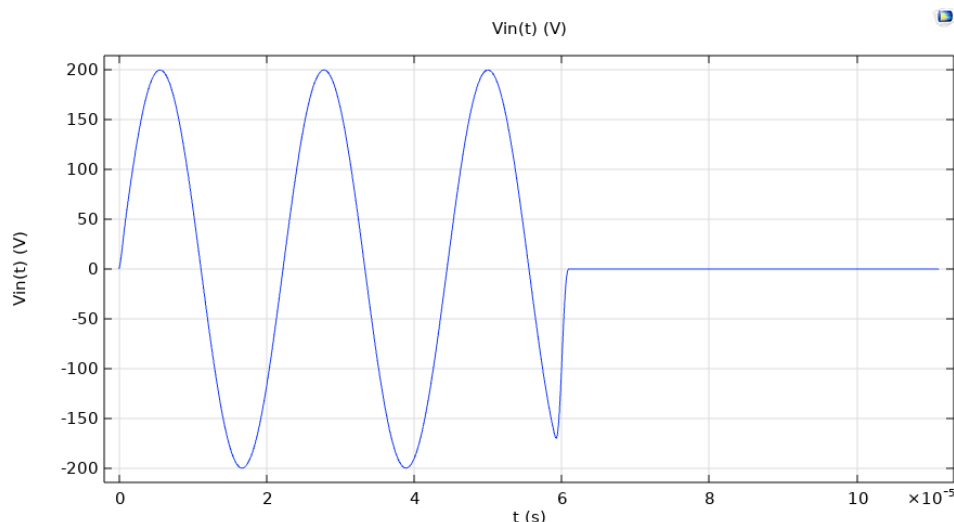


Figura 60. Pulso de voltaje del transductor emisor.

Definición de las condiciones de contorno

Para la definición de las condiciones de contorno, se han empleado tres módulos de COMSOL Multiphysics. En primer lugar, el módulo Ondas elásticas (*Elastic waves*) permite simular la propagación de ondas en el medio y, por tanto, analizar el comportamiento del sistema frente a la propagación ultrasónica. En la Figura 61 se muestra el contorno en el que se ha aplicado la condición de velocidad prescrita, normal al apoyo del transductor en el acoplador.

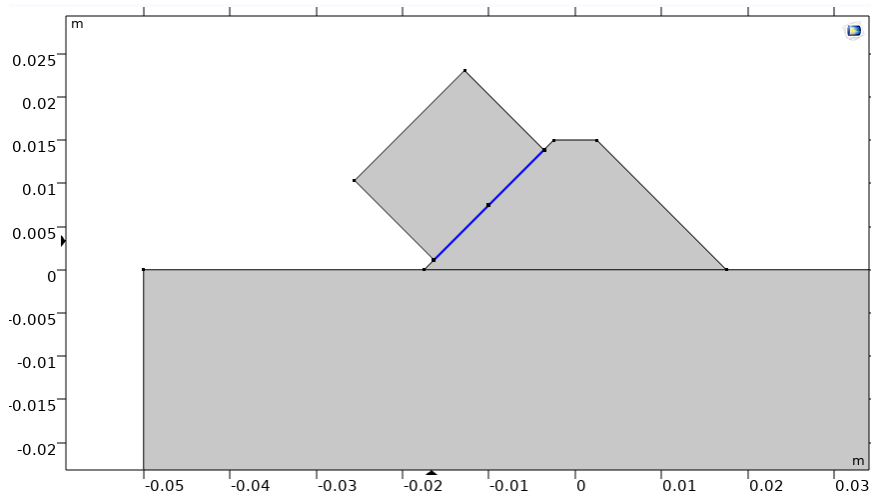


Figura 61. Contorno de aplicación del pulso ultrasónico.

Por otra parte, los módulos Mecánica de sólidos (*Solid Mechanics*) y Electrostática (*Electrostatics*), combinados a través de la multifísica de piezoelectricidad (*piezoelectricity*), posibilitan modelar el efecto piezoeléctrico en el emisor y, de esta manera, obtener el campo de desplazamientos asociado al sistema.

Para ello, se definió el contorno inferior de la muestra como un apoyo de rodillo, restringiendo el desplazamiento vertical sin impedir la deformación lateral, mientras que los transductores fueron configurados como materiales piezoeléctricos dentro del modelo.

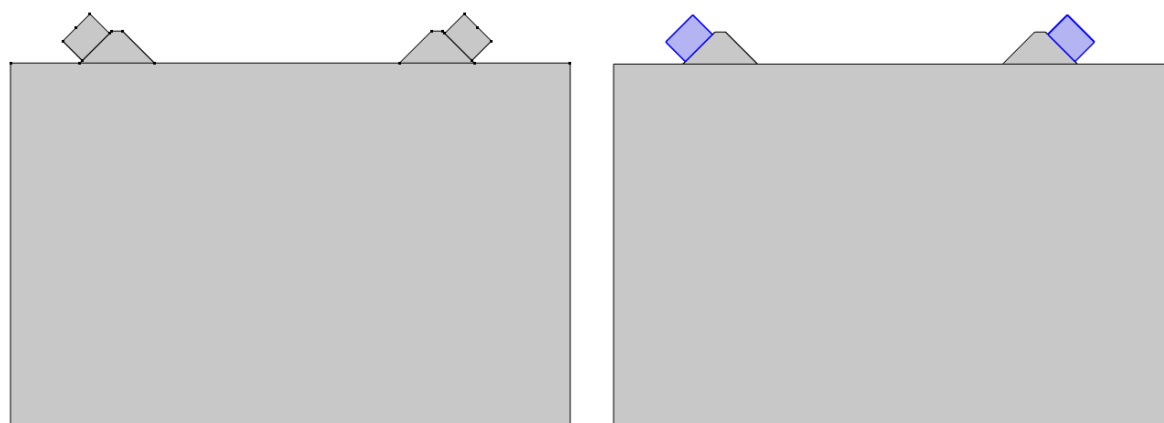


Figura 62. Condición de apoyo (izq.) y material piezoeléctrico (der.).

De igual forma, se asignaron las condiciones de contorno correspondientes a tierra, así como los terminales de voltaje en el emisor y de carga en el receptor, respectivamente.

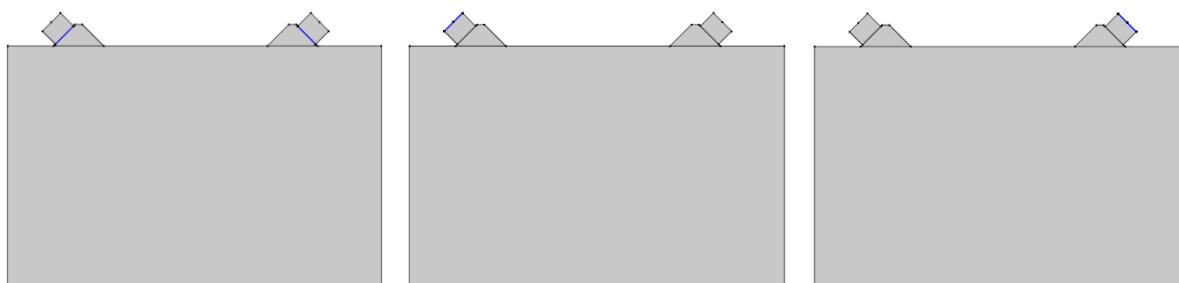


Figura 63. Tierra (izq.), terminal de voltaje (centro) y terminal de carga (der.).

Selección de puntos de referencia

Para la emisión y recepción de la señal, se han considerado como puntos de referencia los puntos medios de los transductores en contacto directo con el acoplador. Con el objetivo de facilitar la comprensión del planteamiento, en la Figura 64 se ilustra la disposición de los transductores y los puntos de referencia considerados.

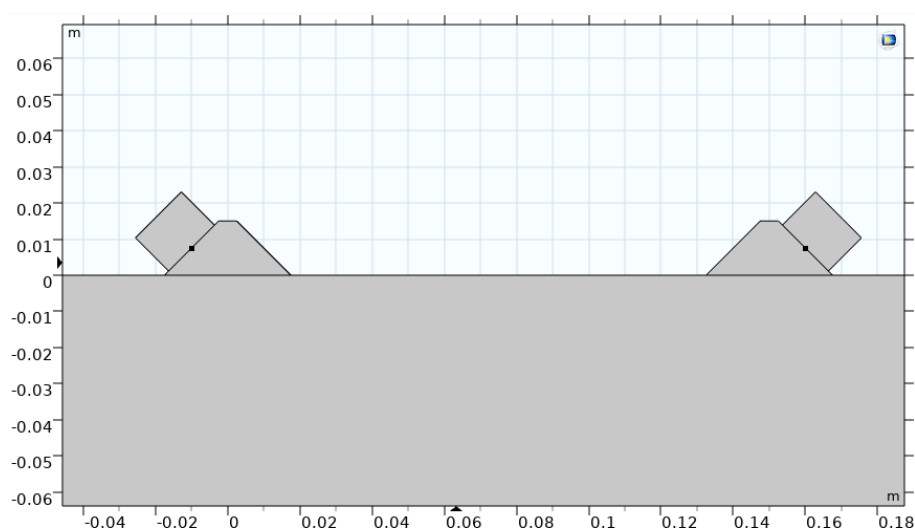


Figura 64. Puntos de referencia considerados.

Generación de la malla de elementos finitos

El dominio del modelo se ha discretizado mediante una malla compuesta por elementos finitos triangulares, estableciendo un tamaño máximo de $\lambda_R/12$, siendo λ_R la longitud de onda de las ondas de Rayleigh en el medio. Estas ondas, al ser más lentas que las ondas primarias y secundarias, requieren un tamaño de elemento más pequeño para capturar con precisión las variaciones del campo de propagación de ondas.

Este tamaño permite una representación adecuada de la geometría, especialmente en las zonas cercanas tanto a los transductores ultrasónicos como a los defectos introducidos, donde se concentra una mayor complejidad geométrica y se espera una mayor variación del campo de ondas.

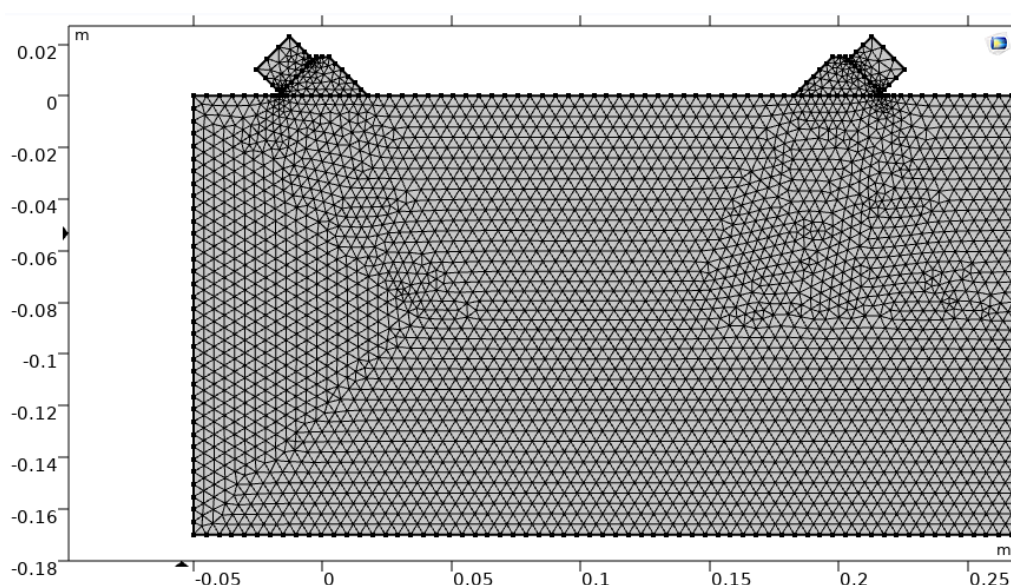


Figura 65. Definición de la malla de elementos finitos para una separación de 20 cm.

Configuración y ejecución de la simulación

Una vez definida la geometría del modelo, las propiedades del material, el pulso ultrasónico y las condiciones de contorno, se procede a configurar la simulación numérica en COMSOL Multiphysics con el fin de resolver el problema de propagación de ondas acústicas en la estructura analizada.

Para ello, se establece un muestreo temporal con un intervalo de $0,1 \mu\text{s}$, comenzando en el instante inicial $t_0 = 0 \text{ s}$. El tiempo final t_f de cada simulación se ajusta individualmente en función de la distancia entre el punto de emisión y el transductor receptor, de modo que se capture completamente la llegada del frente de onda en cada configuración. Este valor, por tanto, varía según la posición del punto de muestreo, adaptándose a las condiciones específicas de cada caso.

Ajustes

Temporal

Calcular Actualizar solución

Etiqueta: Temporal

Configuración del estudio

Unidad del tiempo: μs

Tiempos de salida: range(0,0.1,60) μs

Tolerancia: Controlado por la física

☐ Incluir no linealidad geometría

Figura 66. Configuración del estudio para una separación de 20 cm.

Esta configuración permite establecer un entorno de cálculo coherente con las condiciones experimentales, facilitando así la comparación entre los resultados simulados y los obtenidos en el laboratorio.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a lo largo del trabajo. En la primera sección, se realiza una comparación entre los datos experimentales y los resultados derivados de las simulaciones efectuadas con el modelo numérico desarrollado en COMSOL Multiphysics. El objetivo de esta comparación es evaluar el grado de concordancia entre ambos enfoques y, con ello, valorar la capacidad predictiva del modelo computacional.

Seguidamente, se presentan los resultados de un análisis paramétrico realizado para estudiar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones. En particular, se ha evaluado el impacto de la presencia de defectos habituales, tales como fisuras transversales, nudos y delaminaciones, así como la influencia de características estructurales relevantes, como la ortotropía del material y la variabilidad en el canto. La finalidad de este análisis es obtener una visión más profunda sobre el comportamiento de la propagación de las ondas acústicas en estructuras de madera laminada bajo diferentes escenarios.

Por último, se lleva a cabo un análisis de los resultados, abordando tanto las implicaciones prácticas de los hallazgos como las principales limitaciones del estudio. Esta reflexión permite contextualizar la relevancia del trabajo y sentar las bases para futuros desarrollos en la aplicación de técnicas ultrasónicas al estudio de estructuras de madera laminada.

4.1. VALIDACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

En este apartado se aborda la validación del modelo computacional desarrollado para la simulación del fenómeno estudiado. Este proceso pretende estudiar si el modelo numérico representa con precisión la realidad física del sistema analizado.

Con este propósito, se comparan los resultados obtenidos a partir de ensayos experimentales con aquellos generados mediante simulaciones numéricas realizadas en el software COMSOL Multiphysics. De esta manera, se evalúa el grado de ajuste entre ambos conjuntos de datos, así como se identifican posibles desviaciones y se analizan las causas que podrían afectar a la precisión del modelo.

4.1.1. Comparación entre resultados experimentales y simulados

Para llevar a cabo la validación del modelo computacional, se realizará una comparación entre los datos experimentales obtenidos a partir de la muestra de madera de abeto D047 (Figura 67) y los resultados arrojados por el modelo numérico, considerando dos aproximaciones de modelado.

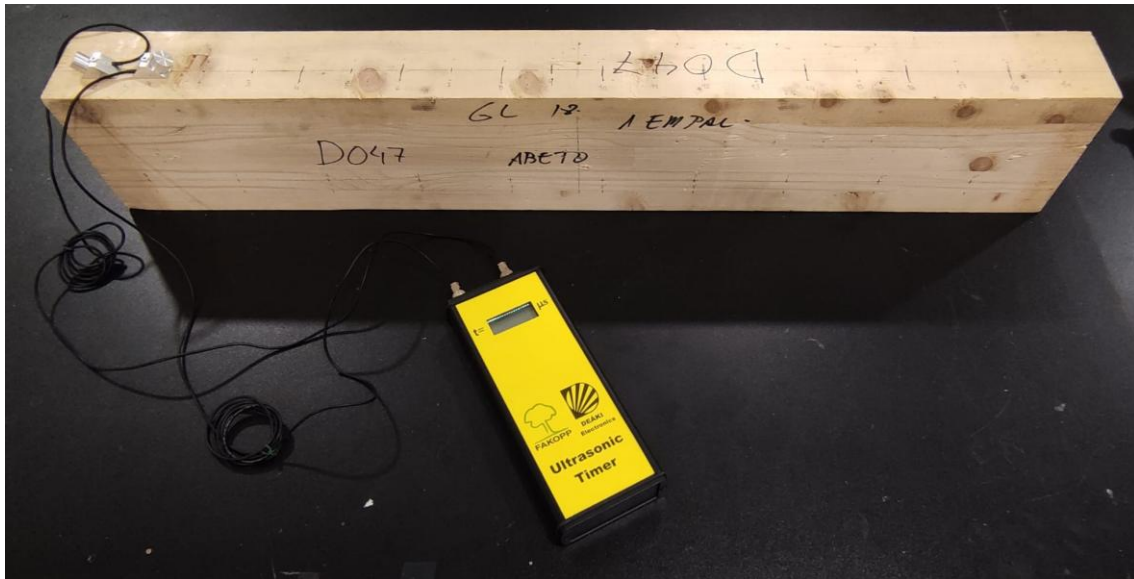


Figura 67. Muestra de madera de abeto D047.

En la primera (Figura 68, izq.), la muestra se representará como un medio continuo, asumiendo un comportamiento homogéneo y sin distinguir las uniones entre los listones, lo que permitirá evaluar su respuesta global como si se tratara de una pieza maciza.

En el segundo enfoque (Figura 68, der.), el modelo incorporará cinco interfases correspondientes a las superficies de contacto entre cada uno de los listones que componen la muestra, con el objetivo de modelar en mayor detalle el efecto de estas discontinuidades en la distribución de la propagación.

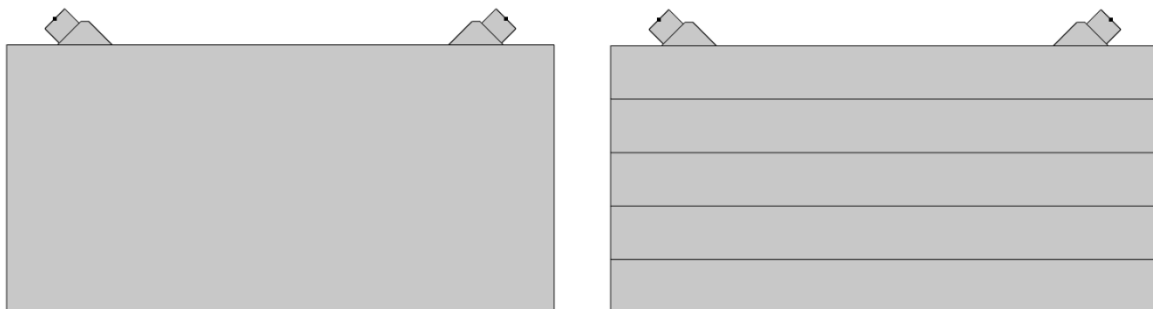


Figura 68. Modelo como un medio continuo (izq.) y considerando las interfases (der.).

La comparación de ambos escenarios permitirá identificar el que mejor reproduzca los resultados experimentales, estableciendo así la validez del modelo. Los parámetros de entrada considerados en la simulación son los siguientes.

$$\rho = 450 \text{ kg/m}^3 \quad E = 11.000 \text{ MPa} \quad \mu = 0,35$$

En la Figura 69 se presentan las diferencias relativas de los tiempos de vuelo obtenidos con ambos modelos con respecto de los resultados experimentales. Las cajas representan el

rango intercuartílico (IQR), esto es, el intervalo en el que se concentra el 50 % central de los datos. El borde inferior de la caja corresponde al primer cuartil (Q1), lo que indica que el 25 % de los valores se encuentra por debajo de este punto. En cambio, el borde superior corresponde al tercer cuartil (Q3), por debajo del cual se ubica el 75 % de los datos. La línea trazada dentro de la caja marca la mediana (Q2), que representa el valor central de la distribución, mientras que la cruz (×) representa la media.

Por último, los bigotes, que se extienden desde los extremos de la caja, abarcan el rango de valores que no se consideran atípicos. Los puntos situados fuera de ellos corresponden a valores atípicos (*outliers*), los cuales representan observaciones que se alejan de manera significativa del resto de los datos.

De esta manera, se observa que los resultados del modelo basado en un medio continuo, homogéneo e isótropo presenta una mayor concordancia con el comportamiento del sistema real, al mostrar tanto una menor media en las diferencias como una menor dispersión de los resultados.

En consecuencia, la validación del modelo se realizará empleando esta representación de medio continuo.

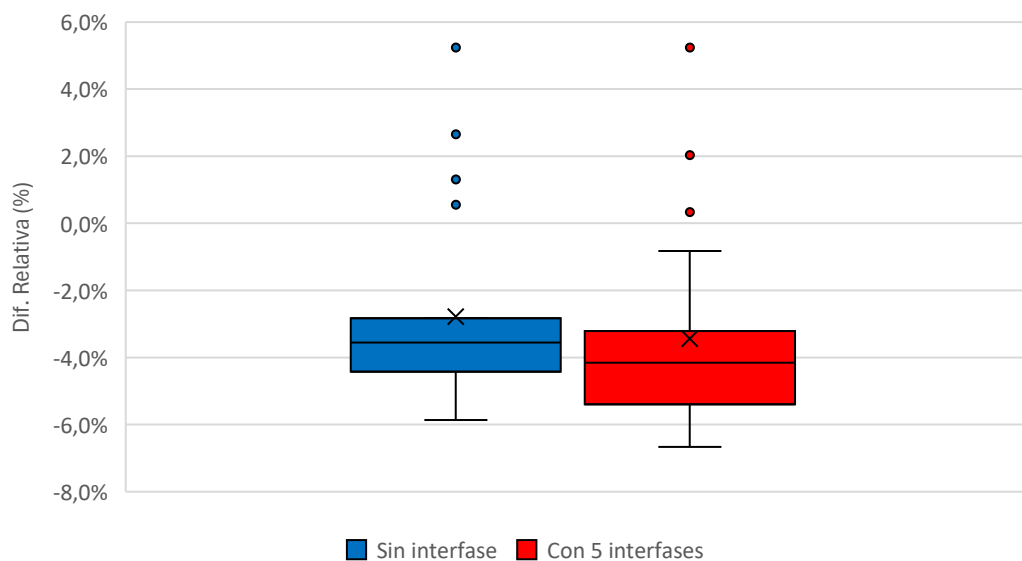


Figura 69. Diferencias relativas de los modelos frente a los resultados experimentales.

En la Figura 70 se representan gráficamente los tiempos de vuelo obtenidos tanto a partir de la simulación numérica, con el modelo seleccionado, como de los ensayos experimentales, mostrados como puntos discretos. A cada conjunto de datos se le ha ajustado una recta de regresión lineal, con el fin de identificar la tendencia general de los resultados y facilitar su comparación. La proximidad entre ambas rectas permite apreciar, de forma preliminar, el grado de concordancia entre el comportamiento simulado y el observado en laboratorio.

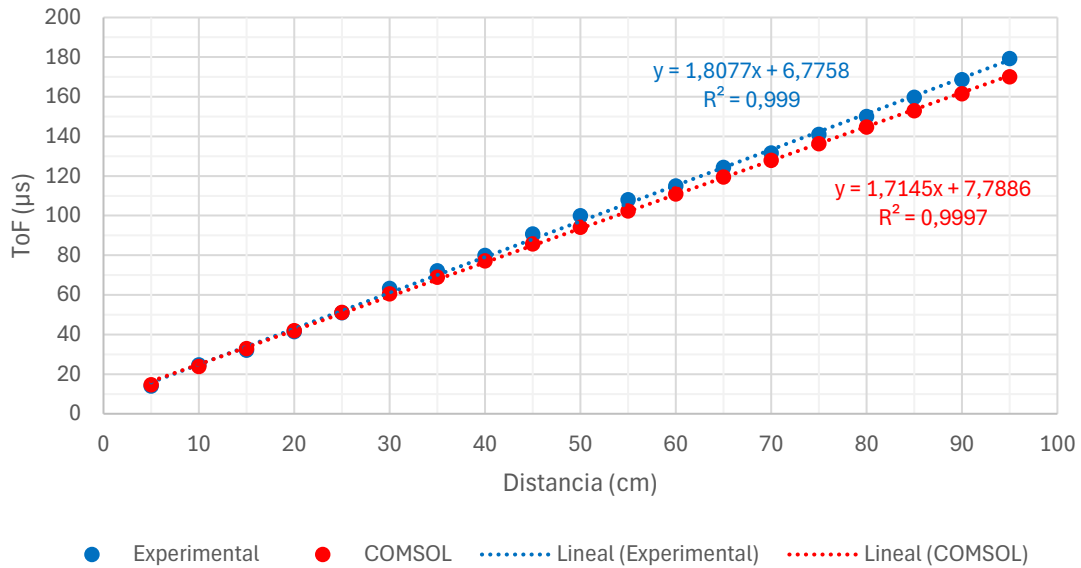


Figura 70. Representación de los tiempos de vuelo experimentales y simulados.

A partir de las ecuaciones de las rectas de regresión obtenidas previamente, y empleando la ordenada en el origen como corrección de tiempo, es posible calcular la velocidad de propagación de la onda longitudinal en el medio a partir de la siguiente expresión:

$$V \text{ (m/s)} = \frac{10^4 \cdot \text{Distancia (cm)}}{\text{Tiempo de vuelo } (\mu s) - \text{Corrección de tiempo}} \quad (2.22)$$

En la Figura 71 se muestra la comparación entre la velocidad de propagación medida en la muestra de madera de abeto D047 y la obtenida a partir de las simulaciones del modelo. Al analizar ambas curvas, se observa que, mientras que la curva del modelo es suave, la de la muestra presenta quiebros y variaciones, probablemente asociadas a defectos puntuales, como la presencia de nudos.

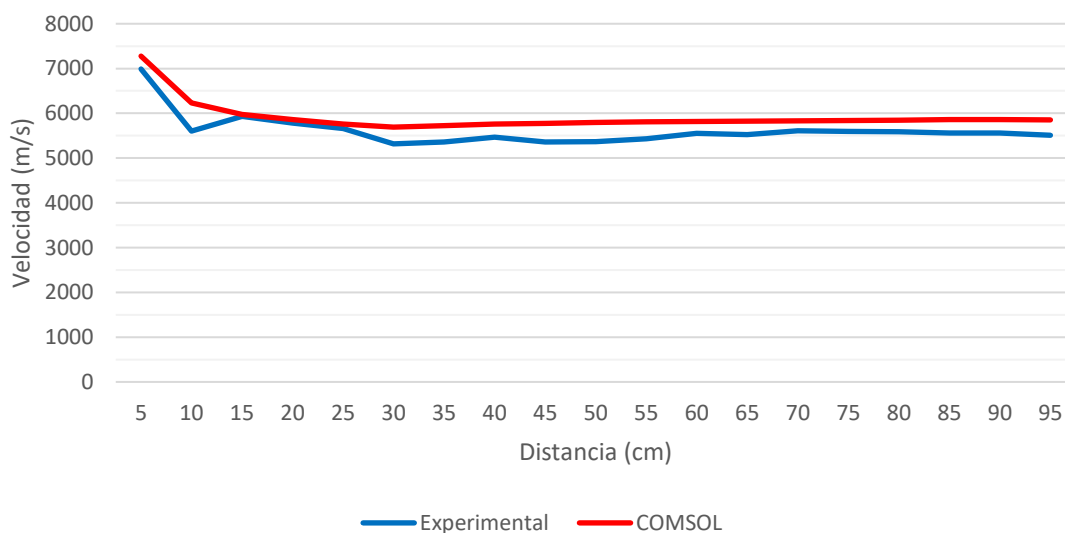


Figura 71. Comparativa entre velocidad de propagación experimental y simulada.

4.1.2. Evaluación del ajuste del modelo

El coeficiente de determinación (R^2) obtenido en ambos casos es prácticamente igual a 1, lo que evidencia una excelente correlación entre los datos y las rectas de regresión ajustadas.

No obstante, se observa una ligera diferencia entre las pendientes de las rectas: la derivada de los datos experimentales presenta un valor ligeramente superior a la obtenida mediante simulación numérica. Este resultado implica una velocidad de propagación algo menor en el material real que en el modelo simulado (se recuerda que en un ensayo indirecto la velocidad de propagación se obtiene como la tangente del ángulo que forma la recta de regresión con la vertical, ver Figura 39).

Esta discrepancia puede atribuirse a las idealizaciones inherentes al modelo computacional, en el cual el material se ha considerado perfectamente homogéneo, continuo e isótropo, sin tener en cuenta posibles defectos o irregularidades. En contraste, el comportamiento del material real está influenciado bien por heterogeneidades locales, imperfecciones en la fabricación o en la preparación de la muestra, así como por condiciones ambientales durante el propio ensayo. Estos factores pueden provocar ligeras desviaciones en la velocidad de propagación de las ondas y explicar así la diferencia observada entre ambos enfoques.

En cualquier caso, las discrepancias observadas se encuentran dentro de márgenes considerados aceptables desde el punto de vista técnico, por lo que se considera que el modelo desarrollado presenta un nivel de precisión adecuado y es apto para representar el fenómeno analizado con suficiente fiabilidad.

4.2. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

El presente apartado recoge un análisis paramétrico orientado a evaluar la influencia de distintos factores geométricos y materiales en la respuesta del modelo numérico. Este procedimiento permite aislar y cuantificar el efecto individual de cada variable, manteniendo constantes el resto de los parámetros, con el fin de identificar patrones y tendencias en el comportamiento del sistema.

Para realizar este estudio, se han seleccionado seis variables de interés, consideradas representativas de defectos o condiciones habituales en elementos estructurales de madera laminada, así como de variaciones geométricas relevantes:

- **Fisura transversal:** discontinuidad lineal introducida perpendicularmente al eje longitudinal de la muestra. Se analiza variando su profundidad para evaluar cómo influye en la transmisión y atenuación de las ondas. Se explora en el apartado 4.3.
- **Nudo:** inclusión circular con propiedades mecánicas reducidas con respecto de la muestra. Se ubica en distintas posiciones y profundidades con el fin de estudiar su impacto en la propagación de ondas. Se explora en el apartado 4.4.
- **Delaminación:** separación parcial entre capas, simulando la pérdida del efecto del adhesivo, evaluando su influencia sobre la dispersión y reflexión de ondas. Se explora en el apartado 4.5.
- **Ataque biótico:** degradación localizada de la muestra simulada mediante 50 cavidades circulares, de 3 mm de diámetro, para el contraste experimental, y mediante 100 cavidades circulares, de 1 a 3 mm de diámetro, para un análisis numérico de mayor complejidad, que simulan el ataque de agentes bióticos. Se explora en el apartado 4.6.
- **Ortotropía:** introducción de la anisotropía característica del material para analizar su impacto en la respuesta del sistema, tanto para una muestra sana como para una muestra con fisura transversal. Se explora en el apartado 4.7.
- **Variación del canto:** modificación de la altura de la pieza para estudiar su influencia en la reflexión, velocidad y atenuación de las ondas de propagación. Se explora en el apartado 4.8.

En cada uno de los siguientes apartados, se describe el modelo de referencia adoptado, la parametrización específica de la variable analizada y se presentan los resultados comparativos obtenidos.

4.3. INFLUENCIA DE DEFECTOS: FISURA TRANSVERSAL

4.3.1. Análisis numérico

Con el objetivo de analizar el comportamiento del material frente a la presencia de fisuras transversales, se ha incorporado en el modelo una grieta de geometría rectilínea introducida desde la superficie superior de la muestra y orientada perpendicularmente al eje principal de la misma. Esta discontinuidad se ha definido con un espesor reducido de forma idealizada, de modo que actúe como plano de debilitamiento, permitiendo estudiar su influencia en la transmisión de ondas.

Para la simulación, se ha considerado que las propiedades mecánicas a lo largo de la fisura representan una separación total del material, interrumpiendo la transmisión en la dirección normal a la misma. La profundidad de la grieta se ha variado en distintos escenarios, expresándola como fracción del espesor total de la pieza, con el fin de evaluar el efecto de este parámetro sobre la respuesta global. Por otra parte, la ubicación y geometría general de la fisura permanecen constantes en todos los casos, modificándose únicamente su profundidad relativa.

En los siguientes apartados se exponen los resultados correspondientes a cada configuración, comparando la influencia de las diferentes configuraciones geométricas de la fisura en el comportamiento de la muestra.

Análisis de fisura con profundidad de un 1/6 del espesor

El primer caso analizado corresponde a una fisura con una profundidad equivalente a un sexto del espesor total de la pieza, lo que se traduce en 28,33 milímetros. Esta fisura ha sido generada de forma transversal respecto al eje principal de la muestra, partiendo desde su superficie superior hacia el interior del material. En la Figura 72 se representan las configuraciones geométricas de la fisura estudiadas para el caso particular de una separación entre transductores de 15 cm.

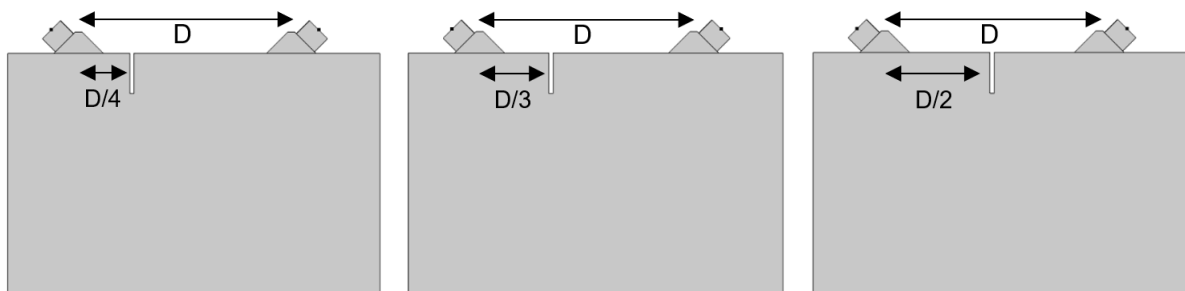


Figura 72. Fisura de $H/6$ de profundidad en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.).

A continuación, se presentan de forma gráfica las variaciones relativas del tiempo de vuelo (ToF) respecto al caso sin defecto, diferenciadas en dos figuras con el fin de facilitar la interpretación de los resultados para cada escenario de ubicación de la fisura (D/4, D/3 y D/2, siendo D la separación entre transductores).

Se observa una disminución de la diferencia relativa muy pronunciado en un primer tramo, para una separación entre transductores comprendida entre 10 y 30 cm, seguido de un tramo con una disminución mucho más gradual, en el que la diferencia de los tiempos de vuelo con respecto de la muestra sin defecto es baja o nula.

Por otra parte, se aprecia que la proximidad de la fisura al transductor incrementa ligeramente esta diferencia, de modo que, en el caso de una fisura situada en D/4, la diferencia es mayor que para una fisura ubicada en D/3, y estas a su vez que para una fisura en D/2.

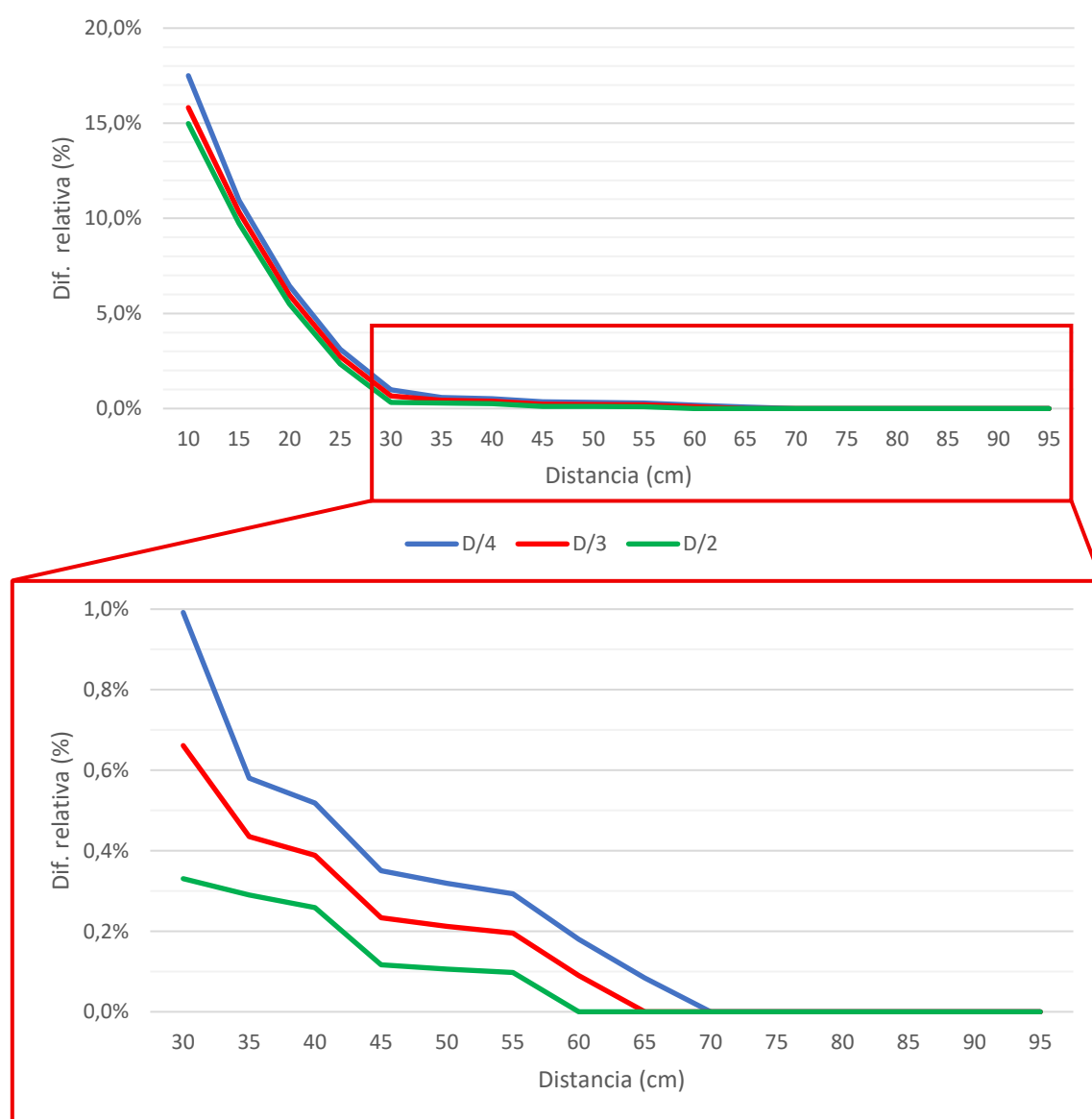


Figura 73. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, para una fisura de profundidad H/6.

Análisis de fisura con profundidad de un 1/4 del espesor

En el segundo caso, se mantienen las mismas características geométricas, de orientación y de ubicación descritas previamente, variando únicamente su profundidad, que en esta ocasión corresponde a un cuarto del espesor de la muestra, es decir, 42,50 mm.

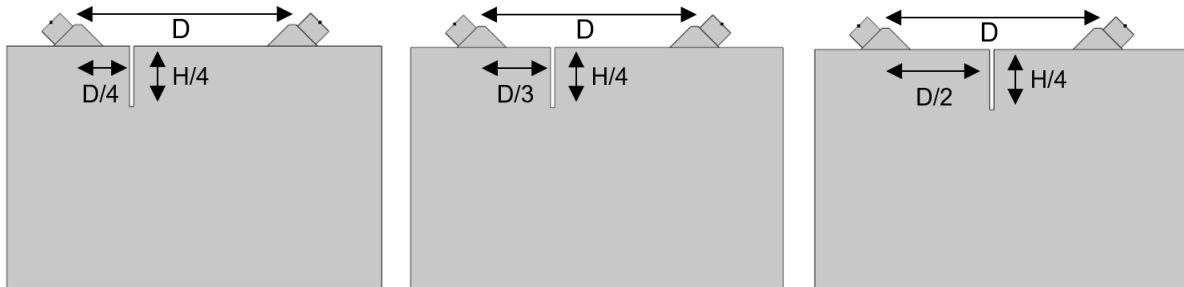


Figura 74. Fisura de $H/4$ de profundidad en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.).

