



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Nuevas técnicas de ensayos no destructivos basadas en ondas mecánicas para la valoración del daño en materiales cementicios

Tesis doctoral realizada por Santiago Vázquez Martínez

Dirigida por Jorge Gosálbez Castillo e Ignacio Bosch Roig

Marzo de 2021

*“Nada es imposible para el que
lucha”.*

Maestro Roshi

Abstract

Nowadays, a large number of infrastructures are partially or wholly built with cementitious materials. Concrete is one of the oldest and most popular cementitious materials due to its low cost, durability and remarkable mechanical and structural characteristics. However, if these materials are exposed to different environments and harsh conditions, they suffer damaging processes that affect their integrity and safety. To verify their state and quality, extensive research has been conducted and several tests have been developed, such as destructive testing and non-destructive testing. Destructive testing (DT) requires a sample of the inspected structure while non-destructive testing (NDT) allows the inspection of the structure without altering its properties and without damaging it.

There are several NDT techniques that characterize cementitious structures without harming them, such as ultrasonic testing, which is one of the most widely used. This technique is based on the study of longitudinal (P) and shear (S) waves, which enable the characterization of a structure by a point-by-point scan. However, there are another kind of waves, called guided waves, which are composed of the superposition of the P and S wave particle displacements. Unlike P and S waves, guided waves allow a global inspection of a structure from a single transducer position and they are able to propagate over long distances with a good signal-to-noise ratio. Rayleigh and Lamb waves are the most frequently used guided waves in NDT of cementitious materials. Rayleigh waves propagate in thick structures while Lamb waves propagate in plate-like structures.

Lamb waves are dispersive (their phase and group velocities depend on frequency) and multimodal (as frequency increases, many propagation modes with different velocities exist in the received signal). Lamb wave modes can be selectively excited and detected by means of oblique incidence, i.e., by varying the inclination of the transmitting and receiving transducers. Different coupling techniques can be used to change the inclination of the transducers, such as the contact technique with angle beam wedge transducers, water coupling and air coupling.

This thesis has been focused in the study of new NDT techniques based on guided waves (Rayleigh and Lamb waves) to characterize different types of damage of cementitious materials. For this goal, a significant number of experimental arrangements based on different coupling techniques have been carried out. Firstly, homogeneous materials as metals have been analyzed, because they are a reference in guided wave testing. After performing different experiments in metals, the acquired knowledge has been used to inspect heterogeneous materials as cementitious ones. Different coupling techniques (variable angle wedges, immersion testing, fixed angle wedges, ...) with different types of transducers (contact transducers, immersion transducers and air-coupled transducers) have been employed.

Cementitious materials with two damaging processes have been inspected by means of guided waves: two-layered mortar specimens to study carbonation and glass-fibre reinforced cement (GRC) plates to study fiber ageing. This thesis demonstrates that guided waves are sensitive to these damaging processes and the obtained results are encouraging. Specifically, Rayleigh waves have been used to detect carbonation due to its sensitivity to surface layers, while Lamb waves have been used to detect fiber ageing due to its sensitivity to defects along the thickness of the GRC plates.

Resum

En l'actualitat, una gran quantitat d'infraestructures estan formades totalment o parcialment de materials cementants. El formigó és un dels materials cementants més antics i utilitzats en la construcció degut al seu preu, la seua durabilitat i les seues característiques mecàniques i estructurals. Malgrat la seua durabilitat i característiques, aquests materials estan exposats a diverses condicions adverses de l'entorn i pateixen processos de deterioració que afecten la seua integritat i seguretat.

El reconeixement de la integritat i seguretat en les estructures cementants ha implicat una extensa investigació i el desenvolupament de diverses proves per a verificar la seua qualitat i estat. Mitjançant la destrucció d'una mostra de l'estructura en el cas dels assajos destructius, o mitjançant la inspecció de l'estructura sense danyar-la o alterar les seues propietats en el cas dels assajos no destructius.

Existeixen multitud de tècniques d'inspecció no destructiva que tracten de caracteritzar aquestes estructures sense danyar-les. La inspecció mitjançant ultrasons és un dels assajos no destructius més utilitzats en materials cementants. Tradicionalment, aquestes tècniques ultrasòniques estan basades en l'estudi de les ones longitudinals (P) i transversals (S), que permeten caracteritzar una estructura mitjançant la realització de múltiples mesures en l'estructura. No obstant, existeixen altres tipus d'ones, formades per la superposició dels desplaçaments de les partícules de les ones P i S, denominades ones guiades, les quals permeten inspeccionar una estructura de manera global a partir d'una única mesura, a més de poder propagar-se a grans distàncies mantenint una bona relació senyal-soroll en comparació a les ones P i S.

Dins de les ones guiades més utilitzades per a inspeccionar materials cementants, es troben les ones de Rayleigh i les ones de Lamb. Les ones de Rayleigh es propaguen en estructures de gran grossària, mentre que les ones de Lamb es propaguen en plaques.

Les ones de Lamb presenten una naturalesa dispersiva i multimodal. La seua naturalesa dispersiva implica que les velocitats de fase i grup d'aquestes ones depenen de la freqüència, mentre que la naturalesa multimodal implica que apareguen més modes de propagació a l'augmentar la freqüència d'excitació. Es poden excitar i detectar selectivament els diferents modes de Lamb mitjançant la incidència obliqua, és a dir, variant la inclinació del transmissor i el receptor. Existeixen diferents tècniques d'acoblament que permeten la incidència obliqua, com l'acoblament per metacrilat, l'acoblament per aigua i l'acoblament per aire.

Aquesta tesi s'ha enfocat en l'estudi de noves tècniques d'assajos no destructius basades en ones guiades (ones de Rayleigh i ones de Lamb) per a caracteritzar diferents tipus de dany en els materials cementants. S'han realitzat un nombre considerable de mesures experimentals basades en diferents tècniques d'acoblament per a la generació i captació d'ones guiades. Inicialment s'han analitzat materials homogenis com els metalls per a, posteriorment, utilitzar el coneixement adquirit en aquests materials i estudiar d'altres més heterogenis com els cementants. Concretament, s'han avaluat diferents tipus de tècniques d'acoblament i diferents tipus de transductors.

Els materials cementants s'han inspeccionat mitjançant ones guiades ultrasòniques amb dos tipus de dany o degradació: la carbonatació, estudiant el seu efecte amb provetes de dues capes

de morter, i l'envelliment de fibres en plaques de ciment reforçat amb fibra de vidre (*GRC*). S'ha demostrat que les ones guiades són sensibles a aquests danys, obtenint resultats esperançadors. Concretament, les ones de Rayleigh s'han utilitzat en el dany per carbonatació a causa de la seua sensibilitat a capes superficials de degradació, mentre que en l'envelliment de fibres s'han utilitzat les ones de Lamb, per la seua sensibilitat a defectes al llarg de la grossària de les plaques.

Resumen

En la actualidad, una gran cantidad de infraestructuras están compuestas de forma parcial o total de materiales cementicios, siendo el hormigón uno de los materiales cementicios más antiguos y utilizados en la construcción debido a su bajo coste, durabilidad y a sus destacables características mecánicas y estructurales. Pese a su durabilidad y características, estos materiales están expuestos a diversas condiciones adversas del entorno y sufren procesos de deterioro que afectan a su integridad y seguridad.

El reconocimiento de la integridad y seguridad en las estructuras cementicias ha implicado una extensa investigación y el desarrollo de diversas pruebas para verificar su calidad y estado. Mediante la destrucción de una muestra extraída de la estructura, en el caso de los ensayos destructivos (ED), o mediante la inspección de la estructura sin necesidad de dañarla o alterar sus propiedades, en el caso de los ensayos no destructivos (END).

Existen multitud de técnicas de inspección no destructiva que tratan de caracterizar estas estructuras sin dañarlas, siendo la inspección mediante ultrasonidos uno de los END más utilizados en materiales cementicios. Tradicionalmente estas técnicas ultrasónicas se basan en el estudio de las ondas longitudinales y transversales (P y S), que permiten caracterizar una estructura mediante la realización de múltiples medidas en la estructura. Sin embargo, existe otro tipo de ondas, formadas por la superposición de los desplazamientos de las partículas de las ondas P y S denominadas ondas guiadas, las cuales permiten inspeccionar una estructura de forma global a partir de una única medida, además de ser capaces de propagarse a grandes distancias manteniendo una buena relación señal-a-ruido en comparación a las ondas P y S. Dentro de las ondas guiadas más utilizadas para inspeccionar materiales cementicios, se encuentran las ondas de Rayleigh y las ondas de Lamb. Las ondas de Rayleigh se propagan en estructuras de gran espesor, mientras que las ondas de Lamb se propagan en estructuras tipo placa.

Las ondas de Lamb presentan una naturaleza dispersiva y multimodal. Su naturaleza dispersiva implica que las velocidades de fase y grupo de estas ondas depende de la frecuencia, mientras que la naturaleza multimodal implica que existen cada vez más modos de propagación conforme se aumenta la frecuencia de excitación. Se pueden excitar y detectar selectivamente los distintos modos de Lamb mediante la incidencia oblicua, es decir, variando la inclinación del transmisor y el receptor. Para ello, existen distintas técnicas de acoplamiento que permiten la incidencia oblicua, como el acoplamiento por cuñas sólidas, el acoplamiento por agua y el acoplamiento por aire.

La presente tesis se ha centrado en el estudio de nuevas técnicas de END basadas en ondas guiadas (ondas de Rayleigh y ondas de Lamb) para caracterizar diferentes tipos de daño en los materiales cementicios. Para ello, se han llevado a cabo un número considerable de medidas experimentales basadas en distintas técnicas de acoplamiento para la generación y captación de ondas guiadas. Inicialmente se han analizado materiales homogéneos como los metales, para, posteriormente, utilizar el conocimiento adquirido en este tipo de materiales y estudiar materiales más heterogéneos como los cementicios. Concretamente, se han evaluado diferentes tipos de técnicas de acoplamiento (cuñas variables, inmersión, cuñas fijas, ...) junto con diferentes tipos de transductores (de contacto, de inmersión y acoplados por aire).

Los materiales cementicios se han inspeccionado mediante ondas guiadas ultrasónicas con dos tipos de daño o degradación: la carbonatación, estudiando el efecto con probetas de dos capas de mortero, y el envejecimiento de fibras en placas de cemento reforzado con fibra de vidrio (GRC). Se ha demostrado que las ondas guiadas son sensibles a estos daños, obteniendo resultados esperanzadores. Concretamente, las ondas de Rayleigh se han utilizado en el daño por carbonatación debido a su sensibilidad a capas superficiales de degradación, mientras que en el envejecimiento de fibras se han utilizado las ondas de Lamb, por su sensibilidad a defectos a lo largo del espesor de las placas.

A mis abuelos

Agradecimientos

A mis directores de tesis Jorge Gosálbez e Ignacio Bosch, por la oportunidad concedida, su paciencia y su inestimable ayuda durante toda la tesis.

A la que ha sido como mi segunda familia por pasar tantas horas con ellos durante todos estos años. A Gonzalo, Guille Lara, Alicia, Carles, Jordi, Guille Pérez, Josevi, Ramón, América, Javi y Luisma (espero no dejarme a nadie). Gracias por vuestros ánimos, consejos, ayuda y por todo lo vivido: almuerzos, comidas, meriendas, cenas, *Escape Rooms*, tardes de fútbol y un largo etcétera.

Al Grupo de Investigación en Química de los Materiales de Construcción (GIQUIMA) del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), en especial al Prof. Jordi Payá, Vicente Genovés y Lourdes Soriano, por los materiales, consejos y ayuda proporcionada durante la tesis.

To Prof. John Popovics, Prof. Tribikram Kundu and Prof. Bill Wright for their invaluable advice on this thesis. Special thanks to Prof. Bill Wright (again) and the people of the Department of Electrical and Electronic Engineering of the University College Cork for their hospitality and help during my research stay.

A Alejandro Valero, por ayudarme a resolver las dudas administrativas que me iban surgiendo durante la tesis.

A los profesores Francisco Jesús Cañadas, Tomás Gómez y Óscar Martínez por su colaboración y sus palabras en el proceso de evaluación externa de la tesis.

A mi profesor Don Ricardo, por decirme que llegaría a donde yo quisiera.

A mis amigos, por su amistad y su apoyo.

A mis abuelos, por sus lecciones de vida, sus recuerdos y la huella imborrable que han dejado en mí.

A mi madre, por su fe inquebrantable en mis capacidades y por animarme a estudiar y a superarme constantemente, además de por su cariño incondicional. Si este documento existe, ella tiene gran parte de culpa.

A mi tía por su apoyo y por alegrarse de mis éxitos.

A mi familia, por su preocupación, interés y por estar siempre ahí.

Índice

1. Introducción y objetivos.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
2. Ensayos no destructivos (END).....	5
2.1. Materiales cementicios	5
2.2. Daños en materiales cementicios	8
2.3. ED y END en materiales cementicios	14
2.3.1. Ensayos destructivos	14
2.3.2. Ensayos no destructivos.....	17
2.4. Conceptos básicos de ultrasonidos	20
2.4.1. Ecuaciones básicas de los ultrasonidos.....	20
2.4.2. Tipos de ondas	22
2.4.3. Refracción de los ultrasonidos	23
2.4.4. Atenuación de los ultrasonidos.....	28
2.4.5. Equipamiento elemental para la inspección por ultrasonidos	29
2.4.6. Transductores.....	30
2.4.7. Acoplante	34
2.4.8. Parámetros ultrasónicos	35
2.4.9. END por ultrasonidos en materiales	37
2.5. Conclusiones.....	39
3. Ondas guiadas	41
3.1. Introducción	41
3.2. Ondas de Rayleigh	44
3.3. Ondas de Lamb.....	47
3.3.1. Curvas de dispersión	48
3.3.2. Curvas de dispersión – Metodología de trabajo	51
3.3.3. Detección de daños con ondas de Lamb.....	53
3.4. Generación de ondas de Lamb.....	55
3.4.1. Acoplamiento por cuñas sólidas	57
3.4.2. Acoplamiento por agua	58
3.4.3. Acoplamiento por aire.....	61
3.5. Procesado de señal - Representación de ondas de Lamb.....	62
3.6. Conclusiones.....	66
4. Medidas experimentales.....	68
4.1. Introducción	68

4.2. Medidas experimentales en materiales homogéneos	75
4.2.1. Introducción y materiales empleados.....	75
4.2.2. Acoplamiento por cuñas sólidas	75
4.2.3. Acoplamiento por agua mediante inmersión – Transductores de inmersión	83
4.2.4. Acoplamiento por agua mediante inmersión – Transductores de banda ancha	90
4.2.5. Acoplamiento por agua mediante contenedores cónicos	94
4.2.6. Acoplamiento por agua mediante globos	98
4.2.7. Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos.....	102
4.2.8. Acoplamiento por aire mediante transductores capacitivos.....	107
4.3. Medidas experimentales en materiales heterogéneos.....	112
4.3.1. Medidas de velocidad de onda P y onda S.....	113
4.3.2. Preprocesado	116
4.3.3. Acoplamiento por agua mediante contenedores cónicos	118
4.3.4. Acoplamiento por agua mediante cuñas	125
4.3.5. Estudio de la saturación de la probeta de mortero sobre las curvas de dispersión.....	135
4.3.6. Discusión entre contenedores cónicos vs cuñas.....	136
4.3.7. Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos.....	138
4.4. Conclusiones.....	149
5. Aplicaciones de ondas guiadas en materiales cementantes.....	152
5.1. Daño por carbonatación.....	153
5.1.1. Fabricación y caracterización de materiales para la simulación del proceso de carbonatación	154
5.1.2. Fabricación de probetas bicapa	157
5.1.3. Fundamento teórico de las ondas de Rayleigh dispersivas en probetas bicapa.....	160
5.1.4. Probetas bicapa - Acoplamiento por agua mediante cuñas	164
5.1.5. Probetas bicapa- Acoplamiento por aire	172
5.1.6. Estudio de daño por carbonatación sobre probetas reales	179
5.1.7. Resultados de la carbonatación con acoplamiento por agua mediante cuñas	179
5.2. Envejecimiento de fibras.....	183
5.2.1. Descripción del experimental.....	184
5.2.2. Estudio de velocidades de onda P y S	186
5.2.3. Estudio con acoplamiento por agua mediante cuñas	189
5.3. Conclusiones.....	198
6. Conclusiones y líneas futuras	201
6.1. Conclusiones.....	201
6.2. Líneas futuras	203

6.3. Agradecimientos institucionales	204
--	-----

Lista de tablas

Tabla 1. Materiales y tecnologías de acoplamiento aplicadas en las medidas experimentales..	74
Tabla 2. Datos de las placas metálicas	75
Tabla 3. Parámetros del experimental de acoplamiento por cuñas de plexiglás en placa de acero inoxidable.....	79
Tabla 4. Parámetros del experimental de acoplamiento por cuñas de plexiglás en placa de aluminio anodizado.....	82
Tabla 5. Parámetros del experimental de acoplamiento por agua mediante inmersión en placa de acero inoxidable (transductores de inmersión).....	86
Tabla 6. Parámetros del experimental de acoplamiento por agua mediante inmersión en placa de aluminio anodizado (transductores de inmersión).....	89
Tabla 7. Parámetros del experimental de acoplamiento por agua mediante inmersión en placa de acero inoxidable (transductores de banda ancha).	93
Tabla 8. Parámetros del experimental de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placa de acero inoxidable.	97
Tabla 9. Parámetros del experimental de acoplamiento localizado por agua mediante globos en placa de acero inoxidable.	101
Tabla 10. Parámetros del experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de acero inoxidable.	106
Tabla 11. Parámetros del experimental de acoplamiento por aire mediante transductores capacitivos en placa de aluminio.	111
Tabla 12. Datos de las placas cementicias.	112
Tabla 13. Parámetros del experimental de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placa de mortero gris de 5 mm de espesor.....	121
Tabla 14. Parámetros del experimental de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placa de GRC.....	124
Tabla 15. Parámetros del experimental de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en placas de mortero gris de distintos espesores.	134
Tabla 16. Parámetros del experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placas de mortero gris de distintos espesores.	145
Tabla 17. Parámetros del experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de GRC.	148
Tabla 18. Viabilidad de excitación de modos de Lamb de las distintas técnicas de acoplamiento utilizadas.	150
Tabla 19. Materiales y tecnologías de acoplamiento planteadas en las aplicaciones de ondas guiadas.	152
Tabla 20. Datos de los morteros gris y blanco.	160
Tabla 21. Resumen de parámetros del montaje de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en la probeta de 5 mm de mortero gris de la amasada 2.	166