En la siguiente figura, se muestra cómo varía el tiempo de vuelo (ToF) con relación al caso sin defecto para las distintas posiciones consideradas de la fisura ($D/4$, $D/3$ y $D/2$).

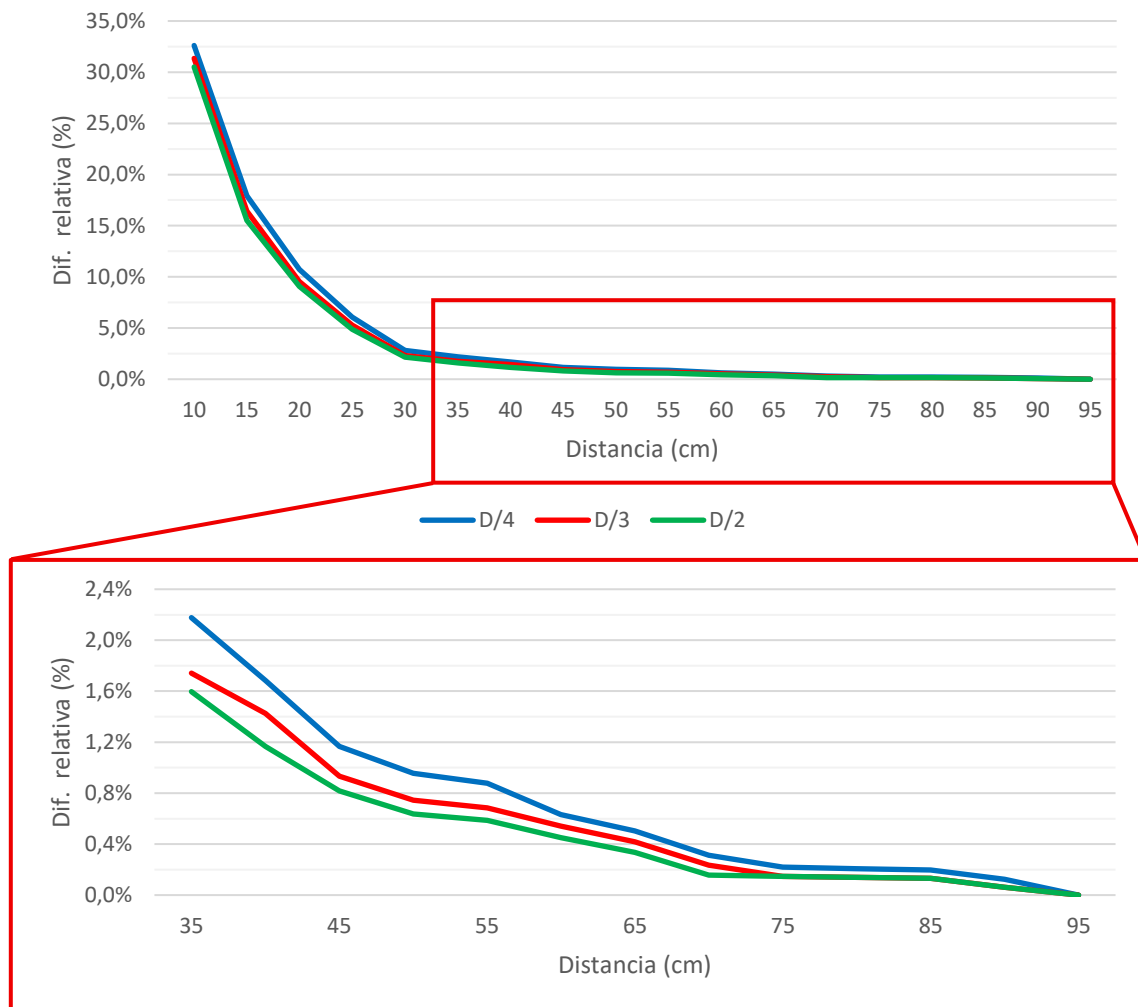


Figura 75. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, para una fisura de profundidad $H/4$.

Análisis de fisura con profundidad de un 1/3 del espesor

En el siguiente caso analizado, la fisura alcanza una profundidad equivalente a un tercio del espesor de la muestra, esto es, 56,66 mm, conservando el resto de características con respecto a los casos anteriores.

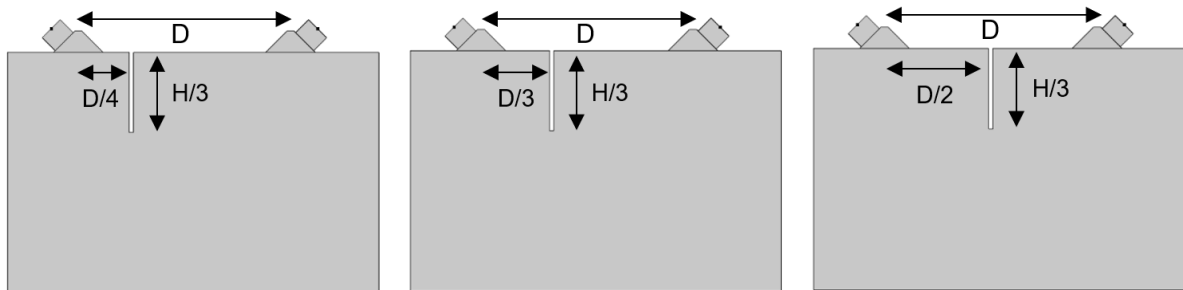


Figura 76. Fisura de $H/3$ de profundidad en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.).

Como en los casos anteriores, en la Figura 77 se muestra cómo la variación del tiempo de vuelo con respecto al caso sin defecto para las distintas posiciones consideradas de la fisura.

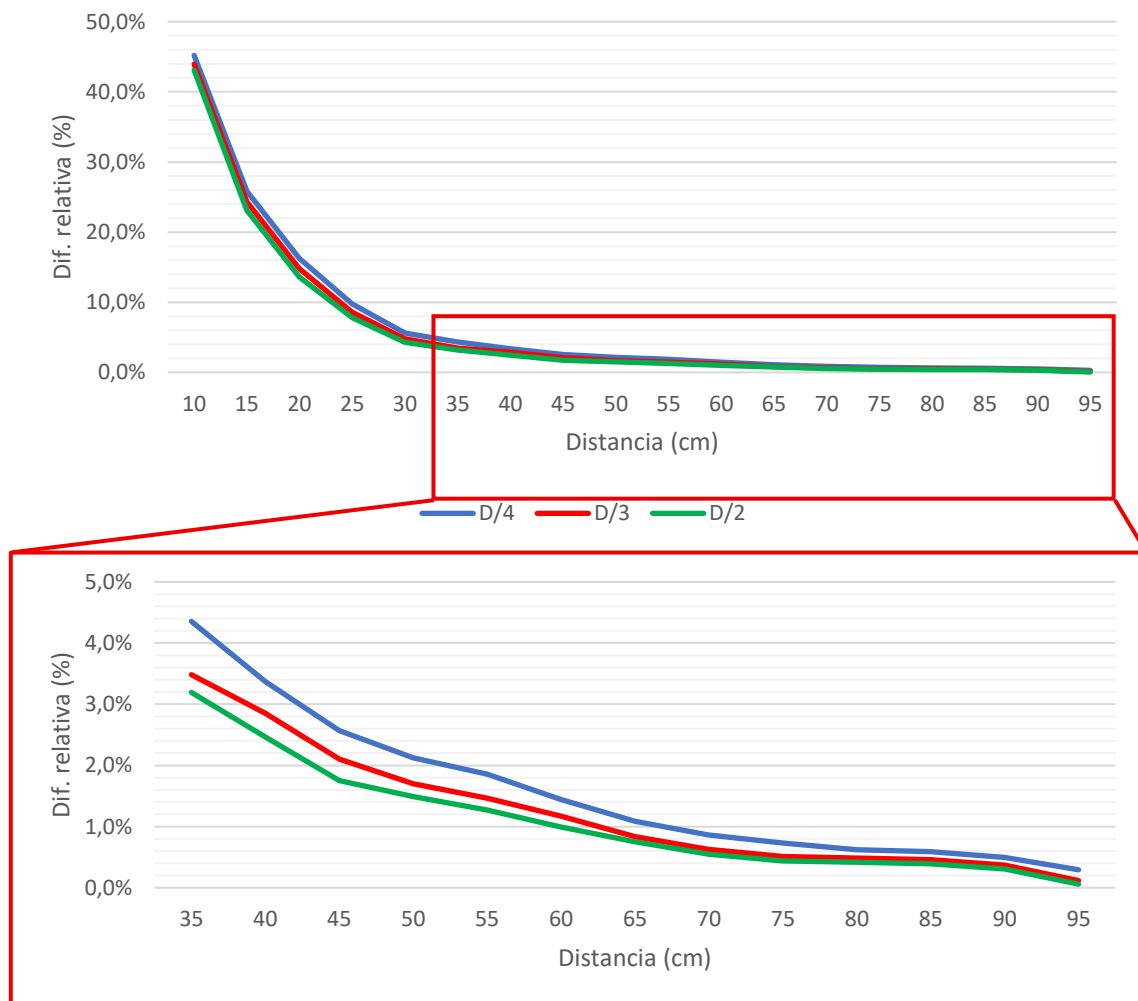


Figura 77. Diferencia. relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, para una fisura de profundidad $H/3$.

Análisis de fisura con profundidad de un 1/2 del espesor

Por último, el cuarto escenario analizado presenta una profundidad de fisura que equivale a la mitad del espesor de la muestra, lo que se traduce en 85 milímetros. El resto de las características geométricas, de orientación y de ubicación se mantienen constantes con respecto a los casos descritos previamente.

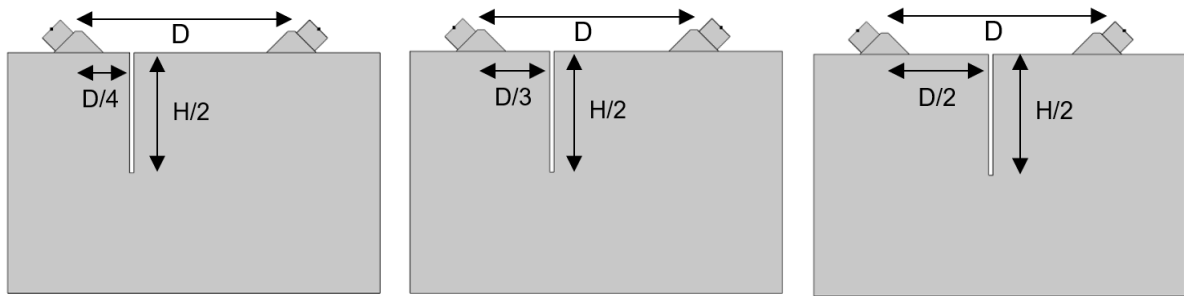


Figura 78. Fisura de $H/2$ de profundidad en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.).

Por último, en la siguiente figura se presentan los resultados de la variación del tiempo de vuelo con respecto de la muestra sana.

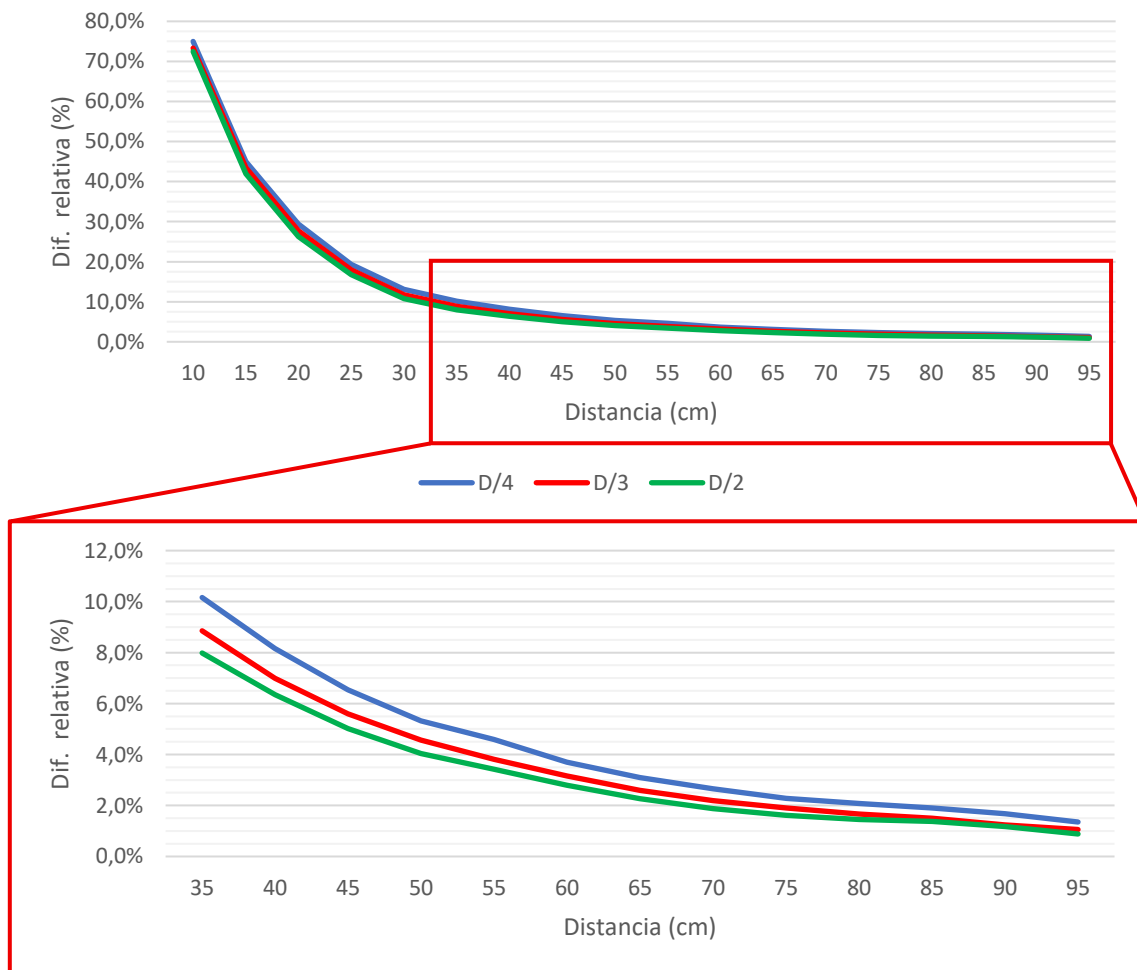


Figura 79. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, para fisura de profundidad $H/2$.

Comparativa en base a la profundidad de la fisura

Tras presentar los datos correspondientes a distintas posiciones y ubicaciones de la fisura, se analiza el efecto de su profundidad sobre el comportamiento del tiempo de vuelo de la onda. Para ello, se presenta inicialmente un análisis de una fisura transversal situada a una distancia constante de 10 cm del transductor emisor, evaluando cómo varía el tiempo de vuelo en función de la profundidad del defecto. Posteriormente, se amplía el análisis considerando fisuras ubicadas en las posiciones relativas a $D/2$ del emisor, siendo D la distancia entre transductores, con el fin de examinar cómo la combinación de profundidad y ubicación longitudinal influye en la propagación de la onda.

De esta manera, se pretende facilitar la comparación entre los distintos escenarios, permitiendo evaluar la influencia de la profundidad frente a la ubicación del defecto en la interferencia y atenuación de la onda.

En primer lugar, se comparan los resultados correspondientes a distintas profundidades, manteniendo constante la ubicación de la fisura a 10 cm del transductor emisor. En la Figura 80 y Figura 81 se presenta, por un lado, la diferencia relativa de los tiempos de vuelo con respecto de la muestra modelada sin defectos y, por otro, la velocidad de propagación de la onda a lo largo de la muestra.

Los resultados indican que la profundidad de la fisura transversal se asocia con un aumento significativo en el tiempo de vuelo de la onda, especialmente en la región inmediatamente posterior a la fisura. Este efecto disminuye a medida que se incrementa la separación entre los transductores, aunque incluso en estos casos las fisuras más profundas siguen mostrando un impacto mayor.

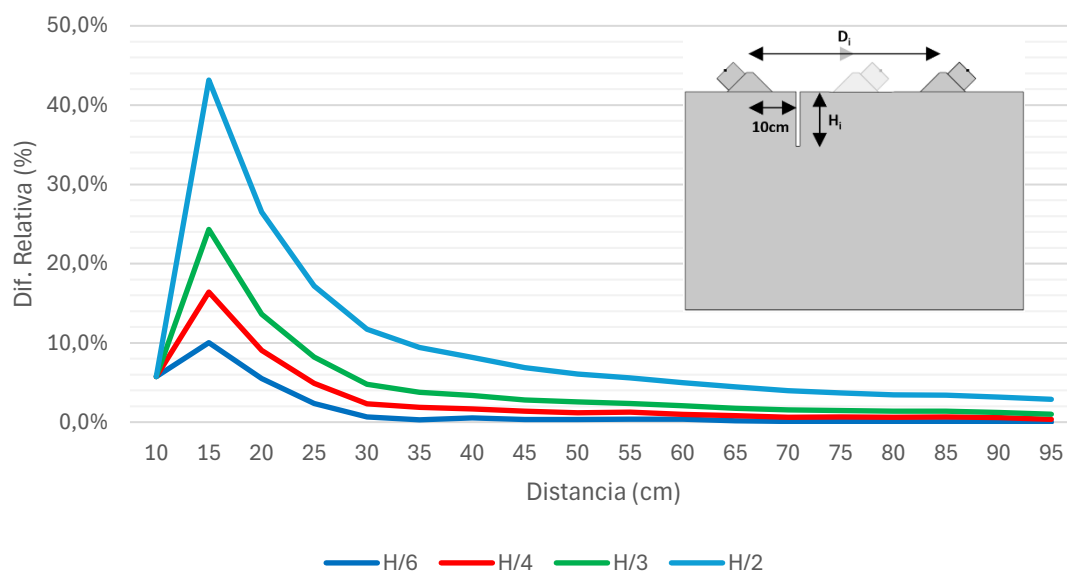


Figura 80. Dif. relativa en ToF, respecto al modelo sin defectos, para una fisura a 10 cm.

Este comportamiento se traduce en una reducción de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica en la zona adyacente posterior a la fisura transversal, reflejando la interferencia que estas generan en la transmisión de energía. A medida que la separación entre transductores aumenta, la velocidad de propagación se recupera gradualmente, acercándose prácticamente a la de una muestra sin defectos para la máxima separación analizada en el caso de fisuras de profundidad $H/6$. Sin embargo, en fisuras más profundas, como $H/2$, se observa aún un descenso residual en la velocidad de propagación, evidenciando el efecto persistente de la profundidad del defecto sobre la transmisión de la onda.

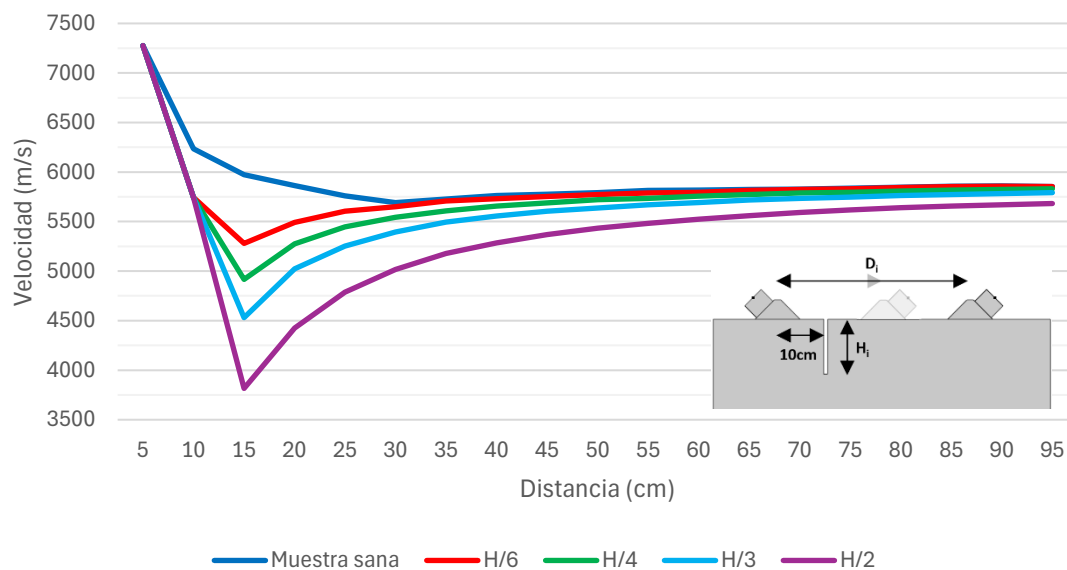


Figura 81. Velocidades de propagación para una fisura a 10 cm.

Siguiendo con el análisis, seguidamente se comparan los resultados correspondientes a distintas profundidades, manteniendo fija su ubicación en $D/2$, es decir, en el punto medio entre los transductores.

En la Figura 82 se aprecia como la presencia de defectos internos, en este caso una fisura transversal, provoca un aumento en el tiempo de vuelo, lo que implica una disminución de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica a través del material. Este efecto se intensifica a medida que aumenta la profundidad de la fisura, y se observa que su influencia es mayor cuanto mayor es la proximidad entre los transductores.

A diferencia del caso idealizado en una muestra sana, donde se esperaría una relación lineal entre la distancia emisor-receptor y el tiempo de vuelo, la introducción de una fisura transversal provoca que dichas curvas adopten una forma hiperbólica, lo que evidencia que las señales detectadas corresponden principalmente a ondas reflejadas.

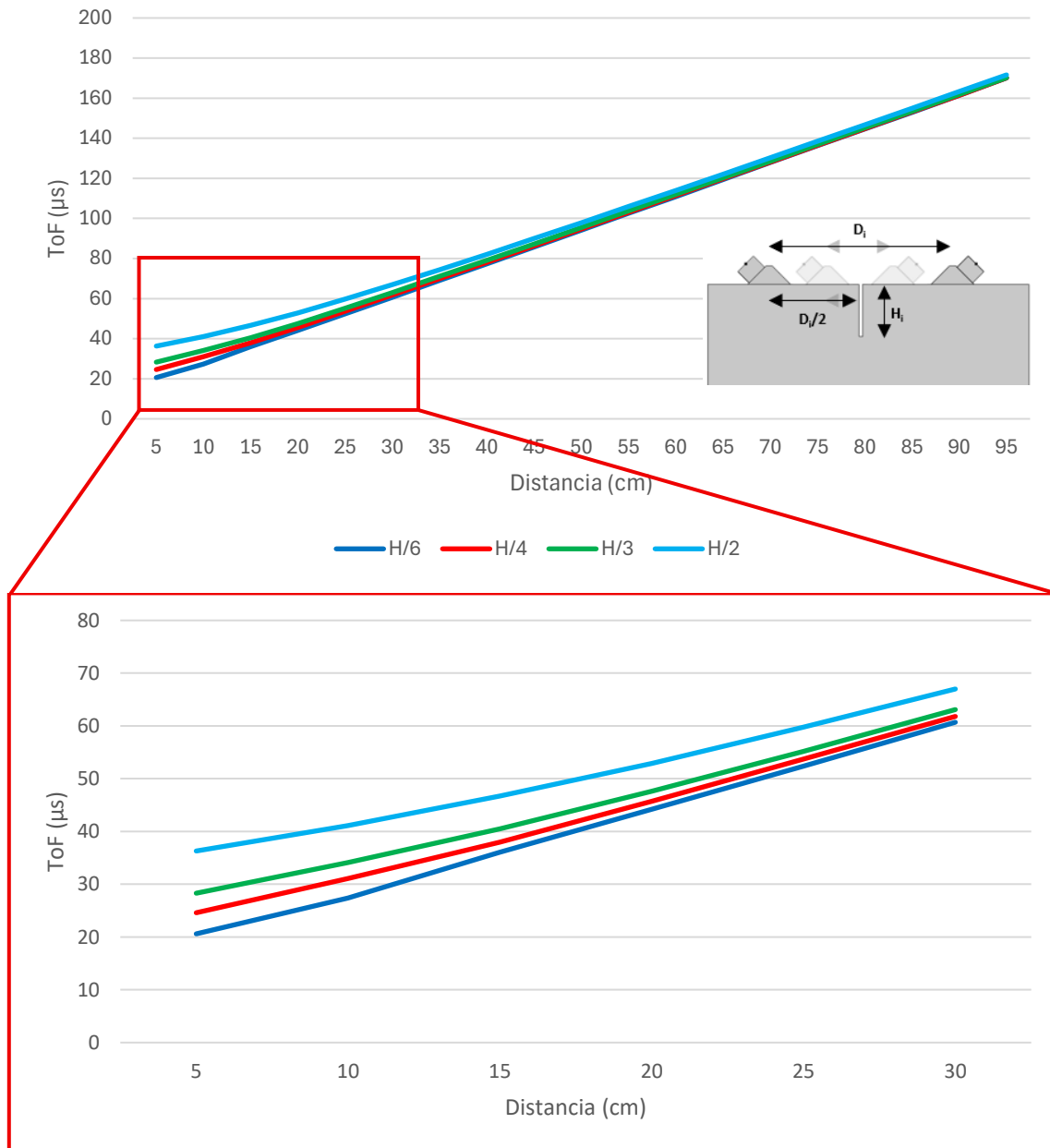


Figura 82. ToF para diferentes profundidades de fisura ubicada en $D/2$ en medio isótropo.

Por otra parte, se observa que la influencia del defecto sobre la velocidad de propagación de la onda se incrementa notablemente cuando los transductores están más próximos, recuperándose gradualmente a medida que aumenta su separación. Este comportamiento coincide con lo observado en análisis previos.

De igual manera, se aprecia que, a mayor profundidad de la fisura, la reducción en la velocidad de propagación es más pronunciada y la onda requiere una mayor distancia para recuperar su velocidad original, evidenciando el efecto persistente de los defectos más profundos sobre la transmisión de la señal ultrasónica.

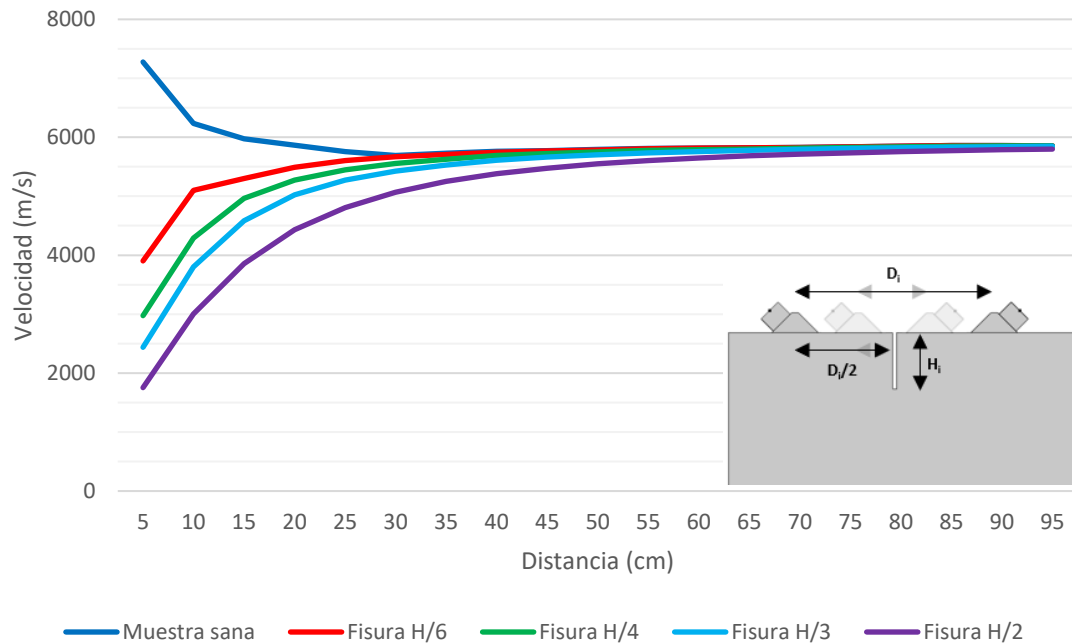


Figura 83. Velocidades de propagación para una fisura en $D/2$.

Por otra parte, en la Figura 84 se observa que la diferencia relativa en el tiempo de vuelo se incrementa conforme aumenta la profundidad de la fisura, siendo más acusada en fisuras que afectan a una mayor proporción del espesor de la muestra.

Así mismo, los resultados indican que, en los casos de mayor separación, el efecto de la fisura sobre el tiempo de vuelo resulta prácticamente inapreciable o incluso nulo, especialmente cuanto menor es la profundidad de la fisura transversal, mientras que, para el caso de fisuras profundas, como en el caso de $H/2$, el efecto persiste incluso en los casos de mayor separación entre transductores.

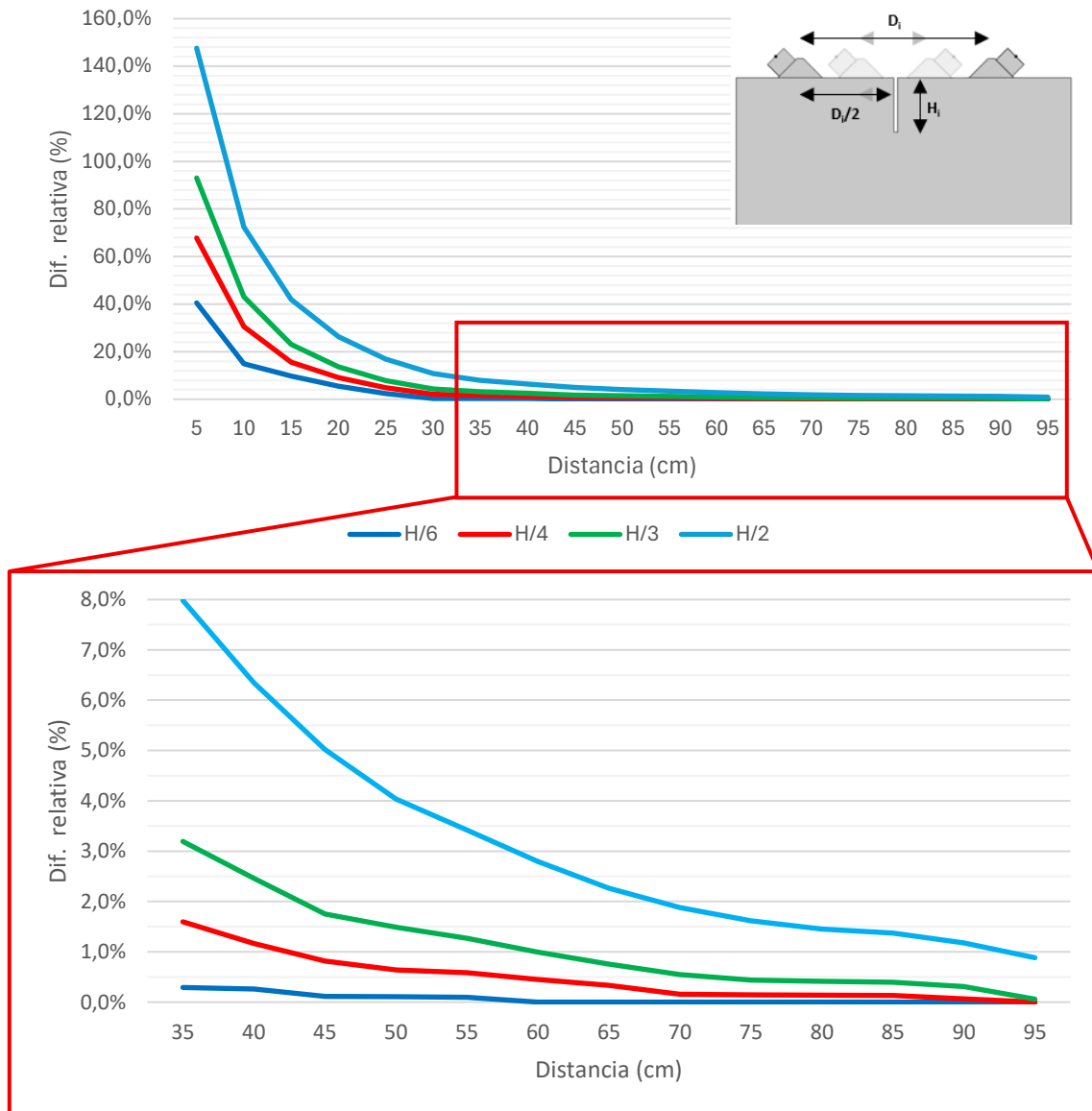
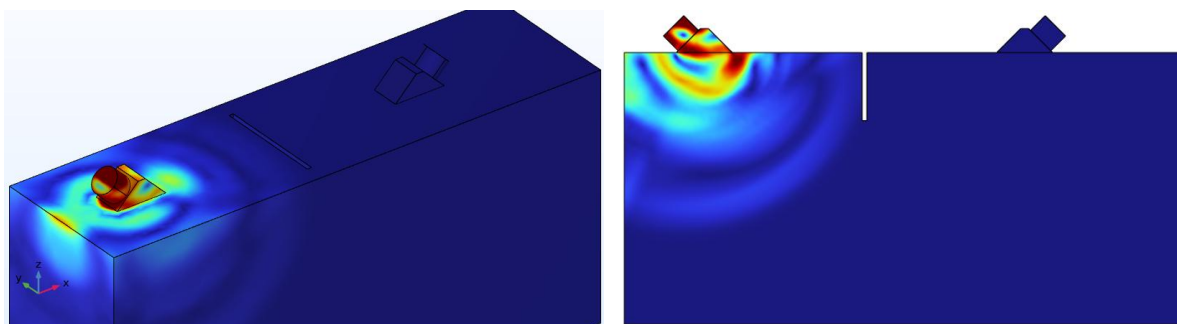


Figura 84. Dif. relativa en ToF, respecto al modelo sin defectos, para una fisura en $D/2$.

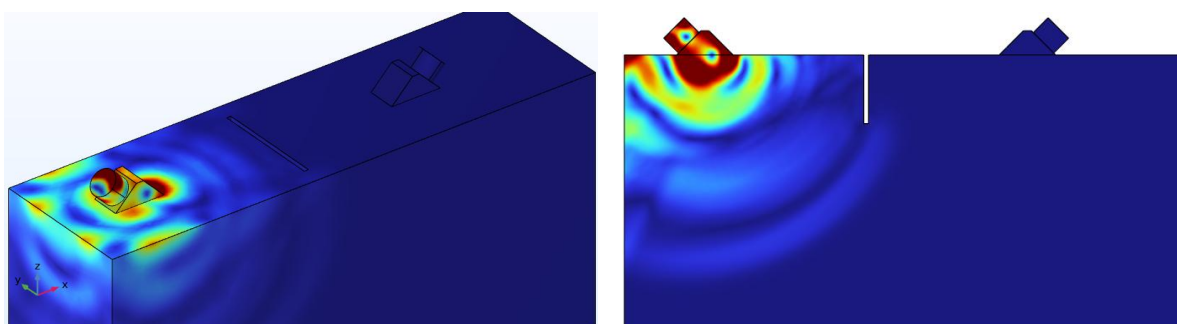
Comportamiento de la propagación ultrasónica ante la fisura

Con el objetivo de analizar con detalle el comportamiento de la propagación de las ondas en la probeta frente a la presencia de una fisura transversal, en la figura siguiente se presentan varias instantáneas correspondientes a intervalos de $5 \mu s$. El modelo utilizado para esta ilustración considera una separación entre transductores de 20 cm y una fisura de profundidad equivalente a $H/4$, permitiendo visualizar cómo el defecto afecta la propagación de las ondas.

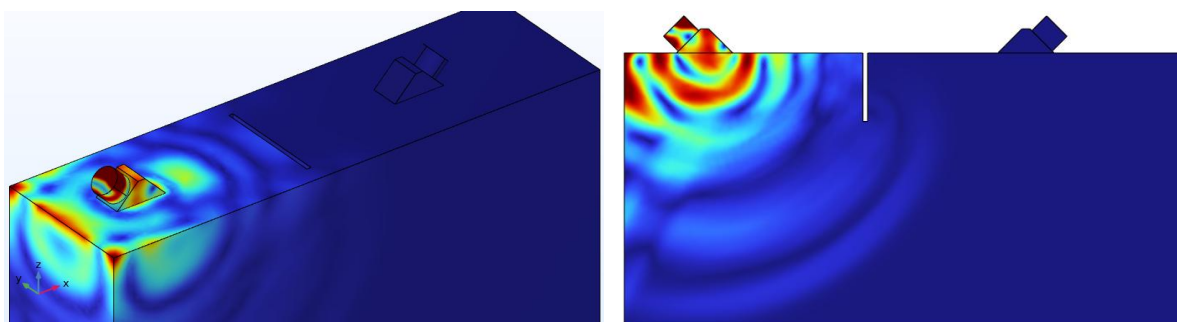
Se observa que la fisura interrumpe la onda directa, bloqueando la transmisión de energía en la zona superficial de la probeta. Además, la presencia del defecto provoca fenómenos de difracción y atenuación de la onda, alterando su propagación.