Tabla 22. Resumen de parámetros del montaje de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en las probetas de 10 mm de mortero gris.	168
Tabla 23. Resumen de parámetros del montaje de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en las probetas de 20 mm de mortero gris.	171
Tabla 24. Resumen de parámetros del montaje de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la probeta de 10 mm de mortero gris.	175
Tabla 25. Resumen de parámetros del montaje de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la probeta de 20 mm de mortero gris de la amasada 1.	178
Tabla 26. Resumen de parámetros de interés de las medidas de acoplamiento por agua mediante cuñas en las probetas de mortero normalizado sin carbonatar y carbonatada.	182
Tabla 27. Datos de las tres placas de GRC M1, M2 y M3.	188
Tabla 28. Resumen de parámetros del montaje de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 20° y 40° en las placas de GRC.	197
Tabla 29. Cambios observados en los procesados de las aplicaciones prácticas.	199

Lista de figuras

Figura 1. Aparato de Vicat (“Appareil de Vicat” por Habib M’henni, licencia bajo CC BY-SA 3.0).	6
Figura 2. Resistencia a la penetración de la aguja del aparato de Vicat respecto al tiempo de una pasta de cemento Portland (“Fig. 1”, por Demetrio Gaspar-Tebar, licencia bajo CC BY-NC 3.0 ES) (Gaspar-Tebar, 1980).	6
Figura 3. Ejemplo de resistencia del hormigón respecto a la relación agua/cemento (w/c) (“Fig.1”, por Kurt Walz, licencia bajo CC BY-NC 3.0 ES) (Walz, 1971).	7
Figura 4. Ejemplo de resistencia de hormigón (fabricado en series de distintos tipos de áridos) respecto a la relación árido/cemento (a/c) (Poon et al., 2008).	8
Figura 5. Ejemplos de ataque ácido en probeta cúbica de pasta de cemento (“Figure 7”, por Vladimir Pavlík, licencia bajo CC BY 3.0) (Pavlík, 2019).	9
Figura 6. Ejemplo de ataque interno por sulfatos (ISA) en series de mortero con : (a) 0% de SO_3 ; (b) 1% de SO_3 ; (c) 1.5% de SO_3 y (d) 2% de SO_3 (Genovés et al., 2017b).	10
Figura 7. Ejemplo de daño térmico: (a) Mortero sano a 40°C, microscopio óptico; (b) Mortero dañado a 525°C, microscopio óptico; (c) Mortero sano a 40° C, SEM; (d) Mortero dañado a 525°C, SEM (Genovés et al., 2019).	11
Figura 8. Ejemplo de ciclos hielo-deshielo aplicados en una probeta de hormigón: (a) 0 ciclos; (b) 200 ciclos; (c) 400 ciclos (“FIGURE 1”, por Huai-shuai Shang, Wei-qun Cao y Bin Wang, licencia bajo CC BY 3.0)(Shang et al., 2014).	11
Figura 9. Ejemplo de ciclos de humectación-secado en probeta de hormigón durante: (a) 0 días; (b) 21 días; (c) 42 días; (d) 54 días y (e) 63 días (“FIGURE 9”, por Wei Tian y Nv Han, licencia bajo CC BY 4.0) (Tian et al., 2017).	12
Figura 10. Ejemplo de probeta de mortero poco carbonatada (izquierda) y probeta de mortero muy carbonatada (derecha).	12
Figura 11. Ejemplo de fibras sin envejecer (a) y (b) y de fibras envejecidas (c) y (d) (Eiras et al., 2013b).	13
Figura 12. Ejemplo de fatiga por carga (“Fig.2” por Li Song, Zhiwei Fan y Jian Hou, licencia bajo CC BY 4.0) (L. Song et al., 2019).	13
Figura 13. Ensayos de resistencias mecánicas: (a) esquema y (b) fotografía (“Rock Fracturing in an Earth Science laboratory” por Auke Barnhoorn, licencia bajo CC BY 3.0) de ensayo de resistencia a compresión; (c) esquema y (d) fotografía (“Tensile testing on a coir composite”, por Kerina yin, licencia bajo CC0 1.0) de ensayo de resistencia a tracción; (e) esquema y (f) fotografía de ensayo de resistencia a flexión.	16
Figura 14. Inspección visual (“130802-N-PD772-074” por U.S. Pacific Fleet, licencia bajo CC BY-NC 2.0).	17
Figura 15. Ensayo por termografía infrarroja (“Infrared Thermography of Modified Bitumen Roof” por Alexander Cua, licencia bajo CC BY-SA 3.0).	18
Figura 16. Ensayo por georradar (“Using ground-penetrating radar” por The Official CTBTO Photostream, licencia bajo CC BY 2.0).	18

Figura 17. Martillo de rebote Schmidt (“Schmidt hammer” por Arjuncm3, licencia bajo CC BY-SA 3.0).	19
Figura 18. Ensayo de vibración en probeta de mortero (Carrión et al., 2018).	19
Figura 19. Ensayo por ultrasonidos.	20
Figura 20. Ensayo por tomografía.	20
Figura 21. Modelo de un cuerpo elástico (V. A. González, 2011; Krautkrämer et al., 1990).	21
Figura 22. Desplazamiento de partículas de ondas P (superior) y ondas S (inferior) (“S-p-waves” por Davezelenka, licencia bajo CC BY-SA 4.0 / Girada 180° respecto a la original).	23
Figura 23. Interfaz sólido-sólido: (a) Onda incidente P; (b) Onda incidente S.	25
Figura 24. Interfaz fluido-sólido.	26
Figura 25. Interfaz sólido-fluido: (a) Onda P incidente; (b) Onda S incidente.	26
Figura 26. Interfaz fluido-fluido.	27
Figura 27. Primer ángulo crítico. No se han incluido los ángulos reflejados por simplicidad.	27
Figura 28. Segundo ángulo crítico. No se han incluido los ángulos reflejados por simplicidad.	28
Figura 29. Fenómeno de dispersion o scattering (Lai et al., 2013; Molero, 2009).	29
Figura 30. Configuraciones de medida: (a) Pulso-eco; (b) Through-transmission; (c) Pitch-catch.	30
Figura 31. Ejemplos de señales sinusoidales: (a) Señal sinusoidal continua; (b) Señal sinusoidal burst de 5 ciclos.	31
Figura 32. Ejemplos de conectores: (a) Conector BNC; (b) Conector Lemo; (c) Conector Microdot 10-32.	32
Figura 33. Esquema de un transductor de contacto (Rubio et al., 2010; Schmerr, 1998).	33
Figura 34. Esquema de campo cercano y campo lejano (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010).	33
Figura 35. Difracción de haz en una simulación del software WAVE2000 (WAVE2000, n.d.). ...	34
Figura 36. Métodos start-to-start y peak-to-peak para obtener el tiempo de vuelo de la onda S (“Figure 5”, por Wojciech Sas, Katarzyna Gabryś, Emil Soból y Alojzy Szymański, licencia bajo CC BY 4.0) (Sas et al., 2016).	37
Figura 37. Ejemplos de distintos medios o estructuras donde se propagan las ondas (Rose, 2014; Schaal et al., 2015; Su et al., 2009): (a) Medio infinito; (b) Medio semi-infinito o semi-espacio; (c) Interfaz entre dos semi-espacios; (d) Placa; (e) Estructura multicapa; (f) Estructura cilíndrica. Las fronteras o límites de las guías de onda se han resaltado en negro y las partes infinitas se han dibujado con líneas discontinuas.	42
Figura 38. Desplazamiento de las partículas de las ondas de Rayleigh (“Rayleigh wave” por Д.Ильин, licencia bajo CC0 1.0).	44
Figura 39. Configuración pitch-catch con incidencia oblicua.	45
Figura 40. Ejemplo de aplicaciones de ondas de Rayleigh: (a) Fisuras superficiales (“Fig. 13”, por Seong-Hoon Kee y Boohyun Nam, licencia bajo CC BY 4.0)(Kee et al., 2015); (b) Porosidad (Punurai et al., 2007) y (c) Espesores (Goueygou et al., 2004b).	46
Figura 41. Desplazamiento de las partículas de los modos de Lamb antisimétricos (a) y simétricos (b) (“Figure 1”, por Santiago Vázquez, Jorge Gosálbez, Ignacio Bosch, Alicia Carrión, Carles	

Gallardo y Jordi Payá, licencia bajo CC BY 4.0) (Vázquez et al., 2019b). Desplazamiento mayoritario de partículas fuera del plano para modos antisimétricos (c) y dentro del plano para modos simétricos (d) (Su et al., 2009).	48
Figura 42. Curvas de dispersión de velocidad de fase de una placa de mortero. Los modos antisimétricos (A) se representan con líneas continuas y los modos simétricos (S) con líneas discontinuas. También se han representado mediante líneas continuas negras la onda P (P), la onda S (S) y la onda de Rayleigh (R).	49
Figura 43. Curvas de dispersión de una placa de mortero ($c_P = 4813$ m/s, $c_S = 3003$ m/s, $2h = 13$ mm): (a) Velocidad de grupo c_g ; (b) Ángulo de incidencia θ (siendo el medio acoplante agua, de $c_1 = 1490$ m/s) y (c) Número de onda k	51
Figura 44. Regiones de las curvas de dispersión de los modos fundamentales A_0 y S_0 de una placa de mortero ($c_P = 4813$ m/s, $c_S = 3003$ m/s, $2h = 13$ mm) donde no se produce dispersión (Hayashi et al., 2003). No se han representado los modos superiores (A_m , S_m , cuando $m > 0$) por simplicidad.	52
Figura 45. Selección de modos con velocidades de grupo muy distintas entre sí (curvas de dispersión de placa de mortero, $c_P = 4813$ m/s, $c_S = 3003$ m/s, $2h = 13$ mm)(Hayashi et al., 2003).	52
Figura 46. Técnicas y actuadores/sensores para la generación y detección de ondas de Lamb y de Rayleigh: (a) Incidencia oblicua; (b) Incidencia normal; (c) PZT y FBG ("Figure 5", por Fucai Li, Hideaki Murayama, Kazuro Kageyama y Takehiro Shirai, licencia bajo CC BY-NC-SA 3.0) (F. Li et al., 2009); (d) PWAS ("Figure 1", por Gerardo Aranguren, Josu Etxaniz, Sergio Cantero-Chinchilla, Jose M. Gil-García y Muhammad Khalid Malik, licencia bajo CC BY 4.0) (Aranguren et al., 2020); (e) Bola de metal y acelerómetros ("Figure 6", por Seong-Hoon Kee, Jin-Wook Lee y Ma. Doreen Candelaria, licencia bajo CC BY 4.0) (Kee et al., 2020).	55
Figura 47. Ejemplo de región de trabajo recomendable de las curvas de dispersión de ángulos de incidencia θ	56
Figura 48. Concepto de línea de excitación (Balasubramaniam et al., 1991). Los picos de la FT coinciden con las intersecciones entre la línea de excitación y las curvas de dispersión teóricas.	57
Figura 49. Acoplamiento por cuñas sólidas ("Figure 5", por Santiago Vázquez, Jorge Gosálbez, Ignacio Bosch, Alicia Carrión, Carles Gallardo y Jordi Payá, licencia bajo CC BY 4.0) (Vázquez et al., 2019b).	58
Figura 50. Acoplamiento por agua mediante inmersión. La placa la sujetan dos bloques de poliestireno (Vázquez et al., 2019b).	59
Figura 51. Algunas de las contribuciones indeseadas que aparecen en el montaje de inmersión (Ghosh et al., 1998a).	59
Figura 52. Acoplamiento por agua localizado: (a) contenedores cónicos (Vázquez et al., 2019b); (b) globos y (c) cuñas.	60
Figura 53. Acoplamiento por aire ("Figure 13", por Santiago Vázquez, Jorge Gosálbez, Ignacio Bosch, Alicia Carrión, Carles Gallardo y Jordi Payá, licencia bajo CC BY 4.0) (Vázquez et al., 2019b).	61
Figura 54. Ejemplo de curvas de dispersión experimentales de número de onda k vs frecuencia obtenido de la 2D-FFT.	63

Figura 55. Diagrama de generación del espectrograma combinado y de las curvas de sensibilidad del sistema (SSC). Las etapas de transmisión (TX) y recepción (RX) incluyen parte del equipamiento empleado en el experimental (amplificadores, generador de señal, osciloscopio, etc.) (Vázquez et al., 2019b).	66
Figura 56. (a) Ejemplo de señal burst; (b) Ejemplo de señal chirp; (c) Ejemplo de FT de señal burst y señal chirp.	69
Figura 57. Comparación entre SSC construidas con burst y chirp: (a) Medidas de contenedores cónicos a 20°; (b) Medidas de contenedores cónicos a 40°; (c) Medidas de cuñas a 40°; (d) Medidas de acoplamiento por aire a 10°.	70
Figura 58. Ejemplo de montaje experimental de ondas de Lamb.	71
Figura 59. (a) Placa de Arduino; (b) Acelerómetro.	72
Figura 60. (a) Generador de funciones Agilent 33120A; (b) Osciloscopio DPO3014; (c) Osciloscopio Rohde RTO 1004; (d) Generador de funciones más osciloscopio programable Handyscope HS3; (e) Generador de funciones más osciloscopio programable Handyscope HS5; (f) Ejemplo de control del HS5 mediante la GUI de MATLAB.	72
Figura 61. Ejemplo de señal pobremente cuantificada.	73
Figura 62. Amplificadores utilizados: (a) WMA-300, Falco Systems (transmisión); (b) AMPLUS-32, Dasel Sistemas (recepción); (c) 5660C, Panametrics (recepción).	73
Figura 63. Señal con acoplamiento eléctrico (recuadro rojo) y contribución directa entre el transmisor y el receptor que llega por el agua (recuadro morado).	74
Figura 64. Acoplamiento por cuñas de plexiglás: (a) Esquema; (b) Fotografía ("Figure 5", por Santiago Vázquez, Jorge Gosálbez, Ignacio Bosch, Alicia Carrión, Carles Gallardo y Jordi Payá, licencia bajo CC BY 4.0)(Vázquez et al., 2019b).	76
Figura 65. Curvas de ángulo para acoplamiento por cuñas de plexiglás en placa de acero inoxidable.	77
Figura 66. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por cuñas de plexiglás en placa de acero inoxidable: (a) 32°; (b) 40°; (c) 50°.	78
Figura 67. Curvas de ángulo para acoplamiento por cuñas de plexiglás en placa de aluminio anodizado.	80
Figura 68. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por cuñas de plexiglás en placa de aluminio anodizado: (a) 32°; (b) 40°; (c) 50°; (d) 60°.	81
Figura 69. Acoplamiento por agua mediante inmersión: (a) Esquema; (b) Fotografía (Vázquez et al., 2019b).	83
Figura 70. (a) Transductores de inmersión; (b) Curva de calibración de los transductores de inmersión.	84
Figura 71. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de acero inoxidable (transductores de inmersión).	84
Figura 72. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante inmersión en placa de acero inoxidable (transductores de inmersión): (a) 35°; (b) 40°.	85
Figura 73. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de aluminio anodizado (transductores de inmersión).	87

Figura 74. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante inmersión en placa de aluminio anodizado (transductores de inmersión): (a) 12°; (b) 17.5°; (c) 22.5°; (d) 35°.....	88
Figura 75. (a) Transductores K2SC; (b) Curva de calibración de los transductores K2SC.....	90
Figura 76. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de acero inoxidable (transductores de banda ancha).	91
Figura 77. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante inmersión en placa de acero inoxidable (transductores de banda ancha): (a) 17.5°; (b) 20°; (c) 30°; (d) 40°.....	92
Figura 78. Acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos: (a) Esquema; (b) Fotografía (Vázquez et al., 2019b).	94
Figura 79. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua mediante contenedores cónicos en placa de acero inoxidable.	95
Figura 80. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placa de acero inoxidable: (a) 20°; (b) 30°; (c) 40°.	96
Figura 81. Acoplamiento localizado por agua mediante globos: (a) Esquema; (b) Fotografía. ..	98
Figura 82. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua mediante globos en placa de acero inoxidable.....	99
Figura 83. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante globos en placa de acero inoxidable: (a) 20°; (b) 30°; (c) 40°.	100
Figura 84. Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos: (a) Esquema; (b) Fotografía ("Figure 13", por Santiago Vázquez, Jorge Gosálbez, Ignacio Bosch, Alicia Carrión, Carles Gallardo y Jordi Payá, licencia bajo CC BY 4.0)(Vázquez et al., 2019b).	102
Figura 85. Curvas de ángulo para acoplamiento por aire en placa de acero inoxidable.	103
Figura 86. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de acero inoxidable: (a) 10° ($f_c = 500$ kHz); (b) 12.5° ($f_c = 250$ kHz); (c) 13.75° ($f_c = 250$ kHz).	105
Figura 87. Acoplamiento por aire mediante transductores capacitivos: (a) Esquema; (b) Fotografía (Vázquez et al., 2019a).	107
Figura 88. Calibración de los transductores capacitivos de acoplamiento por aire (Gosálbez et al., 2018).	107
Figura 89. Curvas de ángulo para acoplamiento por aire en placa de aluminio.....	108
Figura 90. Curvas experimentales de ángulo y velocidad de fase para excitación de banda estrecha ((a) y (b)) y para excitación de banda ancha ((c) y (d)) (Vázquez et al., 2019a)...	109
Figura 91. Placas cementicias: (a) mortero de 2.5 mm; (b) mortero de 5, 7.5, y 13 mm; (c) GRC de 16 mm.	112
Figura 92. (a) Medida de onda P en probeta de mortero gris; (b) Medida del tiempo de calibración de los transductores de onda P.	114
Figura 93. Velocidad de onda P del mortero gris y del GRC.....	114
Figura 94. Medida de onda S en placa de GRC.....	115

Figura 95. (a) Método de la envolvente; (b) Método peak-to-peak.	115
Figura 96. (a) Medida de onda S en pieza de calibración; (b) Velocidad de onda S en pieza de calibración a partir de los métodos de la envolvente (curva azul) y el método peak-to-peak (curva roja).	116
Figura 97. Velocidad de onda S del mortero gris y del GRC.	116
Figura 98. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de la placa de GRC utilizada.	117
Figura 99. Ejemplo de espectrograma combinado de curvas teóricas y SSC, sin máscara (a) y con máscara (b).	118
Figura 100. Acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placas cementicias: (a) Esquema; (b) Fotografía (Vázquez et al., 2019).	119
Figura 101. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de mortero gris de 5 mm de espesor (contenedores cónicos).	120
Figura 102. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placa de mortero gris de 5 mm de espesor: (a) 20°; (b) 40°.	120
Figura 103. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de GRC.	122
Figura 104. Espectrogramas combinados sin máscara (a) y con máscara (b), curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placa de GRC.	123
Figura 105. Acoplamiento localizado por agua mediante cuñas en placas cementicias: (a) Esquema; (b) Fotografía.	125
Figura 106. (a) Modelo de SolidWorks de la cuña de 40°; (a) Cuñas de 40° impresa.	125
Figura 107. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de mortero gris de 2.5 mm de espesor.	126
Figura 108. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en placa de mortero gris de 2.5 mm de espesor.	127
Figura 109. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de mortero gris de 5 mm de espesor (cuña 40°).	128
Figura 110. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en placa de mortero gris de 5 mm de espesor.	129
Figura 111. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de mortero gris de 7.5 mm de espesor.	130
Figura 112. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en placa de mortero gris de 7.5 mm de espesor.	131
Figura 113. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de mortero gris de 13 mm de espesor.	132
Figura 114. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en placa de mortero gris de 13 mm de espesor.	133

Figura 115. Medición de masa de la placa de mortero gris de 5 mm de espesor.	135
Figura 116. Comparativa de amplitud máxima respecto a la frecuencia entre la placa de mortero de 5 mm saturada y seca.	135
Figura 117. Espectrograma combinado y curvas teóricas de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° entre la placa de mortero de 5 mm saturada (a) y seca (b).	136
Figura 118. Espectrogramas combinados y curvas teóricas de la técnica de acoplamiento localizado por: (a) contenedores cónicos; (b) cuñas.....	136
Figura 119. Comparativa de SSC de las técnicas de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos y cuñas en placa de mortero gris de 5 mm.....	137
Figura 120. Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placas cementicias: (a) Esquema; (b) Fotografía (“Figure 19”, por Santiago Vázquez, Jorge Gosálbez, Ignacio Bosch, Alicia Carrión, Carles Gallardo y Jordi Payá, licencia bajo CC BY 4.0) (Vázquez et al., 2019).	138
Figura 121. Curvas de ángulo para acoplamiento por aire en placa de mortero gris de 2.5 mm de espesor.....	139
Figura 122. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de mortero gris de 2.5 mm de espesor.	140
Figura 123. Curvas de ángulo para acoplamiento por aire en placa de mortero gris de 5 mm de espesor.....	141
Figura 124. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de mortero gris de 5 mm de espesor.	142
Figura 125. Curvas de ángulo para acoplamiento por aire en placa de mortero gris de 7.5 mm de espesor.....	143
Figura 126. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de mortero gris de 7.5 mm de espesor.	144
Figura 127. Curvas de ángulo para acoplamiento por aire en placa de GRC.	146
Figura 128. Espectrogramas combinados sin máscara (a) y con máscara (b), curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de GRC.....	147
Figura 129. Ejemplo de probeta de mortero poco carbonatada (izquierda) y de probeta de mortero muy carbonatada (derecha).	153
Figura 130. Profundidad de carbonatación con respecto al tiempo (Kim et al., 2016).	154
Figura 131. Información acerca de las probetas fabricadas: relaciones agua/cemento, tipo de cemento y número de ejemplares por amasada.	155
Figura 132. Probetas de mortero gris y blanco. Empezando por la izquierda: tres probetas de mortero blanco de w/c 0.35, tres probetas de mortero gris de w/c 0.35, tres probetas de mortero blanco de w/c 0.6 y tres probetas de mortero gris de w/c 0.6.....	155
Figura 133. Montaje utilizado para las medidas de velocidad de onda P y atenuación en las probetas de mortero gris y blanco.....	155

Figura 134. Velocidades de onda P promedio de las probetas A, B y C de mortero blanco de w/c 0.6 y 0.35, y mortero gris de w/c 0.6 y 0.35.....	156
Figura 135. Atenuaciones promedio de las probetas A, B y C de mortero blanco de w/c 0,6 y 0,35 y de mortero gris de w/c 0.6 y 0.35.	157
Figura 136. Placa sobre un semi-espacio.	158
Figura 137. (a) Probetas bicapa de dimensiones 240x60x60 mm ³ ; (b) Probetas prismáticas de dimensiones 160x40x40 mm ³ de mortero gris y blanco.....	159
Figura 138. (a) Medición de velocidad de onda S en una probeta de mortero blanco; (b) Medida de masa de una probeta de mortero gris.	159
Figura 139. (a) Velocidades de onda P de mortero gris y blanco; (b) Velocidades de onda S de mortero gris y blanco.	160
Figura 140. (a) Ejemplo de ejecución del software Geopsy; (b). Ejemplo de modelo para una probeta bicapa de 5 mm de mortero gris y 55 mm de mortero blanco.	161
Figura 141. Curvas de dispersión de ondas de Rayleigh dispersivas de tres probetas bicapa de diferentes espesores de capa superior de mortero gris (5, 10 y 20 mm): (a) Velocidad de fase cf ; (b) Velocidad de grupo cg ; (c) Ángulo de inclinación θ (siendo el medio acoplante agua, de $c_1=1490$ m/s) y (d) Número de onda k	162
Figura 142. Esquema de acoplamiento por agua mediante cuñas en probeta bicapa.	164
Figura 143. Acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en la probeta de 5 mm de mortero gris y 55 mm de mortero blanco de la amasada 2.	165
Figura 144. Espectrograma combinado, curva teórica y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en probeta bicapa de 5 mm de mortero gris y 55 mm de mortero blanco de la amasada 2.....	165
Figura 145. Acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en la probeta de 10 mm de mortero gris.	167
Figura 146. Espectrogramas combinados, curvas teórica y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en probetas bicapa de 10 mm de mortero gris.....	167
Figura 147. Acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en la probeta de 20 mm de mortero gris.	169
Figura 148. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en probetas bicapa de 20 mm de mortero gris.	170
Figura 149. Curvas de dispersión de ondas de Rayleigh dispersivas de ángulos de inclinación θ (siendo el medio acoplante aire, de $c_1=343$ m/s) de dos probetas bicapa de diferentes espesores de capa superior de mortero gris (10 mm y 20 mm).	172
Figura 150. Esquema de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en probeta bicapa.	173
Figura 151. Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la probeta de 10 mm de mortero gris y 50 mm de mortero blanco de la amasada 1.	173
Figura 152. Espectrograma combinado, curva teórica y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en probeta bicapa de 10 mm de mortero gris.	174
Figura 153. Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la probeta de 20 mm de mortero gris y 40 mm de mortero blanco de la amasada 1.	176

Figura 154. Espectrograma combinado, curva teórica y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en probeta bicapa de 20 mm de mortero gris y 40 mm de mortero blanco de la amasada 1.	177
Figura 155. Espesores de la capa carbonatada después de sufrir procesos de carbonatación.	179
Figura 156. Acoplamiento por agua mediante cuñas en probeta de mortero normalizado: (a) Esquema; (b) Fotografía.	180
Figura 157. Espectrograma combinado, curva teórica y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en probeta de mortero normalizado (a) sin carbonatar y (b) carbonatada.	181
Figura 158. (a) Fotografía de las tres placas de GRC utilizadas en este estudio; (b) Placas en saturación.	184
Figura 159. (a) Baño de agua caliente; (b) Placas sumergidas en baño de agua caliente.	184
Figura 160. (a) Ensayo a flexión; (b) Gráficas de ensayos a flexión, a la izquierda la curva referente a la placa de GRC envejecida (M1); (c) Placa de GRC envejecida (M1) después de ensayo a flexión; (d) Placas de GRC sin envejecer después de ensayo a flexión.	185
Figura 161. Montaje utilizado para las medidas de velocidad de onda P en las placas de GRC.	186
Figura 162. Velocidades de onda P de las placas M1 (a), M2 (b) y M3 (b). En (a) y (c) se encuentran las curvas de velocidad de onda P de antes y después del proceso de envejecimiento.	187
Figura 163. Velocidades de onda S de las placas M1 (a), M2 (b) y M3 (b). En (a) y (c) se encuentran las curvas de velocidad de onda S de antes y después del proceso de envejecimiento.	188
Figura 164. Esquema de acoplamiento por agua mediante cuñas en placas de GRC.	189
Figura 165. Curvas de ángulo de inclinación para acoplamiento por agua en placas de GRC.	190
Figura 166. Espectrogramas combinados (normalizados) representados entre 0.01 y 0.5 MHz, con mascara de ancho 30 kHz, de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 20° en (a) placa de GRC M1 sin envejecer; (b) placa de GRC M1 envejecida; (c) placa de GRC M3 sin envejecer; (d) placa de GRC M3 envejecida.	191
Figura 167. Espectrogramas combinados (normalizados) representados entre 0.5 y 1 MHz, con mascara de ancho 30 kHz, de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 20° en (a) placa de GRC M1 sin envejecer; (b) placa de GRC M1 envejecida; (c) placa de GRC M3 sin envejecer; (d) placa de GRC M3 envejecida.	192
Figura 168. Espectrogramas combinados no normalizados de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 20° en (a) placa de GRC M1 sin envejecer; (b) placa de GRC M1 envejecida; (c) placa de GRC M3 sin envejecer; (d) placa de GRC M3 envejecida.	193
Figura 169. SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 20° en (a) Placa de GRC M1 sin envejecer y envejecida; (b) Placa de GRC M3 sin envejecer y envejecida.	194
Figura 170. Espectrogramas combinados (normalizados) representados entre 0.01 y 0.3 MHz, con mascara de ancho 30 kHz, de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en (a) placa de GRC M1 sin envejecer; (b) placa de GRC M1 envejecida; (c) placa de GRC M3 sin envejecer; (d) placa de GRC M3 envejecida.	195
Figura 171. Espectrogramas combinados no normalizados de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en (a) placa de GRC M1 sin envejecer; (b) placa de GRC M1 envejecida; (c) placa de GRC M3 sin envejecer; (d) placa de GRC M3 envejecida.	196

Figura 172. SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en (a) Placa de GRC M1 sin envejecer y envejecida; (b) Placa de GRC M3 sin envejecer y envejecida. 196

1. Introducción y objetivos

1.1. Introducción

En la actualidad, el ser humano está rodeado por multitud de elementos; desde grandes infraestructuras como puentes, presas, hospitales, universidades o plantas industriales, hasta elementos más pequeños como puede ser una nevera, una lavadora o un calentador de agua pasando por medios de transporte como el autobús, el tren o el avión. Todos estos elementos, forman parte del día a día del ser humano y la presencia de daño en ellos puede poner en peligro su funcionamiento y, en mayor o menor medida, la seguridad de las personas. Es por ello que existen grandes esfuerzos para desarrollar métodos que permitan evaluar y predecir el estado e integridad de cualquiera de estos elementos en cualquiera de las etapas de la vida de dichas estructuras, aspecto que redundará en la cuantificación del ciclo de vida y en la mejora de la seguridad tanto de los elementos como de las personas. En la actualidad, una gran cantidad de infraestructuras están fabricadas parcial o totalmente con materiales cementicios (Voigt et al., 2005). El hormigón es uno de los materiales más antiguos y utilizados en la construcción debido a su bajo coste, durabilidad y a sus destacables características mecánicas y estructurales (Carrión et al., 2017; Gupta, 2018; Porto, 2005). Es un material compuesto formado por la mezcla de cemento, áridos (grava, arena) y agua que presenta una estructura heterogénea, repleta de poros y micro-fisuras. Concretamente, en el año 2004, se fabricaron 2 billones de toneladas de hormigón (Gupta, 2018). Pese a su durabilidad y características destacables, estos materiales sufren las condiciones del entorno y experimentan procesos de deterioro que afectan a su integridad, durabilidad y seguridad. Algunos de los procesos de deterioro que sufren son ataque ácido, ataque por sulfatos, daño térmico, ciclos hielo-deshielo.

El reconocimiento de la integridad, durabilidad y seguridad como prioridades en las estructuras cementicias ha implicado extensa investigación y el desarrollo de pruebas para verificar su calidad y estado, especialmente en estructuras recién construidas donde existe riesgo de colapso (Voigt et al., 2005). A estas pruebas se les conoce como ensayos destructivos (ED) y los ensayos no destructivos (END) (*¿Qué Son Los END?*, n.d.; Su et al., 2009). Los ED requieren la destrucción parcial (o incluso total) de una estructura para poder obtener información acerca de ella. En materiales cementicios, se suele extraer una pequeña muestra de la estructura mediante un taladro para su análisis (Carrión et al., 2017). Es un tipo de ensayo sencillo de aplicar e interpretar y proporciona una medida directa del parámetro ensayado. Los parámetros más habituales que se pueden calcular son los distintos tipos de resistencia mecánica (compresión, tracción y flexión (Molero, 2009)), densidad, porosidad y permeabilidad. Sin embargo, el principal problema que muestran estos ensayos es que necesitan la destrucción de parte de la estructura. (*Destructive Testing*, n.d.). En estructuras protegidas como templos, monumentos o pinturas (Shankar et al., 2014) estos ensayos son inviables (Arizzi et al., 2013). Por ese motivo, existen los END, los cuales permiten inspeccionar un material sin necesidad de dañarlo ni alterar sus propiedades. Además, se pueden automatizar e incluso complementar sus resultados con los de ED. No obstante, la interpretación de los resultados es más compleja que en el caso de ED, pues siempre están basados en medidas indirectas (Gupta, 2018). Entre las técnicas más utilizadas de END se encuentran la inspección visual, termografía infrarroja, el georradar o los ultrasonidos.

Los END por ultrasonidos son muy utilizados en materiales cementicios. Los parámetros ultrasónicos más habituales son la atenuación y la velocidad (Molero, 2009). La atenuación es

sensible a la microestructura y porosidad de los materiales cementicios (Genovés et al., 2015a). La velocidad se suele obtener habitualmente de dos tipos de ondas, las ondas longitudinales y transversales, también conocidas como ondas P y S, respectivamente (Theobald et al., 2008). Las ondas P y S se pueden utilizar para calcular las constantes elásticas (Genovés et al., 2017b; Molero, 2009). Existen más tipos de ondas, entre ellas las ondas guiadas, las cuales presentan características especiales: son capaces de recorrer mayores distancias y requieren menor número de inspecciones que los ensayos por ondas P y S ultrasónicas (Rose, 2014). No obstante, pese a que se han utilizado para inspeccionar materiales heterogéneos como los cementicios, los resultados de las ondas guiadas son más fáciles de interpretar en materiales homogéneos como los metales (Keller et al., 2001).

1.2. Objetivos

La motivación y por ende el objetivo principal de esta tesis es el estudio y desarrollo de nuevas técnicas de inspección basadas en ondas guiadas por ultrasonidos que nos permitan cuantificar el daño en materiales cementicios. Este objetivo principal se divide en varios objetivos específicos:

- Revisar el estado del arte sobre ensayos no destructivos mediante ultrasonidos, en especial en los diferentes aspectos relacionados con las ondas guiadas: materiales inspeccionados, tipos de ondas, ecuaciones, representación gráfica, técnicas de generación y detección, técnicas de procesamiento de señal y aplicaciones prácticas.
- Estudiar y optimizar las diferentes técnicas de acoplamiento y tipos de transductores ultrasónicos para la generación y captación de ondas guiadas. Para ello, se plantea la realización de diversos experimentales sobre materiales metálicos como materiales de referencia, a modo de antesala para la inspección de materiales de mayor heterogeneidad como los cementicios.
- Aplicar el conocimiento y destreza adquiridos en los experimentales de ondas guiadas para inspeccionar materiales cementicios con degradación o deterioro debido a la carbonatación de su superficie o al envejecimiento de las fibras.

Una vez establecidos los objetivos, la presente tesis doctoral se ha estructurado de la siguiente forma:

- El capítulo 2 establece las bases y el contexto necesario para comprender los ensayos no destructivos mediante ultrasonidos en materiales cementicios, que son el eje principal del presente trabajo. Se detallan las características principales de los materiales cementicios (etapas de fabricación, parámetros de interés, etc.), los tipos de degradación que aparecen en dichos materiales (daño térmico, hielo-deshielo, carbonatación, etc.) y los ensayos (destructivos y no destructivos) utilizados para su detección. Se hace especial hincapié en los ensayos no destructivos basados en ultrasonidos, explicando sus parámetros básicos (amplitud, frecuencia, etc.), los tipos de onda habituales (ondas P y S), el funcionamiento de los transductores, etc.
- El capítulo 3 se centra en el estudio detallado de las ondas guiadas, concretamente en ondas de Rayleigh y de Lamb. Este estudio abarca aspectos tales como las ecuaciones que representan los desplazamientos de dichas ondas y su representación gráfica (curvas de dispersión), algunos ejemplos de aplicaciones prácticas, las técnicas de acoplamiento habituales (contacto, agua, aire, etc.) y las herramientas de procesamiento de

señal más utilizadas (transformada de Fourier, espectrogramas, transformada *wavelet*, etc.).

- El capítulo 4 presenta las medidas experimentales realizadas en materiales metálicos y cementicios mediante distintas técnicas de acoplamiento (cuñas sólidas, acoplamiento por agua y acoplamiento por aire) y distintos tipos de transductores (transductores de contacto, transductores de inmersión, ...). Los materiales metálicos se han utilizado a modo de referencia debido a su homogeneidad y a su habitual estructura tipo placa. A partir de las medidas en materiales metálicos, se han seleccionado las técnicas de acoplamiento adecuadas (acoplamiento por aire y agua) para inspeccionar diferentes materiales cementicios.
- El capítulo 5 muestra las aplicaciones prácticas donde se han empleado ondas guiadas para inspeccionar materiales cementicios: medición de espesores de carbonatación de forma simulada en especímenes de dos capas de distinto cemento (a modo de antesala para estudiar el daño producido por carbonatación) y el envejecimiento de fibras en placas de cemento reforzado con fibra de vidrio o *glass-fibre reinforced cement (GRC)*.
- El capítulo 6 recoge las conclusiones y las posibles líneas futuras de investigación que surgen a partir de los resultados obtenidos.

2. Ensayos no destructivos (END)

En este primer capítulo, se hace una introducción a los materiales cementicios, los tipos de daños que pueden aparecer en ellos y los ensayos destructivos (ED) y no destructivos (END) empleados para detectar dichos daños, desarrollando en profundidad los END basados en ultrasonidos. También se explican los conceptos teóricos del ultrasonido más relevantes, entre ellos los tipos de ondas, los tipos de incidencia y el equipamiento habitual. Por último, se citan los parámetros ultrasónicos habituales, velocidad y atenuación, y su aplicación en la caracterización de materiales cementicios.