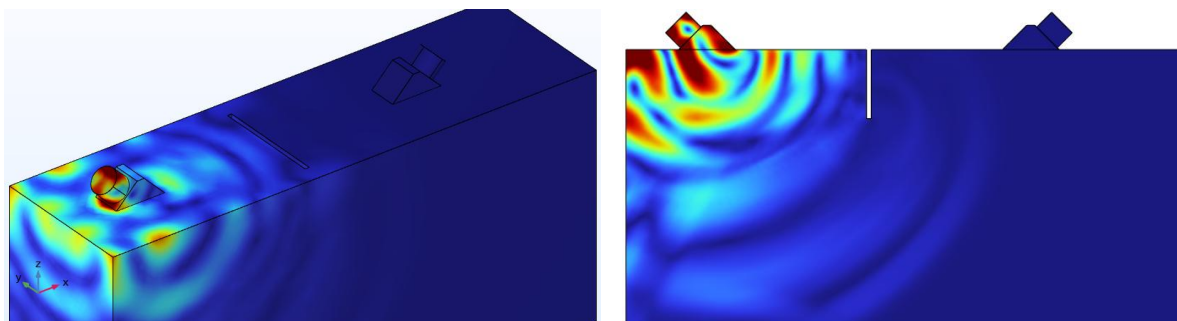
$t = 20 \mu s$



$t = 25 \mu s$



$t = 30 \mu s$



$t = 35 \mu s$

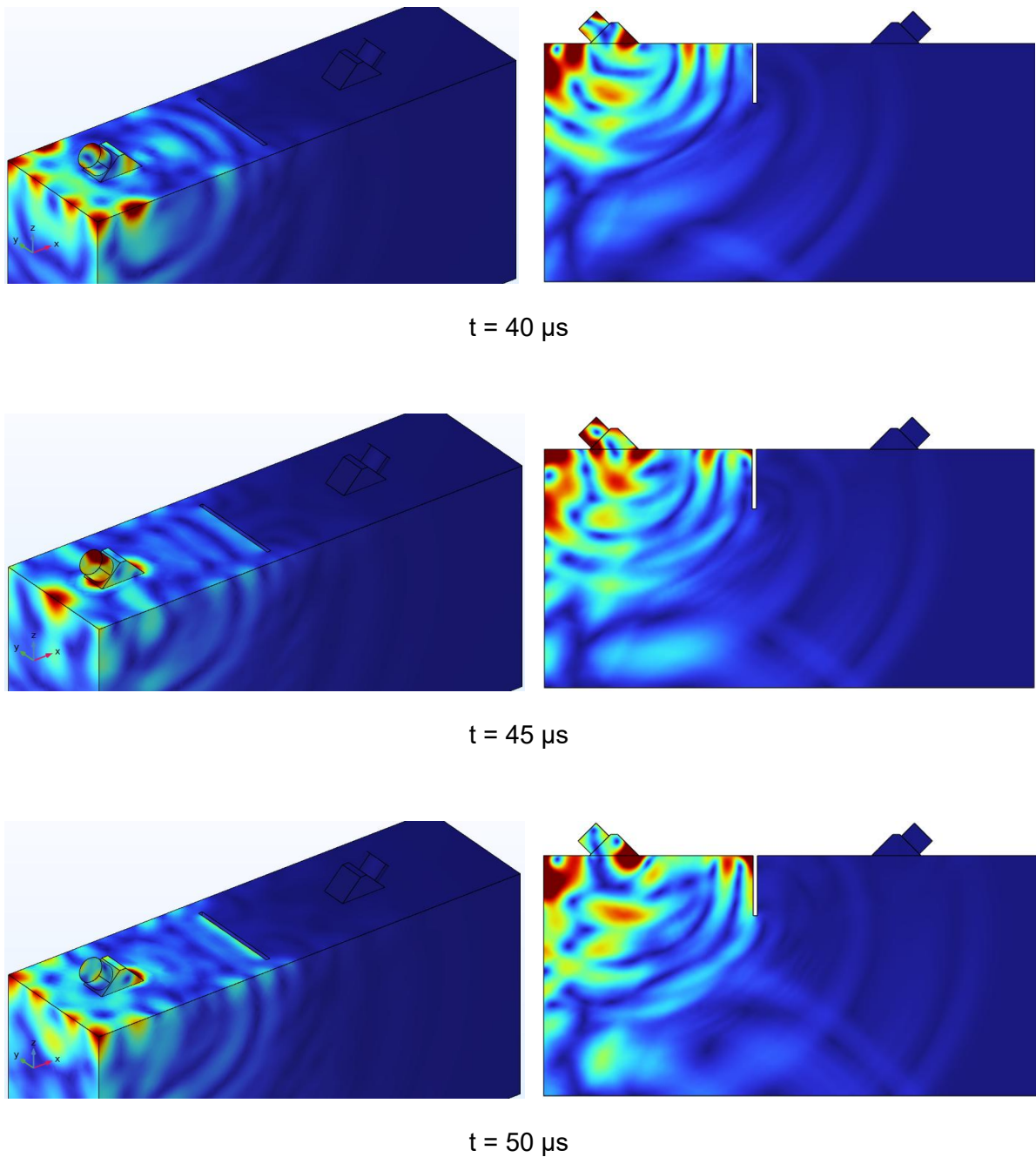


Figura 85. Instantáneas de propagación de ondas frente a fisura de profundidad $H/4$.

4.3.2. Comparativa numérico-experimental

Por otro lado, se llevó a cabo un ensayo experimental utilizando una probeta de madera de abeto, identificada con el código D057. En una primera fase, la muestra fue sometida a un ensayo ultrasónico indirecto, con el propósito de obtener una referencia inicial de los tiempos de vuelo antes de la introducción del defecto.

Posteriormente, se generó una fisura transversal de profundidad $H/6$ con el objetivo de analizar el comportamiento del sistema frente a este tipo de defectos. El ensayo ultrasónico se llevó a cabo considerando separaciones entre transductores comprendidas entre 10 y 50

cm, con incrementos de 5 cm. Se evaluaron dos escenarios distintos: en el primero, la fisura se mantuvo a una distancia constante de 10 cm respecto al transductor emisor (método A), mientras que, en el segundo, la fisura se situó en el punto medio entre los transductores ($D/2$) (método B).

A continuación, se repitió el mismo procedimiento considerando fisuras de mayor profundidad, específicamente $H/4$, $H/3$ y $H/2$, con el fin de evaluar cómo la profundidad del defecto afecta la propagación de las ondas ultrasónicas y el comportamiento del sistema en cada escenario.

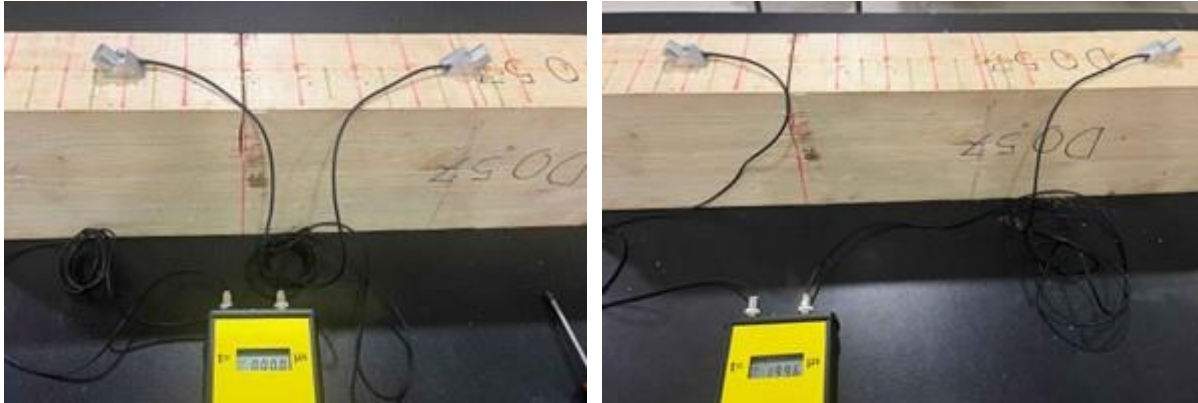


Figura 86. Ensayo en fisuras de profundidad $H/3$ (izq.) y $H/2$ (der.) a 10 cm.

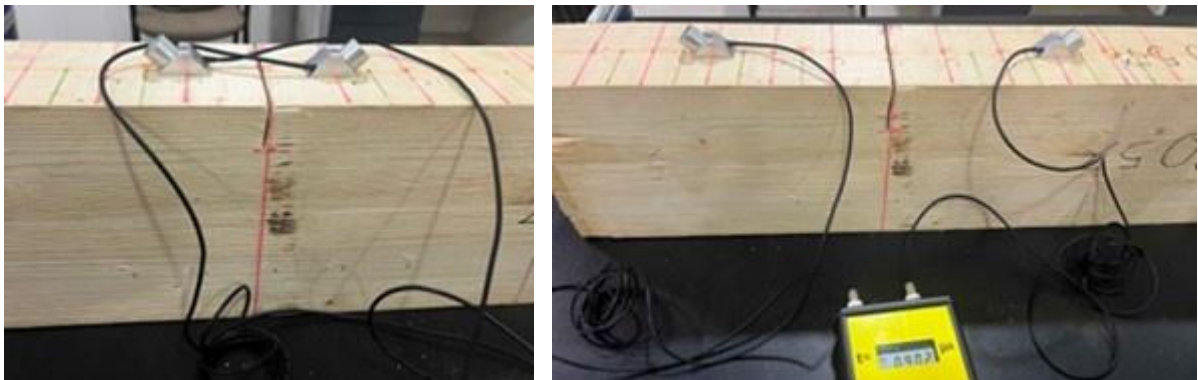


Figura 87. Ensayo en fisuras de profundidad $H/6$ (izq.) y $H/4$ (der.) en $D/2$.

En la Figura 88 se observan diferencias relativas significativas en los tiempos de vuelo registrados respecto a la muestra sin defectos, considerando distintas profundidades de fisura en el punto medio entre transductores ($D/2$). Estas diferencias se intensifican conforme aumenta la profundidad de la fisura, reflejando el impacto creciente de defectos más profundos sobre la propagación de la onda.

Por otra parte, las diferencias disminuyen de manera exponencial a medida que se incrementa la distancia entre transductores, indicando que la influencia del defecto se atenúa con trayectorias de propagación más largas y que la onda tiende a recuperar su comportamiento original a medida que se aleja de la zona afectada.

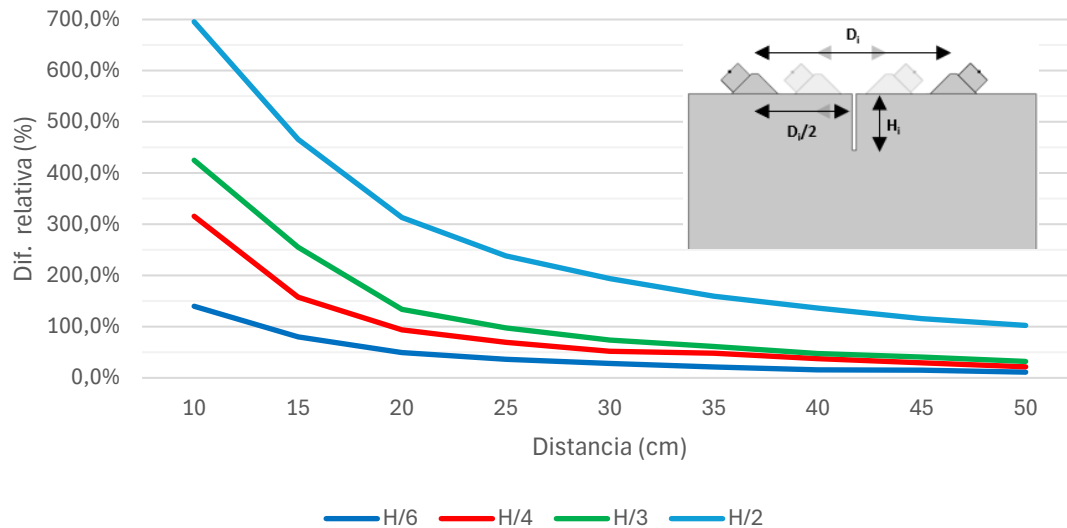


Figura 88. Dif. relativas en ToF, respecto a la probeta sin defectos, con fisura en $D/2$.

Por otra parte, se observa que la influencia del defecto sobre la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas es especialmente significativa, incluso para la fisura de menor tamaño estudiada, de profundidad $H/6$. Este efecto es más pronunciado cuando los transductores se encuentran próximos, disminuyendo la velocidad de propagación localmente, y se recupera de manera gradual a medida que aumenta la separación entre los transductores. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas (ver Figura 84).

De igual manera, se aprecia que, a medida que aumenta la profundidad de la fisura, la reducción en la velocidad de propagación se vuelve más marcada, y la onda requiere recorrer una distancia mayor para recuperar su velocidad original.

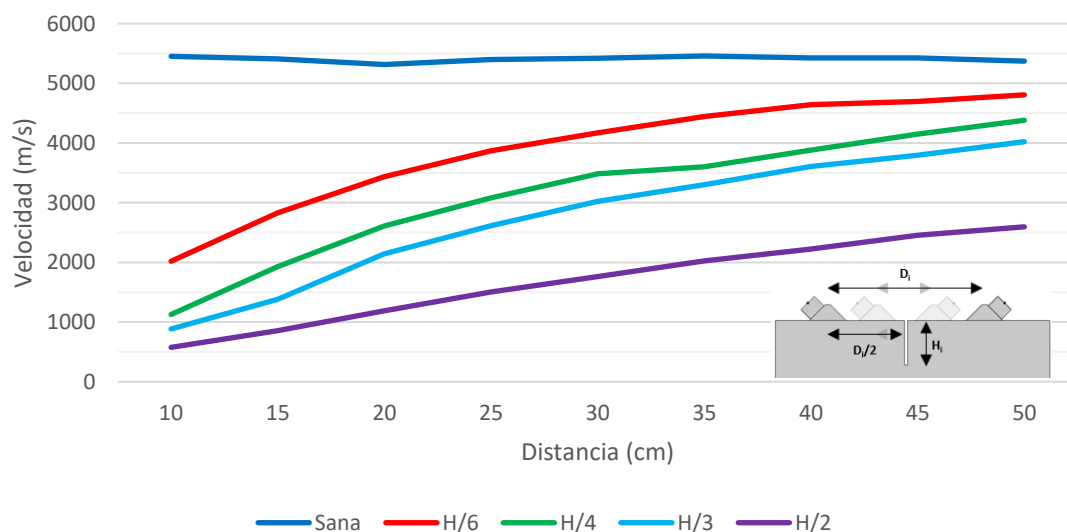


Figura 89. Velocidades de propagación para diferentes profundidades de fisura en $D/2$.

Por otra parte, en la Figura 90 se muestran las diferencias relativas de los tiempos de vuelo para distintas profundidades de fisura ubicadas a 10 cm del transductor emisor. Se observa que el efecto máximo se concentra en la zona inmediatamente posterior a la fisura, decreciendo progresivamente a medida que aumenta la separación entre los transductores, lo que refleja cómo la influencia del defecto se atenúa con la distancia de propagación de la onda.

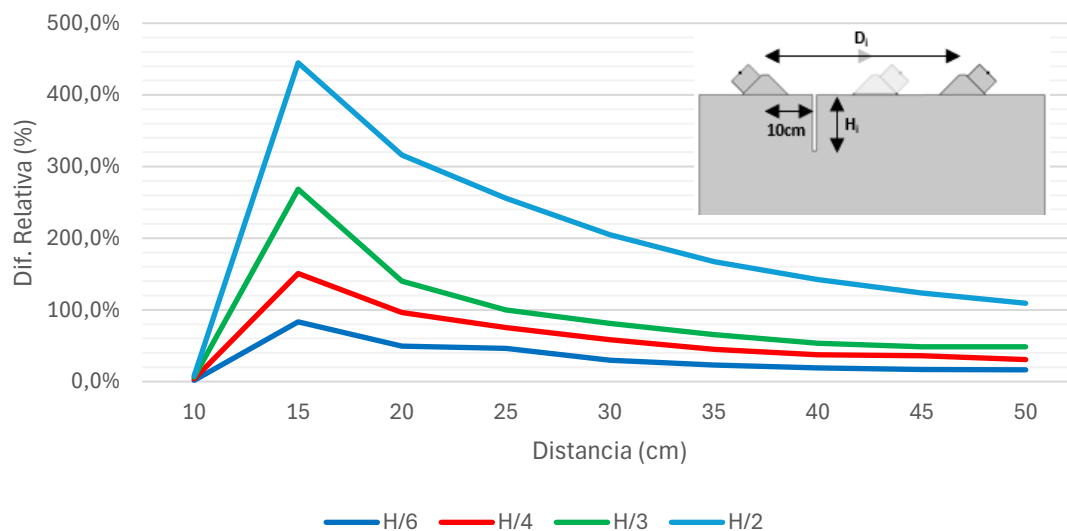


Figura 90. Dif. relativas en ToF, respecto a la probeta sin defectos, con fisura a 10 cm.

En lo que respecta a las velocidades de propagación (Figura 91), se observa una disminución considerable en la zona inmediatamente posterior a la fisura, recuperándose de manera gradual a medida que aumenta la separación entre transductores. Además, a mayor profundidad de la fisura, la reducción en la velocidad de propagación es más pronunciada.

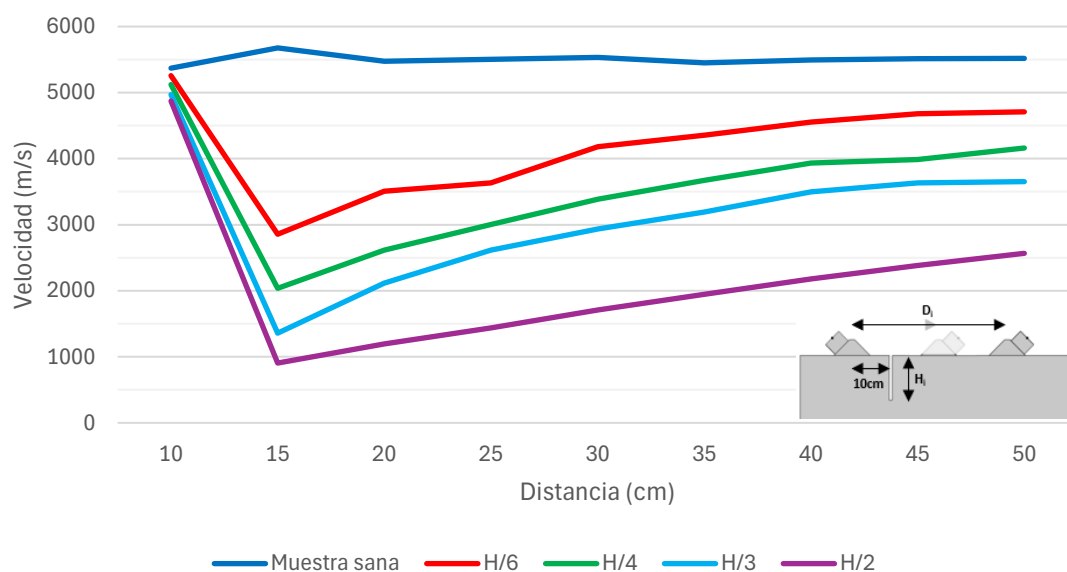


Figura 91. Velocidades de propagación para diferentes profundidades de fisura a 10 cm.

En cualquier caso, aunque el patrón de comportamiento general observado sea similar entre los resultados experimentales y la simulación numérica, se aprecian diferencias notables en la magnitud de los valores obtenidos por ambos métodos. Estas discrepancias pueden atribuirse a que el modelo numérico idealiza las condiciones de propagación ultrasónica, considerando una fisura perfectamente definida, un material isótropo y un contacto óptimo entre transductores y probeta.

En contraste, en la práctica, la madera presenta anisotropía y heterogeneidad microestructural, y las fisuras realizadas presentan geometrías irregulares, lo que incrementa la dispersión y atenuación de las ondas. Adicionalmente, la posibilidad de un acoplamiento imperfecto de los transductores o de la presencia de ruido experimental potencian la influencia del defecto sobre la señal registrada, amplificando las diferencias respecto al modelo numérico.

La combinación de estos factores explica la mayor variabilidad y las desviaciones observadas en los resultados experimentales frente a las predicciones teóricas, destacando las limitaciones inherentes a la idealización en los modelos numéricos.

4.4. INFLUENCIA DE DEFECTOS: NUDOS

4.4.1. Análisis numérico

Con el propósito de evaluar el comportamiento del material ante la presencia de nudos, se ha incorporado en el modelo una inclusión circular de 3 cm de diámetro, representativa de un defecto localizado. Para reproducir las condiciones mecánicas asociadas a la presencia real de un nudo, se ha modificado la asignación de las propiedades al elemento, reduciendo en un 30 % el módulo de Young respecto al valor correspondiente al material base de la muestra.

El nudo se ha dispuesto en diferentes posiciones dentro de la pieza, variando tanto su distancia relativa a los transductores empleados en el ensayo como su profundidad medida desde la superficie superior. Estas variaciones permiten analizar la influencia conjunta de la ubicación y la profundidad del defecto en la respuesta global de la muestra.

En los siguientes apartados, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las configuraciones simuladas, con el fin de analizar la influencia conjunta de la ubicación y la profundidad del defecto en la respuesta medida, así como para identificar patrones en el comportamiento observado.

Análisis de nudo con centro ubicado en la superficie

En el primer caso analizado, el nudo presenta su centro ubicado en la superficie de la muestra, de manera que su punto más alejado se desarrolla hacia el interior de esta. La Figura 92 muestra la geometría y posición del nudo para una separación entre transductores de 15 cm.

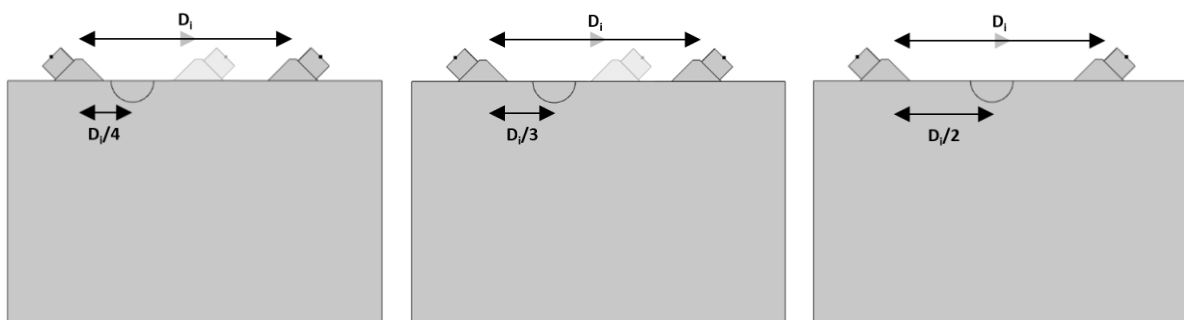


Figura 92. Nudo con centro en superficie en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.).

En primer lugar, los resultados indican que la presencia de nudos en el material ejerce una influencia notablemente menor sobre el tiempo de vuelo (ToF) en comparación con el efecto observado en el caso de las fisuras analizadas en el apartado anterior.

Por otro lado, en el caso particular de un nudo situado en la superficie, se observa que su ubicación longitudinal no presenta incidencia alguna sobre el tiempo de vuelo (en la Figura 93 las tres curvas se superponen). Por último, en este escenario se aprecia que la diferencia

relativa en los tiempos de vuelo aumenta a medida que disminuye la separación entre transductores.

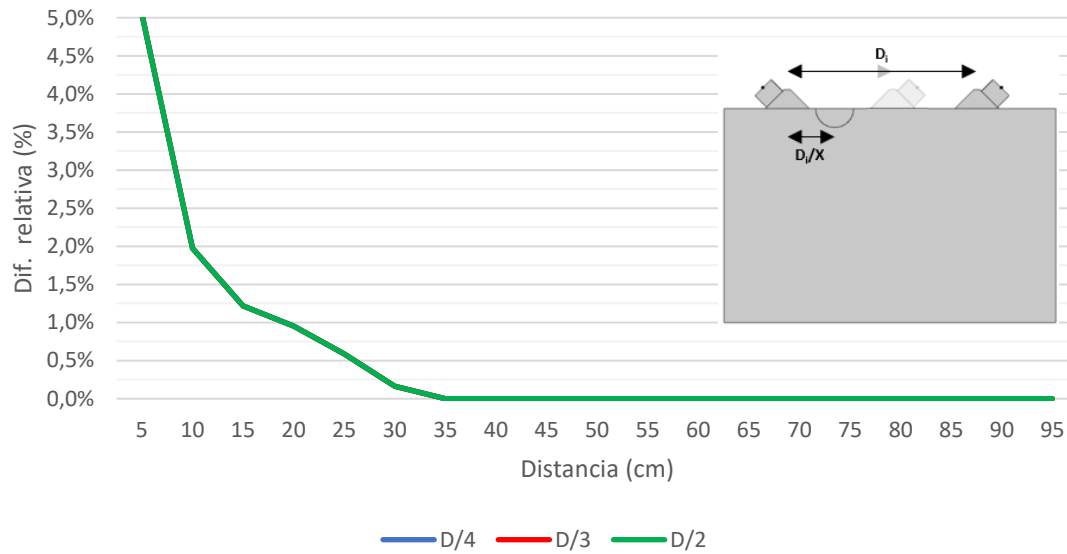


Figura 93. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, con un nudo con la superficie.

Análisis de nudo con centro ubicado a 1/8 del espesor

En el segundo escenario, se conserva la ubicación longitudinal del nudo, pero su centro se sitúa a una profundidad equivalente a un octavo del espesor total de la muestra, lo que se traduce en 14,17 mm.

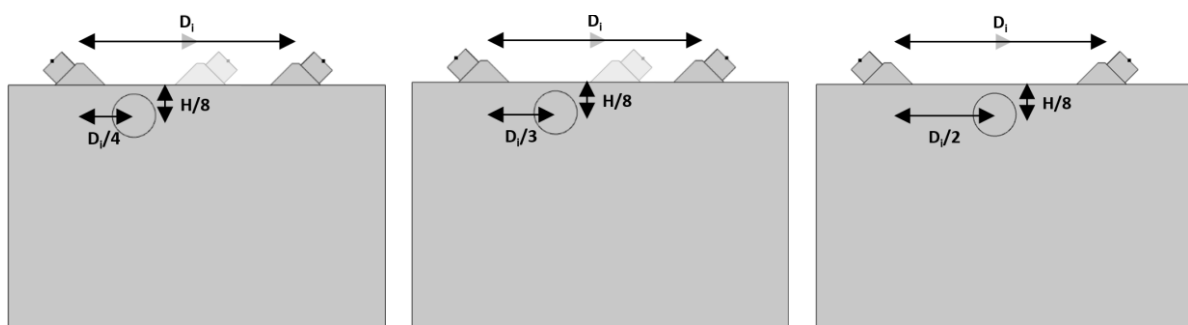


Figura 94. Nudo con centro en $H/8$ del espesor en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.).

A diferencia del caso anterior, en este escenario la ubicación longitudinal es un factor que influye en el tiempo de vuelo registrado, de tal manera que, para un nudo más próximo a un transductor, la diferencia relativa del tiempo de vuelo es ligeramente mayor que para un nudo ubicado en el centro de la separación entre transductores.

Otro aspecto que destacar consiste en que, en este escenario, se observa que el valor máximo de la diferencia relativa en el tiempo de vuelo no se alcanza con la menor separación entre transductores.

En cualquier caso, se confirma nuevamente que el incremento del tiempo de vuelo asociado a este tipo de defecto es significativamente inferior al observado en el caso de fisuras transversales, cuya diferencia relativa máxima superaba incluso el 100 % con respecto de la muestra sin defectos (Figura 84), mientras que en este escenario no supera un 2 %.

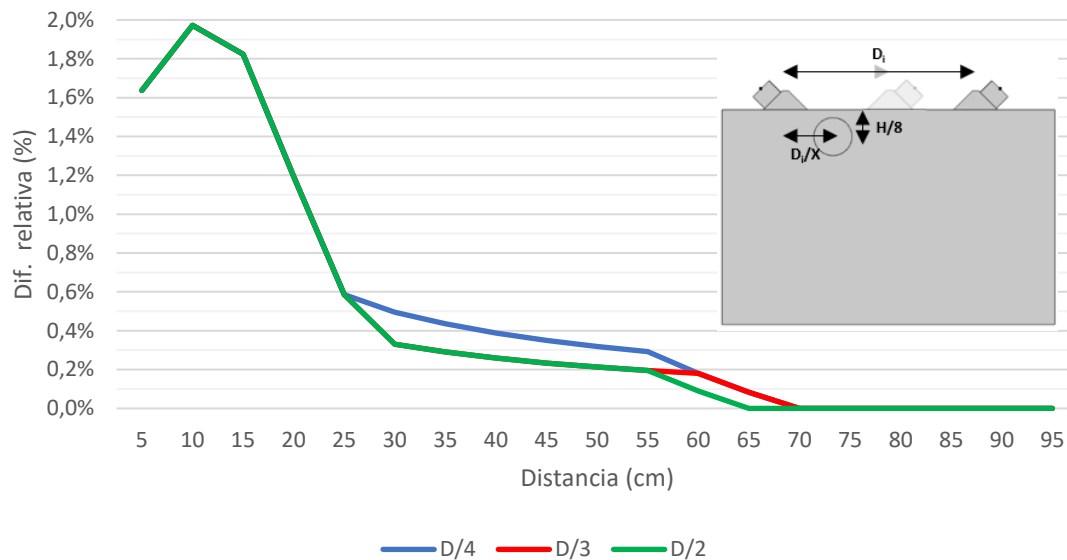


Figura 95. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, con un nudo con centro en $H/8$.

Análisis de nudo con centro ubicado a $1/6$ del espesor

Seguidamente, en el tercer caso, el centro del nudo se ubica a una profundidad equivalente a un sexto del espesor de la muestra, esto es, 28,33 mm, manteniendo inalteradas las demás características respecto al escenario descrito previamente.

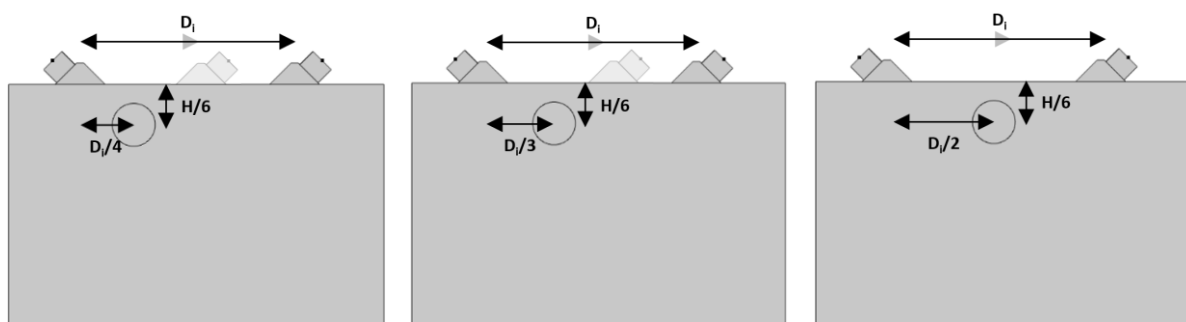


Figura 96. Nudo con centro en $H/6$ del espesor en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.).

En este escenario se aprecia de forma mucho más evidente la influencia que ejerce la proximidad del nudo al transductor sobre el tiempo de vuelo registrado. Así, cuanto más próximo se encuentra un nudo a uno de los transductores, mayor es la diferencia relativa del tiempo de vuelo en comparación con un nudo situado en la posición central entre ambos transductores.

Además, al igual que en el caso anterior, se observa que los nudos ubicados próximos a la superficie dejan de tener una influencia apreciable en el tiempo de vuelo registrado a partir de una determinada distancia de separación entre transductores. Este comportamiento sugiere que, a medida que aumenta dicha separación, la onda se propaga de tal forma que la perturbación provocada por el nudo superficial se atenúa o queda enmascarada por el resto de la propagación, reduciendo su detectabilidad.

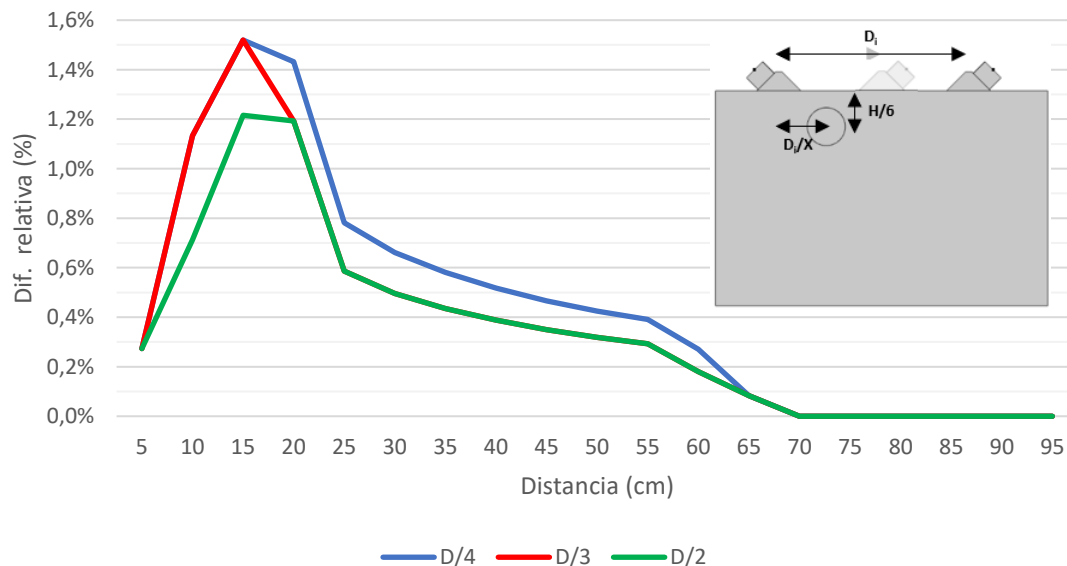


Figura 97. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, con un nudo con centro en $H/6$.

Análisis de nudo con centro ubicado a $1/4$ del espesor

En el cuarto caso, la profundidad del centro del nudo corresponde a un cuarto del espesor de la muestra (42,50 mm), conservando la misma geometría y orientación establecida anteriormente.

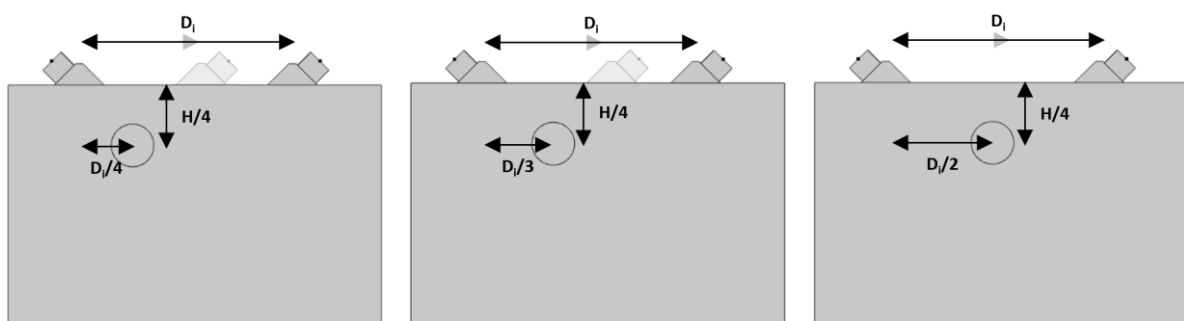


Figura 98. Nudo con centro en $H/4$ del espesor en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.).

Los resultados obtenidos en este escenario parecen indicar que, a partir de una cierta profundidad del nudo, este pasa completamente inadvertido cuando la separación entre transductores es reducida. Luego, en estas condiciones, la perturbación causada por el nudo

no genera una variación lo suficientemente significativa en el tiempo de vuelo como para ser detectada.

Por otra parte, se observa que, a medida que aumenta la profundidad del nudo, el valor máximo de la diferencia relativa en el tiempo de vuelo se desplaza progresivamente, de modo que, cuanto mayor es la profundidad del nudo, más alejado del transductor emisor se sitúa dicho máximo.

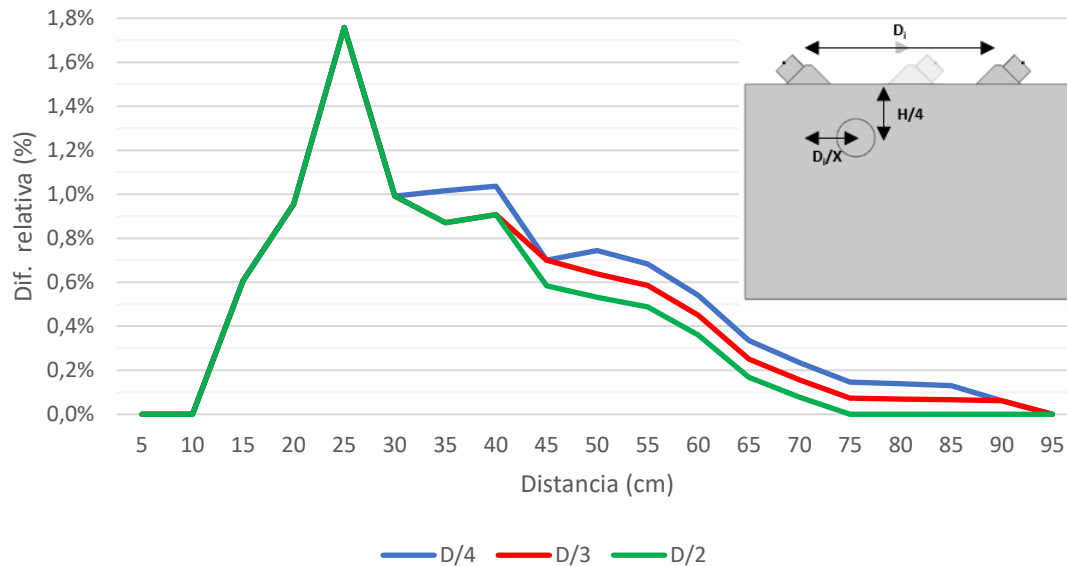


Figura 99. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, con un nudo con centro en $H/4$.

Análisis de nudo con centro ubicado a $1/2$ del espesor

Por último, en el quinto escenario analizado el centro del nudo se sitúa a la mitad del espesor de la muestra, lo que se traduce en 85 milímetros. El resto de características geométricas se mantienen constantes con respecto a los casos descritos previamente.

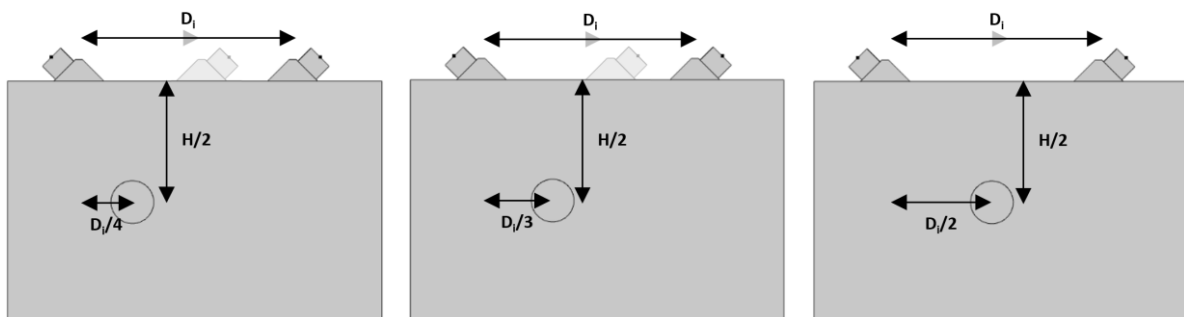


Figura 100. Nudo con centro en $H/2$ del espesor en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.).

Uno de los aspectos más relevantes a destacar en este escenario es la disminución significativa de la influencia que el defecto ejerce sobre el aumento del tiempo de vuelo

registrado. Este comportamiento sugiere que, cuando el nudo se encuentra a una profundidad suficiente, la perturbación que provoca en la propagación de la onda ultrasónica es tan tenue que su capacidad de detección se ve notablemente reducida.

Por otra parte, se confirma nuevamente, y de forma incluso más acusada, que a medida que aumenta la profundidad del nudo este puede pasar completamente inadvertido cuando la separación entre transductores es reducida. En estas condiciones, la geometría de la trayectoria de la onda y la corta distancia de propagación limitan la interacción efectiva entre la señal y el defecto, dificultando así su detección.

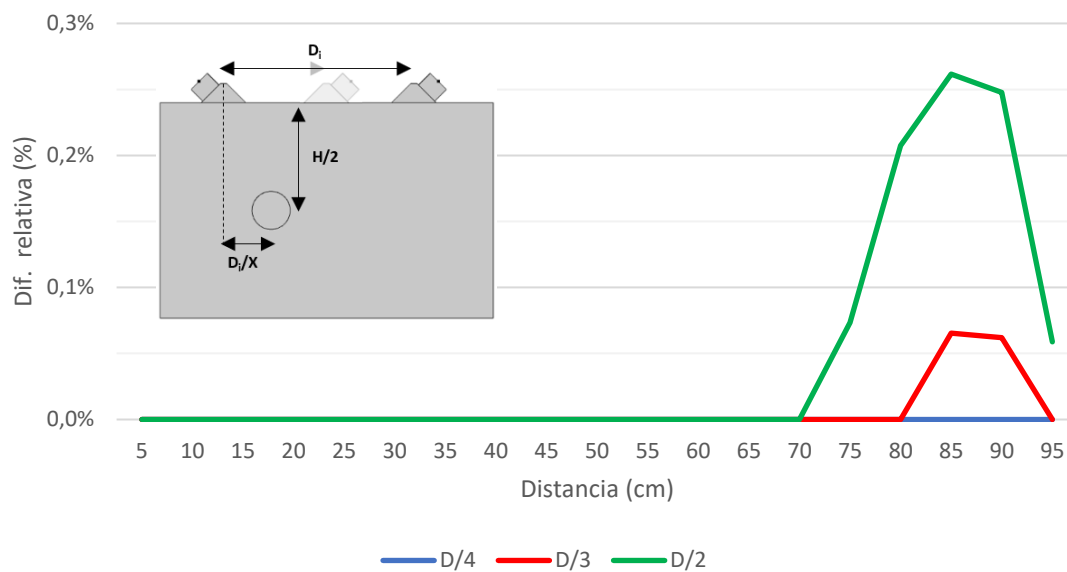


Figura 101. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, con un nudo con centro en $H/2$.