2.1. Materiales cementicios

El cemento es uno de los materiales más usados en la construcción tanto para edificios como para obras civiles. Su naturaleza, maleabilidad en estado fresco y su resistencia una vez curado, le han concedido este rol. Los materiales cementicios son materiales compuestos¹ que se obtienen como resultado de una mezcla de cemento Portland², agua y áridos finos (arena) y gruesos (grava o piedra triturada). Los más conocidos son la pasta de cemento, el mortero y el hormigón. Básicamente, la pasta de cemento es la mezcla entre cemento y agua; el mortero está formado por una mezcla de pasta de cemento y áridos finos; y el hormigón es una mezcla de mortero más áridos gruesos (o dicho de otro modo, una mezcla de pasta de cemento y áridos finos y gruesos) (Molero, 2009; Porto, 2005). Dichas mezclas se suelen situar en moldes de acero para fabricar probetas (ejemplares) de unas dimensiones y morfología concretas (Antón, 2016; Payá et al., 2019). En el caso del mortero y el hormigón, la pasta de cemento se endurece y aglutina los áridos, formando una matriz sólida que presenta una cierta porosidad (Antón, 2016). Para su formación, dichos materiales atraviesan una serie de etapas donde el material va evolucionando y modificando sus propiedades.

Las etapas o procesos que atraviesan las mezclas cementicias son:

- El fraguado se caracteriza por la transición de estado líquido a estado sólido de la pasta de cemento (Lliveras, 2017). Previamente al fraguado, la mezcla se encuentra en un estado plástico. Es un proceso exotérmico que finaliza cuando el hormigón adquiere la rigidez adecuada (Antón, 2016). Se puede dividir en fraguado inicial y final, los cuales se pueden determinar mediante el aparato de Vicat (E. González et al., n.d.). Dicho aparato consta de una aguja con la que se puede medir la profundidad de penetración en la pasta de cemento (Figura 1).

¹ Los materiales compuestos se forman a partir de la unión de dos o más componentes para conseguir una serie de propiedades que no se pueden obtener a partir de los componentes originales (V. A. González, 2011).

² El nombre Portland no es la marca o modelo de cemento, sino una denominación genérica utilizada para referirse a cualquier cemento empleado en la fabricación de hormigón (*Cement & Concrete Basics FAQs*, n.d.). Su inventor, Joseph Aspdin, le llamó cemento Portland debido a su parecido con la piedra de Portland, una piedra caliza que se encuentra en la isla de Portland (Dorset, Inglaterra) (*Portland Cement*, n.d.).



Figura 1. Aparato de Vicat ("[Appareil de Vicat](#)" por [Habib M'henni](#), licencia bajo [CC BY-SA 3.0](#)).

El tiempo inicial de fraguado se obtiene cuando la aguja alcanza una penetración de 25 mm y el tiempo de fraguado final se obtiene cuando la aguja no es capaz de dejar una marca completa en la superficie de la pasta (Zhu et al., 2011b). Un ejemplo de curva que representa la resistencia a la penetración de la aguja del aparato de Vicat con respecto al tiempo de una pasta de cemento Portland se muestra en la Figura 2. En dicha curva se señalan el principio y final del fraguado. A partir del final del fraguado se produce la fase de endurecimiento.

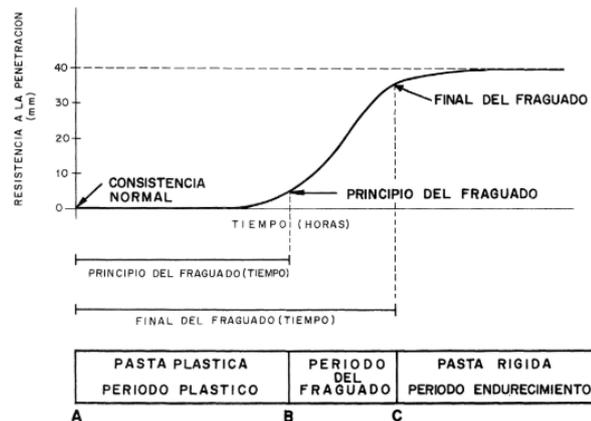


Figura 2. Resistencia a la penetración de la aguja del aparato de Vicat respecto al tiempo de una pasta de cemento Portland ("[Fig. 1](#)", por Demetrio Gaspar-Tebar, licencia bajo [CC BY-NC 3.0 ES](#)) (Gaspar-Tebar, 1980).

- El endurecimiento consiste en una continuación de los procesos de hidratación y solidificación de la pasta de cemento pero de forma más paulatina (Antón, 2016). El proceso puede durar años, hasta que todas las partículas de cemento estén completamente hidratadas (Mercedes, 2018). Tanto el fraguado como el endurecimiento se consideran reacciones químicas.

- El curado consiste en proporcionar unas condiciones de temperatura y humedad adecuadas a las probetas cementicias fabricadas para evitar fisuraciones (Antón, 2016; Porto, 2005). Existen distintas formas de realizar el proceso de curado: mediante riego directo (Porto, 2005), inmersión (Llueras, 2017) o en cámara húmeda (Antón, 2016; Payá et al., 2019). Se realiza durante los procesos de fraguado y endurecimiento y su duración está relacionada con distintos factores (tipo de cemento, temperatura, humedad, ...)(Porto, 2005). Sin embargo, a los 28 días se estima que el material ha alcanzado las características de diseño (Antón, 2016; Llueras, 2017; Molero, 2009).

Opcionalmente, en las mezclas de materiales cementicios se pueden incluir aditivos para modificar sus propiedades, como por ejemplo superplastificante para aumentar la plasticidad (Antón, 2016; *Definición de Pasta de Cemento y Conceptos Relacionados*, n.d.; Llueras, 2017).

Existen dos variables destacables en el diseño de los materiales cementicios: la relación agua/cemento o *water/cement ratio*, w/c , y la relación árido/cemento o *aggregate/cement ratio*, a/c (Genovés et al., 2016).

La relación w/c (Ecuación (1)) se define como el cociente entre el peso de toda el agua, W , (incluyendo el agua presente en la superficie de los áridos, si los hubiera) con respecto al peso del cemento en la mezcla, C (Nischer, 1972; Walz, 1971)

$$w/c = \frac{W}{C} \quad (1)$$

La cohesión del hormigón se puede garantizar con una relación w/c entre aproximadamente 0.3 y 0.6 (Payan et al., 2007). Si la relación w/c es alta, implica que el material cementicio resultante es más trabajable y, por lo tanto, menos resistente (Páez, 1986; Walz, 1971). Es decir, la relación w/c es inversamente proporcional a la resistencia mecánica de dicho material (Figura 3). Los distintos tipos de resistencias mecánicas más habituales se han detallado en el apartado “Ensayos destructivos”.

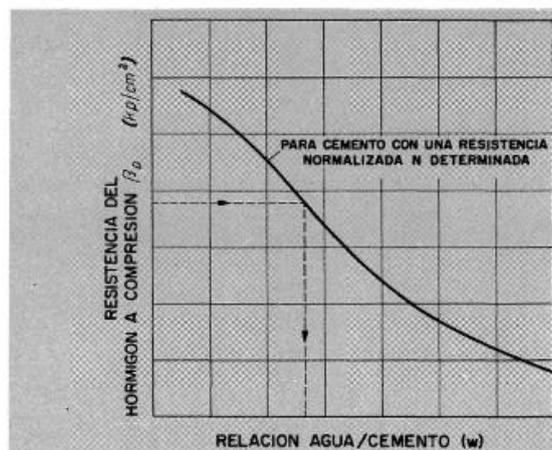


Figura 3. Ejemplo de resistencia del hormigón respecto a la relación agua/cemento (w/c) (“Fig.1”, por Kurt Walz, licencia bajo [CC BY-NC 3.0 ES](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/es/)) (Walz, 1971).

En cuanto a la relación a/c , se define como el cociente entre el peso de los áridos, A , con respecto al peso del cemento utilizado en la amasada, C (Ecuación (2)).

$$a/c = \frac{A}{C} \quad (2)$$

Si la relación a/c es alta, hay menos cantidad de cemento en la mezcla, lo que implica menos cantidad de pasta de cemento para aglutinar los áridos y llenar los poros. En definitiva, se consigue una mezcla menos trabajable. Al igual que la relación w/c , la relación a/c es inversamente proporcional a la resistencia. En la Figura 4 se representan cuatro curvas de resistencia respecto a relación a/c de cuatro series de hormigón que contienen distintos tipos de áridos.

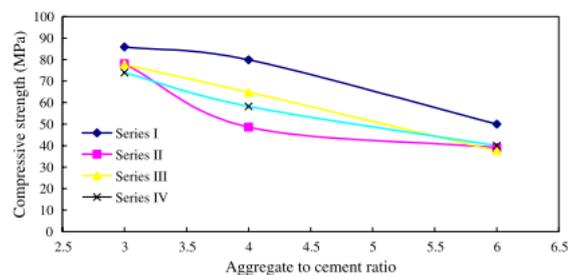


Figura 4. Ejemplo de resistencia de hormigón (fabricado en series de distintos tipos de áridos) respecto a la relación árido/cemento (a/c)³ (Poon et al., 2008).

Una relación a/c de 3 o de 3:1 (es decir, la cantidad de áridos es 3 veces mayor que la cantidad de cemento) se suele utilizar en la fabricación de morteros (Kargari et al., 2019; Philippidis et al., 2004; Poon et al., 2008; Vázquez et al., 2019b). Los áridos se pueden entender como el esqueleto del hormigón (Porto, 2005). Confieren resistencia y durabilidad y ocupan entre el 65 y 80 % del volumen del hormigón (V. A. González, 2011; Porto, 2005). Suelen ser de caliza y sílice (V. A. González, 2011; Payan et al., 2007). Se consideran áridos finos a aquellos cuyo tamaño es inferior a 5 mm y gruesos a los que son mayores de 5 mm (V. A. González, 2011; Molero, 2009; Porto, 2005). Generalmente, su tamaño comprende entre 3 y 16 mm (Payan et al., 2007).

2.2. Daños en materiales cementicios

Pese a la durabilidad y las características mecánicas y estructurales del hormigón (incluyendo el hormigón armado) y, en general, los materiales basados en cemento (fundamentalmente cemento Portland) (Carrión et al., 2017; IAEA, 2002; Porto, 2005; Wardany et al., 2004) sufren procesos de degradación y deterioro que pueden limitar su vida útil. Entre otros, nos podemos encontrar procesos de fisuración por carga mecánica, procesos físicos como hielo-deshielo o altas temperaturas, y procesos químicos y físico-químicos como la carbonatación, el ataque por

³ "Reprinted from Cement and Concrete Composites, 30, Chi Sun Poon, Chi Sing Lam, The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks, 283-289, (2008), with permission from Elsevier."

sulfatos o el ataque ácido. Estos procesos mencionados dan lugar a cambios perjudiciales que modifican las propiedades y prestaciones del hormigón con el tiempo.

Entre los principales procesos de degradación que sufren estos materiales se encuentran los siguientes⁴:

- **Ataque ácido.** Si el material cementicio se halla en un entorno ácido, su pH se reduce. Si dicho ataque persiste, se produce una pérdida gradual de resistencia mecánica que implica la pérdida de masa y la aparición de grietas. En el caso del hormigón armado, se puede producir corrosión en las armaduras de acero, acortando la vida útil de la estructura (Beddoe et al., 2005; Pérez, 2015). En la Figura 5 se muestra una probeta cúbica de pasta de cemento (Pavlík, 2019) que ha estado en agua durante 25 días (Water) y que posteriormente ha sido expuesta a ácido hidrocórico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄) y una mezcla de ambos ácidos (HCl+H₂SO₄). Se observa la aparición de una capa de corrosión en los tres casos (HCl, H₂SO₄ y HCl+H₂SO₄).

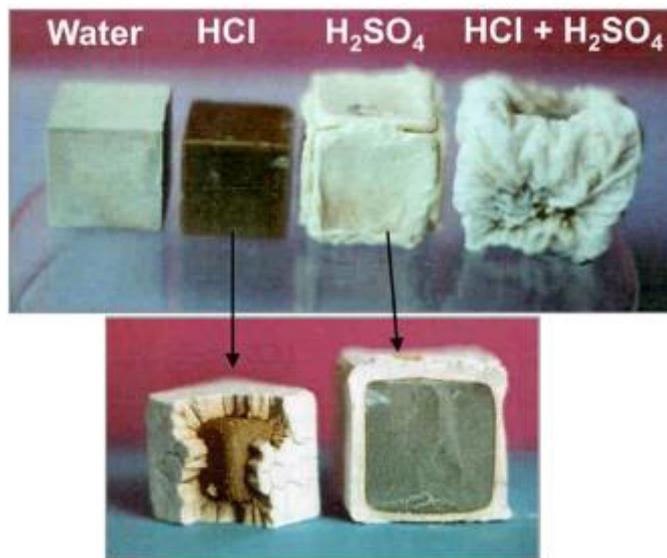


Figura 5. Ejemplos de ataque ácido en probeta cúbica de pasta de cemento ("[Figure 7](#)", por [Vladimir Pavlík](#), licencia bajo [CC BY 3.0](#)) (Pavlík, 2019).

- **Ataque por sulfatos.** Es uno de los más conocidos y se considera uno de los daños más agresivos (Genovés et al., 2017a). Puede ser interno o externo (Carrión et al., 2017). Se genera un proceso de expansión y micro-fisuración en la matriz de cemento debido a la formación de ettringita⁵ (Carrión et al., 2017; Genovés, et al., 2015d). Todo ello se traduce en una reducción de la integridad física y mecánica de la estructura. En la Figura 6 hay cuatro imágenes de microscopía electrónica de barrido de emisión de campo o *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM)⁶ de cuatro series de mortero a las que se les ha aplicado un porcentaje de SO₃ (respecto a la cantidad de cemento) para su

⁴ En este trabajo se ha profundizado más a fondo en los daños por carbonatación y envejecimiento de fibras.

⁵ Es un compuesto expansivo que se forma en el proceso de hidratación del cemento Portland (ettringita primaria) y a lo largo de la vida útil de las estructuras de hormigón (ettringita secundaria) (Genovés et al., 2015d).

⁶ Es una técnica que consiste fundamentalmente en barrer un haz de electrones sobre la superficie de la muestra a analizar. Al mismo tiempo, en un monitor se proyecta la información de interés (*Microscopía Electrónica de Barrido de Emisión de Campo*, n.d.).

composición (ataque interno por sulfatos o *internal sulphate attack* (ISA)). En la Figura 6 (a) no aparece ninguna aguja de ettringita (E) mientras que en la Figura 6 (d) se observan muchas agujas alrededor de las fases de silicatos cálcicos hidratados (C-S-H)⁷ y portlandita⁸ (P).

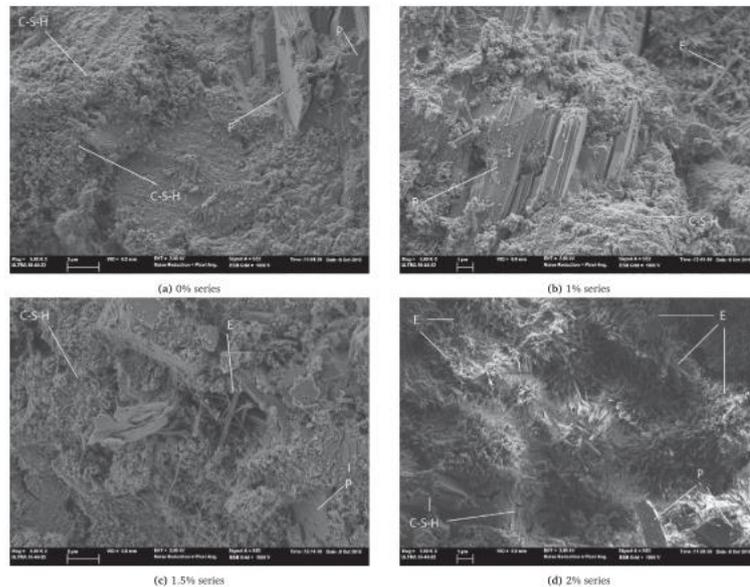


Figura 6. Ejemplo de ataque interno por sulfatos (ISA) en series de mortero con : (a) 0% de SO_3 ; (b) 1% de SO_3 ; (c) 1.5% de SO_3 y (d) 2% de SO_3 ⁹ (Genovés et al., 2017b).

- Daño térmico.** Pese al buen rendimiento del hormigón frente a altas temperaturas, éstas pueden provocar que la pasta de cemento que aglutina los áridos pierda rigidez y capacidad de adhesión. Se puede producir el desprendimiento (*spalling*) del hormigón, la aparición de delaminaciones (Park et al., 2014; Porto, 2005) y micro-fisuras (Genovés et al., 2019) además de disminuir la resistencia a la compresión considerablemente, esto último a partir de 400 °C (Colombo et al., 2007; Payan et al., 2007). Un ejemplo de daño térmico en mortero se encuentra en la Figura 7. Las imágenes de la parte superior (Figura 7 (a) y (b)) se han adquirido mediante microscopio óptico, mientras que las imágenes de la parte inferior (Figura 7 (c) y (d)) se han adquirido mediante microscopía electrónica de barrido o *Scanning Electron Microscopy (SEM)*, cuyo funcionamiento es similar a FESEM (*Microscopía Electrónica de Barrido de Emisión de Campo*, n.d.). En la Figura 7 (b) (mortero dañado a 525 °C) se observa la aparición de fisuras (C) alrededor de los áridos (A), además de la desconexión entre los áridos y la pasta de cemento (P) si se compara con la Figura 7 (a) (mortero sano). Por otro lado, en la Figura 7 (d) (mortero dañado a 525 °C) se ha incrementado la rugosidad de la pasta de cemento si se compara con la Figura 7 (c) (mortero sano).

⁷ Es el producto principal resultante de la hidratación del cemento Portland y el principal responsable de la resistencia en materiales cementicios (*Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H)*, n.d.).

⁸ Es un mineral formado durante el proceso de curado del hormigón. Su fórmula química es $Ca(OH)_2$ (*Portlandite*, n.d.).

⁹ "Reprinted from Materials and Design, 125, V. Genovés, F. Vargas, J. Gosálbez, A. Carrión, M.V. Borrachero, J. Payá, Ultrasonic and impact spectroscopy monitoring on internal sulphate attack of cement-based materials, 46-54, (2017), with permission from Elsevier."

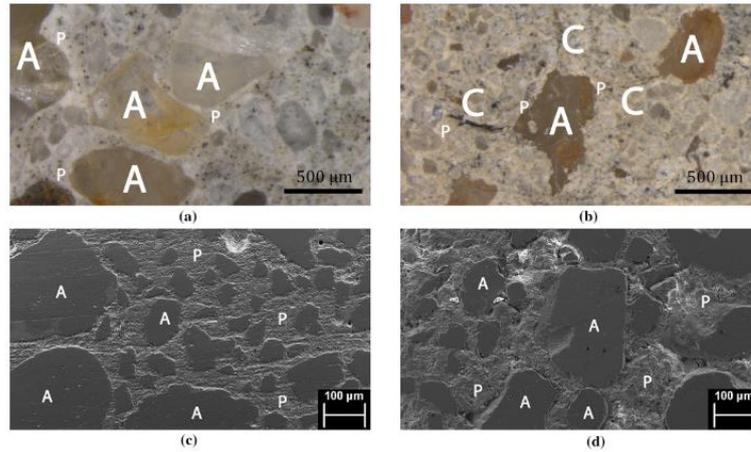


Figura 7. Ejemplo de daño térmico: (a) Mortero sano a 40°C, microscopio óptico; (b) Mortero dañado a 525°C, microscopio óptico; (c) Mortero sano a 40°C, SEM; (d) Mortero dañado a 525°C, SEM¹⁰ (Genovés et al., 2019).