Comparativa en base a la profundidad del nudo

Una vez presentados los datos correspondientes a las distintas posiciones y ubicaciones del nudo, se procede a analizar de forma específica el efecto que ejerce su profundidad sobre el tiempo de vuelo. Con este objetivo, se ha elaborado una figura que recoge los resultados obtenidos para una misma posición longitudinal del nudo, manteniendo constantes el resto de los parámetros y variando únicamente su profundidad.

De esta manera, se pretende aislar el impacto de esta variable y evaluar con mayor claridad cómo la localización vertical del defecto influye en la propagación de la onda ultrasónica y, en consecuencia, en las mediciones del tiempo de vuelo.

En la Figura 102, se presenta la comparación de los resultados obtenidos para diferentes profundidades del nudo, manteniendo constante su ubicación en $D/2$, es decir, en el punto medio entre los transductores. Se pueden apreciar algunos de los hallazgos observados en

los escenarios previos, como que, a medida que aumenta la profundidad del nudo, la influencia de este sobre el tiempo de vuelo disminuye de manera general. En cualquier caso, la influencia de los nudos es limitada y no altera significativamente los resultados obtenidos.

Además, se observa que el valor máximo de la diferencia relativa en el tiempo de vuelo se desplaza hacia separaciones mayores entre transductores, lo que sugiere que existe una relación directa entre la profundidad del nudo y la distancia necesaria para que su efecto sea detectado con mayor claridad. Este comportamiento podría indicar que, a medida que el defecto se encuentra más profundo, se requiere un mayor recorrido de la onda ultrasónica para que la perturbación causada por el nudo se vuelva suficientemente significativa y detectable.

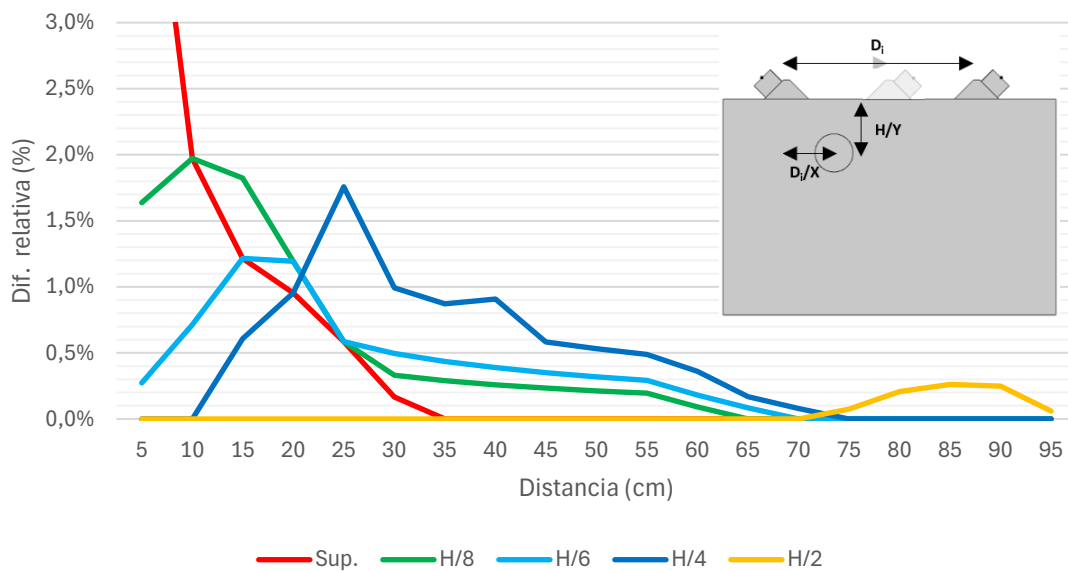


Figura 102. Diferencia relativa del tiempos de vuelo, respecto al modelo sin defectos, para nudo ubicado en $D/2$.

Comportamiento de la propagación ultrasónica ante un nudo

Con el objetivo de analizar con detalle el comportamiento de la propagación de las ondas en la probeta frente a la presencia de un nudo, en la figura siguiente se presentan varias instantáneas correspondientes a intervalos de $5 \mu s$. El modelo utilizado para esta ilustración considera una separación entre transductores de 20 cm y un nudo cuyo centro se ubica a una profundidad equivalente a $H/8$, permitiendo visualizar cómo el defecto afecta la propagación de las ondas.

Se observa que la influencia del nudo en la propagación de las ondas es prácticamente despreciable. Al asumir un contacto perfecto entre el nudo y la probeta, no se generan reflexiones ni otros fenómenos adicionales, y tampoco se aprecia una atenuación significativa de la onda atribuible a la presencia del defecto.

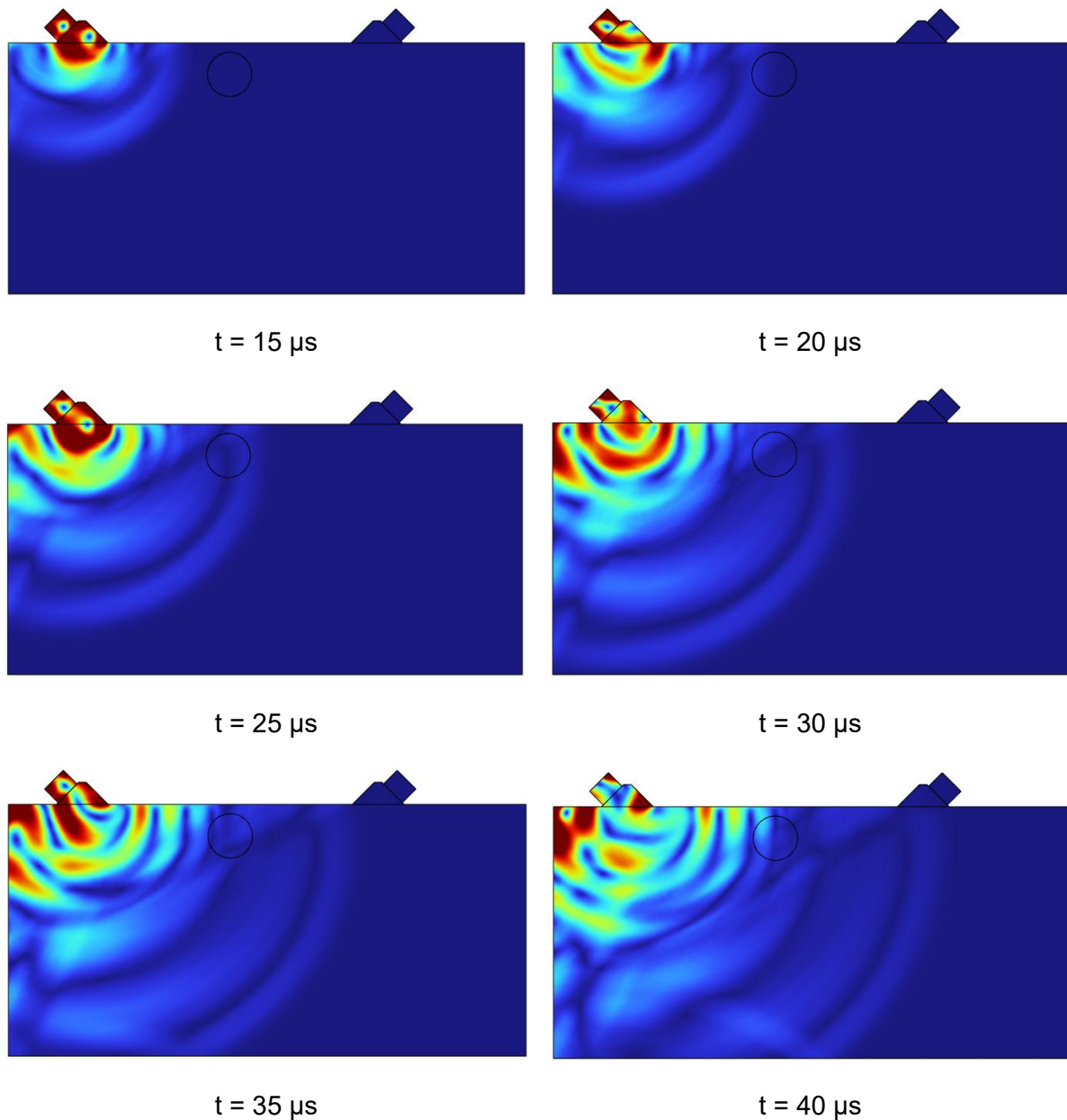


Figura 103. Instantáneas de propagación de ondas frente a nudo de profundidad $H/8$.

4.4.2. Comparativa numérico-experimental

Por otro lado, se ha llevado a cabo un ensayo experimental empleando dos probetas de madera de abeto, seleccionadas con el objetivo de analizar la influencia de la presencia de nudos. La primera muestra, identificada como D051 (Figura 104), fue elegida debido a que presenta una zona afectada por un nudo central y dos nudos laterales, todos ellos localizados en la superficie de la pieza. Esta configuración la convierte en un caso de estudio idóneo para evaluar el efecto de una concentración de defectos tipo nudo.

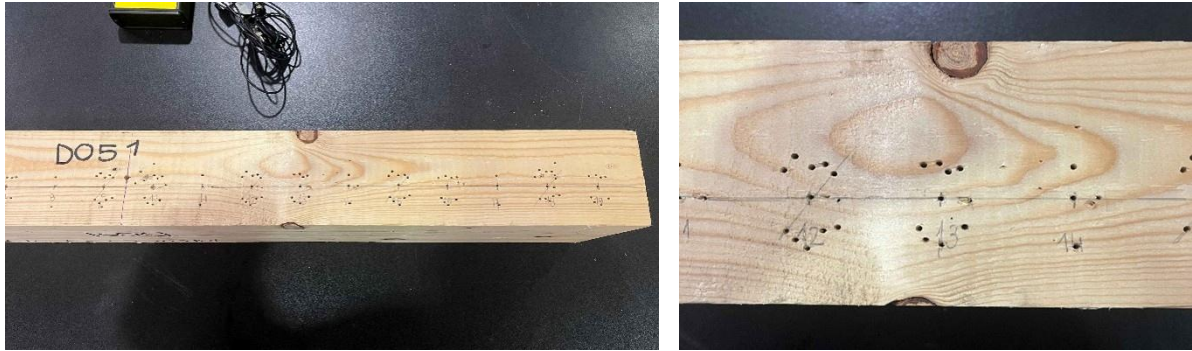
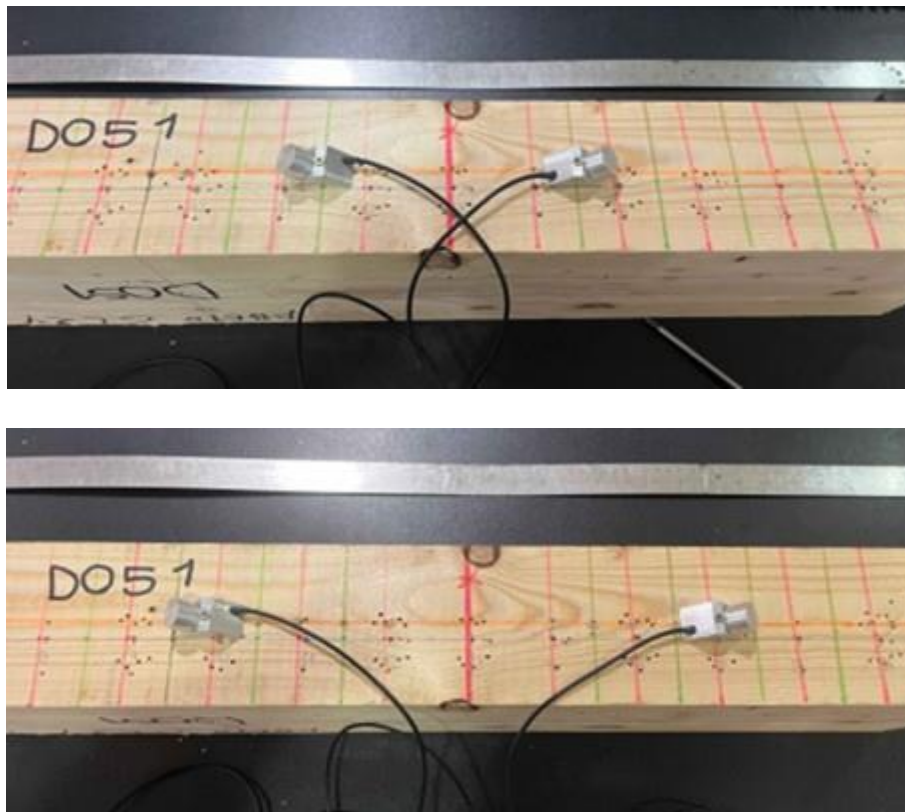


Figura 104. Muestra de madera de abeto D051 con nudo (izq.) y detalle (der.).

Tras marcar la probeta, se llevó a cabo un ensayo ultrasónico indirecto en el que se varió la distancia entre los transductores desde 10 hasta 50 cm, incrementándose en intervalos de 5 cm. Durante el procedimiento, el nudo se mantuvo posicionado en el punto medio de la separación entre los transductores ($D/2$).



*Figura 105. Ensayo experimental sobre muestra D051:
separación de 15 cm (arriba) y 30 cm (debajo).*

En contraste, la segunda muestra, denominada D057 (Figura 106), de la misma especie (abeto), clase resistente (GL24) y mismo lote de fabricación que la probeta D051, fue seleccionada por encontrarse aparentemente en buen estado, sin defectos visibles en su superficie. De esta manera, se pretende utilizar esta muestra como referencia o punto de

comparación, con el objetivo de caracterizar la influencia de la presencia de nudos (probeta D051) mediante la comparación directa con una probeta libre de imperfecciones aparentes (probeta D057).

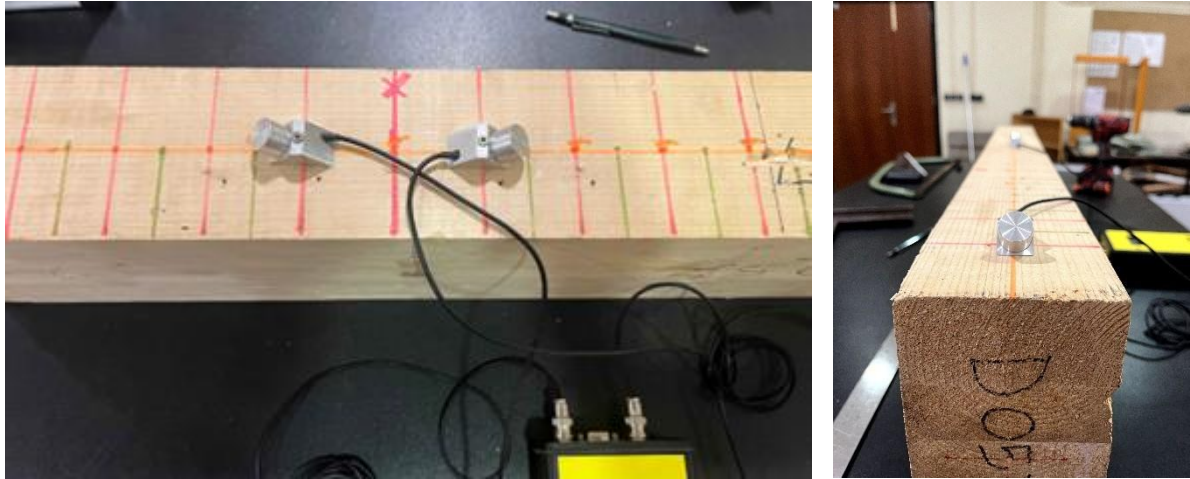


Figura 106. Ensayo en muestra de madera de abeto D057 sin nudo (izq.) y detalle (der.).

En la Figura 107 se muestra la comparativa de los resultados obtenidos de ambos ensayos experimentales. Se observa que la presencia del nudo en la probeta genera un incremento en el tiempo de vuelo registrado, con diferencias relativas superiores al 10% entre ambos casos. Este comportamiento resulta coherente con la teoría de la propagación de ondas en medios heterogéneos, según la cual la presencia de irregularidades, como es el caso de un nudo, produce una mayor atenuación y dispersión, afectando así la velocidad de transmisión en el medio.

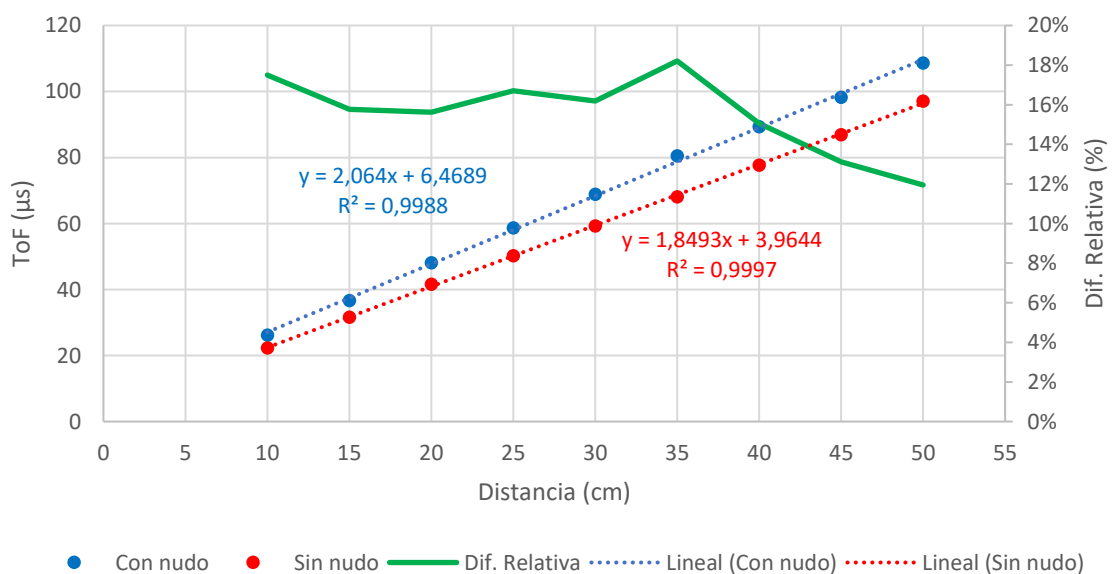


Figura 107. Comparativa de ToF entre muestra D051 (con nudo) y D057 (sin nudo).

Por último, se ha llevado a cabo un análisis comparativo entre los resultados obtenidos experimentalmente y los arrojados por el modelo numérico, considerando un nudo situado en la superficie de la probeta en el punto medio de la separación entre los transductores ($D/2$).

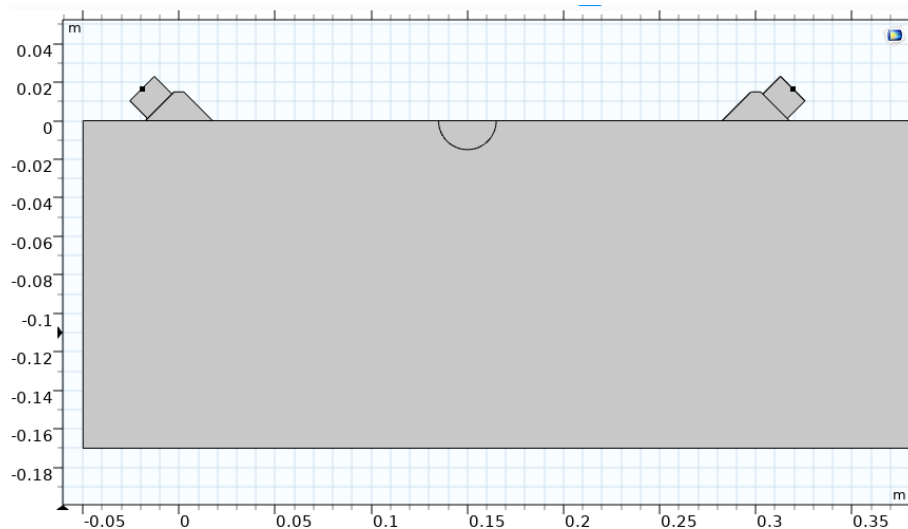


Figura 108. Modelo con nudo en superficie ($D/2$) para una separación de 30 cm.

En la Figura 109 se presenta los resultados del contraste numérico experimental. Se observa que los resultados experimentales tienden a presentar ToF ligeramente superiores a los obtenidos mediante el modelo, especialmente a medida que aumenta la separación entre los transductores.

En este escenario, en los resultados del modelo con separaciones entre transductores superiores a 30 cm, la influencia del nudo resulta muy limitada, como se mostró en el análisis numérico del apartado anterior e ilustrado en la Figura 93. Estas diferencias pueden atribuirse, por un lado, a la complejidad intrínseca del nudo presente en la muestra D051, que representa una zona más heterogénea que la considerada en el modelo, donde las propiedades mecánicas reales podrían estar más afectadas que las asignadas en la simulación, consistentes en una reducción del 30% en el módulo de Young.

Además, en la Figura 104 se es posible apreciar una notoria desviación de las fibras causada por la presencia del nudo central, lo que puede contribuir a las discrepancias observadas entre los resultados experimentales y los arrojados por el modelo. En cualquier caso, las diferencias relativas entre los tiempos de vuelo registrados oscilan entre un 7 y un 14 %.

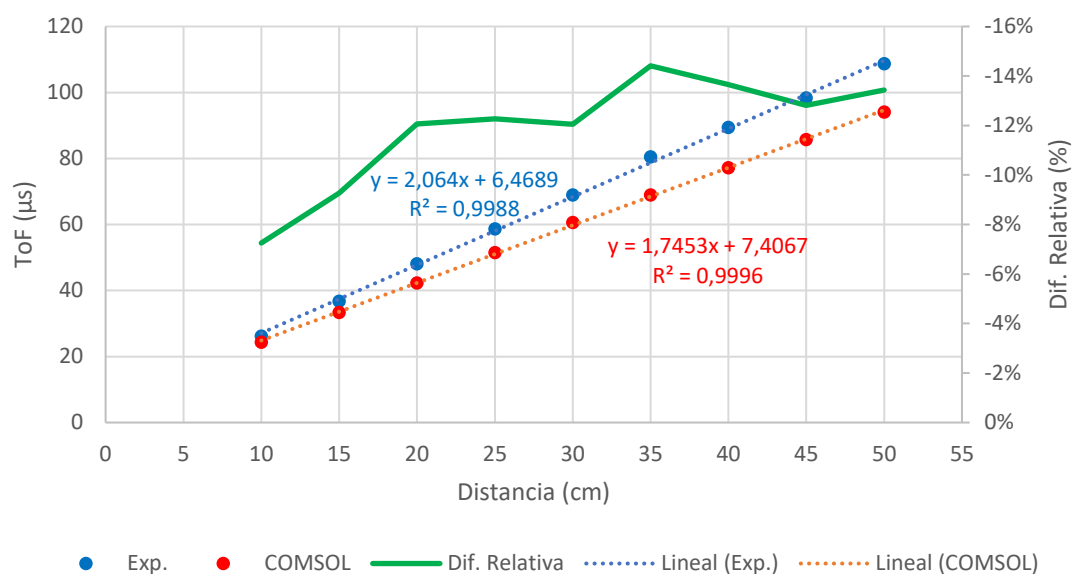


Figura 109. Comparativa de ToF entre muestra D051 (con nudo) y modelo.

4.5. INFLUENCIA DE DEFECTOS: DELAMINACIÓN

Por otra parte, la delaminación se ha modelado mediante la extracción de un área rectangular extremadamente delgada, con un espesor de $10\ \mu\text{m}$ y una anchura variable, con el objetivo de representar la pérdida de adherencia entre dos láminas contiguas de la muestra. Esta simplificación permite reproducir la separación entre capas ocasionada por la degradación o pérdida de efectividad del adhesivo. El análisis se ha desarrollado bajo la hipótesis de un medio isótropo, lo que facilita la interpretación de los resultados y la comparación con casos de referencia.

En lo relativo a la profundidad de la delaminación, se ha buscado que esta coincida con las zonas donde se ubicarían las uniones entre los tablones individuales. Para ello, se ha tomado como referencia la muestra de madera de abeto D047 (ver Figura 67), en la que se observa que la muestra está conformada por cinco tablones horizontales. Con base en esta observación, se han simulado delaminaciones en tres posiciones representativas: a 40, 60 y 80 % de la altura total de la muestra (H), de manera que cada caso corresponda con una posible interfase real entre tablones.

Estudio del efecto de una delaminación de ancho $D/2$

En primer lugar, se ha analizado un escenario en el que la delaminación presenta un ancho equivalente a la mitad de la separación existente entre los transductores, valor que se denota como $D/2$. A modo ilustrativo, en la Figura 110 se muestran los modelos desarrollados para tres configuraciones geométricas, correspondientes a profundidades de la delaminación equivalentes al 40, 60 y 80 % del espesor total del elemento.

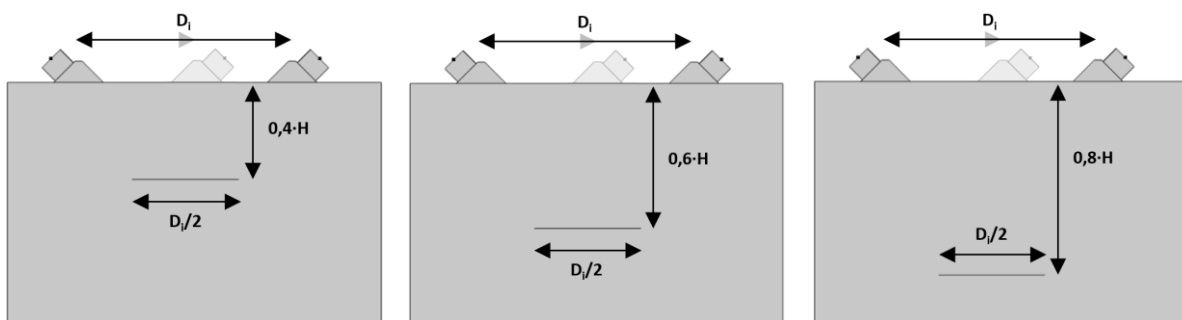


Figura 110. Delaminación de ancho $D/2$ en: $0,4 \cdot H$ (izq.), $0,6 \cdot H$ (centro) y $0,8 \cdot H$ (der.).

A continuación, se muestran las diferencias relativas en los tiempos de vuelo obtenidos respecto del modelo de referencia sin defectos.

Los resultados muestran que la influencia de este tipo de defecto sobre la propagación de las ondas es, en general, moderada o baja, lo que sugiere que el impacto en las mediciones puede pasar inadvertido si no se emplean técnicas de alta resolución.

Por otra parte, se observa una tendencia clara: la influencia disminuye progresivamente a medida que la delaminación se sitúa a mayor profundidad dentro de la muestra. Este comportamiento puede atribuirse a la atenuación de la interacción entre la onda incidente y la discontinuidad, debido al mayor recorrido previo de la señal a través de material intacto, lo que reduce la dispersión y el cambio en la velocidad aparente de la propagación. De esta manera, se deduce que el factor determinante no es el espesor de la grieta frente a la longitud de onda en la madera, sino la condición de contorno que impone, como una superficie libre.

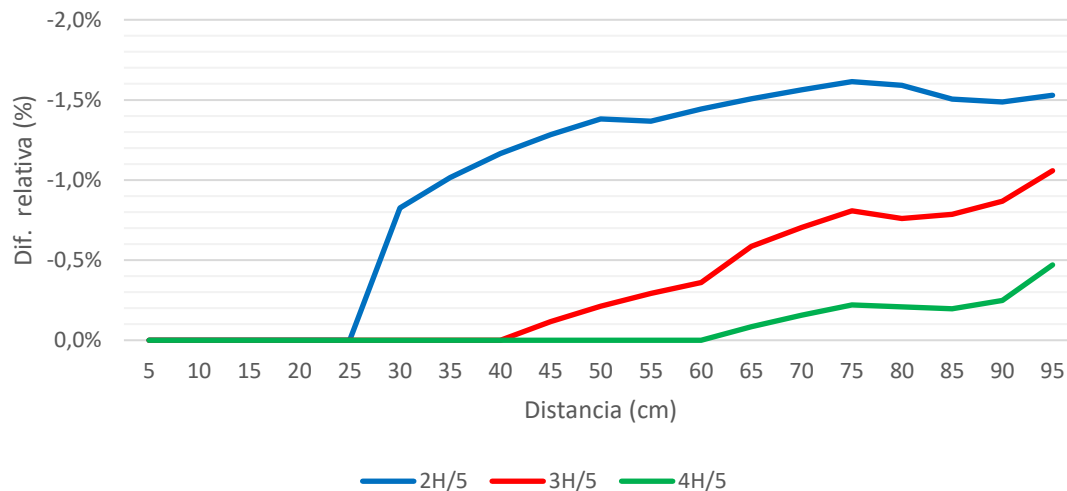


Figura 111. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto del modelo de referencia sin defectos, con una delaminación de ancho $D/2$.

Estudio del efecto de una delaminación de ancho D

Se ha aplicado el mismo procedimiento descrito en el caso anterior, pero en esta ocasión considerando una delaminación con un ancho equivalente a la separación entre transductores, valor que se denota como D . A modo ilustrativo, en la figura siguiente se presenta los modelos desarrollados para las tres configuraciones geométricas, donde se aprecia la geometría de la delaminación y su ubicación relativa dentro de la muestra.

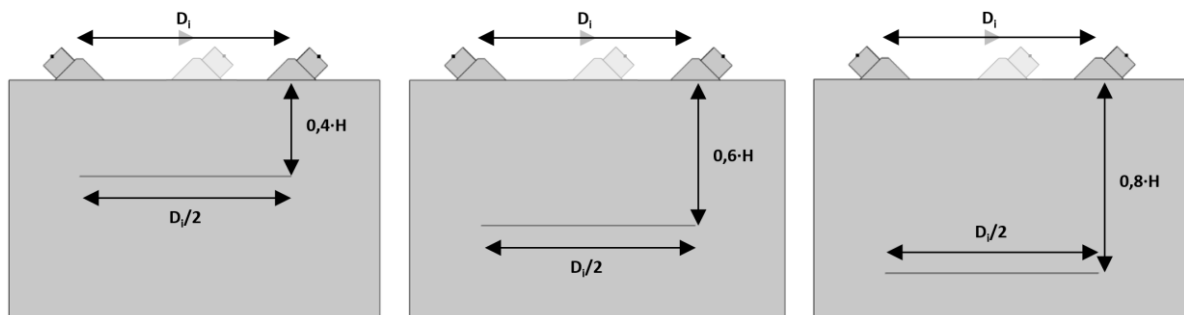


Figura 112. Delaminación de ancho D en: $0,4 \cdot H$ (izq.), $0,6 \cdot H$ (centro) y $0,8 \cdot H$ (der.).

De igual modo que en el escenario previo, se analiza la diferencia relativa en los tiempos de vuelo con respecto al modelo de referencia sin defectos. Este análisis confirma la tendencia

observada en el caso anterior: las delaminaciones superficiales o próximas a la superficie ejercen un impacto más significativo sobre el tiempo de vuelo, al interactuar de manera más directa con la onda incidente en las primeras fases de su propagación. En cambio, cuando la delaminación se encuentra a mayores profundidades, su efecto se atenúa notablemente, lo que dificulta su detección mediante esta técnica. Esta reducción de sensibilidad se debe, en gran medida, a la menor perturbación que experimenta la señal tras atravesar un mayor espesor de material íntegro, lo que limita las variaciones en la velocidad aparente y en la trayectoria de la onda. En cualquier caso, los resultados sugieren que la influencia de este tipo de defectos es muy limitada, pudiendo ser prácticamente inapreciables si se realizara un ensayo experimental.

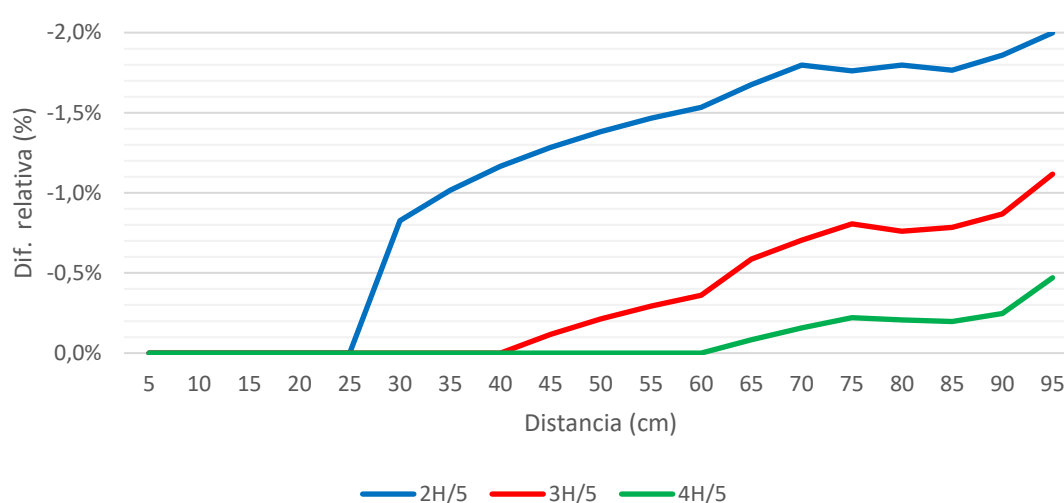


Figura 113. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto del modelo de referencia sin defectos, con una delaminación de ancho D .

Comportamiento de la propagación ultrasónica ante una delaminación

Con el objetivo de analizar con detalle el comportamiento de la propagación de las ondas en la probeta frente a la presencia de una delaminación, en la siguiente figura se presentan varias instantáneas correspondientes a intervalos de $5 \mu\text{s}$. El modelo utilizado para esta ilustración considera una separación entre transductores de 20 cm y una delaminación con una anchura D (20cm) y profundidad equivalente a $0,4 \cdot H$, permitiendo visualizar cómo el defecto afecta la propagación de las ondas.

Se observa que la presencia de la delaminación afecta visiblemente la propagación de las ondas, aunque su impacto en los resultados medidos sea prácticamente despreciable. Se identifican fenómenos de reflexión y difracción, y la delaminación actúa como una barrera que impide la transmisión de energía hacia el fondo de la probeta.

Esto genera una atenuación significativa de la onda en las zonas profundas, mientras que en la parte superior la propagación permanece prácticamente inalterada, lo que explica que los

resultados no presenten variaciones destacables, ya que la onda que alcanza el transductor receptor no se ve afectada prácticamente por el defecto.

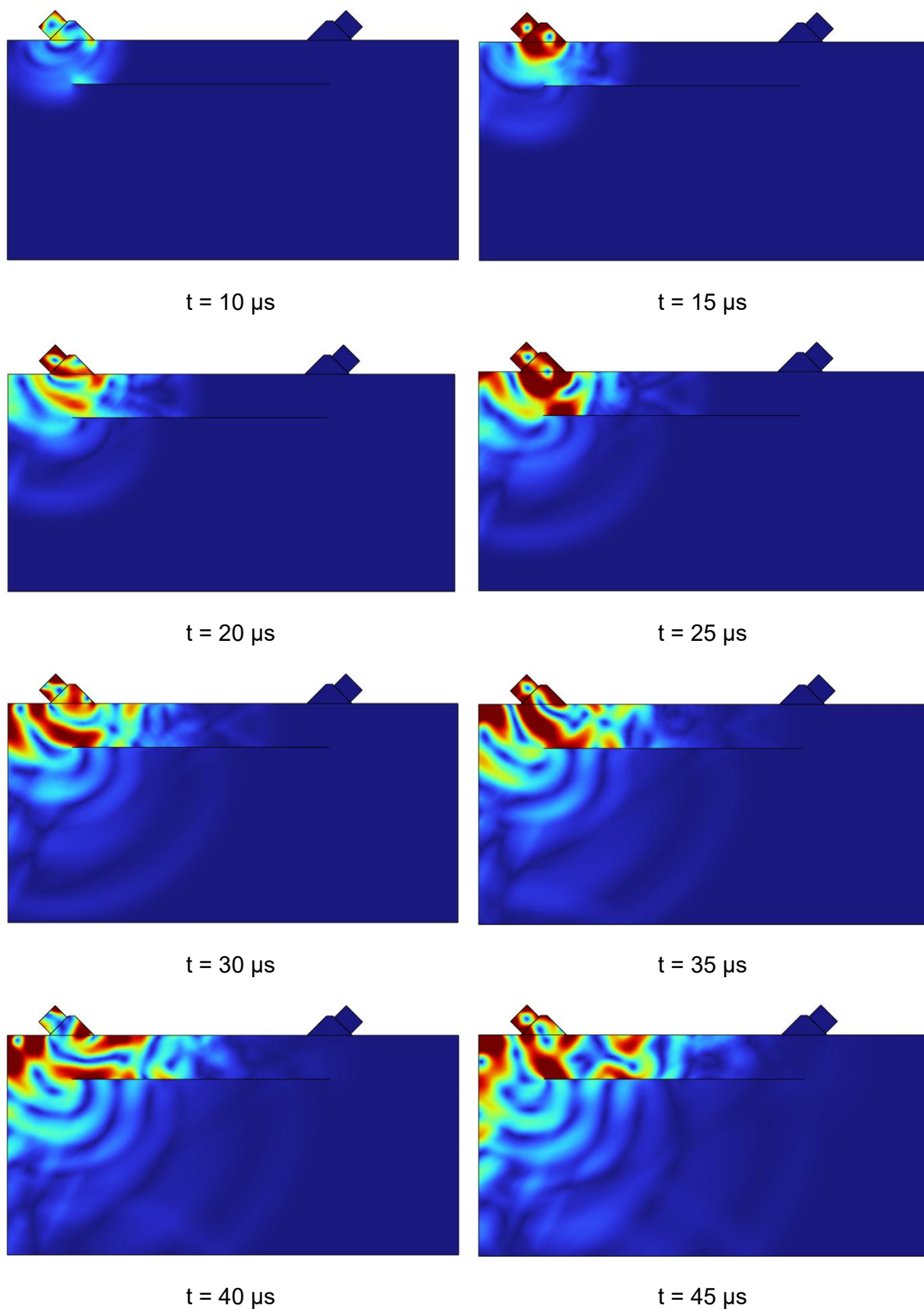


Figura 114. Instantáneas de propagación frente a delaminación con profundidad $0,4 \cdot H$.

4.6. INFLUENCIA DE DEFECTOS: ATAQUE BIÓTICO

4.6.1. Análisis numérico

En este apartado, se ha incorporado en el modelo la simulación de un ataque biótico, como el causado por insectos xilófagos. Este ataque se ha representado mediante la extracción de 100 cavidades circulares en la muestra, con diámetros comprendidos entre 1 y 3 mm, distribuidos de manera aleatoria sobre un área rectangular de 10×5 cm.

Esta estrategia pretende reproducir de forma simplificada la heterogeneidad y aleatoriedad típicas de los daños bióticos en madera, ofreciendo un escenario que se asemeje a las condiciones reales.

Ataque biótico ubicado a $D/4$, $D/3$ y $D/2$ del emisor

Una vez definido el ataque biótico, se llevaron a cabo simulaciones numéricas sobre una muestra de madera de abeto. Para estudiar el efecto de la degradación sobre la propagación de ondas, el patrón de daños se introdujo en tres posiciones relativas: $D/2$, $D/3$ y $D/4$, donde D representa la separación entre los transductores utilizados en la medición.