- **Hielo-deshielo.** Es uno de los principales problemas en entornos fríos. Si el material sufre varios ciclos hielo-deshielo, la matriz de pasta de cemento se expande, provocando micro-fisuras y desprendimiento (*spalling*) (Molero et al., 2012). En la Figura 8 se aprecia el deterioro de la superficie de una probeta de hormigón conforme se aumenta el número de ciclos hielo-deshielo.



Figura 8. Ejemplo de ciclos hielo-deshielo aplicados en una probeta de hormigón: (a) 0 ciclos; (b) 200 ciclos; (c) 400 ciclos ("[FIGURE 1](#)", por [Huai-shuai Shang](#), Wei-qun Cao y Bin Wang, licencia bajo [CC BY 3.0](#)) (Shang et al., 2014).

- **Humectación-secado.** Los ciclos de humectación-secado son uno de los procesos más agresivos para las estructuras cementicias. Se generan fisuraciones, que ponen en peligro su estabilidad. Afectan principalmente a la resistencia mecánica (Aldaood et al., 2014; Dehestani et al., 2020; J. Zhang et al., 2012). La Figura 9 presenta (en imágenes de

¹⁰ Reprinted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: Springer Nature, Journal of Nondestructive Evaluation, Nonlinear Acoustic Spectroscopy and Frequency Sweep Ultrasonics: Case on Thermal Damage Assessment in Mortar, Vicente Genovés, Alicia Carrión, Daniel Escobar, Jorge Gosálbez, Jose Monzó, Maria Victoria Borrachero, Jordi Payá, 2019.

microscopio) la evolución de una probeta de hormigón que ha sufrido ciclos de humectación-secado ininterrumpidamente hasta un máximo de 63 días. Se observa el crecimiento de fisuraciones a partir de los poros (recuadro rojo).

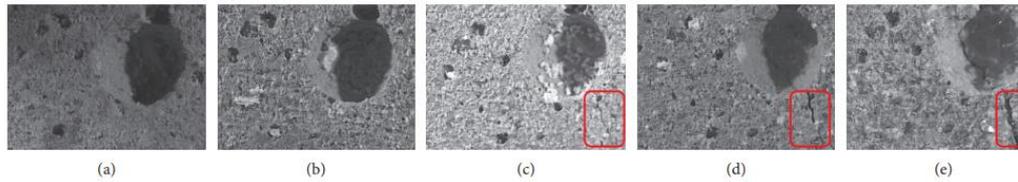


Figura 9. Ejemplo de ciclos de humectación-secado en probeta de hormigón durante: (a) 0 días; (b) 21 días; (c) 42 días; (d) 54 días y (e) 63 días ("FIGURE 9", por [Wei Tian](#) y [Nv Han](#), licencia bajo [CC BY 4.0](#)) (Tian et al., 2017).

- **Carbonatación.** Este proceso produce una reducción de pH (Bouchaala et al., 2011) y de porosidad (Goueygou et al., 2009; Vu et al., 2015) y un incremento en las propiedades elásticas, la densidad, la resistencia mecánica y la compactación del material. Genera un frente o gradiente que con el tiempo alcanza grandes profundidades. Si es una estructura de hormigón armado, dicho frente puede llegar a la armadura metálica y provocar corrosión, lo que, como se ha afirmado en ataque ácido, reduciría enormemente la vida útil de dicha estructura (Arizzi et al., 2013; Kim et al., 2016; Villain et al., 2007). Para revelar el espesor del frente carbonatado¹¹, se utiliza fenolftaleína, un indicador de pH que, aplicado a una superficie recién cortada o dañada (Eiras et al., 2016; Kim et al., 2016), reacciona cambiando de color (tono rosado) donde el material no presenta carbonatación. Es decir, la parte del material que no está carbonatada adquiere un tono rosado mientras que la parte carbonatada no cambia de color (Figura 10).



Figura 10. Ejemplo de probeta de mortero poco carbonatada (izquierda) y probeta de mortero muy carbonatada (derecha).

- **Envejecimiento de fibras.** Las fibras del cemento reforzado con fibra de vidrio o *glass-fibre reinforced cement (GRC)* sufren un rápido proceso de envejecimiento en ambientes húmedos y alcalinos (ambientes con pH superiores a 12), el cual daña la superficie de dichas fibras (Genovés et al., 2015c), afectando a las propiedades mecánicas (módulo elástico, tenacidad) y a la fragilidad del GRC, especialmente a ésta última (Eiras et al., 2013b; Sánchez Paradela et al., 1991). En la Figura 11 se observa el aspecto que presenta una fibra de GRC sin envejecer (Figura 11 (b)) respecto a una muy envejecida (Figura 11 (d)). Las imágenes fueron tomadas mediante SEM. Las fibras de las placas de GRC se han

¹¹ De hecho, la fenolftaleína también se utiliza para revelar el espesor de la capa formada por ataque ácido (M. C. Chen et al., 2013; Pérez, 2015).

envejecido mediante la inmersión de dichas placas en agua caliente a 65 °C durante 150 horas ininterrumpidamente (Eiras et al., 2013b).

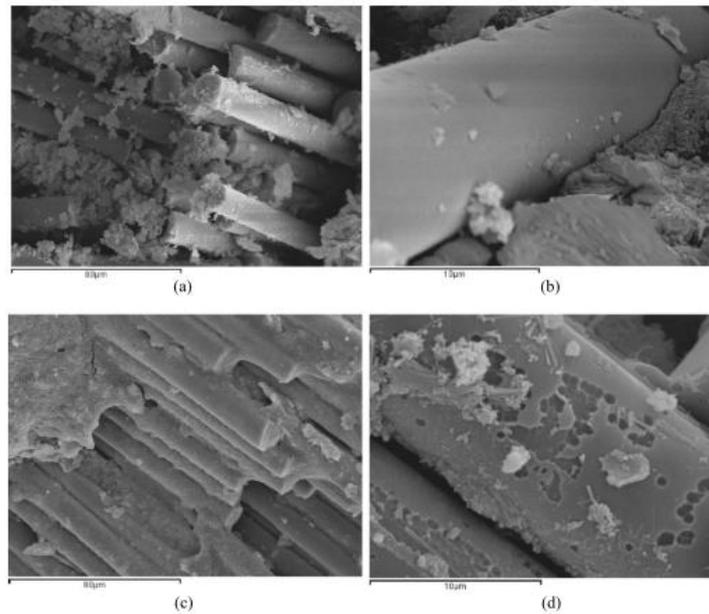


Figura 11. Ejemplo de fibras sin envejecer (a) y (b) y de fibras envejecidas (c) y (d)¹² (Eiras et al., 2013b).

- **Fatiga por carga.** Consiste en la rotura del hormigón debido a la aplicación repetida de una carga (por ejemplo, de compresión (Zanuy et al., 2011) o flexión (L. Song et al., 2019)) por debajo del valor que produce la rotura del material. Se producen microfisuras en la interfaz pasta de cemento-áridos que se propagan, provocando un deterioro progresivo de sus propiedades mecánicas (Figura 12).

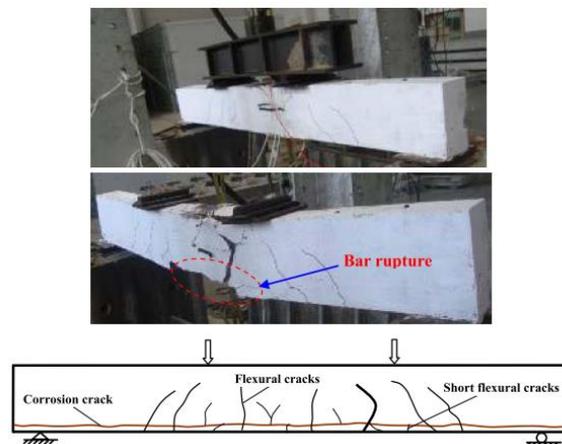


Figura 12. Ejemplo de fatiga por carga ("Fig.2" por Li Song, Zhiwei Fan y Jian Hou, licencia bajo [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)) (L. Song et al., 2019).

¹² Reprinted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: Springer Nature, Journal of Nondestructive Evaluation, Nondestructive Monitoring of Ageing of Alkali Resistant Glass Fibre Reinforced Cement (GRC), J.N. Eiras, T. Kundu, M. Bonilla, J. Payá, 2013.

Tras describir alguno de los problemas que provocan estos procesos y condiciones, es de vital importancia ser capaces de evaluar la durabilidad y calidad de los materiales cementicios mediante la inspección y monitorización de las estructuras con ensayos destructivos (ED) y ensayos no destructivos (END). Si se detectan deterioros y daños con suficiente antelación (Carrión et al., 2017; Payá et al., 2019) se pueden reducir costes en tareas de mantenimiento y reparación (Molero, 2009).

2.3. Ensayos destructivos y ensayos no destructivos en materiales cementicios

Debido al gran uso de los materiales cementicios en la construcción y a su repercusión en la seguridad de las personas, existe normativa y ensayos específicos para garantizar que las propiedades mecánicas alcanzadas son las requeridas de antemano (Gupta, 2018; Porto, 2005).

Ahora bien, los ensayos sobre los materiales cementicios se pueden aplicar en estado fresco, los cuales se realizan para conocer sus características reológicas, o en estado endurecido, los cuales se realizan para obtener su resistencia u otras propiedades como porosidad o permeabilidad (*Ensayos Del Hormigón*, n.d.).

Dentro de los tipos de ensayos, podemos clasificarlos atendiendo a ED o END. En primer lugar, se describen los ED que, tal y como su nombre indica, implican la destrucción (parcial o total) de la muestra o estructura ensayada. También se comentan sus ventajas y principales normativas. Posteriormente se describen los END haciendo especial hincapié en los END por ultrasonidos. Remarcar que, debido a la naturaleza no destructiva de los END, han experimentado un gran auge, aunque al basarse en medidas indirectas, requieren de una interpretación y un procedimiento adecuados, por lo que se sigue investigando y avanzando en esta línea.

2.3.1. Ensayos destructivos

Los ED en materiales cementicios incluyen métodos en los cuales, principalmente, se extraen muestras de la estructura para determinar sus propiedades mecánicas (García, 2009; Gupta, 2018; Porto, 2005). Su finalidad es investigar la vida útil y detectar problemas en el diseño que no surjan en condiciones de trabajo normales. La información y procedimiento de estos ensayos figuran en las normativas correspondientes (García, 2009; Porto, 2005).

Las ventajas de los ED en materiales cementicios son las siguientes (Gupta, 2018):

- Suelen ser más sencillos de llevar a cabo y de interpretar.
- Ayudan a reducir fallos, accidentes y costes.

No obstante, sus desventajas son (Gupta, 2018):

- Las probetas testigo extraídas son inservibles una vez realizado el ED.
- Es complicado determinar defectos internos tales como poros o burbujas.
- No es sencillo detectar deformidades tempranas en el hormigón.
- No son aplicables a la totalidad de la estructura o producción, lo que obliga a realizarlos sobre un número limitado de muestras.

Existen distintos ED en materiales cementicios. En este trabajo, se ha hecho especial hincapié en los ensayos de estimación de los tipos de resistencia mecánica. La resistencia mecánica mide la capacidad de un material para soportar esfuerzos aplicados sin sufrir deformaciones,

deterioros o roturas (Molero, 2009). Se suele expresar en megapascales (MPa) (Cánoves, 2012; Genovés et al., 2017a). Entre las más utilizadas se encuentran la resistencia a compresión, a tracción y a flexión. Los ED para medir resistencias se aplican con una máquina universal (Genovés et al., 2017a; Gupta, 2018). Cada ensayo está documentado en diferentes normativas o estándares (García, 2009; Genovés et al., 2015a; Syarif et al., 2018). Las probetas o ejemplares a ensayar pueden presentar distintas morfologías: cúbicas, cilíndricas o prismáticas (*Compressive Test*, n.d.). Las definiciones de cada resistencia son (Masías, 2018; Molero, 2009):

- La resistencia a compresión (Figura 13 (a)) es el esfuerzo máximo que puede soportar un material al aplastarlo (Hernández et al., 2018). Suele ser la más relevante y la primera en especificarse (Molero, 2009). Algunas normativas que detallan este ensayo son UNE-EN-1015-11 y ASTM C39/C39M-03 (García, 2009; Genovés et al., 2015a). En la Figura 13 (b) se encuentra una imagen del ensayo de resistencia a compresión.
- La resistencia a tracción (Figura 13 (c)) es el esfuerzo máximo que puede soportar un material al estirarlo. Suele ser un 10 % de la resistencia a compresión (Molero, 2009). Las armaduras metálicas que se añaden en el hormigón (hormigón armado) incrementan su resistencia a tracción y evitando su fisuración (Porto, 2005). Dicho hormigón armado se emplea a nivel mundial en el diseño de todo tipo de edificaciones y construcciones tales como túneles o puentes (Payá et al., 2019). Algunas normativas que detallan este ensayo son ASTM C-496/C966M-17 y UNE-EN 12390-6:2010 (Syarif et al., 2018; *UNE-EN 12390-6:2010*, n.d.). En la Figura 13 (d) se encuentra una imagen del ensayo de resistencia a tracción.
- La resistencia a flexión (Figura 13 (e)) es el esfuerzo máximo que puede soportar un material al doblarlo. Suele ser un 15 % del valor de la resistencia a compresión (Molero, 2009). Existe la posibilidad de reforzar el hormigón con fibras para aumentar su resistencia a flexión, como en el *GRC* (Eiras et al., 2013b; Genovés et al., 2015b). De hecho, la resistencia a compresión y a tracción del *GRC* es incluso más alta en comparación al mortero (Hernández et al., 2007). Algunas normativas que detallan este ensayo son BS EN 1170-5 y ASTM C78-02 (García, 2009; Genovés et al., 2015c). En la Figura 13 (f) se encuentra una imagen del ensayo de la resistencia a flexión.

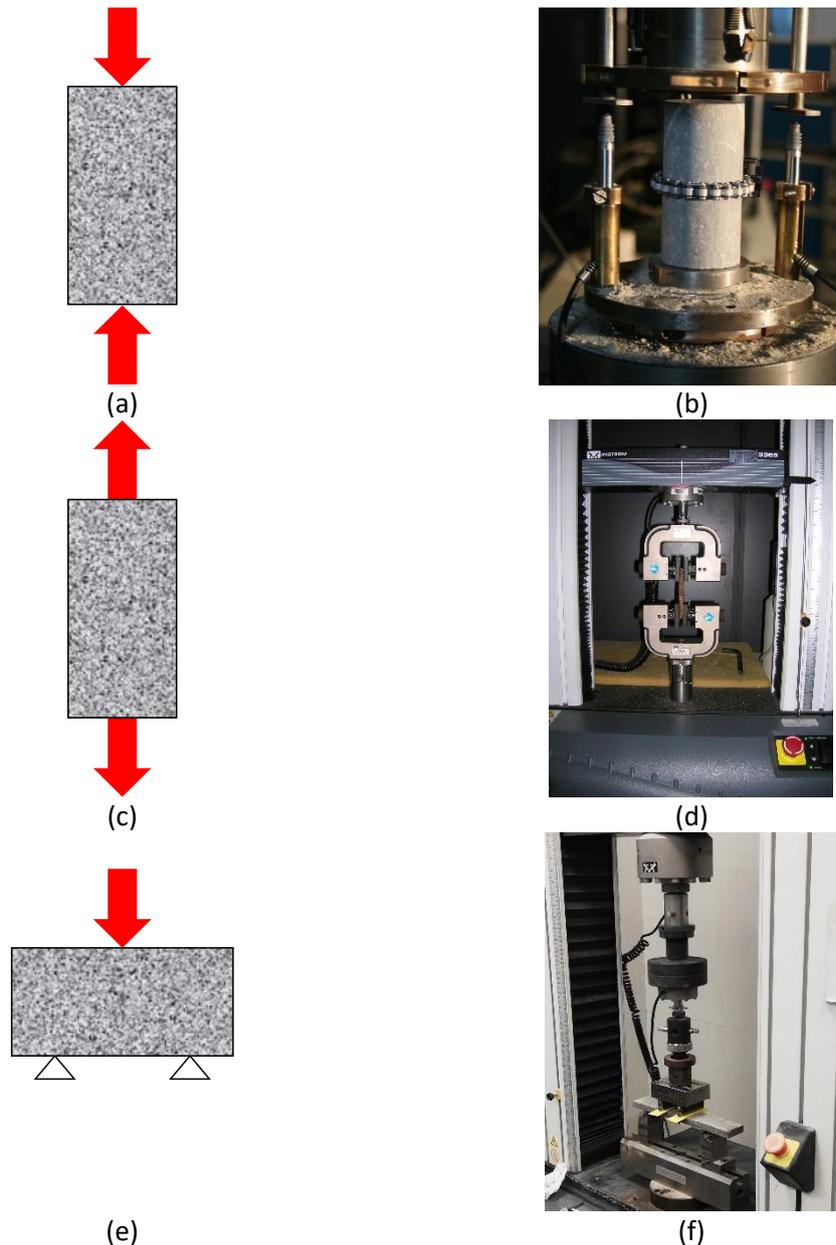


Figura 13. Ensayos de resistencias mecánicas: (a) esquema y (b) fotografía ("[Rock Fracturing in an Earth Science laboratory](#)" por [Auke Barnhoorn](#), licencia bajo [CC BY 3.0](#)) de ensayo de resistencia a compresión; (c) esquema y (d) fotografía ("[Tensile testing on a coir composite](#)", por [Kerina yin](#), licencia bajo [CC0 1.0](#)) de ensayo de resistencia a tracción; (e) esquema y (f) fotografía de ensayo de resistencia a flexión.

Además de los ensayos para determinar las distintas resistencias, otro ensayo de interés en esta tesis es el de profundidad de carbonatación. Las normativas UNE 112011:94 y UNE-EN 14630:2007 rigen este ensayo (Porto, 2005; *UNE-EN 14630:2007*, n.d.). Como se ha explicado en el daño por carbonatación del apartado "Daños en materiales cementicios", consiste en aplicar fenolftaleína en una superficie recién cortada para revelar el espesor carbonatado de la probeta cementicia (Figura 10).

2.3.2. Ensayos no destructivos

Los END se han convertido en una parte fundamental del control de calidad de estructuras. Al igual que los ED, también se rigen por unas normativas (Porto, 2005). Sirven para detectar defectos tales como delaminaciones, fisuras o grietas (Molero, 2009). Se pueden realizar durante la construcción y la vida útil de la estructura. De hecho, estos ensayos se están utilizando para monitorizar el estado de estructuras en tiempo real mediante una red de sensores instalados en ellas. A esta tecnología se le conoce como monitorización de la salud estructural o *Structural Health Monitoring (SHM)* (Gómez-Ullate, 2007; Masurkar et al., 2015; Su et al., 2009).

Entre las ventajas de los END se encuentran:

- Se pueden automatizar y realizar *in situ* (Molero, 2009).
- No degradan ni dañan las estructuras inspeccionadas y por tanto tienen la posibilidad de evaluar la totalidad del elemento.
- Se pueden complementar/correlacionar con los ED.

Por otro lado, sus desventajas son (Gupta, 2018):

- Se basan en medidas indirectas y por tanto la interpretación de los resultados es más compleja.
- Las operaciones se tienen que llevar a cabo por personal especializado y preferiblemente con experiencia.
- La inspección de estructuras cementicias irregulares y porosas es complicada.

Existen distintos tipos de END para todo tipo de materiales: métodos electromagnéticos, corrientes de inducción (*Eddy Current*), líquidos penetrantes, métodos ópticos, radiografía, ... (*What Is NDT?*, n.d.). No obstante, los END más utilizados en materiales cementicios son (IAEA, 2002; Jung et al., 2000):

- Inspección visual. Es el proceso esencial y probablemente más importante de los END (IAEA, 2002). Un ingeniero civil o de estructuras con experiencia puede ser capaz de establecer un análisis preliminar de la estructura y las posibles causas de daño existentes, proponiendo los END adecuados para inspeccionarla (Figura 14). Entre los desperfectos que se pueden localizar mediante inspección visual se encuentran: fisuras, cambio de color, pérdida de uniformidad, astillamiento (*spalling*), corrosión, orificios, ... (IAEA, 2002; *Inspecciones Visuales*, n.d.). El ingeniero que lleva a cabo el ensayo puede utilizar herramientas (lupa, binoculares, microscopio portátil, telescopio, ...) para facilitar la inspección.



Figura 14. Inspección visual ("[130802-N-PD772-074](#)" por [U.S. Pacific Fleet](#), licencia bajo [CC BY-NC 2.0](#)).

- Termografía infrarroja. Es una técnica que, mediante una cámara termográfica, detecta variaciones en la radiación infrarroja (temperatura) de la superficie de un material en tiempo real (IAEA, 2002)(Figura 15). El espectro de radiación infrarroja se puede dividir en infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta, media y larga e infrarrojo lejano (*Termografía - Basics*, n.d.). Existen dos tipos de termografía: activa (cuando se introduce energía adicional en forma de frío o calor al objeto de estudio) y pasiva (cuando no se introduce energía adicional) (*Infrared Thermography*, n.d.). Aparecen gradientes térmicos entre un material dañado y otro no dañado debido a la diferencia de temperatura entre ellos. Se pueden detectar delaminaciones o grietas internas con esta técnica (Aggelis et al., 2010).

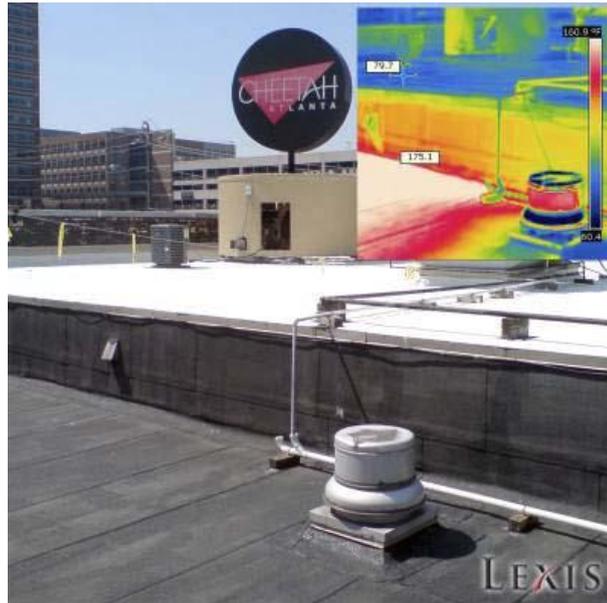


Figura 15. Ensayo por termografía infrarroja ("[Infrared Thermography of Modified Bitumen Roof](#)" por [Alexander Cua](#), licencia bajo [CC BY-SA 3.0](#)).

- Georradar o Ground Penetrating Radar (GPR). Es una END basada en la transmisión de ondas electromagnéticas (del orden de GHz) en el material a inspeccionar (Clayton et al., 2013). Si existen heterogeneidades, parte de esas ondas se transmite y parte se reflejan. La energía reflejada se detecta con una antena y se procesa en tiempo real. Conforme se desplaza esa antena, se representa en la pantalla del equipo una sección cruzada de la superficie de la estructura inspeccionada (Figura 16).



Figura 16. Ensayo por georradar ("[Using ground-penetrating radar](#)" por [The Official CTBTO Photostream](#), licencia bajo [CC BY 2.0](#)).

- Ensayo esclerométrico o índice de rebote. Se basa en la medida del rebote de una masa metálica que proyecta dicho martillo de Schmidt (Figura 17) contra la estructura de interés (IAEA, 2002; Porto, 2005).



Figura 17. Martillo de rebote Schmidt ("*Schmidt hammer*" por [Arjuncm3](#), licencia bajo [CC BY-SA 3.0](#)).

- Ondas mecánicas. Dentro de las ondas mecánicas, se puede hacer una subcategorización donde se puede distinguir entre ondas de baja frecuencia y ondas de alta frecuencia.
 - Técnicas de impacto-eco. Estas técnicas se basan en la excitación del material mediante un impacto (Figura 18) y recoger las vibraciones generadas debidos a los modos propios del material (Payá et al., 2019). Estas vibraciones vienen condicionadas por la señal de impacto, la morfología del material y las características de éste. Analizando dichas vibraciones se puede establecer una correlación con el estado del material. Dentro de estas técnicas podemos identificar, la técnica de espectroscopia acústica (*NonLinear Impact Acoustic Resonance (NIRAS)*), la cual es capaz de detectar cambios y comportamiento no lineal del material a partir de los desplazamientos de la frecuencia de resonancia de los modos de vibración conforme aumenta la energía de impacto (Genovés et al., 2015c). Destacar también la técnica *FANSIRAS*, la cual es una evolución de la técnica anterior y permite obtener resultados similares, pero mediante un único impacto (Carrión et al., 2018; Payá et al., 2019).

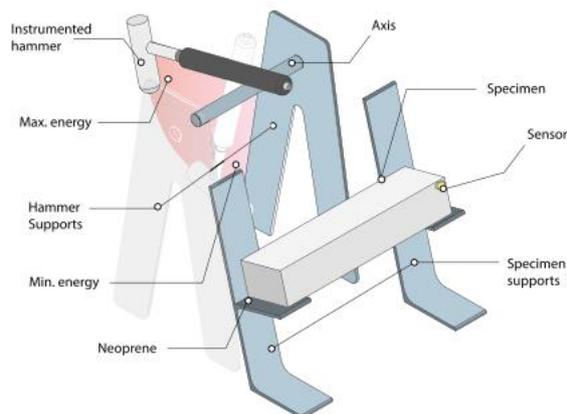


Figura 18. Ensayo de vibración en probeta de mortero¹³ (Carrión et al., 2018).

¹³ "Reprinted from Journal of Sound and Vibration, 432, A. Carrión, V. Genovés, G. Pérez, J. Payá, J. Gosálbez, Flipped Accumulative Non-Linear Single Impact Resonance Acoustic Spectroscopy (FANSIRAS): A novel feature extraction algorithm for global damage assessment, 454-469, (2018), with permission from Elsevier".

- Ultrasonidos. Consiste en inyectar ondas mecánicas (Figura 19) de frecuencias por encima de la banda audible para la inspección de materiales. Es útil para detectar, entre otros aspectos, la uniformidad (Gupta, 2018) y cambios microscópicos (Genovés et al., 2015) de materiales cementicios. Este último END es el que se ha trabajado en esta tesis.

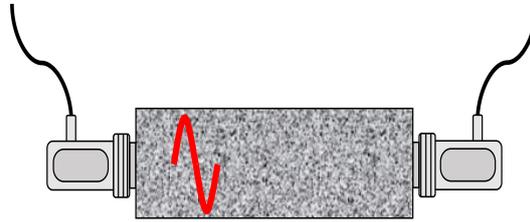


Figura 19. Ensayo por ultrasonidos.

- Tomografía. Consiste en una evolución de la técnica anterior mediante la radiación de un material desde diferentes ángulos (diversidad espacial) para reconstruir una sección de su interior (Figura 20) a partir de las variaciones de algún parámetro de las señales radiadas. Es útil para comprobar la existencia de anomalías internas (Gallardo et al., 2019; Lluveras, 2017). Aunque las técnicas tomográficas están muy consolidadas y son muy robustas para rayos X, para ondas ultrasónicas no ofrecen tanta precisión por dos motivos: por un lado, las ondas ultrasónicas tienen una longitud de onda mayor que los rayos X, y por otro y a diferencia de los rayos X, las ondas ultrasónicas se difractan, generando imágenes de peor resolución.

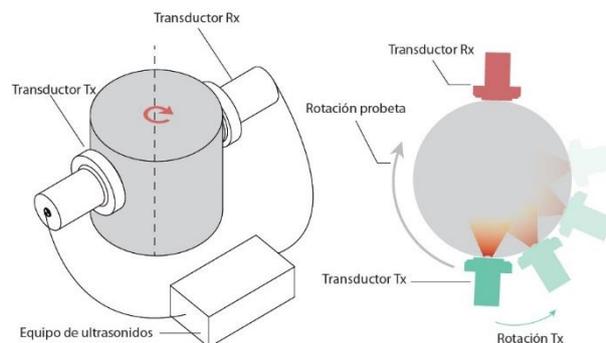


Figura 20. Ensayo por tomografía.

2.4. Conceptos básicos de ultrasonidos

Dentro de los diferentes tipos de END, esta tesis se centra en la aplicación de las señales ultrasónicas para la generación y captación de ondas guiadas para la caracterización de materiales. Es por ello que, en esta sección, se explicarán los conceptos básicos de las ondas ultrasónicas que permitirán una propuesta de los END con ondas guiadas.

2.4.1. Ecuaciones básicas de los ultrasonidos

El ultrasonido se define como un fenómeno acústico de frecuencia superior a 20 kHz, que es el límite superior del rango auditivo humano¹⁴ (V. A. González, 2011). Aunque se comporte de

¹⁴ El rango auditivo humano comprende aproximadamente desde 20 Hz a 20 kHz (Ahmad et al., 2018).

forma similar al sonido, su longitud de onda es mucho más pequeña, lo que implica que es sensible a pequeños defectos existentes dentro de un material (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010). Algunos animales los utilizan para comunicarse u orientarse, como los delfines o los murciélagos (V. A. González, 2011). Las perturbaciones mecánicas del ultrasonido provocan pequeñas alteraciones en las partículas del medio en su posición de reposo. Estas alteraciones producen un desplazamiento de las partículas que se transmiten a otras partes del medio. La interacción entre las partículas se puede representar con un modelo de muelles (Figura 21)(V. A. González, 2011; Krautkrämer et al., 1990; Laugier et al., 2011).

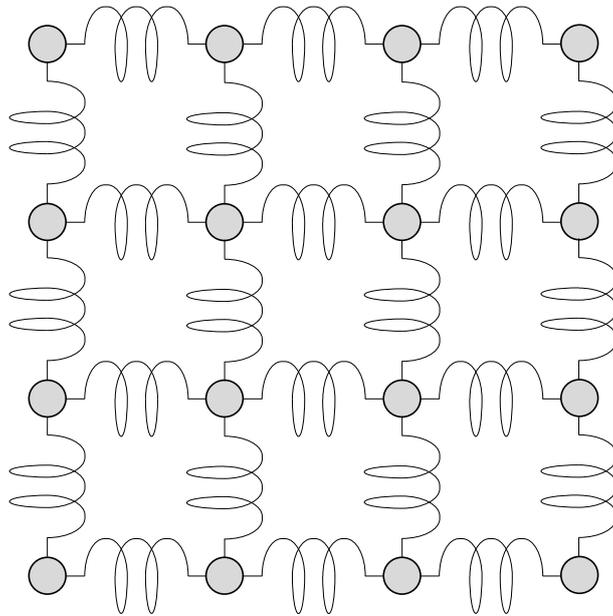


Figura 21. Modelo de un cuerpo elástico (V. A. González, 2011; Krautkrämer et al., 1990).

Por tanto, las ondas ultrasónicas se propagan por cualquier material mediante el desplazamiento de sus partículas (Gómez-Ullate, 2007). No obstante, estas partículas del material se oponen a desplazarse en presencia del ultrasonido, lo que se conoce como impedancia acústica Z (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010). Se calcula de la siguiente forma (Ecuación(3)) (Gosálbez et al., 2018; Laugier et al., 2011; “Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010):

$$Z = \frac{p}{v} = \rho c \quad (3)$$

Donde p es la presión acústica, v es la velocidad de la partícula¹⁵, ρ es la densidad del material y c la velocidad de propagación de la onda en el material. La energía transportada por una onda ultrasónica se caracteriza habitualmente por la intensidad acústica I y está relacionada con la presión acústica p de la siguiente forma (Ecuación (4))

$$I = \frac{p^2}{2Z} \quad (4)$$

¹⁵ Es la velocidad de movimiento de las partículas del medio debida a la onda ultrasónica. Estas partículas se encuentran en reposo si no se propaga ninguna onda (Laugier et al., 2011).

Otros parámetros que definen a una onda ultrasónica son:

- La amplitud A (m). Es el desplazamiento máximo que realiza una partícula desde su posición de equilibrio (Lliveras, 2017).
- El periodo T (s). Es el tiempo en que vuelve a repetirse la onda. Se puede determinar a partir de dos máximos o mínimos consecutivos.
- La frecuencia f (Hz). Es el número de oscilaciones de una partícula por segundo (V. A. González, 2011). Es la inversa del periodo T .

$$T = \frac{1}{f} \quad (5)$$

- La longitud de onda λ (m). Es la distancia entre 2 planos en los que las partículas se hallan en el mismo estado de movimiento (V. A. González, 2011; Lliveras, 2017). Se puede entender como el periodo espacial de la onda, es decir, la distancia en la que la onda vuelve a repetirse. Su ecuación es:

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT \quad (6)$$

- El número de onda k (rad/m). Indica el número de veces que una onda vibra en una unidad de distancia (Loaiza, 2011). Su ecuación es:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

2.4.2. Tipos de ondas

Si el ultrasonido se propaga en un medio infinito¹⁶, homogéneo e isotrópico (V. A. González, 2011), se producen en él dos tipos de ondas dependiendo de la dirección de propagación de éstas y de la dirección de desplazamiento de las partículas (Lliveras, 2017):

- Ondas P. También denominadas ondas longitudinales, primarias, compresionales, de compresión, de presión o de dilatación (V. A. González, 2011; Loaiza, 2011). Su dirección de propagación coincide con la dirección de desplazamiento de las partículas. Se propagan en cualquier medio (sólido, líquido y/o gaseoso) y son las ondas más rápidas (Lliveras, 2017; Vázquez et al., 2019b). En hormigón sano su rango de valores es de 3500 m/s a 4500 m/s (Y. H. Lee et al., 2016a; Popovics et al., 2010). De ahora en adelante, por simplicidad y brevedad, se hará referencia a las ondas longitudinales como **ondas P** y a su velocidad con la variable c_p ¹⁷.

¹⁶ Hay que tener en cuenta que en la práctica no existen materiales de tamaño infinito. Si la longitud de onda utilizada es pequeña en comparación a las dimensiones del material inspeccionado (largo, ancho y alto) el material se puede interpretar como infinito (Briers et al., 1994; Kundu, 2004; Moiseyenko et al., 2012; Rose, 2014; Sharma et al., 2014; Su et al., 2009; X. Xu et al., 2008) y sólo existirán ondas P y S en él, sin interacción entre ellas (V. A. González, 2011).

¹⁷ En la literatura, c_p se suele utilizar para referirse a la velocidad de fase en vez de a la velocidad de onda P (Rose, 2014; Su et al., 2009).

- Ondas S. También denominadas ondas transversales, secundarias, de cizalla, de cizalladura o de corte (V. A. González, 2011; Lluveras, 2017). Su dirección de propagación es perpendicular a la dirección de desplazamiento de las partículas. No se propagan ni en líquidos (agua) ni en gases (aire) (Bond, 2018; Molero, 2009; Vázquez et al., 2019b), únicamente en sólidos o fluidos muy viscosos (Chaston et al., 2008) y son más lentas que las ondas P. Por ejemplo, en materiales metálicos, la velocidad de la onda S suele ser alrededor de un 50 % de la velocidad de la onda P (V. A. González, 2011) y en el hormigón alrededor de un 60 % de la onda P (Nor et al., 2013). De ahora en adelante, por simplicidad y brevedad, se hará referencia a ellas como **ondas S** y a su velocidad con la variable c_S . A las ondas P y S se les conoce como ondas de volumen. En la Figura 22, se encuentra un diagrama del desplazamiento de las partículas para cada onda.

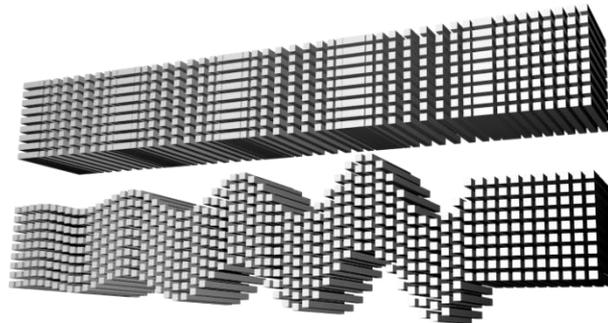


Figura 22. Desplazamiento de partículas de ondas P (superior) y ondas S (inferior) ("*S-p-waves*" por [Davezelenka](#), licencia bajo [CC BY-SA 4.0](#) / Girada 180° respecto a la original).

Otros tipos de onda que existen son las ondas guiadas, las cuales se forman a partir de la superposición de los desplazamientos de las partículas de las ondas P y S. Son capaces de propagarse a mayores distancias que las ondas P y S, además de requerir menos puntos de inspección. Se estudiarán en detalle en el siguiente capítulo.