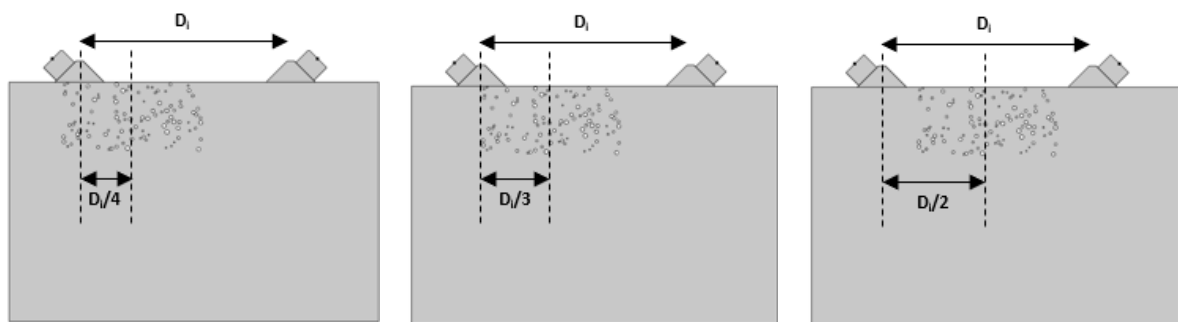


Figura 115. Ataque biótico ubicado en: $D/4$ (izq.), $D/3$ (centro) y $D/2$ (der.).

Los resultados obtenidos se presentan a continuación y se comparan con aquellos derivados del mismo análisis realizado bajo la hipótesis de un material sin defectos. Se observa que la presencia del ataque biótico ejerce una influencia apreciable sobre los tiempos de vuelo de las ondas, superior a la registrada frente a otros defectos típicos, como nudos o delaminaciones, con diferencias relativas cercanas al 5% en los primeros 20 cm de separación entre transductores. A medida que la distancia entre los transductores incrementa, esta influencia tiende a disminuir de forma progresiva, lo que refleja un efecto más localizado del daño biótico sobre la propagación de las ondas en la madera.

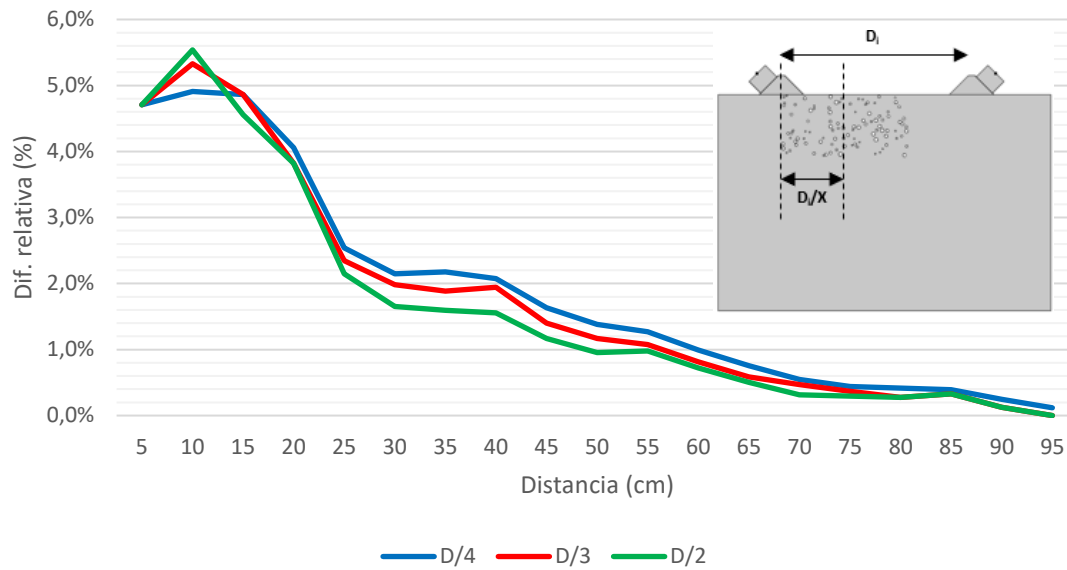


Figura 116. Diferencia relativa en tiempos de vuelo, respecto del modelo de referencia sin defectos, de muestra con ataque biótico.

Ataque biótico ubicado a 10 cm del emisor

Se ha seguido el mismo procedimiento descrito en el caso anterior, aplicándolo en esta ocasión a un ataque biótico localizado a una distancia constante del transductor emisor. Para ello, el patrón de ataque se introdujo a 10 y 30 cm del emisor. El objetivo de este análisis es evaluar cómo se comporta la propagación de las ondas y cómo varían los tiempos de vuelo registrados a medida que el transductor receptor se aproxima o se aleja del defecto.

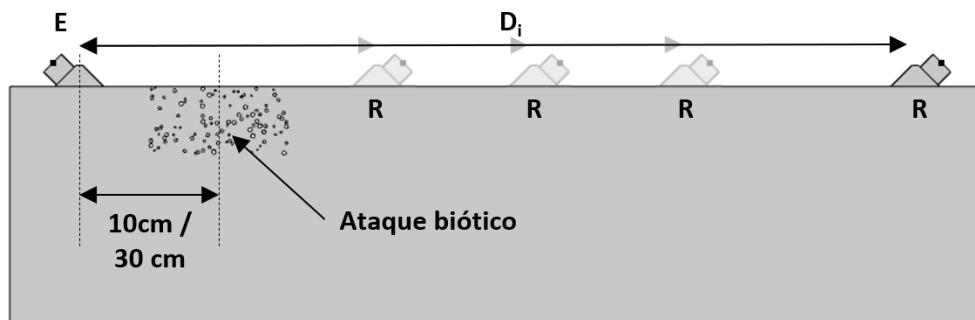


Figura 117. Ataque biótico ubicado a 10 cm del emisor.

Al igual que en el caso anterior, los resultados muestran un incremento apreciable en los tiempos de vuelo, alcanzando su valor máximo cuando el transductor receptor se encuentra inmediatamente después del área deteriorada.

Este comportamiento indica que la presencia del ataque biótico provoca un efecto localizado en la propagación de las ondas, concentrando su impacto en la zona próxima al daño y disminuyendo progresivamente a medida que el receptor se aleja del mismo.

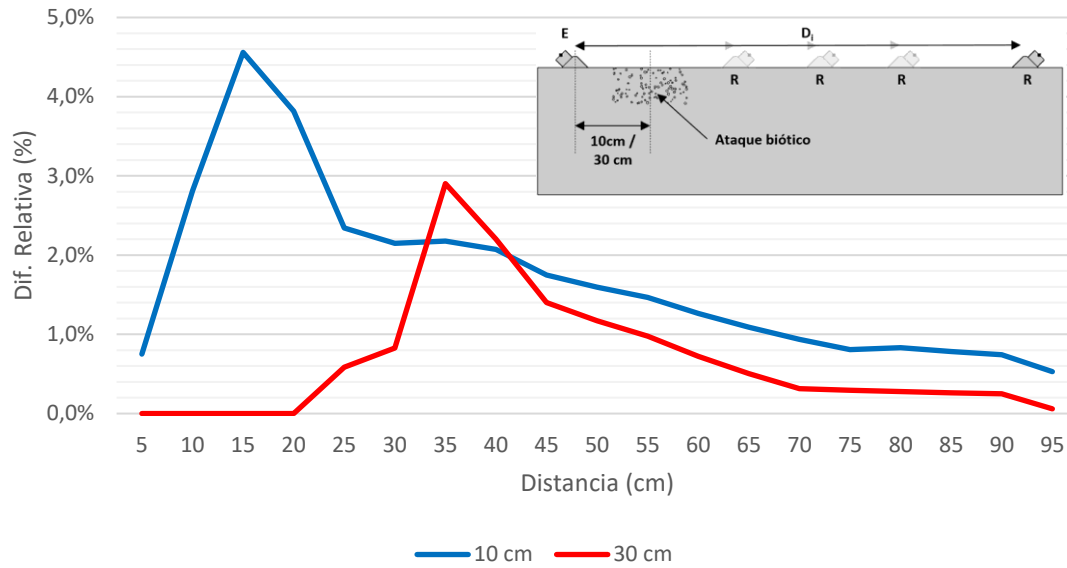


Figura 118. Diferencia relativa en ToF, respecto del modelo de referencia sin defectos, con ataque biótico ubicado a 10 y 30 cm.

Por otra parte, se observa una disminución de la velocidad de propagación, la cual alcanza su valor mínimo en la zona inmediatamente posterior al área deteriorada.

A medida que la separación entre los transductores aumenta, esta velocidad se recupera gradualmente, indicando que el efecto del daño biótico sobre la propagación de ondas es principalmente local y tiende a diluirse con la distancia.

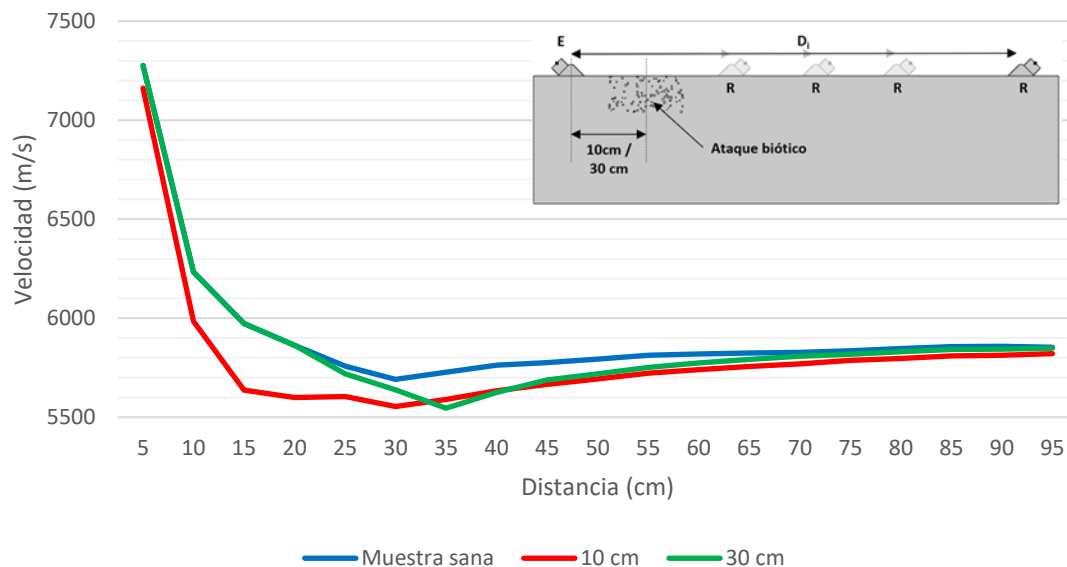
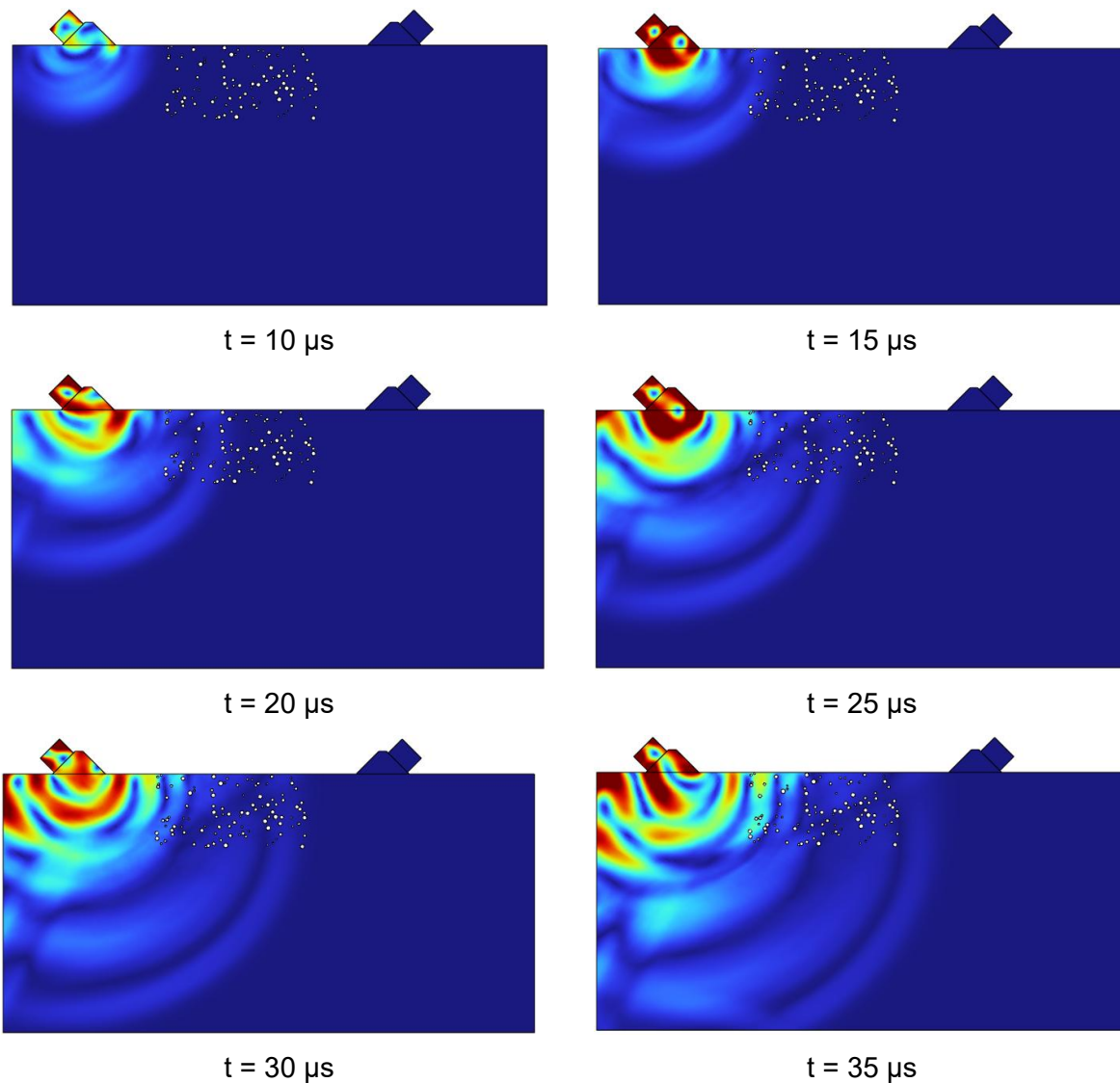


Figura 119. Velocidad de propagación con ataque biótico ubicado a 10 y 30 cm.

Comportamiento de la propagación ultrasónica ante un ataque biótico

Con el objetivo de analizar con detalle el comportamiento de la propagación de las ondas en la probeta frente a la presencia de una degradación por agentes bióticos, en la siguiente figura se presentan varias instantáneas correspondientes a intervalos de $5 \mu\text{s}$. El modelo utilizado para esta ilustración considera una separación entre transductores de 20 cm y la agresión biótica concentrada alrededor de la posición $D/2$.

Se observa que la influencia del ataque biótico en la propagación de las ondas es prácticamente despreciable. Dada la naturaleza puntual de las cavidades y de la diferencia de magnitud entre la longitud de onda de la onda propagada y las cavidades del ataque biótico, la onda se mantiene prácticamente inalterada y no se observa que se generen reflexiones ni otros fenómenos adicionales, ni se aprecia una atenuación significativa de la onda atribuible a la presencia del defecto.



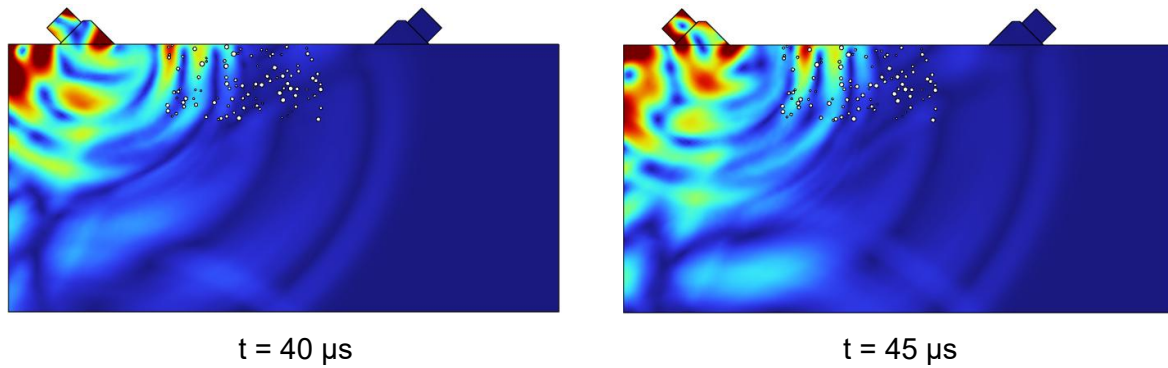


Figura 120. Instantáneas de propagación de ondas frente a un ataque biótico.

4.6.2. Comparativa numérico-experimental

Por otro lado, se llevó a cabo un ensayo experimental utilizando una probeta de madera de abeto, identificada con el código D051. En una primera fase, la muestra fue sometida a un ensayo ultrasónico indirecto, con el propósito de obtener una referencia inicial de los tiempos de vuelo antes de la introducción del defecto.

A continuación, la probeta fue sometida a un proceso de inducción del defecto mediante perforaciones realizadas con un resistógrafo IML-RESI PD-Series. Para ello, se definió un área de 10×5 cm en cada una de las caras laterales de la muestra. En dichas superficies se efectuaron un total de 50 perforaciones, distribuidas de manera aleatoria, con el objetivo de simular el deterioro característico asociado a un ataque biótico.

Ataque biótico ubicado en D/2

Una vez inducido el defecto en la probeta, se procedió a realizar, en primer lugar, un ensayo indirecto empleando separaciones entre transductores comprendidas entre 10 y 50 cm, con incrementos de 5 cm. Durante el procedimiento, el área degradada se mantuvo en la posición central entre transductores (D/2, siendo D la separación entre transductores).

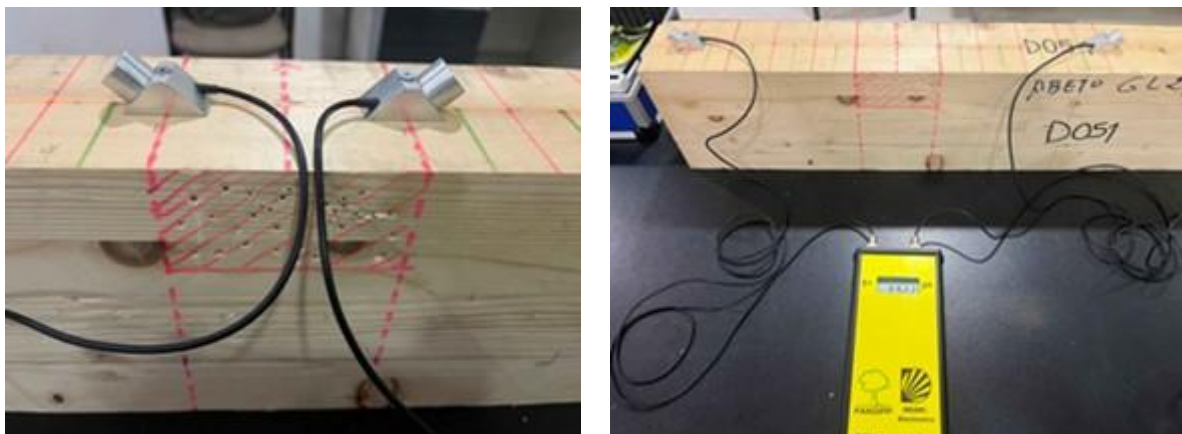


Figura 121. Ensayo con ataque biótico en D/2. Separaciones de 10 (izq.) y 50 cm (der.).

Ataque biótico ubicado a 10 cm

Posteriormente, y siguiendo una metodología similar a la del ensayo anterior, se efectuó un nuevo ensayo indirecto. En esta ocasión, se mantuvo una separación constante de 10 cm entre el transductor emisor y el centro del área degradada, mientras que el transductor receptor fue desplazado progresivamente, variando su distancia respecto al emisor desde 10 hasta 50 cm, en incrementos de 5 cm.



Figura 122. Ensayo con ataque biótico ubicado a 10 cm del transductor emisor.
Separaciones de 10 (izq.) y 30 cm (der.).

En la Figura 123 se muestra la comparación de las velocidades de propagación de la probeta D051, registradas antes y después de la ejecución de perforaciones destinadas a simular un ataque biótico.

Los resultados muestran un descenso apreciable de la velocidad de propagación en la zona afectada, que se atenúa progresivamente conforme aumenta la distancia entre transductores, indicando una menor influencia relativa del defecto en trayectorias de propagación más largas.

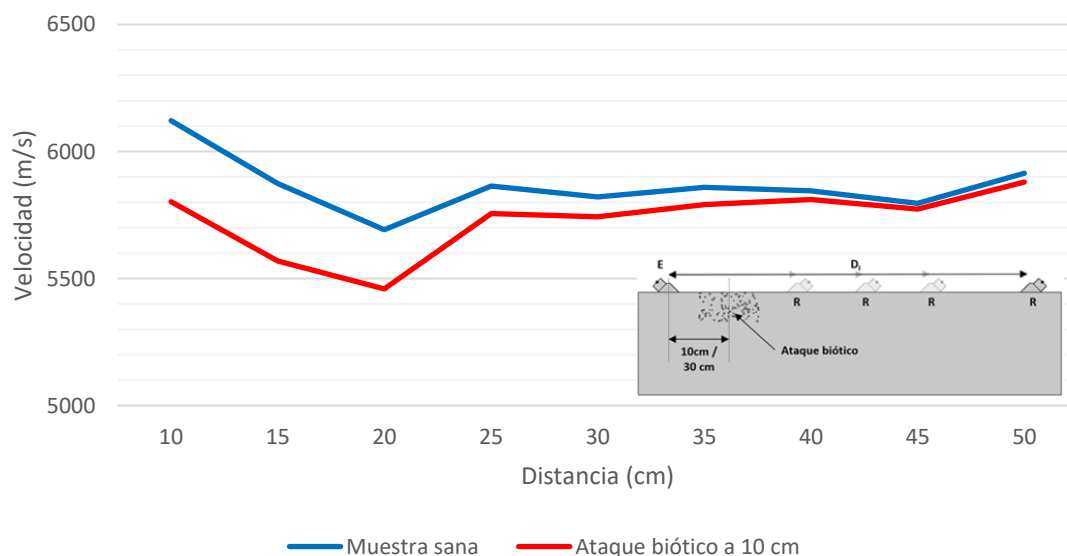


Figura 123. Comparativa de velocidades de propagación en la muestra D051 sana y con ataque biótico a ubicado a 10 cm del transductor emisor.

Por último, se realizó un análisis comparativo entre los resultados obtenidos experimentalmente y las predicciones del modelo numérico, considerando un escenario de ataque biótico representado mediante 50 perforaciones de 3 mm de diámetro, distribuidas de forma aleatoria en la probeta (Figura 54).

En primer lugar, se analiza el escenario en el que el área degradada se encuentra en el punto central entre transductores ($D/2$). Se aprecian valores similares en los resultados obtenidos por ambos métodos, con diferencias relativas inferiores al 10 %.

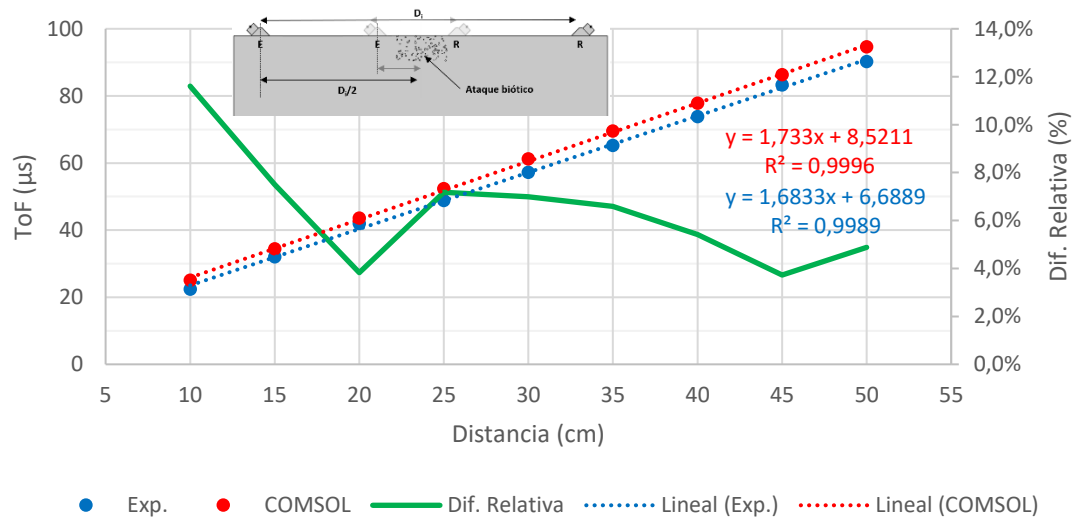


Figura 124. Tiempos de vuelo experimentales y simulados con ataque biótico a $D/2$.

No obstante, resulta especialmente relevante analizar la variación de los tiempos de vuelo, tanto los medidos experimentalmente como los obtenidos por el modelo numérico, en comparación con los de la muestra sana, respectivamente. En la Figura 125 se observa que, en ambos casos, las curvas presentan un comportamiento similar, mostrando que la presencia del ataque biótico ejerce una influencia relativamente limitada, concentrándose principalmente en las separaciones más cortas entre transductores.

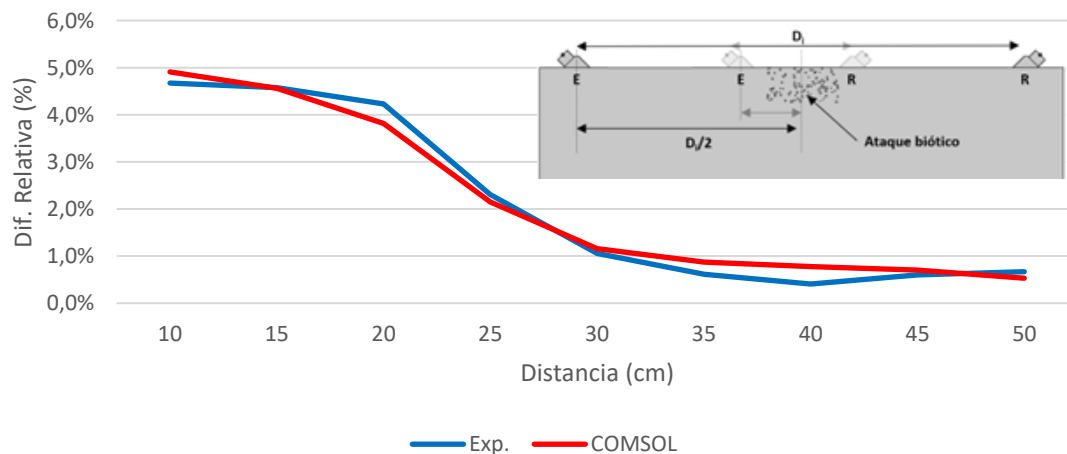


Figura 125. Dif. relativa en ToF con respecto de muestra sana. Ataque biótico en $D/2$.

En un segundo escenario, se analizó la situación en la que el área degradada se ubicaba a una distancia constante de 10 cm respecto al transductor emisor. Nuevamente, los resultados obtenidos mediante ensayo experimental y modelo numérico mostraron un comportamiento similar, con diferencias relativas inferiores al 10 %.

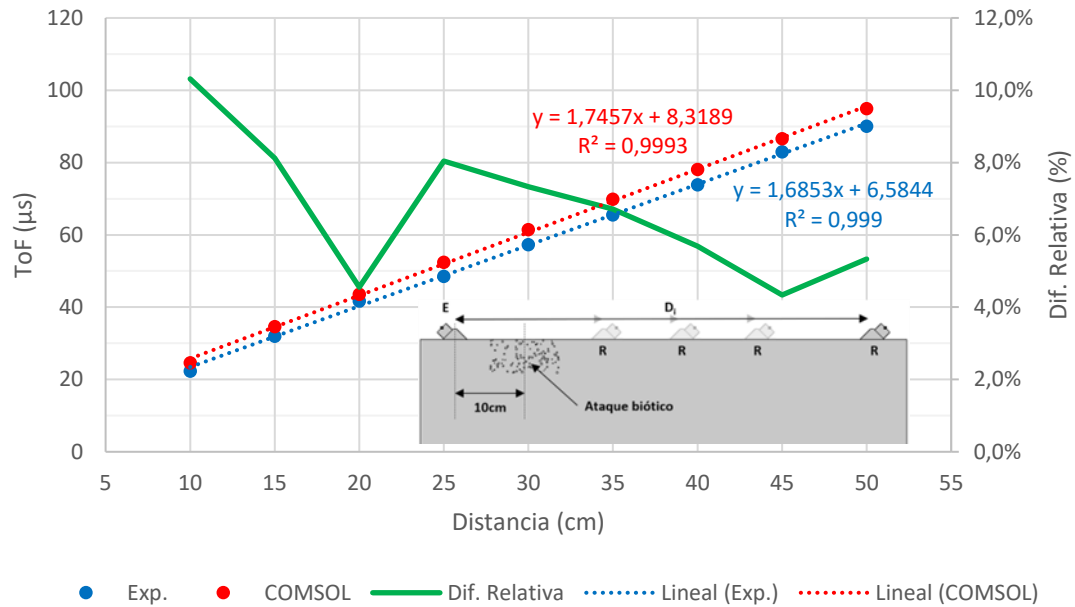


Figura 126. Tiempos de vuelo experimentales y simulados con ataque biótico a 10 cm.

Al analizar la variación de los tiempos de vuelo en comparación con los de la muestra respectiva sana, se observa nuevamente un comportamiento similar en ambas curvas. La máxima influencia del ataque biótico se concentra en la zona inmediatamente posterior al defecto, siendo esta afectación relativamente limitada y disminuyendo rápidamente a medida que aumenta la separación entre transductores.

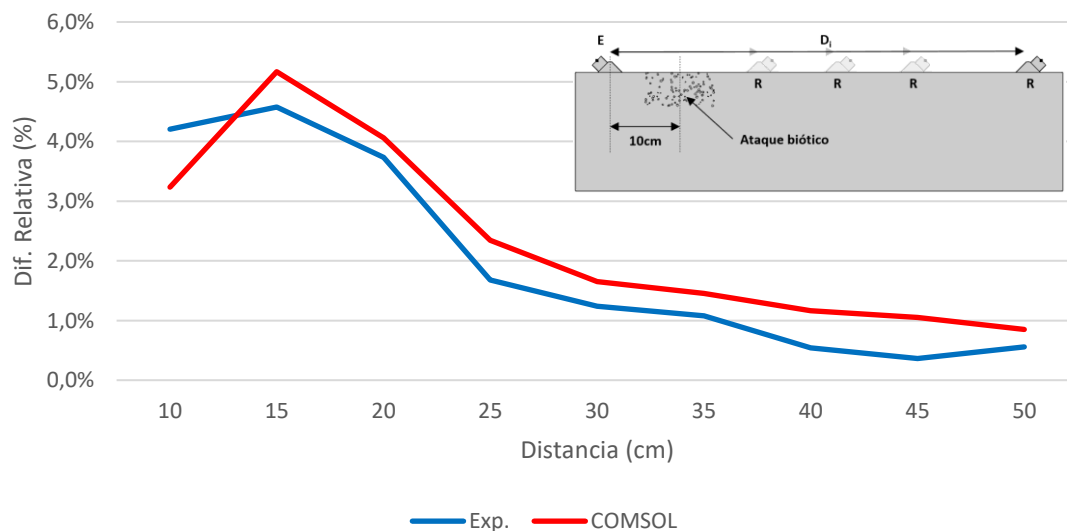


Figura 127. Dif. relativa en ToF con respecto de muestra sana. Ataque biótico a 10 cm.

4.7. INFLUENCIA DE LA ORTOTROPÍA

Con el objetivo de estudiar una representación más realista del comportamiento de la madera, se ha considerado su naturaleza anisótropa, modelándola como un material ortótropo. Bajo este enfoque, se han asignado valores diferenciados a sus propiedades elásticas (módulo de Young, coeficientes de Poisson y módulos de elasticidad transversal) en cada una de las tres direcciones ortogonales principales asociadas a su estructura: longitudinal, radial y tangencial. Por otra parte, el aluminio se ha mantenido con un comportamiento isotrópico, empleando las mismas propiedades elásticas uniformes utilizadas en los casos descritos previamente.

Estudio en muestras sanas de madera de abeto

Una vez definidas y asignadas las propiedades correspondientes al material, incorporando su comportamiento ortótropo, se procedió a la realización de simulaciones numéricas sobre una muestra estructural en estado sano. Los resultados obtenidos se presentan a continuación y se contrastan con los derivados del análisis equivalente realizado bajo la hipótesis de un comportamiento isotrópico.

Se observa un incremento significativo en los tiempos de vuelo, del orden del 20 %, respecto a los valores obtenidos en el caso isotrópico. Este aumento se asocia a la reducción de la velocidad de propagación de las ondas en la dirección vertical del modelo, efecto directamente atribuible a la anisotropía introducida al caracterizar el material como ortótropo. La diferencia observada pone de manifiesto la relevancia de considerar la naturaleza direccional de las propiedades elásticas de la madera en la predicción del comportamiento del sistema.

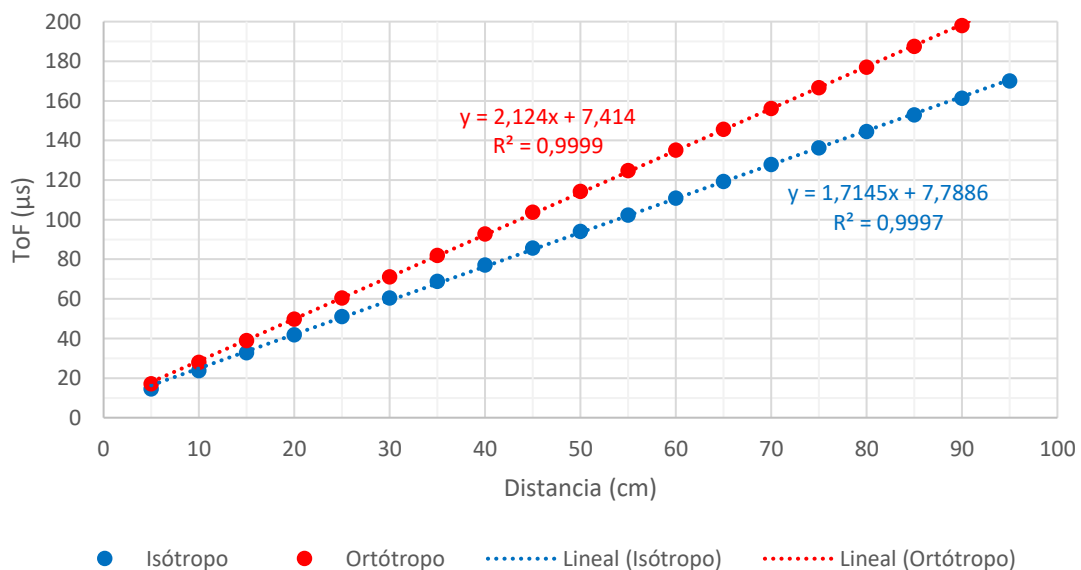
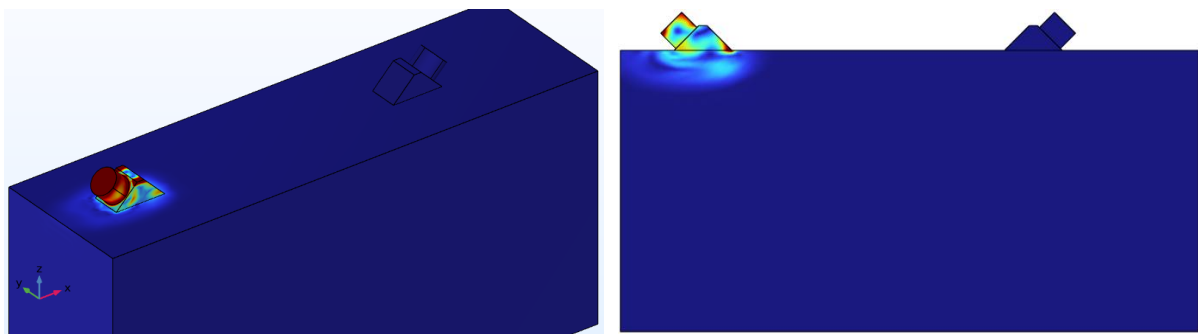


Figura 128. Comparación de tiempos de vuelo considerando medio isótropo y ortótropo.

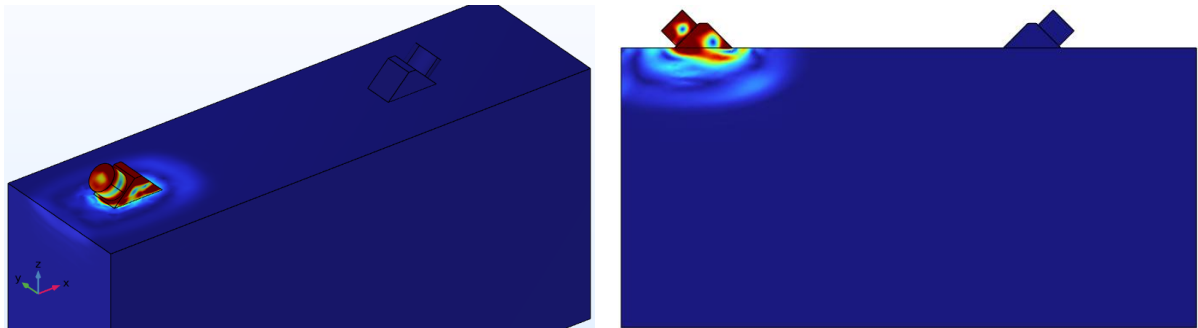
Comportamiento de la propagación ultrasónica en medio ortótropo

Con el objetivo de analizar con detalle el comportamiento de la propagación de las ondas en la probeta modelándola como un medio ortótropo, en la figura siguiente se presentan varias instantáneas correspondientes a intervalos de 5 μs . El modelo utilizado para esta ilustración considera una separación entre transductores de 20 cm.

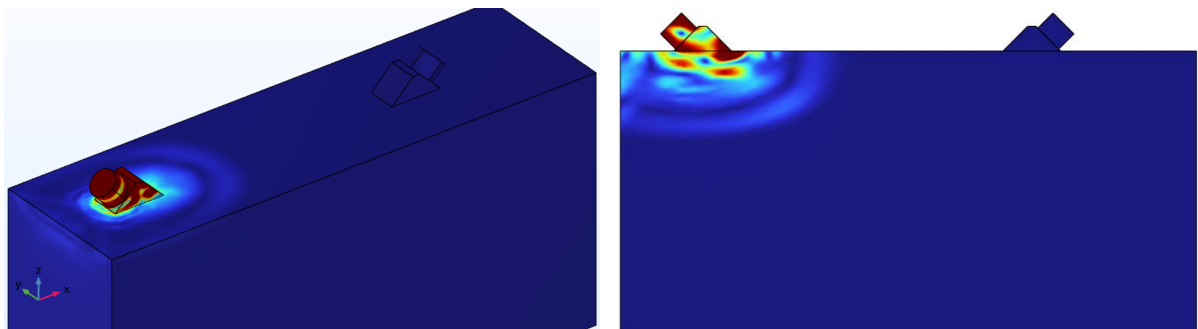
Se observa que la influencia de la ortotropía en la propagación de las ondas es particularmente notable en la dirección vertical, considerada como la dirección radial de la madera, donde se registra una menor velocidad de propagación. Como resultado, el frente de onda deja de ser circular y adopta una forma elíptica, con el semieje mayor orientado en la dirección longitudinal.



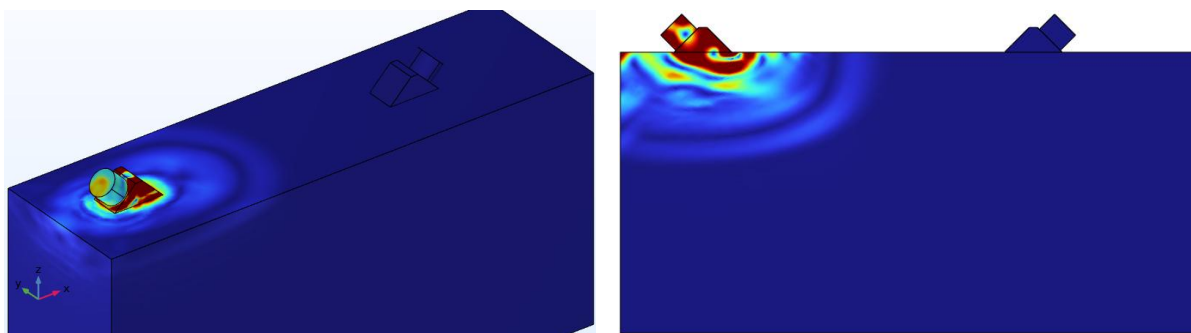
$t = 10 \mu\text{s}$



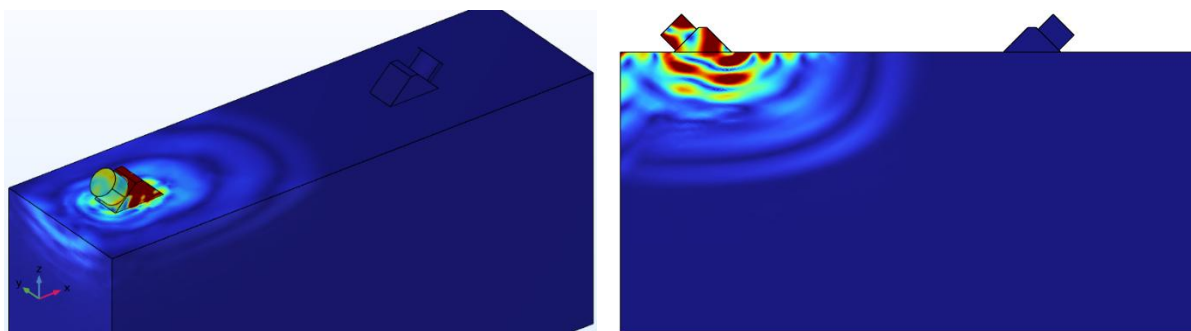
$t = 15 \mu\text{s}$



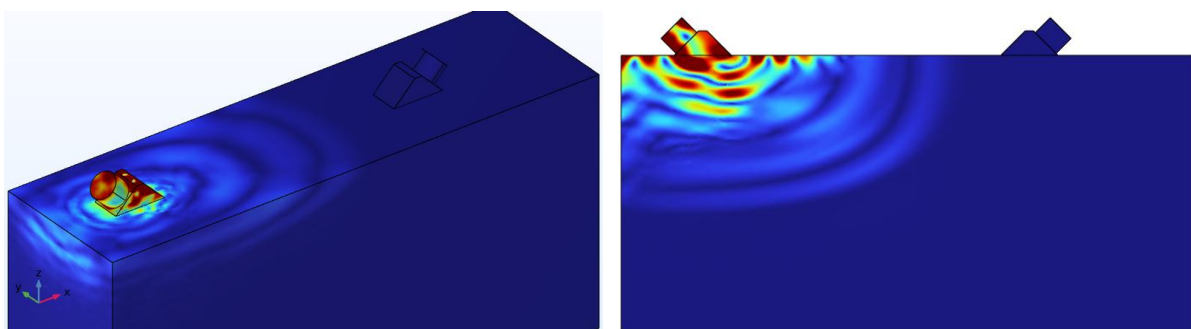
$t = 20 \mu\text{s}$



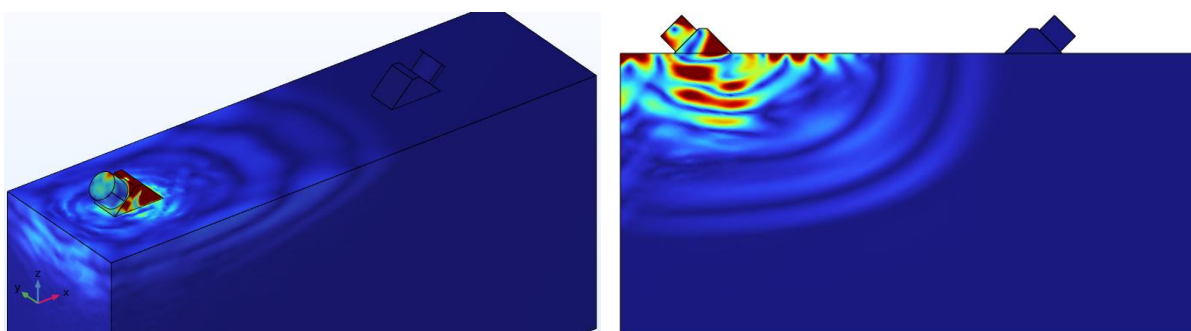
$t = 25 \mu\text{s}$



$t = 30 \mu\text{s}$



$t = 35 \mu\text{s}$



$t = 40 \mu\text{s}$

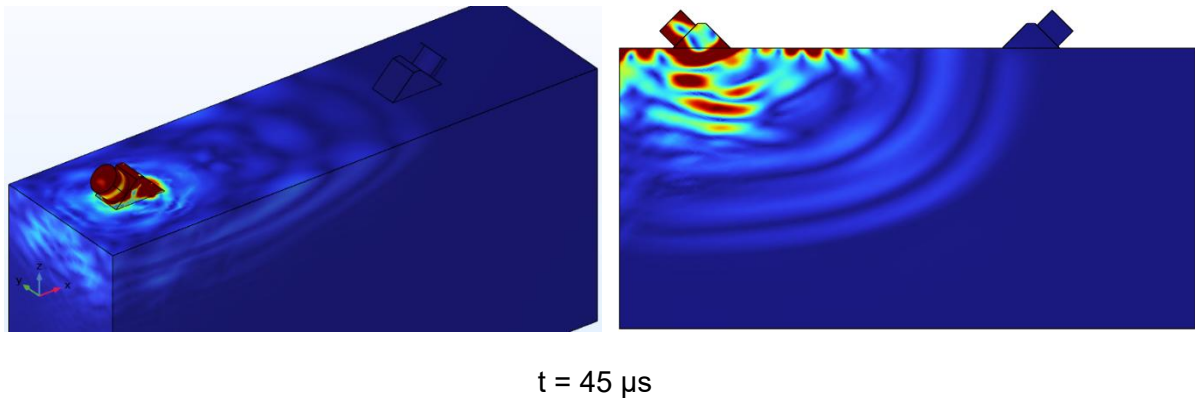


Figura 129. Instantáneas de propagación de ondas en medio ortótropo.

Efecto en muestras con fisura transversal de madera de abeto

Tal y como ocurría al analizar el caso análogo considerando un medio isótropo, y a diferencia de lo que sucede en una muestra sana idealizada, donde se esperaría una relación lineal entre la distancia emisor-receptor y el tiempo de vuelo (Figura 70), la introducción de una fisura transversal provoca que dichas curvas adopten una forma hiperbólica ().

En el presente escenario (Figura 130), la desviación respecto a la linealidad es aún más acusada que en cuando se consideraba un medio isótropo (Figura 82), ya que al considerar una velocidad de propagación radial menor que la longitudinal, se amplifica el efecto de la discontinuidad. Este contraste de velocidades provoca una mayor curvatura en las gráficas, reflejando con mayor claridad la influencia combinada de la anisotropía del material y la presencia del defecto sobre el patrón de la propagación de las ondas.

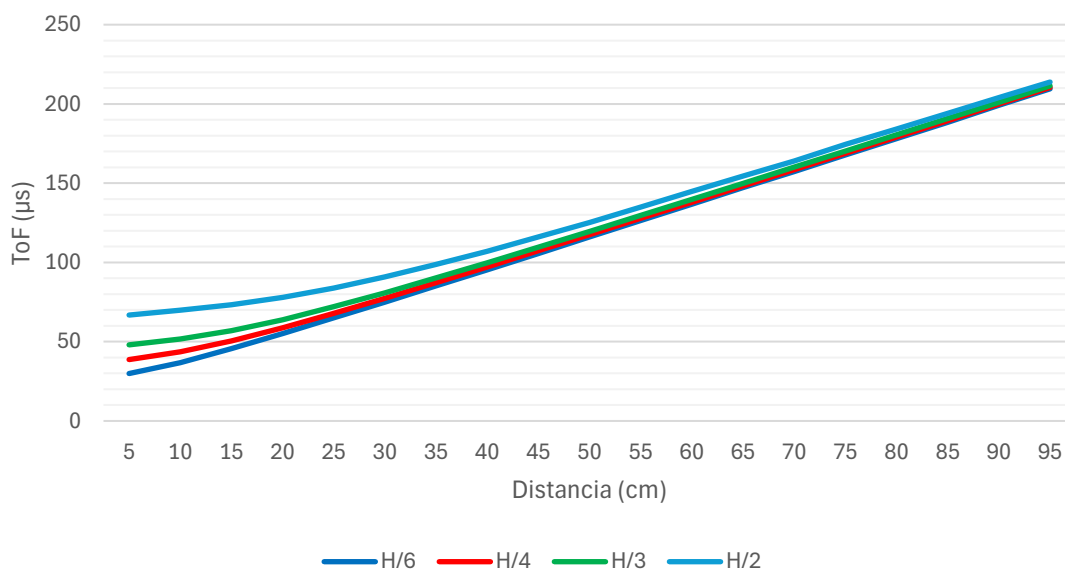


Figura 130. Tiempos de vuelo registrados para diferentes profundidades de fisura ubicada en $D/2$ en medio ortótropo.

Por otra parte, se analiza la diferencia relativa en los tiempos de vuelo respecto a los valores obtenidos bajo la hipótesis de un medio isótropo, con el propósito de cuantificar el impacto de la anisotropía del material en combinación con la presencia de defectos.

Los resultados indican que esta influencia tiende a decrecer de forma exponencial a medida que aumenta la separación entre transductores, hasta converger hacia un valor próximo al rango del 20-25 % observado en las muestras sanas cuando se asume un comportamiento ortótropo. Este patrón sugiere que, a distancias mayores, el efecto de la fisura se ve progresivamente atenuado por la dispersión y la pérdida de energía de las ondas, de manera que la respuesta registrada está dominada por las propiedades del material en estado intacto.

Por otra parte, como es lógico, se constata una influencia significativamente mayor en los escenarios donde la profundidad de la fisura es más elevada, especialmente en las mediciones realizadas con transductores a distancias reducidas. En tales casos, la interacción directa entre la onda incidente y la discontinuidad produce alteraciones más marcadas tanto en la trayectoria como en el tiempo de llegada de la señal, amplificando el contraste con respecto a la muestra sana.

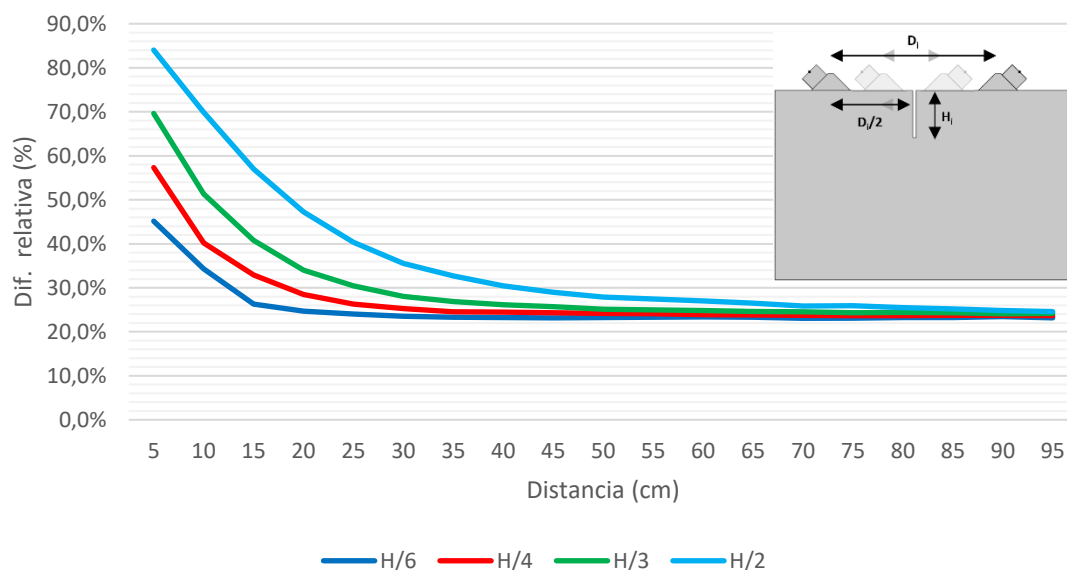
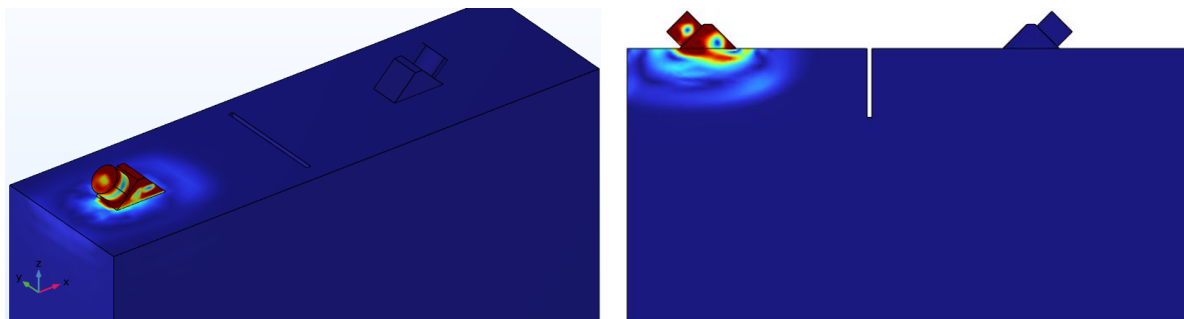


Figura 131. Diferencia relativa en ToF con respecto a sus homólogos en medio isótropo.

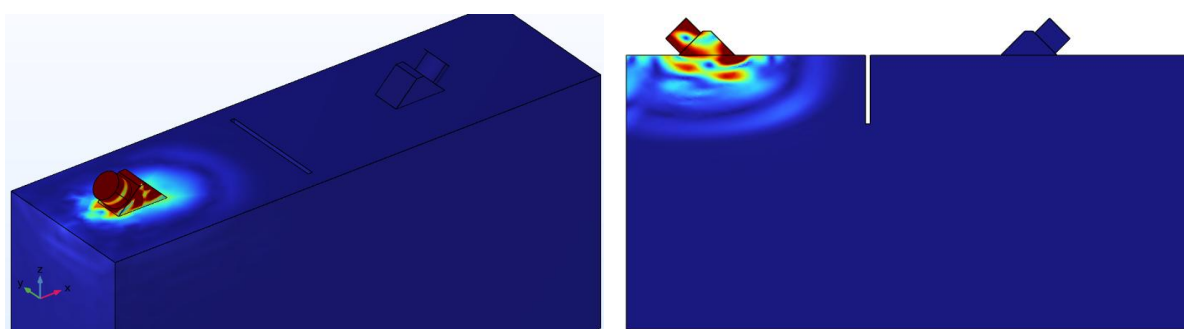
Comportamiento de la propagación ultrasónica ante la fisura en medio ortótropo

Con el objetivo de analizar con detalle el comportamiento de la propagación de las ondas en la probeta frente a la presencia de una fisura transversal en un medio ortótropo, en la figura siguiente se presentan varias instantáneas correspondientes a intervalos de 5 μ s. El modelo utilizado para esta ilustración considera una separación entre transductores de 20 cm y una fisura de profundidad equivalente a $H/4$, permitiendo visualizar cómo el defecto afecta la propagación de las ondas.

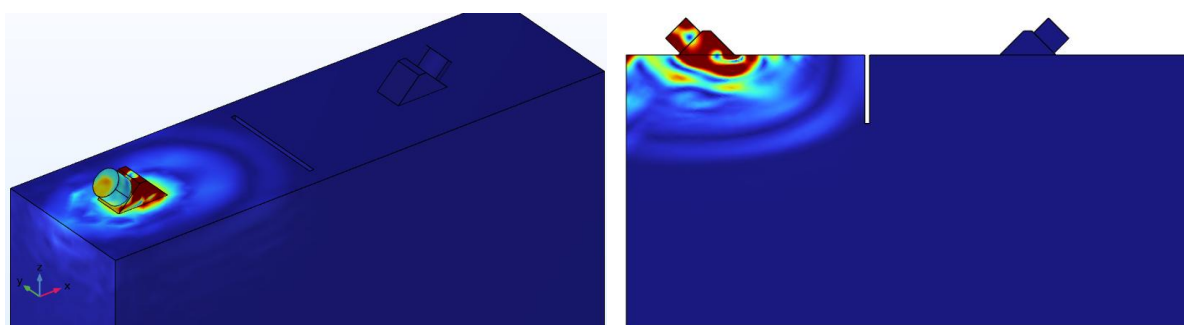
Se observa que, como ocurría en el medio isótropo, la fisura interrumpe la onda directa, bloqueando la transmisión de energía en la zona superficial de la probeta. Además, la presencia del defecto provoca fenómenos de difracción y atenuación de la onda, alterando su propagación.



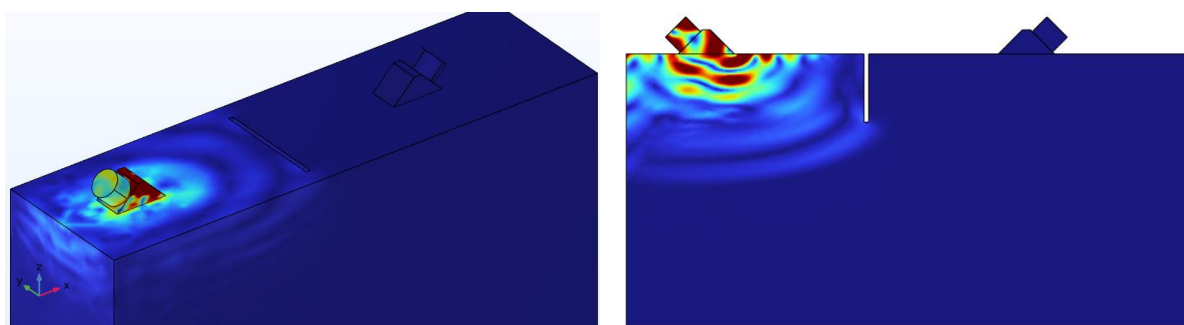
a) $t = 15 \mu s$



$t = 20 \mu s$



$t = 25 \mu s$



$t = 30 \mu s$

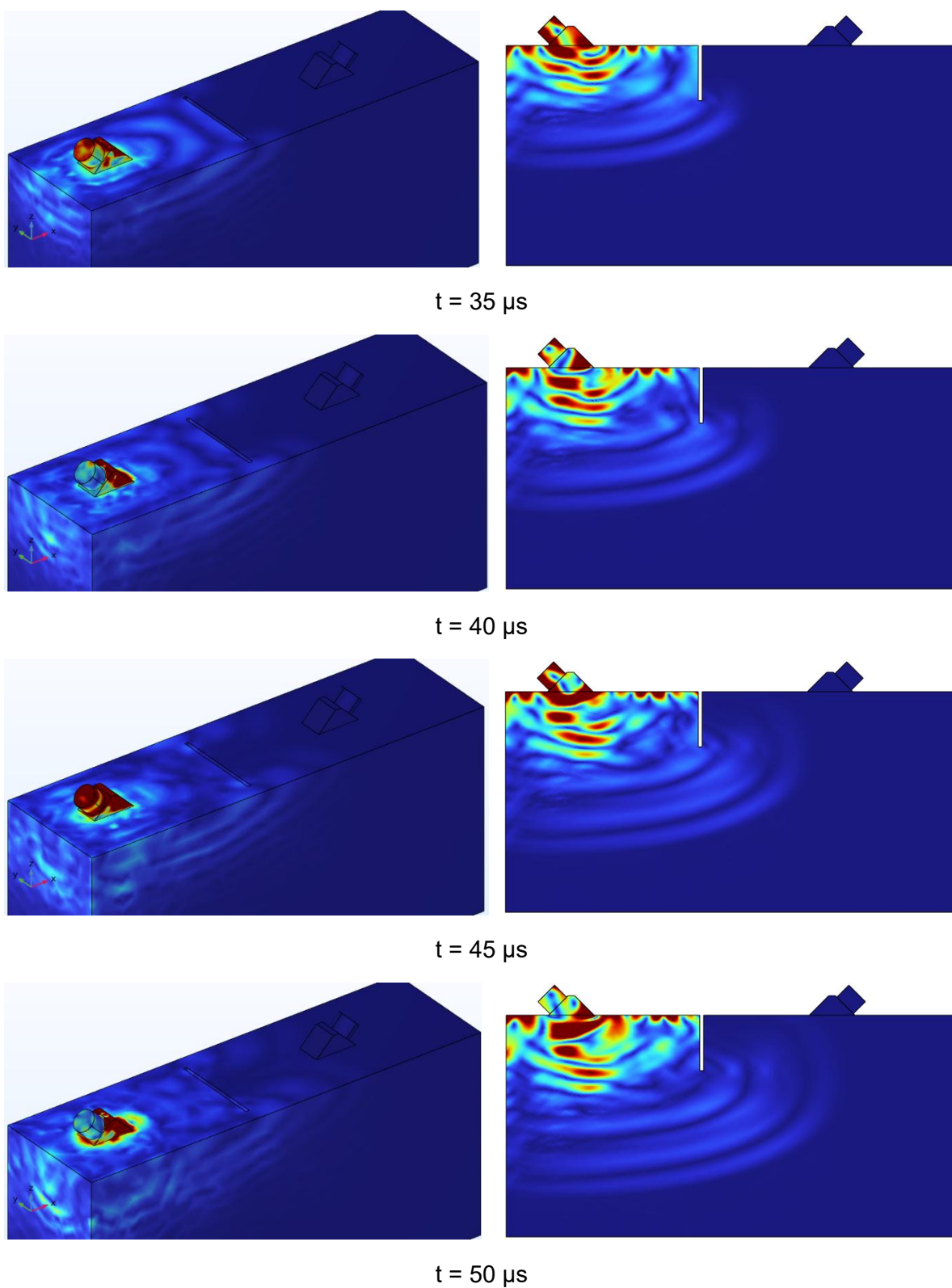


Figura 132. Instantáneas de propagación de ondas en medio ortótropo con fisura.

4.8. INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DEL CANTO

Se ha llevado a cabo un análisis sobre la influencia del canto de la viga en la propagación de las ondas. Para este propósito, se realizaron simulaciones numéricas considerando distintas dimensiones del canto, concretamente de 4 cm, 5 cm, 7 cm y 12 cm, con el fin de evaluar cómo varía el comportamiento de la propagación ultrasónica en función de esta variable geométrica.

Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, se ha elaborado la siguiente figura, en la que se presenta un mapa de colores que representa las diferencias en los tiempos de vuelo registrados para los distintos cantos analizados, en comparación con el caso de referencia correspondiente a un canto de 17 cm.

De este modo, se observa que, en los casos con cantos reducidos, entre 4 y 5 cm, la influencia sobre el tiempo de vuelo es considerablemente más significativa en comparación con los escenarios que presentan cantos de 7 y 12 cm, donde dicho efecto resulta mucho menos acusado.

La mayor sensibilidad del tiempo de vuelo registrado en cantos reducidos (4–5 cm) proviene de una combinación provocada por efectos geométricos, como trayectos más cortos de las ondas reflejadas y la superposición de ecos.

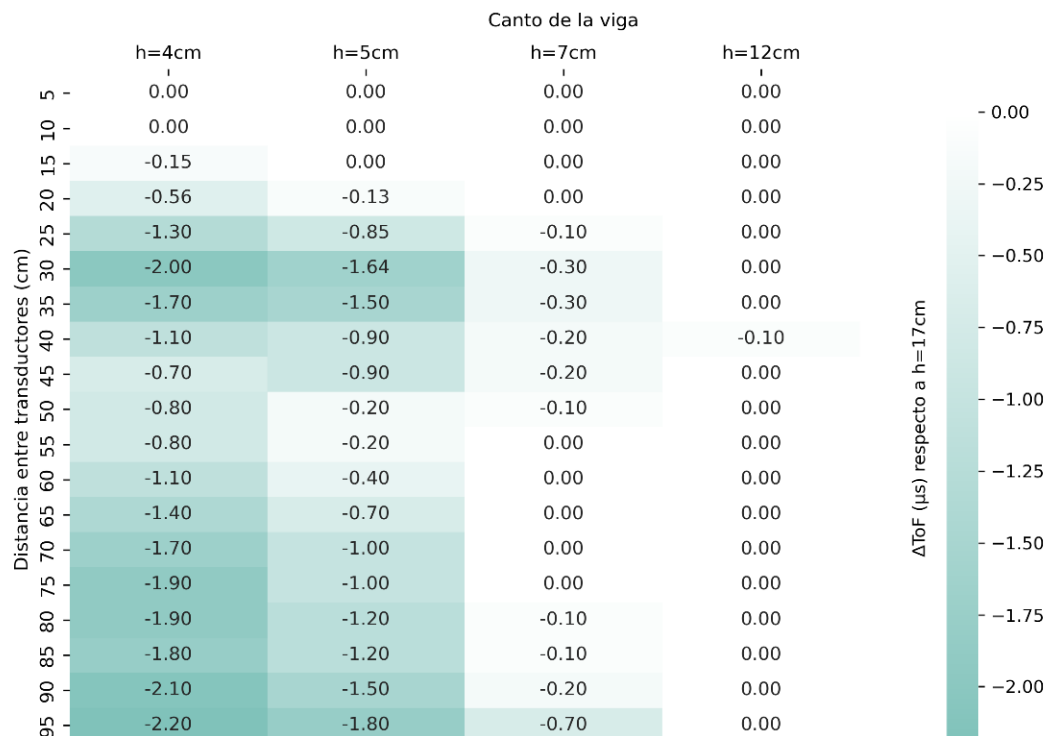


Figura 133. Variación en los tiempos de vuelo con respecto del caso base $H = 17$ cm.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Por último, en este capítulo se presentan las conclusiones generales derivadas del trabajo realizado, sintetizando los principales hallazgos obtenidos a partir del modelo computacional desarrollado. Se reflexiona sobre el cumplimiento de los objetivos planteados y se destacan las aportaciones más relevantes en el contexto del análisis ultrasónico en estructuras de madera laminada.

En primer lugar, se exponen los hallazgos más importantes del estudio, haciendo énfasis en los resultados más significativos y en la validez del enfoque metodológico adoptado. A continuación, se enumeran las contribuciones específicas del trabajo en el desarrollo y aplicación del modelo numérico.

Por otra parte, se identifican las principales limitaciones encontradas durante el desarrollo del estudio, señalando posibles mejoras metodológicas o técnicas que podrían aplicarse en futuros trabajos. Finalmente, se proponen líneas de investigación futuras que permitirían ampliar el alcance del estudio y profundizar en el conocimiento del comportamiento ultrasónico de la madera laminada.

5.1. CONCLUSIONES PRINCIPALES

El desarrollo de este trabajo ha permitido profundizar en la comprensión del comportamiento de las ondas ultrasónicas en estructuras de madera laminada, mostrando con claridad tanto las capacidades como las limitaciones de esta técnica para la detección y caracterización de defectos internos.

En primer lugar, la validación del modelo numérico implementado en COMSOL Multiphysics evidenció una concordancia muy elevada entre los resultados simulados y los obtenidos experimentalmente para muestras sanas. El ajuste casi perfecto en términos de coeficiente de determinación ($R^2 \approx 1$) confirma que el modelo reproduce de manera fiable la propagación de ondas en un medio de referencia, a pesar de las idealizaciones asumidas. No obstante, se observaron ligeras discrepancias en las pendientes de las rectas de regresión, lo que indica que la muestra real presenta heterogeneidades y defectos que no pueden captarse plenamente bajo la hipótesis de homogeneidad e isotropía.

En cuanto al análisis paramétrico, los resultados han mostrado patrones diferenciados según el tipo de defecto. Las fisuras transversales emergen como los defectos más críticos, capaces de interrumpir de manera significativa la transmisión de energía y provocar incrementos notables en los tiempos de vuelo. La profundidad de la fisura resultó ser un factor

determinante: cuanto mayor es la penetración en el espesor, mayor es la alteración de la onda, y más persistente su efecto a lo largo de la trayectoria.

Los nudos, en contraste, presentaron una influencia mucho más limitada. Aunque generan aumentos en los tiempos de vuelo y cierta atenuación, su efecto se mostró reducido y altamente dependiente de la profundidad y de la posición relativa respecto a los transductores. En escenarios con separaciones mayores entre transductores, el impacto del nudo llegó incluso a ser inapreciable, lo que plantea dudas sobre la fiabilidad de la técnica para detectar este tipo de irregularidades, especialmente cuando se encuentran en posiciones profundas o alejadas de la superficie.

De igual manera, la delaminación mostró un efecto limitado, con una influencia mayor cuando se ubica en zonas próximas a la superficie, pero con una repercusión decreciente a medida que aumenta su profundidad. Este resultado apunta a que las delaminaciones podrían pasar desapercibidas en un control ultrasónico, lo que obliga a considerar otras estrategias complementarias en la detección de elementos expuestos a procesos que puedan degradar el adhesivo.

El ataque biótico, modelado mediante cavidades múltiples y distribuidas aleatoriamente, evidenció un comportamiento poco significativo. Su impacto se concentra en zonas localizadas, provocando una alteración de la propagación inmediatamente después del área dañada, pero que tiende a atenuarse a medida que la onda recorre mayores distancias.

Todo esto nos confirma que el ultrasonido puede ser una herramienta útil para la detección temprana de daños, aunque su sensibilidad se reduce a medida que la separación entre transductores aumenta o que el deterioro se dispersa en áreas más profundas.

5.2. CONTRIBUCIONES DEL TRABAJO

Los hallazgos obtenidos permiten establecer varias conclusiones relevantes:

- El ultrasonido es una técnica con gran potencial para el diagnóstico no destructivo de estructuras de madera laminada, especialmente en la identificación de defectos que interrumpen de manera brusca la propagación de la onda, como fisuras o degradaciones concentradas.
- La eficacia de la técnica es más limitada frente a defectos de naturaleza más difusa, como las delaminaciones profundas, o de naturaleza puntual, como los nudos, donde los cambios en la señal pueden ser reducidos o quedar enmascarados por la dispersión propia del material.

- La variabilidad natural de la madera, su anisotropía y la presencia inevitable de heterogeneidades introducen una complejidad adicional que exige combinar los ensayos experimentales con modelos numéricos, capaces de representar con mayor fidelidad el comportamiento del material.
- La sensibilidad del método depende en gran medida de la configuración del ensayo, en particular de la separación y ubicación relativa de los transductores, lo que resalta la importancia de diseñar protocolos de inspección adaptados a cada tipo de defecto esperado.
 - En el caso de **fisuras transversales**, se recomienda realizar los ensayos con separaciones entre transductores comprendidas entre 10 y 50 cm, rango en el que los resultados muestran mayor sensibilidad. Al representar la relación ToF–distancia y compararla con una muestra sana, es posible identificar la presencia de una curvatura hiperbólica, junto con diferencias relativas de ToF especialmente acusadas en separaciones cortas. La persistencia de estas anomalías a mayores distancias suele asociarse con fisuras de mayor profundidad.
 - En el caso de **nudos**, estos se manifiestan en forma de incrementos leves del ToF, más notorios cuando se encuentran próximos a la superficie. A medida que aumentan en profundidad, el efecto tiende a desplazarse hacia distancias de medida mayores, lo que hace recomendable analizar el patrón de respuesta en distintas posiciones relativas ($D/4$, $D/3$ y $D/2$) y para separaciones entre 10 y 50 cm. La combinación de esta técnica con métodos complementarios, como la resistografía, puede enriquecer la caracterización.
 - En el caso de **delaminaciones**, los cambios registrados en el ToF resultan muy sutiles, particularmente en defectos profundos, por lo que resulta recomendable contar con una línea de referencia sin defecto obtenida en alguna zona de la propia pieza y a extremar las precauciones en el acoplamiento de los transductores. Para delaminaciones de extensión considerable (al menos la mitad de la distancia entre transductores), se recomienda priorizar separaciones superiores a 50 cm, donde los efectos son comienzan a aparecer, aun siendo muy limitados. No obstante, la baja sensibilidad observada numéricamente mediante el método indirecto pone de relieve la necesidad de seguir profundizando en este tipo de defectos.
 - En el caso de **ataques bióticos**, estos pueden identificarse por un incremento del ToF y una disminución de la velocidad a distancias cortas (≤ 20 cm), efectos

que tienden a atenuarse conforme aumenta la separación. El protocolo aconsejable incluye barridos en el rango de 10 a 50 cm, con un muestreo denso en torno a las zonas sospechosas. La detección se apoya en diferencias relativas del ToF en el intervalo del 1 al 5% y en la coherencia del patrón obtenido bajo distintas configuraciones de medida.

En conjunto, este estudio demuestra que la aplicación de técnicas ultrasónicas a la madera laminada, combinada con modelos numéricos, ofrece una vía prometedora para el control estructural y la detección preventiva de daños, pero también subraya la necesidad de continuar perfeccionando los modelos computacionales y experimentales, así como de complementar estos métodos con otras técnicas de diagnóstico no destructivo, como la caracterización dinámica de elementos estructurales o las técnicas de resistografía. De este modo, se podrá avanzar hacia una caracterización más precisa y fiable de un material cuya heterogeneidad y complejidad constituyen, a la vez, un reto y una oportunidad para la ingeniería estructural contemporánea.

5.3. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Si bien el presente trabajo ha permitido profundizar en el análisis numérico de la madera laminada y ha aportado resultados relevantes en relación con la propagación de ondas ultrasónicas en presencia de defectos, es necesario reconocer que el fenómeno analizado presenta una complejidad que excede los límites de esta investigación. Las decisiones metodológicas adoptadas, así como el alcance temporal y contextual del estudio, han delimitado los resultados obtenidos, dejando abiertas diversas cuestiones que merecen ser abordadas en investigaciones posteriores. En este sentido, el análisis realizado no solo pone de relieve los logros alcanzados, sino también las oportunidades de avance que se derivan de él.

A continuación, se presentan algunas posibles líneas de investigación futura, orientadas a superar las limitaciones detectadas y a ampliar la comprensión del fenómeno estudiado.

- **Integración con técnicas de caracterización dinámica:** la combinación de los ensayos ultrasónicos con técnicas de caracterización dinámica, abre la posibilidad de establecer metodologías híbridas para la detección de defectos en madera laminada. Este enfoque multimodal podría mejorar la sensibilidad frente a discontinuidades internas y permitir una caracterización más integral del comportamiento mecánico del material, especialmente en elementos de grandes dimensiones utilizados en aplicaciones estructurales.

- **Representación numérica de nudos como discontinuidades mecánicas:** una de las extensiones de este trabajo consiste en incorporar en los modelos numéricos la representación explícita de los nudos como discontinuidades mecánicas. La inclusión de este tipo de heterogeneidades permitiría analizar con mayor realismo el efecto de los defectos naturales en la propagación de las ondas ultrasónicas. Con ello, se podrían establecer correlaciones más precisas entre la respuesta simulada y la experimental, lo cual contribuiría a una mejor caracterización estructural de la madera laminada y a la validación de modelos predictivos de integridad.
- **Estudio experimental de la delaminación en función de su geometría:** otra línea relevante es el análisis experimental de la delaminación, considerando variaciones sistemáticas en su ancho y profundidad. De esta manera, se buscaría determinar cómo las dimensiones de este defecto influyen en la atenuación, reflexión y dispersión de las ondas ultrasónicas, contrastándolas posteriormente con los resultados del modelo computacional. En este sentido, el diseño de protocolos de ensayo facilitaría la creación de bases de datos experimentales útiles para la validación de modelos numéricos y para el desarrollo de técnicas de diagnóstico más robustas.
- **Aplicación de algoritmos de *machine learning* en la identificación de defectos:** el empleo de algoritmos de aprendizaje automático representa una línea de investigación con gran potencial. El análisis de los tiempos de vuelo registrados en muestras defectuosas podría entrenar modelos predictivos capaces de identificar y clasificar defectos en función de sus características geométricas y mecánicas. Este enfoque *data-driven* facilitaría la automatización del diagnóstico, incrementando la eficiencia de los ensayos no destructivos y aportando herramientas útiles para la monitorización continua de estructuras de madera laminada en servicio.

5.4. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

En el marco de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen una guía global para orientar la investigación, la innovación y la práctica profesional hacia un modelo de desarrollo más equilibrado, responsable y respetuoso con el entorno. La ingeniería, y en particular el ámbito de la construcción, adquiere especial relevancia en este proceso, dado su impacto directo sobre el consumo de recursos, la generación de emisiones y la configuración de entornos urbanos sostenibles.

El presente trabajo, centrado en la modelización y el contraste experimental de la propagación de ondas ultrasónicas en elementos de madera laminada, se vincula de manera natural con diversos ODS, ya que aborda la necesidad de optimizar el uso de materiales renovables,

fomentar técnicas de control no destructivo y garantizar la seguridad y durabilidad de las infraestructuras. En las siguientes secciones se analizan las principales conexiones entre los resultados obtenidos y aquellos objetivos que promueven una producción y consumo responsables, la innovación tecnológica y la sostenibilidad en las ciudades y en la gestión de los ecosistemas terrestres.

➤ **ODS 9: Industria, innovación e infraestructura**

El desarrollo de metodologías no destructivas (NDT) para la inspección de madera laminada fomenta la innovación tecnológica en la construcción y en la ingeniería civil. La profundización en el conocimiento de este material mejora la seguridad y durabilidad de infraestructuras basadas en la madera laminada, que cada vez resulta más relevante en la transición hacia construcciones más sostenibles.

➤ **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles**

Promover materiales como la madera laminada, junto con herramientas de control de calidad, ayuda a desarrollar edificaciones más sostenibles y resilientes. Además, la posibilidad de monitorizar defectos estructurales aumenta la seguridad y prolonga la vida útil de las construcciones urbanas.

➤ **ODS 12: Producción y consumo responsables**

Detectar defectos en etapas tempranas mediante ensayos ultrasónicos contribuye a optimizar el uso de la madera, reduciendo desperdicios y evitando el desecho prematuro de elementos estructurales. Por otra parte, se favorece un ciclo de vida más largo de los materiales y un consumo más eficiente de recursos forestales, alineado con prácticas de economía circular.

➤ **ODS 13: Acción por el clima**

Al incentivar el uso de madera estructural frente a materiales más contaminantes como el acero o el hormigón, se contribuye a reducir la huella de carbono del sector de la construcción. En cuanto a los métodos de inspección, estos garantizan que el material de origen biológico sea seguro y competitivo frente a alternativas más intensivas en emisiones.