2.4.3. Refracción de los ultrasonidos

2.4.3.1. Incidencia normal

Por otro lado, si el ultrasonido se propaga e incide de manera normal (sin ángulo) en una interfaz acústica (límite o frontera entre dos materiales de diferentes impedancias acústicas Z_1 y Z_2) parte de la energía se refleja y parte se transmite a través del límite ("Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers", 2010). La cantidad de energía reflejada y transmitida depende de la diferencia de impedancias acústicas (o velocidades de propagación) entre los 2 medios. A mayor diferencia, mayor energía reflejada y menor transmitida (Laugier et al., 2011). Para cuantificar la energía reflejada y transmitida, existen los coeficientes de reflexión y transmisión. En el caso de la presión acústica recibida (r) y transmitida (t), los coeficientes presentan las siguientes expresiones (Krautkrämer et al., 1990; Laugier et al., 2011; Rose, 2014):

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (8)$$

$$t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (9)$$

Y en el caso de intensidad acústica I , las ecuaciones de intensidad acústica recibida (R) y transmitida (T) son (Gosálbez et al., 2018; Laugier et al., 2011):

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (10)$$

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (11)$$

Para los coeficientes de intensidad, se cumple la ley de conservación de la energía (Laugier et al., 2011):

$$R + T = 1 \quad (12)$$

2.4.3.2. Incidencia oblicua. Ángulos críticos

En el caso de que el ultrasonido incida con un cierto ángulo en una interfaz acústica, se produce el fenómeno de refracción mediante la ley de Snell

$$c_1 \sin(\theta_2) = c_2 \sin(\theta_1) \quad (13)$$

donde c_1 y c_2 son las velocidades de propagación en el medio 1 y 2, respectivamente; y θ_1 y θ_2 son los ángulos de la ondas incidente y refractada (transmitida) o reflejada, respectivamente.

Las velocidades y ángulos involucrados en la ley de Snell hacen referencia tanto a la onda P como a la onda S. Pero, a diferencia de la incidencia normal, en incidencia oblicua se produce un fenómeno conocido como conversión de modos (Rose, 2014). Por ejemplo, una onda P de velocidad c_{1P} que se propaga en el medio 1 se puede convertir en una onda S de velocidad c_{2S} en el medio 2 o viceversa.

Dependiendo del tipo de los medios en la interfaz (sólido y fluido¹⁸), se plantean 4 posibles casos:

- Interfaz sólido-sólido. Debido a que en medios sólidos existen tanto ondas P como S (Rose, 2014), en el medio 1 aparecen dos ondas reflejadas (una onda P y una onda S) de velocidades c_{1P} y c_{1S} ; y en el medio 2 aparecen dos ondas refractadas (onda P y onda S) de velocidades c_{2P} y c_{2S} (Figura 20 (a) y (b)). La onda incidente puede ser una onda P o S (Piwakowski et al., 2004). De la ley de Snell se pueden obtener los dos ángulos de reflexión θ_{1P} y θ_{1S} y los dos ángulos de refracción θ_{2P} y θ_{2S} . Nótese que la onda incidente y la reflejada tienen el mismo ángulo si son del mismo tipo (si la onda incidente es una onda P, la onda P reflejada presenta el mismo ángulo)(Rose, 2014). A partir de la ley de Snell y asumiendo que la onda incidente es una onda P de velocidad c_{1P} se demuestra que:

$$c_{1P} \sin(\theta_{2P}) = c_{2P} \sin(\theta_{1P}) \quad (14)$$

¹⁸ Tanto el agua como el aire se pueden entender como fluidos no viscosos (Harb et al., 2015; Rose, 2014; Vázquez et al., 2019b).

Al ser el medio 2 igual que el medio 1, $c_{1P} = c_{2P}$, por lo que $\theta_{1P} = \theta_{2P}$.

Además, el ángulo de la onda P reflejada/refractada, θ_{1P}/θ_{2P} , siempre será mayor que el ángulo de la onda S reflejada/refractada, θ_{1S}/θ_{2S} . De nuevo, a partir de la ley de Snell y asumiendo onda incidente de cualquier tipo (P o S) de velocidad c_1 se obtienen 2 ecuaciones, una para el ángulo de onda P refractada θ_{2P} y otra por el ángulo de onda S refractada θ_{2S} :

$$c_1 \sin(\theta_{2P}) = c_{2P} \sin(\theta_1) \quad (15)$$

$$c_1 \sin(\theta_{2S}) = c_{2S} \sin(\theta_1) \quad (16)$$

Despejando se obtienen las expresiones para los ángulos θ_{2P} y θ_{2S} :

$$\theta_{2P} = \sin^{-1} \left(\frac{c_{2P} \sin(\theta_1)}{c_1} \right) \quad (17)$$

$$\theta_{2S} = \sin^{-1} \left(\frac{c_{2S} \sin(\theta_1)}{c_1} \right) \quad (18)$$

Al ser siempre $c_{2P} > c_{2S} \rightarrow \theta_{2P} > \theta_{2S}$.

En este caso se puede observar el fenómeno de conversión de modos: si la onda incidente del medio 1 de velocidad c_1 y ángulo θ_1 es una onda P, según la ecuación (18) es posible obtener una onda S en el medio 2 de velocidad c_{2S} y ángulo θ_{2S} . Dicho de otro modo, la onda P del medio 1 se puede convertir en una onda S en el medio 2. Por el contrario, si la onda incidente del medio 1 es una onda S, a partir de la ecuación (17) se puede convertir en una onda P en el medio 2.

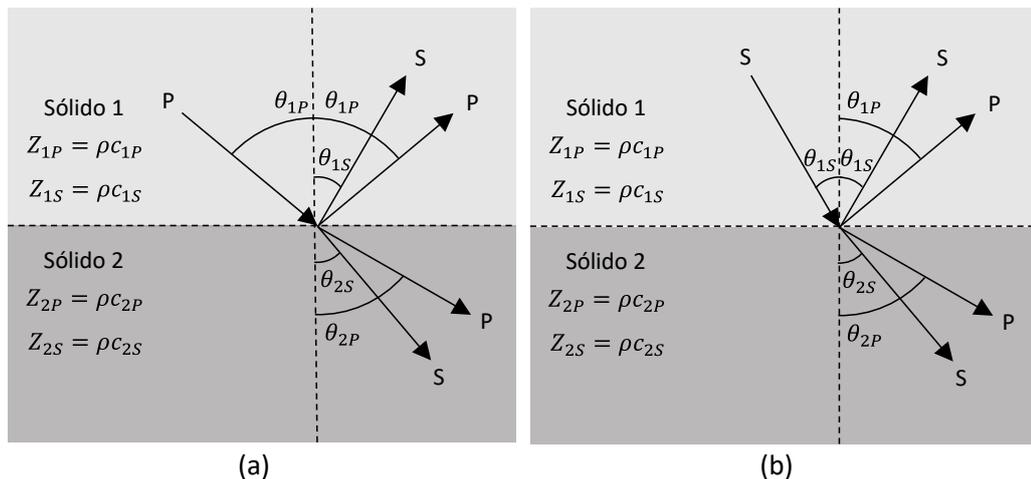


Figura 23. Interfaz sólido-sólido: (a) Onda incidente P; (b) Onda incidente S.

- **Interfaz fluido-sólido.** Al ser el medio 1 un fluido no viscoso¹⁹ (agua, aire) que no permite la propagación de ondas S, la onda incidente y reflejada sólo pueden ser ondas P (Figura 24).

¹⁹ Si fuera un fluido viscoso sería el mismo caso que la interfaz sólido-sólido, dado que en un fluido viscoso pueden propagarse tanto onda P como onda S.

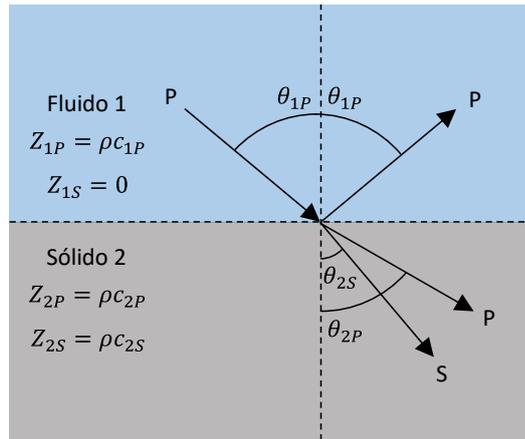


Figura 24. Interfaz fluido-sólido.

- Interfaz sólido-fluido. Al contrario que en el caso anterior, existe onda P y S en el medio sólido y únicamente onda P en el medio fluido (Figura 25 (a) y (b)). Este caso es especialmente complicado porque puede no existir onda refractada. Asumiendo una onda incidente de cualquier tipo (P o S) de velocidad c_1 , la expresión del ángulo incidente θ_1 es la siguiente:

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{c_1 \sin \theta_{2P}}{c_{2P}} \right) \quad (19)$$

Para que haya onda refractada, se debe garantizar que $c_1 < c_{2P}$ (Viktorov, 1967). Esta condición es más factible de cumplir si se utiliza una onda incidente S (Piwakowski et al., 2004).

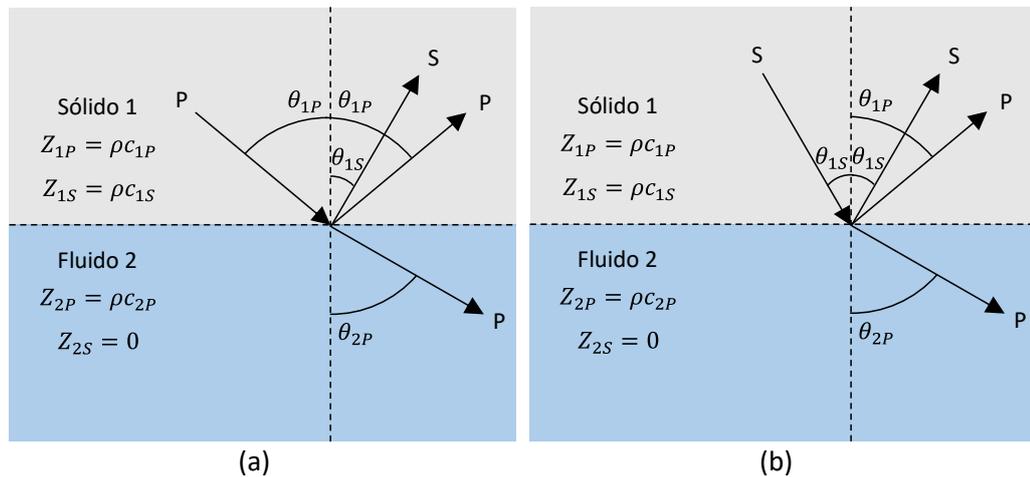


Figura 25. Interfaz sólido-fluido: (a) Onda P incidente; (b) Onda S incidente.

- Interfaz fluido-fluido. En este caso, sólo existe onda P en ambos medios (Figura 26).

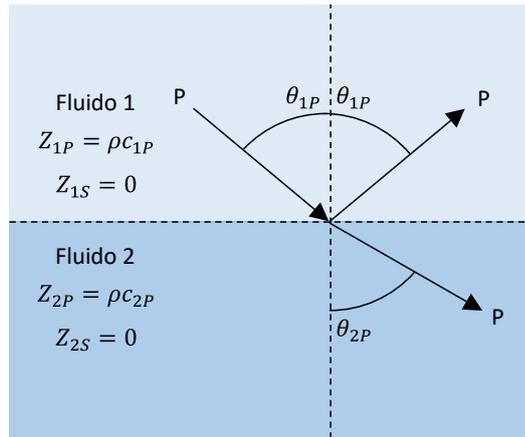


Figura 26. Interfaz fluido-fluido.

En estos cuatro escenarios, mediante el ángulo de incidencia se pueden controlar las ondas refractadas al segundo medio. Tomando como referencia el caso de la interfaz sólido-sólido, si el ángulo de la onda P refractada al segundo medio θ_{2P} es un ángulo de 90° , la expresión del ángulo incidente (de onda P o S) en el medio 1 queda de la siguiente forma:

$$\theta_{cr1} = \sin^{-1}\left(\frac{c_1}{c_{2P}}\right) \quad (20)$$

A este ángulo θ_{cr1} se le conoce como primer ángulo crítico. Al incidir con θ_{cr1} , no hay onda P refractada en el medio 2, ya que ésta se convierte en una onda que se propaga por la interfaz entre ambos medios. Únicamente se transmite onda S en el medio 2 (Figura 27). De nuevo, se tiene que cumplir la condición $c_1 < c_{2P}$.

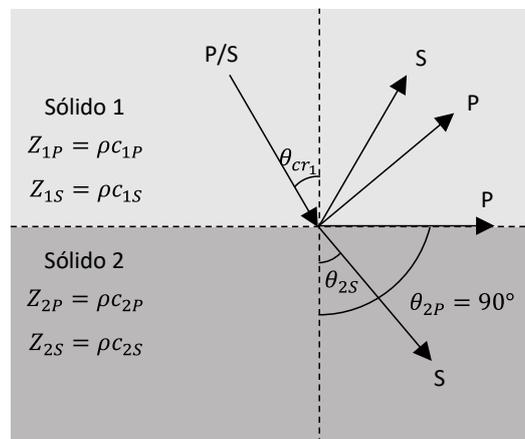


Figura 27. Primer ángulo crítico. No se han incluido los ángulos reflejados por simplicidad.

Si el ángulo incidente supera al primer ángulo crítico θ_{cr1} , la onda P que se propagaba por la interfaz acaba reflejándose totalmente. En el caso de que se siga aumentando el ángulo de incidencia y el ángulo de la onda S refractada θ_{2S} llegue a 90° , se obtiene el segundo ángulo crítico θ_{cr2} ²⁰, cuya expresión es:

²⁰ Si el segundo medio es un fluido (interfaz sólido-fluido o fluido-fluido), no habrá segundo ángulo crítico porque no se pueden propagar las ondas S.

$$\theta_{cr2} = \sin^{-1}\left(\frac{c_1}{c_{2S}}\right) \quad (21)$$

En este caso, no existe ni onda P ni onda S refractada en el medio 2, únicamente la onda S que se refractaba anteriormente se convierte en una onda de interfaz (Figura 28). Si se supera este segundo ángulo crítico θ_{cr2} , ambas ondas P y S se reflejarán totalmente²¹ (V. A. González, 2011; Krautkrämer et al., 1990; Rose, 2014).

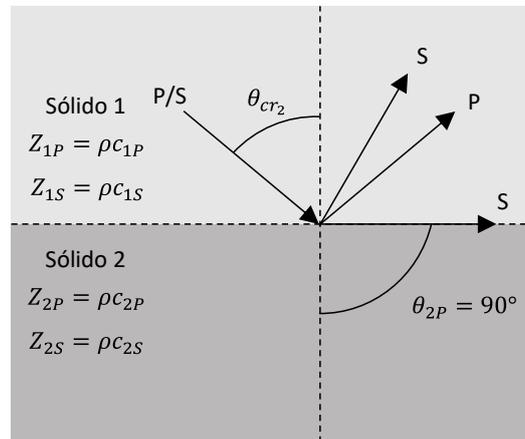


Figura 28. Segundo ángulo crítico. No se han incluido los ángulos reflejados por simplicidad.

2.4.4. Atenuación de los ultrasonidos

No obstante, las reflexiones producidas en interfaces acústicas no es el único mecanismo que provoca que la amplitud de la señal ultrasónica se reduzca, o lo que es lo mismo, que se atenúe.

El ultrasonido se atenúa al propagarse por un medio. En general, la atenuación del ultrasonido (Laugier et al., 2011) se caracteriza por un decrecimiento exponencial de la presión p y/o de la intensidad acústica I con respecto a la distancia recorrida d (Krautkrämer et al., 1990; Y. Zhang, 2013):

$$p(d) = p_0 e^{-\alpha d} \quad (22)$$

$$I(d) = I_0 e^{-2\alpha d} \quad (23)$$

Donde p_0 e I_0 son la presión y la intensidad respectivamente en $d = 0$. Por otro lado, α (cm^{-1}) es el coeficiente de atenuación dependiente de la frecuencia. Conforme más alta sea la frecuencia, mayor será la atenuación.

Sin asumir reflexiones, existen tres causas de atenuación (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010) :

- La difracción es un fenómeno en el cual cualquier punto de un frente de ondas se puede representar como un nuevo foco de ondas secundarias (Lliveras, 2017).
- La absorción se define como la conversión de la energía mecánica de la onda en otros tipos de energía, habitualmente en forma de calor (Loaiza, 2011). La onda ultrasónica pierde energía y este calor se deposita en el medio. Algunos de los mecanismos

²¹ Existe un tercer ángulo crítico que se explicará en el siguiente capítulo.

responsables del fenómeno de absorción son efectos de conducción térmica, efectos químicos o no linealidades (Laugier et al., 2011).

- La dispersión o scattering se produce de la interacción entre una onda ultrasónica y los límites de las heterogeneidades si las propiedades físicas de dichas heterogeneidades (densidad, elasticidad) son diferentes a las del medio que las rodea. El resultado es una dispersión de la energía de la onda en todas las direcciones (Figura 29). Si la longitud de onda es menor que el tamaño de las heterogeneidades, parte de la energía se reflejará y se transmitirá (Laugier et al., 2011). Por el contrario, si la longitud de onda es igual o mayor que las heterogeneidades, la onda consigue rodearlas (Lliveras, 2017). Debido a este fenómeno, si se trabaja con longitudes de onda grandes (bajas frecuencias) en hormigón se comporta como un material homogéneo (Jung et al., 2001; J. H. Lee et al., 1998; Molero, 2009). Otra opción sería investigar con mortero en vez de hormigón, al ser los áridos (heterogeneidades) del mortero menores que los del hormigón (Piwakowski et al., 2004).

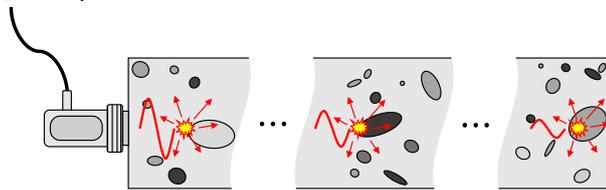


Figura 29. Fenómeno de dispersión o scattering (Lai et al., 2013; Molero, 2009).

2.4.5. Equipamiento elemental para la inspección por ultrasonidos

Una vez presentada la base teórica acerca del ultrasonido, es el momento de abordar los END por ultrasonidos en materiales cementicios.

Entre las ventajas de los END por ultrasonidos, se encuentran las siguientes (Bond, 2018; Molero, 2009):

- Permiten la detección de defectos de muy reducido tamaño gracias a su alta sensibilidad.
- Únicamente es necesaria una superficie accesible para llevarlos a cabo.
- No entrañan peligrosidad ni para el operario ni para las personas de alrededor.