➤ **ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres**

El uso responsable de la madera laminada implica una gestión forestal sostenible. Mediante el desarrollo de las técnicas de inspección preventiva, se incrementa la fiabilidad del material y se evita que se desechen piezas válidas por falta de técnicas adecuadas de inspección.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, L., Díez, R. y Casado, M. (2006). Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural: aplicación a *Pinus pinaster* Ait. *Boletín Informativo CIDEU*, 2, 7-26.
- Acuña, L., Díez, R., Casado, M., Fernández, A., Sánchez, M., Blázquez, L., Otero, A., Ganga, E., & Ramón, G. (2007). La transmisión de ultrasonidos aplicada a la madera estructural. *11º Congreso Español de END*. [[CrossRef](#)]
- Andrews, D. (2014). *Modelling of Ultrasonic Transducers and Ultrasonic Wave Propagation for Commercial Applications using Finite Elements with Experimental Visualization of Waves for Validation*. 2014 COMSOL Conference in Cambridge. [[CrossRef](#)]
- Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., Grazieschi, G. (2017). *A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications*. Building and Environment, 114, 307-332. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>.
- Balmori, J. A., Acuña, L., y 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*. Euro-American Congress REHABEND 2016, 746-755. [[CrossRef](#)]
- Basterra, L. A., Acuña, L., Casado, M., Ramón-Cueto, G., y López, G. (2009). *Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid)*. Informes de la Construcción, 61(516), 21-36. <https://doi.org/10.3989/ic.09.016>
- Blaß, H. J., y Sandhaas, C. (2017). *Timber engineering - Principles for design*. KIT Scientific Publishing.
- Bustamante Gutiérrez, F. (2025). *Análisis teórico-experimental del comportamiento de ondas ultrasónicas en el seno de vigas de madera laminada acondicionadas higrotérmicamente*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones. Universidad de Cantabria.
- Cabrera-López, J. y Velasco-Medina, J. (2011). *Diseño e Implementación de un Sistema Embebido para el Procesamiento de Señales Ultrasónicas*. Revista Colombiana de Física, 43(1). <https://www.researchgate.net/publication/277031312>
- Calama-Rodríguez, J. M., y Martínez-Gracia, J. J. (1994). *Estructuras arquitectónicas de madera laminada encolada*. Re. Revista de Edificación, 18, 7-21. <https://doi.org/10.15581/020.18.34944>
- Chilton, J.C y Tang, G. (2016). *Timber Gridshells: Architecture, Structure and Craft*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315773872>
- Demkoff, M. L. V. (2003). Vigas laminadas estructurales de madera, su fabricación y empleo. *XVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos*. [[CrossRef](#)]
- Dinwoodie, J. M. (2000). *Timber: its nature and behaviour*. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9780203477878>

- Esteban, M. (2003). *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Fakopp. (2025). *Fakopp Ultrasonic Timer User's Guide*. [CrossRef]
- GANN. (2025). *Instrucciones de Empleo. GANN HYDROMETTE RTU 600*. [CrossRef]
- Ghose, B., Balasubramaniam, K., Krishnamurthy, C. V., y Rao, A. S. (2010). *Two dimensional FEM simulation of ultrasonic wave propagation in isotropic Solid Media using COMSOL*. In COMSOL Conference, 37.
- How, S. S., Sik, H. S. y Anwar, U. M. K. (2016). *An Overview of Manufacturing Process of Glued-Laminated Timber*. Timber Technology Bulletin, 63.
- IML. (2024). *Manual and Warranty Terms & Conditions*. Instrumental Mechanik Labor System.
- 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.
- Jeska, S. y Pascha, K. S. (2014). *Emergent Timber Technologies Materials, Structures, Engineering, Projects*. Rainer Hascher. <https://doi.org/10.1515/9783038216162>
- Kaproth-Joslin, K. A., Nicola, R., y Dogra, V. S. (2015). *The History of US: From Bats and Boats to the Bedside and Beyond*. Radiographics, 35(3), 960-970. <https://doi.org/10.1148/rq.2015140300>
- Krautkrämer, J. y Krautkrämer, H. (1983). *Ultrasonic Testing of Materials* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02357-0>
- Kuzman, M., Oblak, L. y Vratuša, S. (2010). *Glued Laminated Timber in Architecture*. Drvna industrija, 61.
- Martínez, J., Cantor, S. y Oyaga, J. (2007). *Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido*. Tecnura. 10(20). 4-18.
- Mass Madera. (2024). *Informe 2023-24*. Mass Madera: Red Española para el impulso de la madera maciza industrializada para la edificación. [CrossRef]
- Medina, V. G. (2013). *Ultrasonidos, técnica no destructiva para el estudio de monumentos*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Sevilla.
- Ministerio de Fomento. (2019). *Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad estructural: Madera*. CTE DB SE-M.
- MIT. (2008). *Introduction to Seismology: Travel-Time Curves*. Massachusetts Institute of Technology. [CrossRef]
- Moya, L., Pérez Gomar, C., Vega, A., Sánchez, A., Torino, I., y Baño, V. (2019). *Relación entre parámetros de producción y propiedades estructurales de madera laminada encolada de Eucalyptus grandis*. Maderas. Ciencia y tecnología, 21(3), 327-340. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000305>
- Müller, C. (2000). *Laminated Timber Construction*. Birkhäuser.
- Netto, R. S. (2024). *Tabla de conductividad térmica*. Fisicanet. [CrossRef]

- Petersen, A. K., y Solberg, B. (2005). *Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden*. Forest policy and economics, 7(3), 249-259. [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(03\)00063-7](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(03)00063-7)
- Quesada, H., Adhikari, S., y Smith, R. (2022). Glue-Laminated Timber. *Virginia Tech*. [\[CrossRef\]](#)
- Rhude, A. J. (1996). *Structural glued laminated timber: History of its origins and early development*. Forest Products Journal, 46(1), 15.
- Rödel, J. y Li, JF. (2018). *Lead-free piezoceramics: Status and perspectives*. MRS Bulletin 43, 576-580 (2018). <https://doi.org/10.1557/mrs.2018.181>
- Santos, J. C. (2005). *La madera: Ingeniería natural / El MUJA: El Museo Jurásico de Asturias*. DYNA, 80(4), 14-16.
- Sharma, S.K., Shukla, S.R. (2012). *Properties evaluation and defects detection in timbers by ultrasonic non-destructive technique*. Journal of the Indian Academy of Wood Science, 9, 66-71. <https://doi.org/10.1007/s13196-012-0064-5>
- Techlam. (2020). Techlam Process Video - How Techlam Glulam is manufactured. YouTube. [\[CrossRef\]](#)
- Tellechea, J. A. (1999). *La fabricación de la madera laminada encolada*. Re. Revista De Edificación, 29, 57-61. <https://doi.org/10.15581/020.29.34816>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2010). *AP 42, Volume I, Chapter 10: Wood products industry* (5th ed.). [\[CrossRef\]](#)
- UNE-EN 12504. (2022). *Ensayos de hormigón en estructuras. Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos*. Asociación Española de Normalización
- UNE-EN 14080. (2022). *Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos*. Asociación Española de Normalización.
- UNE-EN 301 (2023). *Adhesivos fenólicos y aminoplásticos para estructuras portantes de madera. Clasificación y requisitos de comportamiento*. Asociación Española de Normalización.
- UNE-EN 351 (2023). *Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Madera maciza tratada con productos protectores*. Asociación Española de Normalización.
- UPENN. (2013). *LING. 520: Lecture #1*. University of Pennsylvania. [\[CrossRef\]](#)
- Vignote, S. (2014). *Principales maderas de coníferas en España características, tecnología y aplicaciones*. Universidad Politécnica de Madrid. [\[CrossRef\]](#)
- World Green Building Council. (2019). *Bringing embodied carbon upfront: coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon*. [\[CrossRef\]](#)
- Žak, A. (2024). *A Finite Element Approach for Wave Propagation in Elastic Solids*. Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Sciences. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-56836-7>
- Zienkiewicz, O. C., y Taylor, R. L. (2005). *The finite element method for solid and structural mechanics*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-26332-X>

ANEXO I

ANEXO I

Tabla 14. Tiempos de vuelo experimentales y simulados.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)		
		Experimental	Nº interfases	
			Sin interfase	Con 5 interfases
0	0	-	-	-
1	5	13,93	14,66	14,66
2	10	24,62	23,83	23,83
3	15	32,05	32,9	32,7
4	20	41,36	41,9	41,5
5	25	50,92	51,2	50,5
6	30	63,2	60,5	60
7	35	72,09	68,9	68,2
8	40	79,9	77,2	76,6
9	45	90,75	85,7	85
10	50	99,96	94,1	93,3
11	55	108,07	102,4	101,7
12	60	114,86	110,9	110,2
13	65	124,38	119,4	118,5
14	70	131,62	127,9	127
15	75	140,87	136,3	135,4
16	80	149,93	144,6	143,7
17	85	159,74	152,9	152,2
18	90	168,61	161,4	160,7
19	95	179,17	170,1	169,1

Tabla 15. Diferencias relativas en ToF respecto resultados experimentales.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF	
		Nº interfases	
		Sin interfase	Con 5 interfases
0	0		-
1	5	5,2%	5,2%
2	10	-3,2%	-3,2%
3	15	2,7%	2,0%
4	20	1,3%	0,3%
5	25	0,5%	-0,8%
6	30	-4,3%	-5,1%
7	35	-4,4%	-5,4%
8	40	-3,4%	-4,1%
9	45	-5,6%	-6,3%
10	50	-5,9%	-6,7%
11	55	-5,2%	-5,9%
12	60	-3,4%	-4,1%
13	65	-4,0%	-4,7%
14	70	-2,8%	-3,5%
15	75	-3,2%	-3,9%
16	80	-3,6%	-4,2%
17	85	-4,3%	-4,7%
18	90	-4,3%	-4,7%
19	95	-5,1%	-5,6%

ANEXO I

Tabla 16. Velocidad de propagación experimental y simulada.

Punto	Distancia (cm)	Velocidad (m/s)		Error relativo
		Experimental	COMSOL	
0	0	-	-	-
1	5	6989	7277	4,1%
2	10	5604	6234	11,2%
3	15	5935	5973	0,6%
4	20	5783	5863	1,4%
5	25	5663	5759	1,7%
6	30	5317	5691	7,0%
7	35	5359	5727	6,9%
8	40	5470	5763	5,3%
9	45	5359	5776	7,8%
10	50	5366	5793	8,0%
11	55	5430	5813	7,1%
12	60	5551	5819	4,8%
13	65	5527	5824	5,4%
14	70	5607	5828	3,9%
15	75	5593	5836	4,3%
16	80	5588	5847	4,6%
17	85	5557	5858	5,4%
18	90	5561	5859	5,4%
19	95	5511	5853	6,2%

Tabla 17. Corrección de tiempo para el cálculo de la velocidad.

Tipo	Ordenada en el origen (μ s)
Experimental	6,7758
COMSOL	7,7886

ANEXO I

Tabla 18. Tiempos de vuelo para una fisura de profundidad H/6.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)			
		Ubicación fisura			Modelo sin defecto
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	-	-	20,6	14,66
2	10	28	27,6	27,4	23,83
3	15	36,5	36,3	36,1	32,9
4	20	44,6	44,4	44,2	41,9
5	25	52,8	52,6	52,4	51,2
6	30	61,1	60,9	60,7	60,5
7	35	69,3	69,2	69,1	68,9
8	40	77,6	77,5	77,4	77,2
9	45	86	85,9	85,8	85,7
10	50	94,4	94,3	94,2	94,1
11	55	102,7	102,6	102,5	102,4
12	60	111,1	111	110,9	110,9
13	65	119,5	119,4	119,4	119,4
14	70	127,9	127,9	127,9	127,9
15	75	136,3	136,3	136,3	136,3
16	80	144,6	144,6	144,6	144,6
17	85	152,9	152,9	152,9	152,9
18	90	161,4	161,4	161,4	161,4
19	95	170,1	170,1	170,1	170,1

Tabla 19. Diferencia relativa en ToF para una fisura de profundidad H/6.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto			
		Ubicación fisura			Modelo sin defecto
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	-	-	40,5%	14,66
2	10	17,5%	15,8%	15,0%	23,83
3	15	10,9%	10,3%	9,7%	32,9
4	20	6,4%	6,0%	5,5%	41,9
5	25	3,1%	2,7%	2,3%	51,2
6	30	1,0%	0,7%	0,3%	60,5
7	35	0,6%	0,4%	0,3%	68,9
8	40	0,5%	0,4%	0,3%	77,2
9	45	0,4%	0,2%	0,1%	85,7
10	50	0,3%	0,2%	0,1%	94,1
11	55	0,3%	0,2%	0,1%	102,4
12	60	0,2%	0,1%	0,0%	110,9
13	65	0,1%	0,0%	0,0%	119,4
14	70	0,0%	0,0%	0,0%	127,9
15	75	0,0%	0,0%	0,0%	136,3
16	80	0,0%	0,0%	0,0%	144,6
17	85	0,0%	0,0%	0,0%	152,9
18	90	0,0%	0,0%	0,0%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,0%	170,1

ANEXO I

Tabla 20. Tiempos de vuelo para una fisura de profundidad H/4.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)			
		Ubicación fisura			Modelo sin defecto
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	-	-	24,6	14,66
2	10	31,6	31,3	31,1	23,83
3	15	38,8	38,3	38	32,9
4	20	46,4	45,9	45,7	41,9
5	25	54,3	53,9	53,7	51,2
6	30	62,2	61,9	61,8	60,5
7	35	70,4	70,1	70	68,9
8	40	78,5	78,3	78,1	77,2
9	45	86,7	86,5	86,4	85,7
10	50	95	94,8	94,7	94,1
11	55	103,3	103,1	103	102,4
12	60	111,6	111,5	111,4	110,9
13	65	120	119,9	119,8	119,4
14	70	128,3	128,2	128,1	127,9
15	75	136,6	136,5	136,5	136,3
16	80	144,9	144,8	144,8	144,6
17	85	153,2	153,1	153,1	152,9
18	90	161,6	161,5	161,5	161,4
19	95	170,1	170,1	170,1	170,1

Tabla 21. Diferencia relativa en ToF para una fisura de profundidad H/4.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto			
		Ubicación fisura			Modelo sin defecto (μ s)
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	-	-	67,8%	14,66
2	10	32,6%	31,3%	30,5%	23,83
3	15	17,9%	16,4%	15,5%	32,9
4	20	10,7%	9,55%	9,0%	41,9
5	25	6,0%	5,3%	4,9%	51,2
6	30	2,8%	2,3%	2,1%	60,5
7	35	2,2%	1,7%	1,6%	68,9
8	40	1,7%	1,4%	1,2%	77,2
9	45	1,2%	0,9%	0,8%	85,7
10	50	1,0%	0,7%	0,6%	94,1
11	55	0,9%	0,6%	0,6%	102,4
12	60	0,6%	0,5%	0,4%	110,9
13	65	0,5%	0,4%	0,3%	119,4
14	70	0,3%	0,2%	0,1%	127,9
15	75	0,2%	0,1%	0,1%	136,3
16	80	0,2%	0,1%	0,1%	144,6
17	85	0,2%	0,1%	0,1%	152,9
18	90	0,1%	0,0%	0,0%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,0%	170,1

ANEXO I

Tabla 22. Tiempos de vuelo para una fisura de profundidad H/3.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μs)			
		Ubicación fisura			Modelo sin defecto
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	-	-	28,3	14,66
2	10	34,6	34,3	34,1	23,83
3	15	41,4	40,9	40,5	32,9
4	20	48,7	48,1	47,6	41,9
5	25	56,2	55,6	55,2	51,2
6	30	63,9	63,4	63,1	60,5
7	35	71,9	71,3	71,1	68,9
8	40	79,8	79,4	79,1	77,2
9	45	87,9	87,5	87,2	85,7
10	50	96,1	95,7	95,5	94,1
11	55	104,3	103,9	103,7	102,4
12	60	112,5	112,2	112	110,9
13	65	120,7	120,4	120,3	119,4
14	70	129	128,7	128,6	127,9
15	75	137,3	137	136,9	136,3
16	80	145,5	145,4	145,2	144,6
17	85	153,8	153,7	153,5	152,9
18	90	162,2	162	161,9	161,4
19	95	170,6	170,3	170,2	170,1

Tabla 23. Diferencia relativa en ToF para una fisura de profundidad H/3.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto			
		Ubicación fisura			ToF modelo sin defecto (μs)
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	-	-	93,0%	14,66
2	10	45,2%	43,9%	43,1%	23,83
3	15	25,8%	24,3%	23,1%	32,9
4	20	16,2%	14,8%	13,6%	41,9
5	25	9,8%	8,6%	7,8%	51,2
6	30	5,6%	4,8%	4,3%	60,5
7	35	4,4%	3,5%	3,2%	68,9
8	40	3,4%	2,8%	2,5%	77,2
9	45	2,6%	2,1%	1,8%	85,7
10	50	2,1%	1,7%	1,5%	94,1
11	55	1,9%	1,5%	1,3%	102,4
12	60	1,4%	1,2%	1,0%	110,9
13	65	1,1%	0,8%	0,8%	119,4
14	70	0,9%	0,6%	0,5%	127,9
15	75	0,7%	0,5%	0,4%	136,3
16	80	0,6%	0,6%	0,4%	144,6
17	85	0,6%	0,5%	0,4%	152,9
18	90	0,5%	0,4%	0,3%	161,4
19	95	0,3%	0,1%	0,1%	170,1

ANEXO I

Tabla 24. Tiempos de vuelo para una fisura de profundidad H/2.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μs)			
		Ubicación fisura			Modelo sin fisura
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	-	-	36,3	14,66
2	10	41,7	41,3	41,1	23,83
3	15	47,7	47,2	46,7	32,9
4	20	54,2	53,5	52,9	41,9
5	25	61,1	60,4	59,8	51,2
6	30	68,4	67,6	67	60,5
7	35	75,9	75	74,4	68,9
8	40	83,5	82,6	82,1	77,2
9	45	91,3	90,5	90	85,7
10	50	99,1	98,4	97,9	94,1
11	55	107,1	106,3	105,9	102,4
12	60	115	114,4	114	110,9
13	65	123,1	122,5	122,1	119,4
14	70	131,3	130,7	130,3	127,9
15	75	139,4	138,9	138,5	136,3
16	80	147,6	147	146,7	144,6
17	85	155,8	155,2	155	152,9
18	90	164,1	163,4	163,3	161,4
19	95	172,4	171,9	171,6	170,1

Tabla 25. Diferencia relativa en ToF para una fisura de profundidad H/2.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto			
		Ubicación fisura			ToF modelo sin defecto (μs)
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	-	-	147,6%	14,66
2	10	75,0%	73,3%	72,5%	23,83
3	15	45,0%	43,5%	41,9%	32,9
4	20	29,4%	27,7%	26,3%	41,9
5	25	19,3%	18,0%	16,8%	51,2
6	30	13,1%	11,7%	10,7%	60,5
7	35	10,2%	8,9%	8,0%	68,9
8	40	8,2%	7,0%	6,3%	77,2
9	45	6,5%	5,6%	5,0%	85,7
10	50	5,3%	4,6%	4,0%	94,1
11	55	4,6%	3,8%	3,4%	102,4
12	60	3,7%	3,2%	2,8%	110,9
13	65	3,1%	2,6%	2,3%	119,4
14	70	2,7%	2,2%	1,9%	127,9
15	75	2,3%	1,9%	1,6%	136,3
16	80	2,1%	1,7%	1,5%	144,6
17	85	1,9%	1,5%	1,4%	152,9
18	90	1,7%	1,2%	1,2%	161,4
19	95	1,4%	1,1%	0,9%	170,1

ANEXO I

Tabla 26. Diferencia relativa en ToF para una fisura ubicada en D/2.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto				
		Espesor fisura				ToF sin defecto (µs)
		H/6	H/4	H/3	H/2	
0	0	-	-	-	-	-
1	5	40,5%	67,8%	93,0%	147,6%	14,66
2	10	15,0%	30,5%	43,1%	72,5%	23,83
3	15	9,7%	15,5%	23,1%	41,9%	32,9
4	20	5,5%	9,1%	13,6%	26,3%	41,9
5	25	2,3%	4,9%	7,8%	16,8%	51,2
6	30	0,3%	2,1%	4,3%	10,7%	60,5
7	35	0,3%	1,6%	3,2%	8,0%	68,9
8	40	0,3%	1,2%	2,5%	6,3%	77,2
9	45	0,1%	0,8%	1,8%	5,0%	85,7
10	50	0,1%	0,6%	1,5%	4,0%	94,1
11	55	0,1%	0,6%	1,3%	3,4%	102,4
12	60	0,0%	0,5%	1,0%	2,8%	110,9
13	65	0,0%	0,3%	0,8%	2,3%	119,4
14	70	0,0%	0,2%	0,5%	1,9%	127,9
15	75	0,0%	0,1%	0,4%	1,6%	136,3
16	80	0,0%	0,1%	0,4%	1,5%	144,6
17	85	0,0%	0,1%	0,4%	1,4%	152,9
18	90	0,0%	0,1%	0,3%	1,2%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,1%	0,9%	170,1

Tabla 27. Diferencia relativa en ToF para una fisura ubicada en D/3.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto				
		Espesor fisura				ToF sin defecto (µs)
		H/6	H/4	H/3	H/2	
0	0	-	-	-	-	-
1	5	-	-	-	-	14,66
2	10	15,8%	31,3%	43,9%	73,3%	23,83
3	15	10,3%	16,4%	24,3%	43,5%	32,9
4	20	6,0%	9,5%	14,8%	27,7%	41,9
5	25	2,7%	5,3%	8,6%	18,0%	51,2
6	30	0,7%	2,3%	4,8%	11,7%	60,5
7	35	0,4%	1,7%	3,5%	8,9%	68,9
8	40	0,4%	1,4%	2,8%	7,0%	77,2
9	45	0,2%	0,9%	2,1%	5,6%	85,7
10	50	0,2%	0,7%	1,7%	4,6%	94,1
11	55	0,2%	0,7%	1,5%	3,8%	102,4
12	60	0,1%	0,5%	1,2%	3,2%	110,9
13	65	0,0%	0,4%	0,8%	2,6%	119,4
14	70	0,0%	0,2%	0,6%	2,2%	127,9
15	75	0,0%	0,1%	0,5%	1,9%	136,3
16	80	0,0%	0,1%	0,5%	1,7%	144,6
17	85	0,0%	0,1%	0,5%	1,5%	152,9
18	90	0,0%	0,1%	0,4%	1,2%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,1%	1,1%	170,1

Tabla 28. Diferencia relativa en ToF para una fisura ubicada en D/4.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto				
		Espesor fisura				ToF sin defecto (μs)
		H/6	H/4	H/3	H/2	
0	0	-	-	-		-
1	5	-	-	-	-	14,66
2	10	17,5%	32,6%	45,2%	75,0%	23,83
3	15	10,9%	17,9%	25,8%	45,0%	32,9
4	20	6,4%	10,7%	16,2%	29,4%	41,9
5	25	3,1%	6,1%	9,8%	19,3%	51,2
6	30	1,0%	2,8%	5,6%	13,1%	60,5
7	35	0,6%	2,2%	4,4%	10,2%	68,9
8	40	0,5%	1,7%	3,4%	8,2%	77,2
9	45	0,4%	1,2%	2,6%	6,5%	85,7
10	50	0,3%	1,0%	2,1%	5,3%	94,1
11	55	0,3%	0,9%	1,9%	4,6%	102,4
12	60	0,2%	0,6%	1,4%	3,7%	110,9
13	65	0,1%	0,5%	1,1%	3,1%	119,4
14	70	0,0%	0,3%	0,9%	2,7%	127,9
15	75	0,0%	0,2%	0,7%	2,3%	136,3
16	80	0,0%	0,2%	0,6%	2,1%	144,6
17	85	0,0%	0,2%	0,6%	1,9%	152,9
18	90	0,0%	0,1%	0,5%	1,7%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,3%	1,4%	170,1

ANEXO I

Tabla 29. Tiempos de vuelo experimentales para distintas profundidades de fisura ubicada a 10 cm del emisor.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μs)				
		Profundidad fisura				Muestra sin fisura
		H/6	H/4	H/3	H/2	
0	0	-	-	-	-	
1	5	-	-	-	-	
2	10	23,9	24,4	25	25,4	23,5
3	15	57,4	78,5	115,3	170,5	31,3
4	20	61,9	81,3	99,4	172,3	41,4
5	25	73,7	88,1	100,5	179	50,3
6	30	76,6	93,5	107	180,2	59,1
7	35	85,2	100,2	114,5	184,8	69,1
8	40	92,7	106,6	119,3	188,3	77,7
9	45	101	117,7	128,7	193,6	86,5
10	50	111,1	125	141,7	199,7	95,5

Tabla 30. Diferencias relativas en tiempos de vuelo para distintas profundidades de fisura ubicada a 10 cm del emisor.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto				
		Profundidad fisura				ToF sin defecto (µs)
		H/6	H/4	H/3	H/2	
0	0	-	-	-		-
1	5	-	-	-	-	-
2	10	1,7%	3,8%	6,4%	8,1%	23,5
3	15	83,4%	150,8%	268,4%	444,7%	31,3
4	20	49,5%	96,4%	140,1%	316,2%	41,4
5	25	46,5%	75,1%	99,8%	255,9%	50,3
6	30	29,6%	58,2%	81,0%	204,9%	59,1
7	35	23,3%	45,0%	65,7%	167,4%	69,1
8	40	19,3%	37,2%	53,5%	142,3%	77,7
9	45	16,8%	36,1%	48,8%	123,8%	86,5
10	50	16,3%	30,9%	48,4%	109,1%	95,5

ANEXO I

Tabla 31. Tiempos de vuelo experimentales para distintas profundidades de fisura ubicada en D/2.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μs)				
		Profundidad fisura				Muestra sin fisura
		H/6	H/4	H/3	H/2	
0	0		-	-	-	
1	5		-	-	-	
2	10	53,5	92,7	117,1	177,4	22,3
3	15	57	81,7	112,5	179,4	31,7
4	20	62,2	80,6	97,3	172	41,6
5	25	68,6	85,1	99,5	170,1	50,3
6	30	75,9	90,1	103,2	174,4	59,3
7	35	82,7	101,1	110	176,9	68,1
8	40	90,1	107	114,8	183,8	77,7
9	45	99,8	112,5	122,5	187,2	86,9
10	50	108	118,1	128,3	196,6	97,1

Tabla 32. Diferencias relativas en tiempos de vuelo para distintas profundidades de fisura ubicada en D/2.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto				
		Profundidad fisura				ToF sin defecto (µs)
		H/6	H/4	H/3	H/2	
0	0	-	-	-	-	-
1	5	-	-	-	-	-
2	10	139,9%	315,7%	425,1%	695,5%	22,3
3	15	79,8%	157,7%	254,9%	465,9%	31,7
4	20	49,5%	93,8%	133,9%	313,5%	41,6
5	25	36,4%	69,2%	97,8%	238,2%	50,3
6	30	28,0%	51,9%	74,0%	194,1%	59,3
7	35	21,4%	48,5%	61,5%	159,8%	68,1
8	40	16,0%	37,7%	47,7%	136,6%	77,7
9	45	14,8%	29,5%	41,0%	115,4%	86,9
10	50	11,2%	21,6%	32,1%	102,5%	97,1

ANEXO I

Tabla 33. Tiempos de vuelo para un nudo con centro en superficie.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)			
		Ubicación nudo			Modelo sin defecto
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	15,4	15,4	15,4	14,66
2	10	24,3	24,3	24,3	23,83
3	15	33,3	33,3	33,3	32,9
4	20	42,3	42,3	42,3	41,9
5	25	51,5	51,5	51,5	51,2
6	30	60,6	60,6	60,6	60,5
7	35	68,9	68,9	68,9	68,9
8	40	77,2	77,2	77,2	77,2
9	45	85,7	85,7	85,7	85,7
10	50	94,1	94,1	94,1	94,1
11	55	102,4	102,4	102,4	102,4
12	60	110,9	110,9	110,9	110,9
13	65	119,4	119,4	119,4	119,4
14	70	127,9	127,9	127,9	127,9
15	75	136,3	136,3	136,3	136,3
16	80	144,6	144,6	144,6	144,6
17	85	152,9	152,9	152,9	152,9
18	90	161,4	161,4	161,4	161,4
19	95	170,1	170,1	170,1	170,1

Tabla 34. Diferencia relativa en ToF para un nudo con centro en superficie.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto			
		Ubicación nudo			ToF modelo sin defecto (μ s)
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	5,0%	5,0%	5,0%	14,66
2	10	2,0%	2,0%	2,0%	23,83
3	15	1,2%	1,2%	1,2%	32,9
4	20	1,0%	1,0%	1,0%	41,9
5	25	0,6%	0,6%	0,6%	51,2
6	30	0,2%	0,2%	0,2%	60,5
7	35	0,0%	0,0%	0,0%	68,9
8	40	0,0%	0,0%	0,0%	77,2
9	45	0,0%	0,0%	0,0%	85,7
10	50	0,0%	0,0%	0,0%	94,1
11	55	0,0%	0,0%	0,0%	102,4
12	60	0,0%	0,0%	0,0%	110,9
13	65	0,0%	0,0%	0,0%	119,4
14	70	0,0%	0,0%	0,0%	127,9
15	75	0,0%	0,0%	0,0%	136,3
16	80	0,0%	0,0%	0,0%	144,6
17	85	0,0%	0,0%	0,0%	152,9
18	90	0,0%	0,0%	0,0%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,0%	170,1

ANEXO I

Tabla 35. Tiempos de vuelo para un nudo con centro en H/8.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)			
		Ubicación nudo			Modelo sin defecto
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	14,9	14,9	14,9	14,66
2	10	24,3	24,3	24,3	23,83
3	15	33,5	33,5	33,5	32,9
4	20	42,4	42,4	42,4	41,9
5	25	51,5	51,5	51,5	51,2
6	30	60,8	60,7	60,7	60,5
7	35	69,2	69,1	69,1	68,9
8	40	77,5	77,4	77,4	77,2
9	45	86	85,9	85,9	85,7
10	50	94,4	94,3	94,3	94,1
11	55	102,7	102,6	102,6	102,4
12	60	111,1	111,1	111	110,9
13	65	119,5	119,5	119,4	119,4
14	70	127,9	127,9	127,9	127,9
15	75	136,3	136,3	136,3	136,3
16	80	144,6	144,6	144,6	144,6
17	85	152,9	152,9	152,9	152,9
18	90	161,4	161,4	161,4	161,4
19	95	170,1	170,1	170,1	170,1

Tabla 36. Diferencia relativa en ToF para un nudo con centro en H/8.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto			
		Ubicación nudo			ToF sin defecto (μ s)
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	1,6%	1,6%	1,6%	14,66
2	10	2,0%	2,0%	2,0%	23,83
3	15	1,8%	1,8%	1,8%	32,9
4	20	1,2%	1,2%	1,2%	41,9
5	25	0,6%	0,6%	0,6%	51,2
6	30	0,5%	0,3%	0,3%	60,5
7	35	0,4%	0,3%	0,3%	68,9
8	40	0,4%	0,3%	0,3%	77,2
9	45	0,4%	0,2%	0,2%	85,7
10	50	0,3%	0,2%	0,2%	94,1
11	55	0,3%	0,2%	0,2%	102,4
12	60	0,2%	0,2%	0,1%	110,9
13	65	0,1%	0,1%	0,0%	119,4
14	70	0,0%	0,0%	0,0%	127,9
15	75	0,0%	0,0%	0,0%	136,3
16	80	0,0%	0,0%	0,0%	144,6
17	85	0,0%	0,0%	0,0%	152,9
18	90	0,0%	0,0%	0,0%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,0%	170,1

ANEXO I

Tabla 37. Tiempos de vuelo para un nudo con centro en H/6.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μs)			
		Ubicación nudo			Modelo sin defecto
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	14,7	14,7	14,7	14,66
2	10	24,1	24,1	24	23,83
3	15	33,4	33,4	33,3	32,9
4	20	42,5	42,4	42,4	41,9
5	25	51,6	51,5	51,5	51,2
6	30	60,9	60,8	60,8	60,5
7	35	69,3	69,2	69,2	68,9
8	40	77,6	77,5	77,5	77,2
9	45	86,1	86	86	85,7
10	50	94,5	94,4	94,4	94,1
11	55	102,8	102,7	102,7	102,4
12	60	111,2	111,1	111,1	110,9
13	65	119,5	119,5	119,5	119,4
14	70	127,9	127,9	127,9	127,9
15	75	136,3	136,3	136,3	136,3
16	80	144,6	144,6	144,6	144,6
17	85	152,9	152,9	152,9	152,9
18	90	161,4	161,4	161,4	161,4
19	95	170,1	170,1	170,1	170,1

Tabla 38. Diferencia relativa en ToF para un nudo con centro en H/6.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto			
		Ubicación nudo			ToF sin defecto (μs)
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	0,3%	0,3%	0,3%	14,66
2	10	1,1%	1,1%	0,7%	23,83
3	15	1,5%	1,5%	1,2%	32,9
4	20	1,4%	1,2%	1,2%	41,9
5	25	0,8%	0,6%	0,6%	51,2
6	30	0,7%	0,5%	0,5%	60,5
7	35	0,6%	0,4%	0,4%	68,9
8	40	0,5%	0,4%	0,4%	77,2
9	45	0,5%	0,4%	0,4%	85,7
10	50	0,4%	0,3%	0,3%	94,1
11	55	0,4%	0,3%	0,3%	102,4
12	60	0,3%	0,2%	0,2%	110,9
13	65	0,1%	0,1%	0,1%	119,4
14	70	0,0%	0,0%	0,0%	127,9
15	75	0,0%	0,0%	0,0%	136,3
16	80	0,0%	0,0%	0,0%	144,6
17	85	0,0%	0,0%	0,0%	152,9
18	90	0,0%	0,0%	0,0%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,0%	170,1

ANEXO I

Tabla 39. Tiempos de vuelo para un nudo con centro en H/4.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)			
		Ubicación nudo			Modelo sin defecto
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	14,66	14,66	14,66	14,66
2	10	23,83	23,83	23,83	23,83
3	15	33,1	33,1	33,1	32,9
4	20	42,3	42,3	42,3	41,9
5	25	52,1	52,1	52,1	51,2
6	30	61,1	61,1	61,1	60,5
7	35	69,6	69,5	69,5	68,9
8	40	78	77,9	77,9	77,2
9	45	86,3	86,3	86,2	85,7
10	50	94,8	94,7	94,6	94,1
11	55	103,1	103	102,9	102,4
12	60	111,5	111,4	111,3	110,9
13	65	119,8	119,7	119,6	119,4
14	70	128,2	128,1	128	127,9
15	75	136,5	136,4	136,3	136,3
16	80	144,8	144,7	144,6	144,6
17	85	153,1	153	152,9	152,9
18	90	161,5	161,5	161,4	161,4
19	95	170,1	170,1	170,1	170,1

Tabla 40. Diferencia relativa en ToF para un nudo con centro en H/4.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto			
		Ubicación nudo			ToF sin defecto (μ s)
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	0,0%	0,0%	0,0%	14,66
2	10	0,0%	0,0%	0,0%	23,83
3	15	0,6%	0,6%	0,6%	32,9
4	20	1,0%	1,0%	1,0%	41,9
5	25	1,8%	1,8%	1,8%	51,2
6	30	1,0%	1,0%	1,0%	60,5
7	35	1,0%	0,9%	0,9%	68,9
8	40	1,0%	0,9%	0,9%	77,2
9	45	0,7%	0,7%	0,6%	85,7
10	50	0,7%	0,6%	0,5%	94,1
11	55	0,7%	0,6%	0,5%	102,4
12	60	0,5%	0,5%	0,4%	110,9
13	65	0,3%	0,3%	0,2%	119,4
14	70	0,2%	0,2%	0,1%	127,9
15	75	0,1%	0,1%	0,0%	136,3
16	80	0,1%	0,1%	0,0%	144,6
17	85	0,1%	0,1%	0,0%	152,9
18	90	0,1%	0,1%	0,0%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,0%	170,1

ANEXO I

Tabla 41. Tiempos de vuelo para un nudo con centro en H/2.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)			
		Ubicación nudo			Modelo sin defecto
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	14,66	14,66	14,66	14,66
2	10	23,83	23,83	23,83	23,83
3	15	32,9	32,9	32,9	32,9
4	20	41,9	41,9	41,9	41,9
5	25	51,2	51,2	51,2	51,2
6	30	60,5	60,5	60,5	60,5
7	35	68,9	68,9	68,9	68,9
8	40	77,2	77,2	77,2	77,2
9	45	85,7	85,7	85,7	85,7
10	50	94,1	94,1	94,1	94,1
11	55	102,4	102,4	102,4	102,4
12	60	110,9	110,9	110,9	110,9
13	65	119,4	119,4	119,4	119,4
14	70	127,9	127,9	127,9	127,9
15	75	136,3	136,3	136,4	136,3
16	80	144,6	144,6	144,9	144,6
17	85	152,9	153	153,3	152,9
18	90	161,4	161,5	161,8	161,4
19	95	170,1	170,1	170,2	170,1

Tabla 42. Diferencia relativa en ToF para un nudo con centro en H/2.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto			
		Ubicación nudo			ToF sin defecto (μ s)
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	0,0%	0,0%	0,0%	14,66
2	10	0,0%	0,0%	0,0%	23,83
3	15	0,0%	0,0%	0,0%	32,9
4	20	0,0%	0,0%	0,0%	41,9
5	25	0,0%	0,0%	0,0%	51,2
6	30	0,0%	0,0%	0,0%	60,5
7	35	0,0%	0,0%	0,0%	68,9
8	40	0,0%	0,0%	0,0%	77,2
9	45	0,0%	0,0%	0,0%	85,7
10	50	0,0%	0,0%	0,0%	94,1
11	55	0,0%	0,0%	0,0%	102,4
12	60	0,0%	0,0%	0,0%	110,9
13	65	0,0%	0,0%	0,0%	119,4
14	70	0,0%	0,0%	0,0%	127,9
15	75	0,0%	0,0%	0,1%	136,3
16	80	0,0%	0,0%	0,2%	144,6
17	85	0,0%	0,1%	0,3%	152,9
18	90	0,0%	0,1%	0,2%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,1%	170,1

ANEXO I

Tabla 43. Diferencia relativa en ToF para nudo ubicado en D/2.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto					
		Profundidad nudo					ToF modelo sin defecto (μs)
		Sup.	H/8	H/6	H/4	H/2	
0	0	-			-	-	-
1	5	5,0%	1,6%	0,3%	0,0%	0,0%	14,66
2	10	2,0%	2,0%	0,7%	0,0%	0,0%	23,83
3	15	1,2%	1,8%	1,2%	0,6%	0,0%	32,9
4	20	1,0%	1,2%	1,2%	1,0%	0,0%	41,9
5	25	0,6%	0,6%	0,6%	1,8%	0,0%	51,2
6	30	0,2%	0,3%	0,5%	1,0%	0,0%	60,5
7	35	0,0%	0,3%	0,4%	0,9%	0,0%	68,9
8	40	0,0%	0,3%	0,4%	0,9%	0,0%	77,2
9	45	0,0%	0,2%	0,4%	0,6%	0,0%	85,7
10	50	0,0%	0,2%	0,3%	0,5%	0,0%	94,1
11	55	0,0%	0,2%	0,3%	0,5%	0,0%	102,4
12	60	0,0%	0,1%	0,2%	0,4%	0,0%	110,9
13	65	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	119,4
14	70	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	127,9
15	75	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	136,3
16	80	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	144,6
17	85	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	152,9
18	90	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	170,1

ANEXO I

Tabla 44. Diferencia relativa en ToF para nudo ubicado en D/3.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto					
		Profundidad nudo					ToF modelo sin defecto (μs)
		Sup.	H/8	H/6	H/4	H/2	
0	0	-			-	-	-
1	5	5,0%	1,6%	0,3%	0,0%	0,0%	14,66
2	10	2,0%	2,0%	1,1%	0,0%	0,0%	23,83
3	15	1,2%	1,8%	1,5%	0,6%	0,0%	32,9
4	20	1,0%	1,2%	1,2%	1,0%	0,0%	41,9
5	25	0,6%	0,6%	0,6%	1,8%	0,0%	51,2
6	30	0,2%	0,3%	0,5%	1,0%	0,0%	60,5
7	35	0,0%	0,3%	0,4%	0,9%	0,0%	68,9
8	40	0,0%	0,3%	0,4%	0,9%	0,0%	77,2
9	45	0,0%	0,2%	0,4%	0,7%	0,0%	85,7
10	50	0,0%	0,2%	0,3%	0,6%	0,0%	94,1
11	55	0,0%	0,2%	0,3%	0,6%	0,0%	102,4
12	60	0,0%	0,2%	0,2%	0,5%	0,0%	110,9
13	65	0,0%	0,1%	0,1%	0,3%	0,0%	119,4
14	70	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	127,9
15	75	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	136,3
16	80	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	144,6
17	85	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	152,9
18	90	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	170,1

ANEXO I

Tabla 45. Diferencia relativa en ToF para nudo ubicado en D/4.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto					
		Profundidad nudo					ToF modelo sin defecto (μs)
		Sup.	H/8	H/6	H/4	H/2	
0	0	-			-	-	-
1	5	5,0%	1,6%	0,3%	0,0%	0,0%	14,66
2	10	2,0%	2,0%	1,1%	0,0%	0,0%	23,83
3	15	1,2%	1,8%	1,5%	0,6%	0,0%	32,9
4	20	1,0%	1,2%	1,4%	1,0%	0,0%	41,9
5	25	0,6%	0,6%	0,8%	1,8%	0,0%	51,2
6	30	0,2%	0,5%	0,7%	1,0%	0,0%	60,5
7	35	0,0%	0,4%	0,6%	1,0%	0,0%	68,9
8	40	0,0%	0,4%	0,5%	1,0%	0,0%	77,2
9	45	0,0%	0,4%	0,5%	0,7%	0,0%	85,7
10	50	0,0%	0,3%	0,4%	0,7%	0,0%	94,1
11	55	0,0%	0,3%	0,4%	0,7%	0,0%	102,4
12	60	0,0%	0,2%	0,3%	0,5%	0,0%	110,9
13	65	0,0%	0,1%	0,1%	0,3%	0,0%	119,4
14	70	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	127,9
15	75	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	136,3
16	80	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	144,6
17	85	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	152,9
18	90	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	161,4
19	95	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	170,1

ANEXO I

Tabla 46. ToF muestras D041 (con nudo) y D057 (sin nudo).

Punto	Distancia (cm)	ToF (μs)		Dif. Relativa
		D041	D057	
		Con nudo	Sin nudo	
0	0	-	-	-
1	5	-	-	-
2	10	26,2	22,3	17,5%
3	15	36,7	31,7	15,8%
4	20	48,1	41,6	15,6%
5	25	58,7	50,3	16,7%
6	30	68,9	59,3	16,2%
7	35	80,5	68,1	18,2%
8	40	89,4	77,7	15,1%
9	45	98,3	86,9	13,1%
10	50	108,7	97,1	11,9%

Tabla 47. Diferencias relativas en ToF experimentales y simulados.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μs)		Dif. Relativa
		Exp.	COMSOL	
0	0	-	-	-
1	5	-	-	-
2	10	26,2	24,3	-7,25%
3	15	36,7	33,3	-9,26%
4	20	48,1	42,3	-12,06%
5	25	58,7	51,5	-12,27%
6	30	68,9	60,6	-12,05%
7	35	80,5	68,9	-14,41%
8	40	89,4	77,2	-13,65%
9	45	98,3	85,7	-12,82%
10	50	108,7	94,1	-13,43%

ANEXO I

Tabla 48. Tiempos de vuelo para una delaminación de ancho D.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)			
		Profundidad delaminación			Modelo sin defecto
		0,4H	0,6H	0,8H	
0	0	-	-	-	-
1	5	14,66	14,66	14,66	14,66
2	10	23,83	23,83	23,83	23,83
3	15	32,9	32,9	32,9	32,9
4	20	41,9	41,9	41,9	41,9
5	25	51,2	51,2	51,2	51,2
6	30	60	60,5	60,5	60,5
7	35	68,2	68,9	68,9	68,9
8	40	76,3	77,2	77,2	77,2
9	45	84,6	85,6	85,7	85,7
10	50	92,8	93,9	94,1	94,1
11	55	100,9	102,1	102,4	102,4
12	60	109,2	110,5	110,9	110,9
13	65	117,4	118,7	119,3	119,4
14	70	125,6	127	127,7	127,9
15	75	133,9	135,2	136	136,3
16	80	142	143,5	144,3	144,6
17	85	150,2	151,7	152,6	152,9
18	90	158,4	160	161	161,4
19	95	166,7	168,2	169,3	170,1

Tabla 49. Diferencia relativa en ToF para una delaminación de ancho D.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto			
		Profundidad delaminación			Modelo sin defecto
		0,4H	0,6H	0,8H	
0	0	-	-	-	-
1	5	0,0%	0,0%	0,0%	14,66
2	10	0,0%	0,0%	0,0%	23,83
3	15	0,0%	0,0%	0,0%	32,9
4	20	0,0%	0,0%	0,0%	41,9
5	25	0,0%	0,0%	0,0%	51,2
6	30	-0,8%	0,0%	0,0%	60,5
7	35	-1,0%	0,0%	0,0%	68,9
8	40	-1,2%	0,0%	0,0%	77,2
9	45	-1,3%	-0,1%	0,0%	85,7
10	50	-1,4%	-0,2%	0,0%	94,1
11	55	-1,5%	-0,3%	0,0%	102,4
12	60	-1,5%	-0,4%	0,0%	110,9
13	65	-1,7%	-0,6%	-0,1%	119,4
14	70	-1,8%	-0,7%	-0,2%	127,9
15	75	-1,8%	-0,8%	-0,2%	136,3
16	80	-1,8%	-0,8%	-0,2%	144,6
17	85	-1,8%	-0,8%	-0,2%	152,9
18	90	-1,9%	-0,9%	-0,2%	161,4
19	95	-2,0%	-1,1%	-0,5%	170,1

ANEXO I

Tabla 50. Tiempos de vuelo para una delaminación de ancho D/2.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)			
		Profundidad delaminación			Modelo sin defecto
		0,4H	0,6H	0,8H	
0	0	-	-	-	-
1	5	14,66	14,66	14,66	14,66
2	10	23,83	23,83	23,83	23,83
3	15	32,9	32,9	32,9	32,9
4	20	41,9	41,9	41,9	41,9
5	25	51,2	51,2	51,2	51,2
6	30	60	60,5	60,5	60,5
7	35	68,2	68,9	68,9	68,9
8	40	76,3	77,2	77,2	77,2
9	45	84,6	85,6	85,7	85,7
10	50	92,8	93,9	94,1	94,1
11	55	101	102,1	102,4	102,4
12	60	109,3	110,5	110,9	110,9
13	65	117,6	118,7	119,3	119,4
14	70	125,9	127	127,7	127,9
15	75	134,1	135,2	136	136,3
16	80	142,3	143,5	144,3	144,6
17	85	150,6	151,7	152,6	152,9
18	90	159	160	161	161,4
19	95	167,5	168,3	169,3	170,1

Tabla 51. Diferencia relativa en ToF para una delaminación de ancho D/2.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto			
		Profundidad delaminación			Modelo sin defecto
		0,4H	0,6H	0,8H	
0	0	-	-	-	-
1	5	0,0%	0,0%	0,0%	14,66
2	10	0,0%	0,0%	0,0%	23,83
3	15	0,0%	0,0%	0,0%	32,9
4	20	0,0%	0,0%	0,0%	41,9
5	25	0,0%	0,0%	0,0%	51,2
6	30	-0,8%	0,0%	0,0%	60,5
7	35	-1,0%	0,0%	0,0%	68,9
8	40	-1,2%	0,0%	0,0%	77,2
9	45	-1,3%	-0,1%	0,0%	85,7
10	50	-1,4%	-0,2%	0,0%	94,1
11	55	-1,4%	-0,3%	0,0%	102,4
12	60	-1,4%	-0,4%	0,0%	110,9
13	65	-1,5%	-0,6%	-0,1%	119,4
14	70	-1,6%	-0,7%	-0,2%	127,9
15	75	-1,6%	-0,8%	-0,2%	136,3
16	80	-1,6%	-0,8%	-0,2%	144,6
17	85	-1,5%	-0,8%	-0,2%	152,9
18	90	-1,5%	-0,9%	-0,2%	161,4
19	95	-1,5%	-1,1%	-0,5%	170,1

ANEXO I

Tabla 52. ToF para ataque biótico ubicado en D/4, D/3 y D/2.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μs)			
		Ubicación ataque biótico			Modelo sin defecto
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	15,35	15,35	15,35	14,66
2	10	25	25,1	25,15	23,83
3	15	34,5	34,5	34,4	32,9
4	20	43,6	43,5	43,5	41,9
5	25	52,5	52,4	52,3	51,2
6	30	61,8	61,7	61,5	60,5
7	35	70,4	70,2	70	68,9
8	40	78,8	78,7	78,4	77,2
9	45	87,1	86,9	86,7	85,7
10	50	95,4	95,2	95	94,1
11	55	103,7	103,5	103,4	102,4
12	60	112	111,8	111,7	110,9
13	65	120,3	120,1	120	119,4
14	70	128,6	128,5	128,3	127,9
15	75	136,9	136,8	136,7	136,3
16	80	145,2	145	145	144,6
17	85	153,5	153,4	153,4	152,9
18	90	161,8	161,6	161,6	161,4
19	95	170,3	170,1	170,1	170,1

Tabla 53. Diferencia relativa en ToF para ataque biótico en D/4, D/3 y D/2.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto sin defecto			
		Ubicación ataque biótico			ToF sin defecto (μs)
		D/4	D/3	D/2	
0	0	-	-	-	-
1	5	4,7%	4,7%	4,7%	14,66
2	10	4,9%	5,3%	5,5%	23,83
3	15	4,9%	4,9%	4,6%	32,9
4	20	4,1%	3,8%	3,8%	41,9
5	25	2,5%	2,3%	2,1%	51,2
6	30	2,1%	2,0%	1,7%	60,5
7	35	2,2%	1,9%	1,6%	68,9
8	40	2,1%	1,9%	1,6%	77,2
9	45	1,6%	1,4%	1,2%	85,7
10	50	1,4%	1,2%	1,0%	94,1
11	55	1,3%	1,1%	1,0%	102,4
12	60	1,0%	0,8%	0,7%	110,9
13	65	0,8%	0,6%	0,5%	119,4
14	70	0,5%	0,5%	0,3%	127,9
15	75	0,4%	0,4%	0,3%	136,3
16	80	0,4%	0,3%	0,3%	144,6
17	85	0,4%	0,3%	0,3%	152,9
18	90	0,2%	0,1%	0,1%	161,4
19	95	0,1%	0,0%	0,0%	170,1

ANEXO I

Tabla 54. ToF para ataque biótico ubicado a 10 y 30 cm.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μs)		Modelo sin defecto
		Ubicación ataque biótico		
		10 cm	30 cm	
0	0	-	-	-
1	5	14,77	14,66	14,66
2	10	24,5	23,83	23,83
3	15	34,4	32,9	32,9
4	20	43,5	41,9	41,9
5	25	52,4	51,5	51,2
6	30	61,8	61	60,5
7	35	70,4	70,9	68,9
8	40	78,8	78,9	77,2
9	45	87,2	86,9	85,7
10	50	95,6	95,2	94,1
11	55	103,9	103,4	102,4
12	60	112,3	111,7	110,9
13	65	120,7	120	119,4
14	70	129,1	128,3	127,9
15	75	137,4	136,7	136,3
16	80	145,8	145	144,6
17	85	154,1	153,3	152,9
18	90	162,6	161,8	161,4
19	95	171	170,2	170,1

Tabla 55. Diferencia relativa en ToF para ataque biótico a 10 y 30 cm.

Punto	Distancia (cm)	Dif. relativa ToF con respecto sin defecto		
		Ubicación ataque biótico		ToF sin defecto (μ s)
		10 cm	30 cm	
0	0	-	-	-
1	5	0,8%	0,0%	14,66
2	10	2,8%	0,0%	23,83
3	15	4,6%	0,0%	32,9
4	20	3,8%	0,0%	41,9
5	25	2,3%	0,6%	51,2
6	30	2,1%	0,8%	60,5
7	35	2,2%	2,9%	68,9
8	40	2,1%	2,2%	77,2
9	45	1,8%	1,4%	85,7
10	50	1,6%	1,2%	94,1
11	55	1,5%	1,0%	102,4
12	60	1,3%	0,7%	110,9
13	65	1,1%	0,5%	119,4
14	70	0,9%	0,3%	127,9
15	75	0,8%	0,3%	136,3
16	80	0,8%	0,3%	144,6
17	85	0,8%	0,3%	152,9
18	90	0,7%	0,2%	161,4
19	95	0,5%	0,1%	170,1

ANEXO I

Tabla 56. ToF experimentales y simulados para ataque biótico en D/2.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)		Dif. Relativa
		Exp.	COMSOL	
0	0	-	-	-
1	5	-	-	-
2	10	22,4	25	11,61%
3	15	32	34,4	7,50%
4	20	41,9	43,5	3,82%
5	25	48,8	52,3	7,17%
6	30	57,2	61,2	6,99%
7	35	65,2	69,5	6,60%
8	40	73,8	77,8	5,42%
9	45	83,2	86,3	3,73%
10	50	90,2	94,6	4,88%

Tabla 57. Diferencias relativas en tiempos de vuelo experimentales y simulados para ataque biótico en D/2.

Punto	Distancia (cm)	Dif. Relativa respecto sana	
		Experimental	COMSOL
0	0	-	-
1	5	-	-
2	10	4,7%	4,9%
3	15	4,6%	4,6%
4	20	4,2%	3,8%
5	25	2,3%	2,1%
6	30	1,1%	1,2%
7	35	0,6%	0,9%
8	40	0,4%	0,8%
9	45	0,6%	0,7%
10	50	0,7%	0,5%

ANEXO I

Tabla 58. ToF experimentales y simulados para ataque biótico en 10 cm.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)		Dif. Relativa
		Exp.	COMSOL	
0	0	-	-	-
1	5	-	-	-
2	10	22,3	24,6	10,31%
3	15	32	34,6	8,13%
4	20	41,7	43,6	4,56%
5	25	48,5	52,4	8,04%
6	30	57,3	61,5	7,33%
7	35	65,5	69,9	6,72%
8	40	73,9	78,1	5,68%
9	45	83	86,6	4,34%
10	50	90,1	94,9	5,33%

Tabla 59. Diferencias relativas en tiempos de vuelo experimentales y simulados para ataque biótico en 10 cm.

Punto	Distancia (cm)	Dif. Relativa respecto sana	
		Experimental	COMSOL
0	0	-	-
1	5	-	-
2	10	4,2%	3,2%
3	15	4,6%	5,2%
4	20	3,7%	4,1%
5	25	1,7%	2,3%
6	30	1,2%	1,7%
7	35	1,1%	1,5%
8	40	0,5%	1,2%
9	45	0,4%	1,1%
10	50	0,6%	0,9%

ANEXO I

Tabla 60. ToF para fisura en D/2 considerando medio ortótropo.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)			
		Profundidad fisura			
		H/6	H/4	H/3	H/2
0	0	-	-	-	-
1	5	29,9	38,7	48	66,8
2	10	36,8	43,6	51,6	69,8
3	15	45,6	50,5	57	73,3
4	20	55,1	58,7	63,8	77,9
5	25	65	67,8	72	83,9
6	30	75	77,4	80,8	90,8
7	35	85,2	87,2	90,2	98,7
8	40	95,4	97,2	99,8	107,1
9	45	105,7	107,4	109,6	116,1
10	50	116,1	117,6	119,5	125,2
11	55	126,4	127,8	129,6	135
12	60	136,8	138	139,8	144,8
13	65	147,2	148,3	149,9	154,5
14	70	157,4	158,5	160,2	164
15	75	167,8	168,8	170,2	174,4
16	80	178,2	179,1	180,6	184,1
17	85	188,4	189,4	190,8	194,1
18	90	199,2	199,9	200,9	203,9
19	95	209,5	210,4	211,4	213,8

Tabla 61. Diferencia relativa en ToF para fisura ubicada en D/2 con respecto a su homólogo en medio isótropo.

Punto	Distancia (cm)	Diferencia relativa ToF con respecto medio isótropo			
		Profundidad fisura			
		H/6	H/4	H/3	H/2
0	0	-	-	-	-
1	5	45,1%	57,3%	69,6%	84,0%
2	10	34,3%	40,2%	51,3%	69,8%
3	15	26,3%	32,9%	40,7%	57,0%
4	20	24,7%	28,4%	34,0%	47,3%
5	25	24,0%	26,3%	30,4%	40,3%
6	30	23,6%	25,2%	28,1%	35,5%
7	35	23,3%	24,6%	26,9%	32,7%
8	40	23,3%	24,5%	26,2%	30,5%
9	45	23,2%	24,3%	25,7%	29,0%
10	50	23,2%	24,2%	25,1%	27,9%
11	55	23,3%	24,1%	25,0%	27,5%
12	60	23,4%	23,9%	24,8%	27,0%
13	65	23,3%	23,8%	24,6%	26,5%
14	70	23,1%	23,7%	24,6%	25,9%
15	75	23,1%	23,7%	24,3%	25,9%
16	80	23,2%	23,7%	24,4%	25,5%
17	85	23,2%	23,7%	24,3%	25,2%
18	90	23,4%	23,8%	24,1%	24,9%
19	95	23,2%	23,7%	24,2%	24,6%

Tabla 62. Tiempos de vuelo en función de la dimensión del canto.

Punto	Distancia (cm)	ToF (μ s)				
		H = 4 cm	H = 5 cm	H = 7 cm	H = 12 cm	H = 17 cm
0	0	-	-	-	-	-
1	5	14,66	14,66	14,66	14,66	14,66
2	10	23,83	23,83	23,83	23,83	23,83
3	15	32,75	32,9	32,9	32,9	32,9
4	20	41,34	41,77	41,9	41,9	41,9
5	25	49,9	50,35	51,1	51,2	51,2
6	30	58,5	58,86	60,2	60,5	60,5
7	35	67,2	67,4	68,6	68,9	68,9
8	40	76,1	76,3	77,0	77,1	77,2
9	45	85,0	84,8	85,5	85,7	85,7
10	50	93,3	93,9	94,0	94,1	94,1
11	55	101,6	102,2	102,4	102,5	102,4
12	60	109,8	110,5	110,9	110,9	110,9
13	65	118,0	118,7	119,4	119,4	119,4
14	70	126,2	126,9	127,9	127,9	127,9
15	75	134,4	135,3	136,3	136,3	136,3
16	80	142,7	143,4	144,5	144,6	144,6
17	85	151,1	151,7	152,8	152,9	152,9
18	90	159,3	159,9	161,2	161,4	161,4
19	95	167,4	168,3	169,4	170,1	170,1

ANEXO II

ANEXO II

Script de Python para simulación de ataque biótico

```
import random
import math
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import ezdxf

def generar_puntos(x_dim, y_dim, n, d_min, d_max, max_intentos=10000):
    puntos = []
    intentos = 0

    while len(puntos) < n and intentos < max_intentos:
        intentos += 1

        d = random.uniform(d_min, d_max)
        r = d / 2

        # generar punto dentro del rectángulo
        x = random.uniform(r, x_dim - r)
        y = random.uniform(r, y_dim - r)

        # comprobar solapamiento
        valido = True
        for (x2, y2, d2) in puntos:
            r2 = d2 / 2
            distancia = math.dist((x, y), (x2, y2))
            if distancia < (r + r2):
                valido = False
                break

        if valido:
            puntos.append((x, y, d))

    return puntos

# =====
# Parámetros de simulación
# =====
x_dim = 0.1      # m ancho del rectángulo
y_dim = 0.05     # m alto del rectángulo
n = 100          # número de agujeros
d_min = 0.001    # m diámetro mínimo
d_max = 0.003    # m diámetro máximo

# Generar agujeros
lista_puntos = generar_puntos(x_dim, y_dim, n, d_min, d_max)

# Visualización
fig, ax = plt.subplots()
ax.set_aspect('equal')
ax.set_xlim(0, x_dim)
ax.set_ylim(0, y_dim)
ax.set_title("Distribución de ataque biótico simulado")
ax.set_xlabel("Eje X (m)")
ax.set_ylabel("Eje Y (m)")

# Dibujar rectángulo de borde
rect = plt.Rectangle((0, 0), x_dim, y_dim, fill=False, edgecolor="black")
ax.add_patch(rect)
```

```
# Dibujar círculos
for (x, y, d) in lista_puntos:
    circ = plt.Circle((x, y), d/2, fill=False, edgecolor="blue")
    ax.add_patch(circ)
    ax.plot(x, y, "ro", markersize=2) # centro del círculo

plt.show()

def exportar_a_dxf(lista_puntos, nombre_archivo="agujeros.dxf"):
    doc = ezdxf.new(dxfversion="R2010")
    msp = doc.modelspace()

    for (x, y, d) in lista_puntos:
        r = d / 2
        msp.add_circle((x, y), r, dxfattribs={"layer": "Agujeros"})

    doc.saveas(nombre_archivo)
    print(f"Archivo DXF exportado: {nombre_archivo}")

exportar_a_dxf(lista_puntos, "agujeros.dxf")
```

Modelización y contraste experimental de la propagación de ondas ultrasónicas en elementos estructurales de madera laminada mediante ensayos indirectos

Autor: Christian González Iglesias

Directores: Ignacio Lombillo Vozmediano y Ramón Sancibrián Herrera

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos – Universidad de Cantabria

Resumen

Este Trabajo Fin de Máster investiga la propagación de ondas ultrasónicas en elementos de madera laminada encolada. Se realizan ensayos experimentales en probetas con defectos simulados (fisuras, nudos y ataques bióticos) y se desarrolla un modelo numérico en COMSOL Multiphysics para simular la propagación de ondas. La comparación entre resultados valida el modelo, mostrando correlaciones en los tiempos de vuelo y la localización de defectos. El estudio confirma que el análisis ultrasónico, junto con modelos numéricos, es una herramienta eficaz para la inspección no destructiva y el mantenimiento predictivo de estructuras, favoreciendo el empleo de soluciones constructivas más sostenibles.

Introducción

Construcción sostenible: ¿Por qué madera laminada?

- Construcción y CO₂:** el sector genera 39% de las emisiones globales, parte de ellas el hormigón y acero.
- Madera laminada encolada:** ligera, buena relación resistencia-peso, versátil y con menor impacto ambiental que otros materiales.
- Uso limitado en España:** solo $\approx 1\%$ de la obra nueva en 2022.
- Desafío:** los métodos tradicionales de inspección pueden ser subjetivos, costosos y, a menudo, insuficientes.
- Solución:** técnicas avanzadas como la propagación ultrasónica en combinación con modelos numéricos permiten detectar defectos internos.

Objetivo

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Máster está enfocado en el desarrollo y validación de un modelo de análisis ultrasónico para la evaluación estructural de madera laminada, combinando ensayos experimentales en laboratorio con simulaciones computacionales, con el fin de mejorar la detección de defectos y la caracterización del material.

Materiales y metodología experimental

Se emplearon muestras de madera de abeto y el equipo de ultrasonidos Fakopp Ultrasonic Timer, con una frecuencia de 45 kHz. Se simulaban defectos con sierra manual y resistógrafo IML-RESI PD-Series.

Se aplicaron dos métodos de ensayo:

Método A: emisor fijo y receptor desplazado en intervalos de 5 cm.

Método B: ambos transductores se alejan simultáneamente, de forma simétrica respecto del defecto, en intervalos de 5 cm.

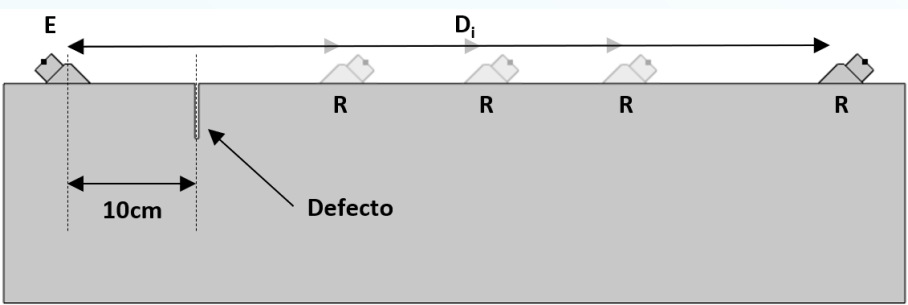


Figura 1. Método convencional (A)

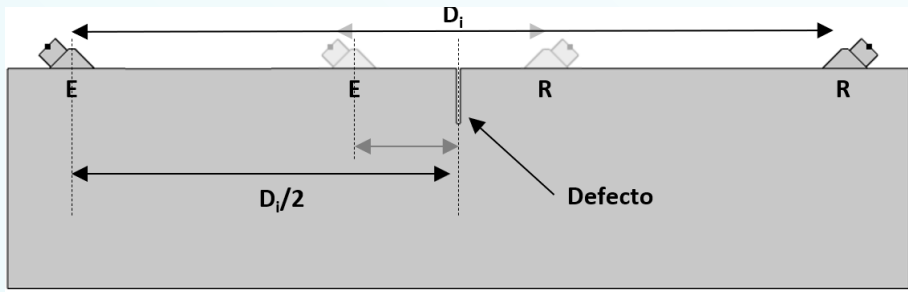


Figura 2. Método simétrico (B)

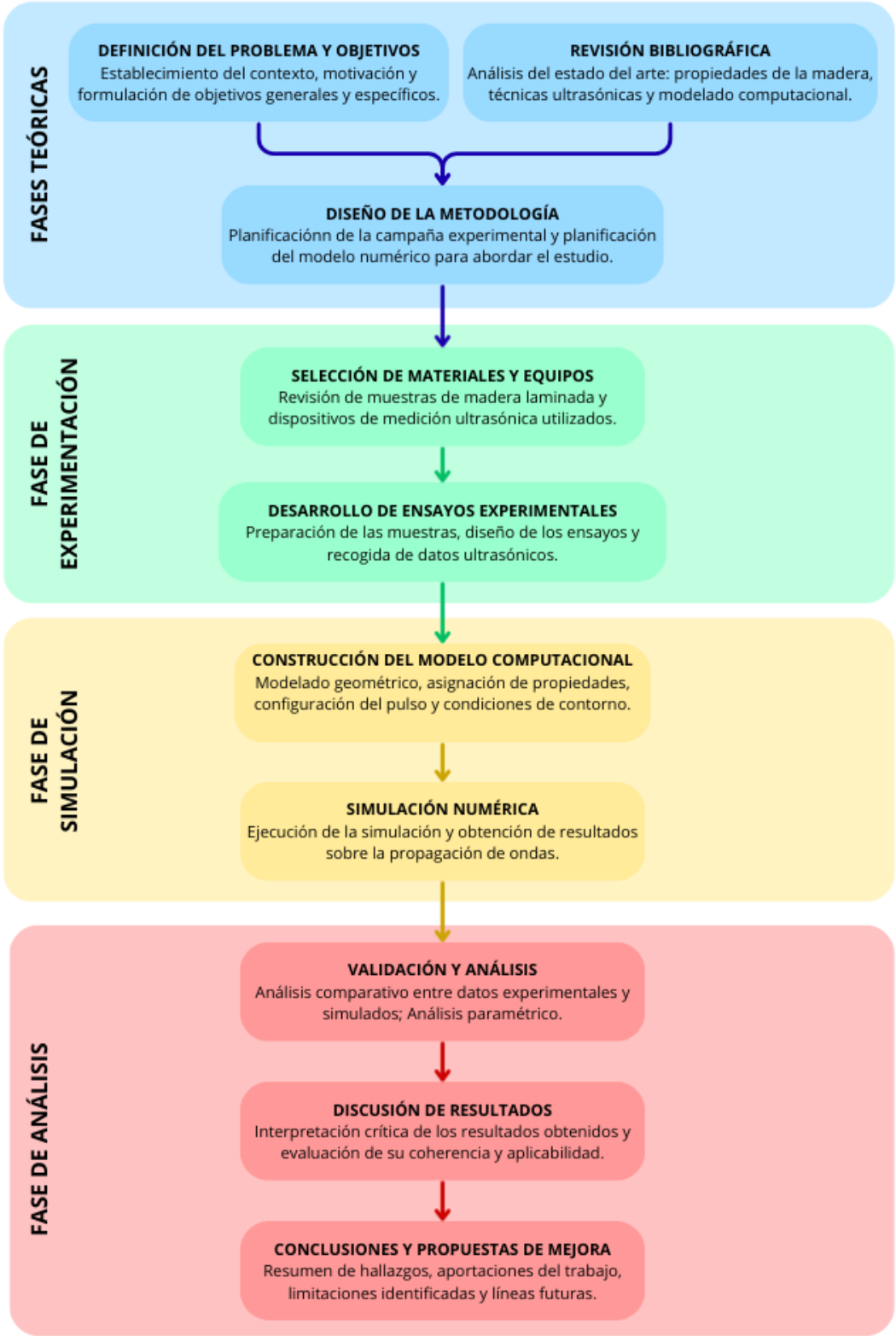


Figura 3. Diagrama de flujo del trabajo

Resultados

Tabla 1. Resumen de ensayos experimentales y simulaciones numéricas realizadas.

Tipo de análisis	Ensayo experimental		Simulación numérica	
	Método A	Método B	Método A	Método B
Muestra sana	X	X	X	X
Muestra con fisura	X	X	X	X
Muestra con nudo		X		X
Muestra con delaminación				X
Muestra con ataque biótico	X	X	X	X

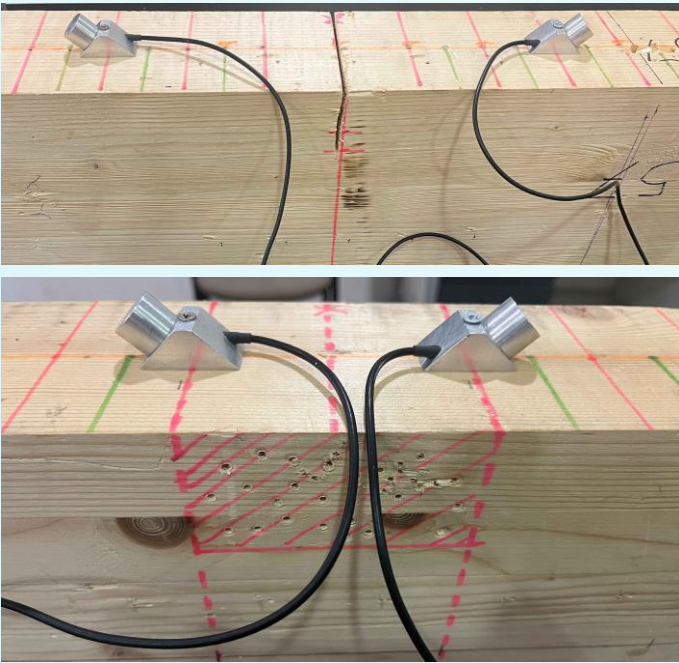


Figura 4. Ejemplo de ensayo con fisura simulada (arriba) y ataque biótico simulado (abajo).

FISURAS

Los resultados evidencian una disminución significativa de la velocidad de propagación en la zona inmediatamente posterior a la fisura, que se recupera progresivamente conforme a medida que aumenta la distancia entre transductores. Fisuras más profundas generan mayor reducción de velocidad y requieren más distancia para su recuperación, mostrando un efecto persistente.

Por otra parte, la fisura bloquea la transmisión de energía y provoca fenómenos de difracción y atenuación, alterando la propagación ultrasónica y confirmando los resultados de análisis previos.

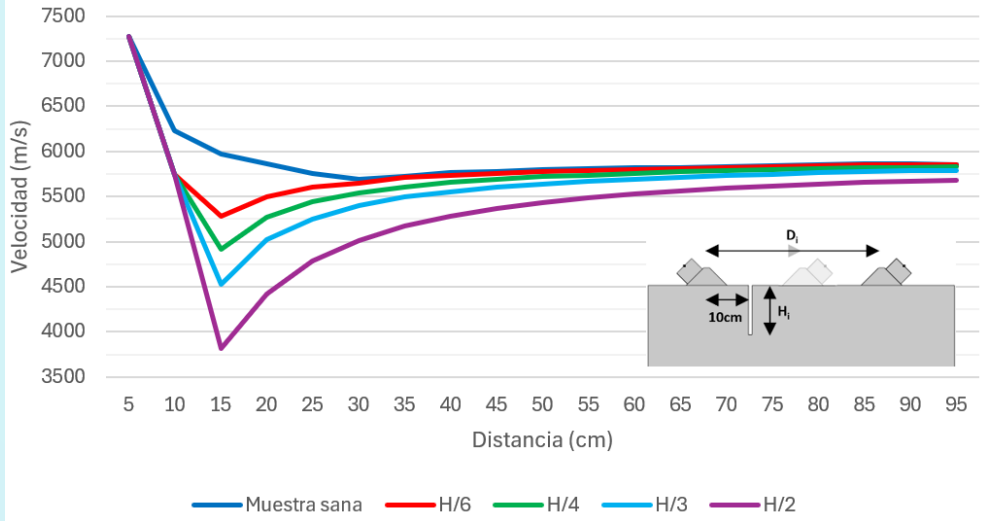


Figura 5. Velocidades de propagación para una fisura a 10 cm.

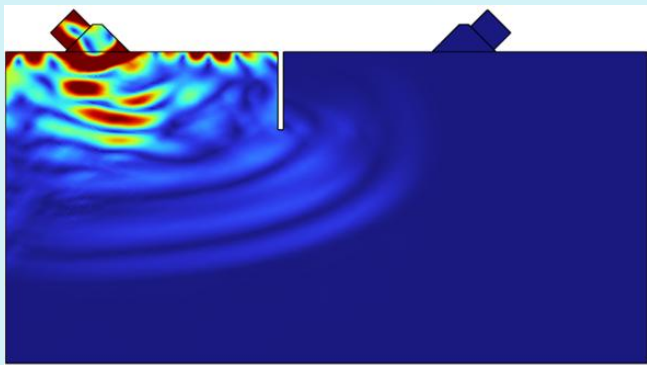


Figura 8. Corte lateral de propagación de ondas en muestra con fisura. Medio ortótropo.



Figura 6. Vista superior de propagación de ondas en muestra sana. Medio ortótropo.

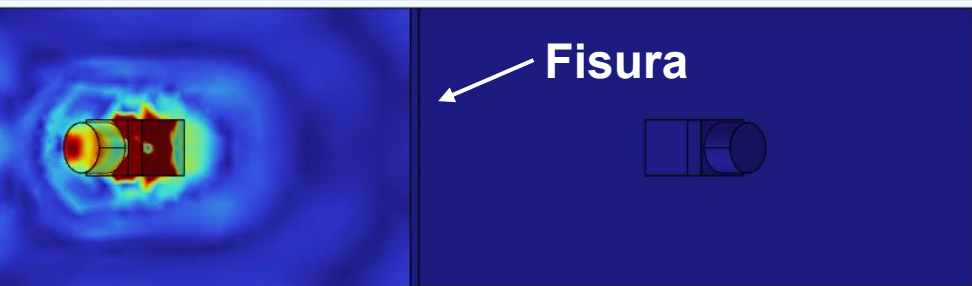


Figura 7. Vista superior de propagación de ondas en muestra con fisura. Medio ortótropo.

ATAQUE BIÓTICO

Los resultados muestran un descenso apreciable de la velocidad de propagación en la zona afectada, que se atenúa progresivamente conforme aumenta la distancia entre transductores, indicando una menor influencia relativa del defecto en trayectorias de propagación más largas.

Por otra parte, en ambos casos, las curvas presentan un comportamiento similar, mostrando que la presencia del ataque biótico ejerce una influencia relativamente limitada, concentrándose principalmente en las separaciones más cortas entre transductores.

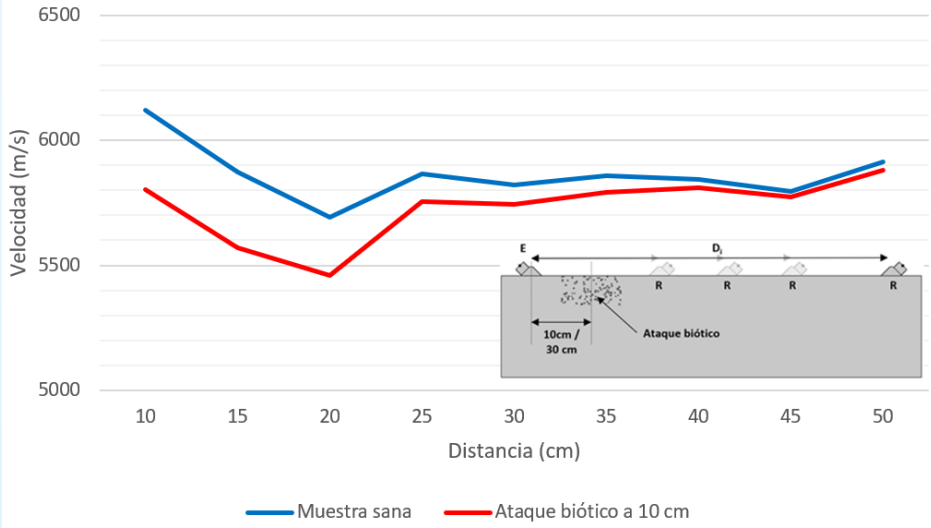


Figura 9. Velocidades de propagación en muestra sana y con ataque biótico.

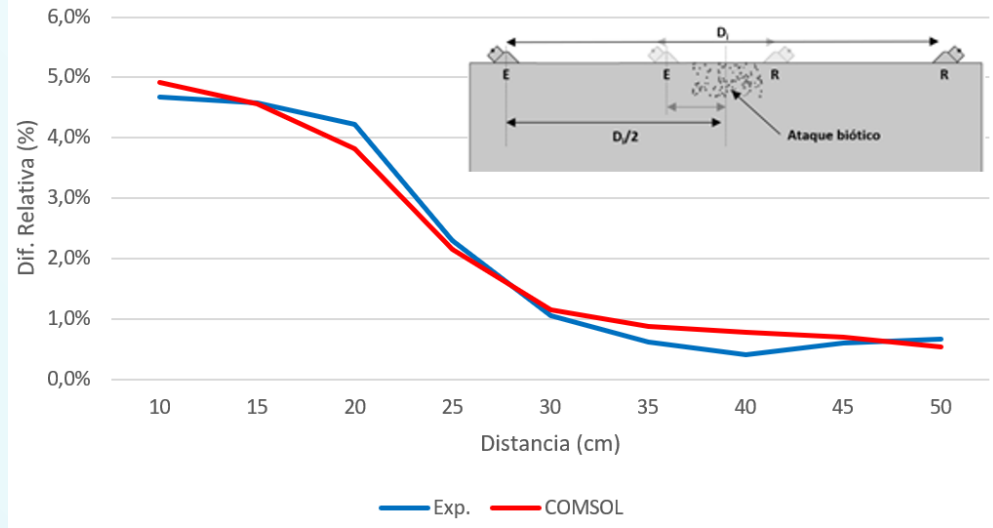


Figura 10. Dif. relativa en ToF con respecto de muestra sana. Ataque biótico en D/2.

Conclusiones

El modelo numérico en COMSOL mostró alta concordancia con resultados experimentales ($R^2 \approx 1$) en muestras sanas, aunque reveló discrepancias por heterogeneidades reales.

Las fisuras transversales fueron los defectos más críticos, aumentando significativamente los tiempos de vuelo según su profundidad. Nudos y delaminaciones tuvieron efectos reducidos, particularmente en posiciones profundas, y el ataque biótico mostró impacto leve y localizado.

Se concluye que la combinación de estas técnicas es útil para la detección temprana de daños, pero su sensibilidad disminuye con mayor distancia entre transductores o con defectos dispersos y profundos.