Algunos de los inconvenientes de la inspección ultrasónica son (Ahmad et al., 2018):

- Se requiere amplio conocimiento técnico para el desarrollo de los procedimientos de inspección.
- Las partes rugosas, de forma irregular, de reducido tamaño, finas o heterogéneas son difíciles de inspeccionar.
- La necesidad de estándares de referencia para la mayoría de las aplicaciones, tanto para la calibración de equipamiento como para la caracterización de defectos.

Las frecuencias con las que se trabajan habitualmente en los END por ultrasonidos comprenden desde los 40 kHz hasta los 500 MHz (Rose, 2014). Por ejemplo, el ultrasonido de baja frecuencia (alrededor de 50 kHz) se suele utilizar para caracterizar defectos grandes a altas profundidades dentro de la estructura cementicia (Piwakowski et al., 2004).

El equipamiento básico en los sistemas de inspección ultrasónica para investigación consta de: generador de señal, amplificadores, osciloscopio, ordenador portátil, acoplante y transductores

(Bond, 2018; Y. H. Lee et al., 2016a; Molero, 2009). Estos últimos son los dispositivos clave en los END por ultrasonidos.

2.4.6. Transductores

Los transductores ultrasónicos son dispositivos que convierten energía eléctrica en energía mecánica (ultrasonidos) y viceversa mediante el efecto piezoeléctrico. Los más habituales son los de contacto. Existen distintas configuraciones de medida a la hora de situar los transductores (Figura 30). Se puede utilizar un único transductor que emita y reciba señales, lo que se conoce como pulso-eco (Gómez-Ullate, 2007; Kim et al., 2002; Lluveras, 2017). El método de pulso-eco es un tipo de inspección que requiere desplazar el transductor en cuestión y realizar un escaneo extenso (manual o mecánico) de toda la superficie de la estructura, una tarea muy costosa en términos de tiempo. Una de sus ventajas es que sólo necesita acceso a una de las caras de la estructura (Molero, 2009) además de ser capaz de ubicar el posible defecto.

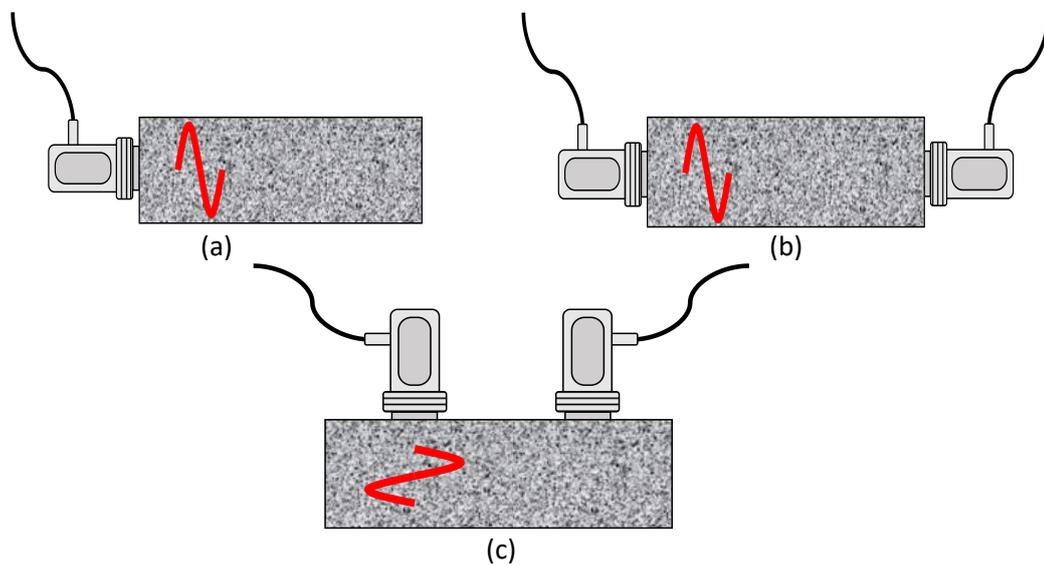


Figura 30. Configuraciones de medida: (a) Pulso-eco; (b) Through-transmission; (c) Pitch-catch.

Si se usan dos transductores, uno actúa como emisor y otro como receptor. Si dichos transductores están enfrentados y entre ellos se encuentra el material inspeccionado, esta configuración se conoce como *through-transmission* (Genovés et al., 2016; V. A. González, 2011). En este caso sí que es necesario tener acceso a ambas caras de la estructura. La configuración *through-transmission* se conoce como una técnica de transmisión directa (Birgül, 2009; Karaiskos et al., 2015). Por otro lado, si los transductores no se encuentran enfrentados (se encuentran sobre la estructura) se denomina configuración *pitch-catch* (Ambrozinski et al., 2014; Delrue et al., 2010). En este caso también presenta la misma ventaja que pulso-eco: es suficiente con tener acceso a una de las caras de la estructura. La configuración *pitch-catch* se conoce como una técnica de transmisión indirecta o transmisión superficial (Birgül, 2009; Karaiskos et al., 2015) En estos casos, la ubicación del defecto no es tan directa como en la configuración pulso/eco.

Los elementos principales (Figura 33) que componen un transductor de contacto son (Rubio et al., 2010; Schmerr, 1998; Peña, 2014):

- **Elemento activo o cristal piezoeléctrico.** Es un material piezoeléctrico o ferroeléctrico. Está conectado eléctricamente al conector mediante los electrodos que lo cubren por ambas caras y el sintonizador eléctrico. Se excita con energía eléctrica de formas de onda como señales continuas o de pocos ciclos (estas últimas conocidas como señales *burst*²², Figura 31) y produce energía ultrasónica mediante vibraciones hacia delante y hacia atrás. Dependiendo del tipo de movimiento del cristal y de cómo se haya cortado, se pueden clasificar en transductores de onda P y/o de onda S²³. Estos transductores son de incidencia normal.

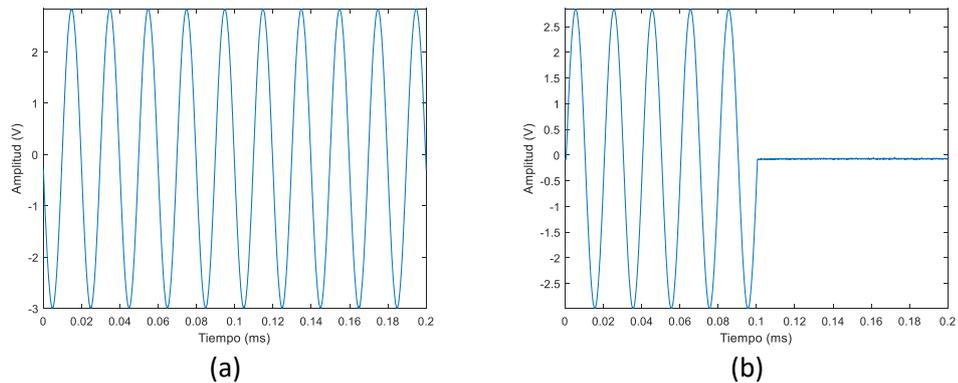


Figura 31. Ejemplos de señales sinusoidales: (a) Señal sinusoidal continua; (b) Señal sinusoidal burst de 5 ciclos.

- **Conector.** Puede ser tipo BNC, LEMO o Microdot (Schmerr, 1998; “Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010). Un ejemplo de cada conector se encuentra en la Figura 32. En el caso de transductores de onda S y una configuración *through-transmission*, es importante que los conectores de ambos transductores estén correctamente alineados entre ellos (polarizados) para obtener la mayor componente de onda S en recepción (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010; Proceq, 2013).

²² Las señales *burst* consisten básicamente en la multiplicación entre un pulso rectangular y una señal continua (por ejemplo, sinusoidal o cuadrada).

²³ Se pueden transmitir ondas S en el material utilizados transductores de onda P de incidencia normal inclinados un ángulo concreto mediante cuñas específicas (V. A. González, 2011; “Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010). Además, una onda S se puede generar por los bordes un transductor de onda P (Theobald et al., 2008).

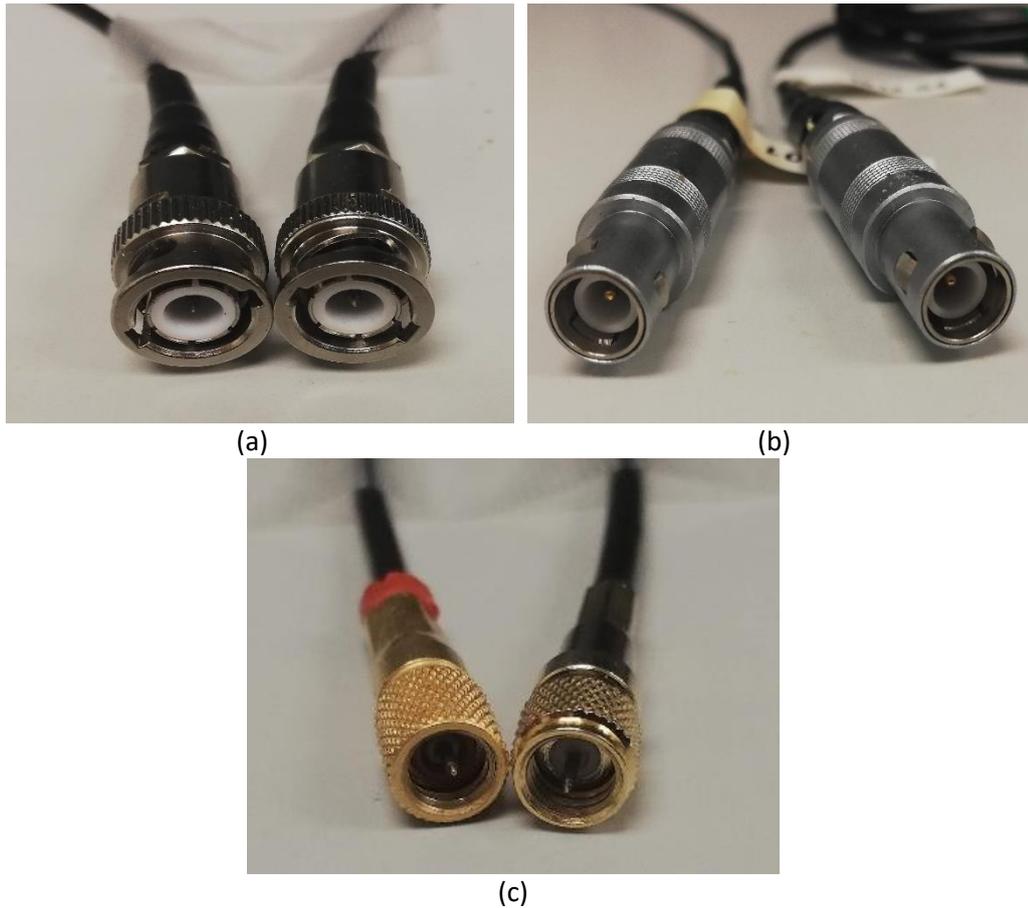


Figura 32. Ejemplos de conectores: (a) Conector BNC; (b) Conector Lemo; (c) Conector Microdot 10-32.

- Contramasa o backing. Es un elemento atenuante que se coloca en la parte posterior del elemento activo y tiene como fin absorber la energía mecánica que emite el cristal por detrás y detener su oscilación (sólo se utiliza la emisión que produce el cristal por delante). Si el material de la contramasa tiene una impedancia acústica similar al material del cristal, se transmitirá mayor energía hacia la contramasa, lo que se traduce en una reducción de amplitud de la señal ultrasónica emitida y un aumento del ancho de banda (menor duración de la señal ultrasónica). Por el contrario, si las impedancias son distintas, se reflejará más energía hacia adelante, lo que se traduce en una señal ultrasónica de mayor amplitud y un menor ancho de banda (mayor duración de la señal ultrasónica). La contramasa también influye en la forma del ultrasonido (Schmerr, 1998).
- Capa de acoplamiento. Se encarga de proteger al frágil elemento activo y de garantizar una mayor transferencia de energía entre el elemento activo y el medio de acoplamiento. Esto último se consigue utilizando un material para la capa de una impedancia acústica cercana al medio de acoplamiento. Dos ejemplos conocidos son los transductores de inmersión si el medio es agua o los transductores de acoplamiento por aire si el medio es aire (Gómez, 2004; Schmerr, 1998; “Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010).

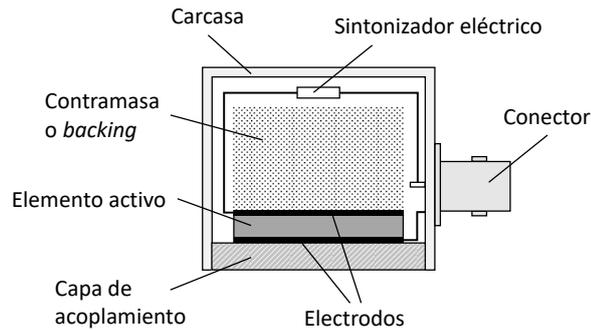


Figura 33. Esquema de un transductor de contacto (Rubio et al., 2010; Schmerr, 1998).

Algunos los parámetros principales de los transductores son:

- **Campo cercano.** El campo de sonido de un transductor se divide en dos zonas: la zona de campo cercano o zona de Fresnel y la zona de campo lejano o zona de Fraunhofer (Gosálbez et al., 2018; Molero, 2009). La distancia de campo cercano de un transductor se define como el punto del eje del transductor que separa una zona de grandes oscilaciones (en la cual aparecen varios máximos locales) de una región de disminución suave de la presión del ultrasonido (Rose, 2014). Este punto es donde se encuentra el último máximo de la zona de grandes oscilaciones. En la zona de campo cercano es complicado determinar la presencia de defectos (Alleyne, 1991). La ecuación que rige la distancia del campo cercano N es (Gosálbez et al., 2018; Rose, 2014; Vázquez et al., 2019b):

$$N = \frac{D^2 f}{4c} = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (24)$$

Siendo D el diámetro del transductor. El campo lejano es la zona que existe a partir de la distancia de campo cercano N donde la presión del campo sonoro tiende gradualmente a cero. En esta zona, el frente de onda se puede considerar como una onda plana (Laugier et al., 2011). Debido a las variaciones existentes en la zona de campo cercano, no se recomienda trabajar en dicha zona. La representación gráfica del campo cercano y lejano se encuentra en la Figura 34.

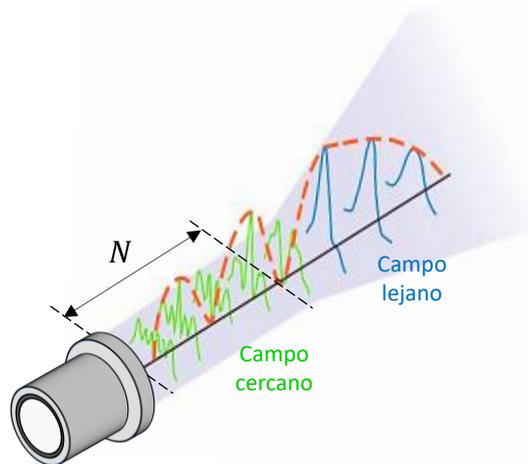


Figura 34. Esquema de campo cercano y campo lejano ("Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers", 2010).

- **Distancia focal.** Es la longitud entre la cara del transductor y el punto de máxima amplitud del campo de sonido (Kundu, 2012). El valor de la distancia focal puede

coincidir con el valor de la distancia de campo cercano (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010).

- Ángulo de apertura de haz. Todos los haces ultrasónicos divergen (Figura 35) o, dicho de otro modo, presentan una apertura (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010).

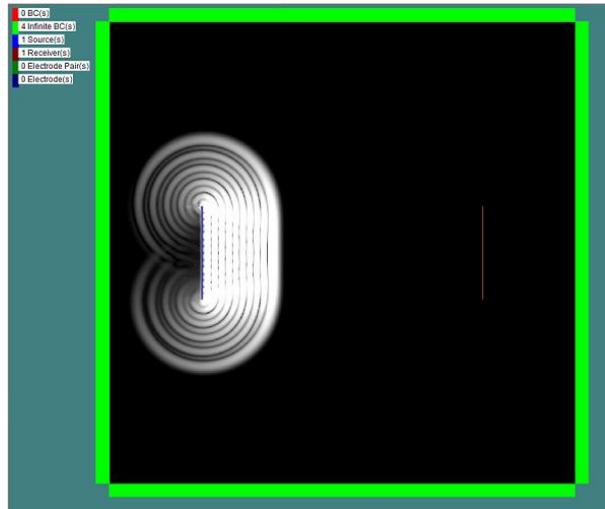


Figura 35. Difracción de haz en una simulación del software WAVE2000 (WAVE2000, n.d.).

El ángulo de apertura de haz (Molero, 2009) o el ángulo de divergencia del haz (Rose, 2014) se obtiene mediante la ecuación (Santos et al., 2000; R. Zhang et al., 2001):

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{1.2\lambda}{D} \right) \quad (25)$$

A medida que disminuye la frecuencia, la divergencia del haz aumenta (Ghosh et al., 1998a), por lo que es conveniente aplicar la corrección de difracción (Molero, 2009). La ley de Snell no es exacta en esas condiciones (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010). Otras formas de reducir esta divergencia de haz es utilizar transductores de altas frecuencias y/o transductores de mayor diámetro (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010; Rose, 2014)

2.4.7. Acoplante

Para asegurar una transmisión eficiente de energía mecánica entre el transductor y el material inspeccionado se requiere el uso de un elemento acoplante (Hayashi et al., 2003; Piwakowski et al., 2004; Vázquez et al., 2019b). El objetivo de utilizar este elemento o sustancia es eliminar el aire existente entre la cara del transductor y la superficie del material a inspeccionar (Boyd et al., 2005; Theobald et al., 2008). Esto se debe a la gran diferencia entre la impedancia acústica del aire y la mayoría de materiales sólidos (Castaings et al., 1996; Gómez, 2004) que provoca que la mayor parte de la energía emitida se refleje (V. A. González, 2011). Se recomienda una fina capa de acoplante de buena impedancia acústica (V. A. González, 2011), inferior a un cuarto de la longitud de onda empleada (Alleyne et al., 1992b; Molero, 2009), para que no se produzcan interferencias como reflexiones múltiples (Krautkrämer et al., 1990). Para acoplar transductores de contacto de onda P se suele utilizar gel de ultrasonidos de base acuosa, aceite o vaselina (Molero, 2009). La silicona es interesante respecto al gel de ultrasonidos de base acuosa porque

no se seca con el tiempo (Theobald et al., 2008) aunque su rendimiento puede reducirse a altas frecuencias (Ono, 2017). También se puede utilizar acoplamiento seco con plastilina (Molero, 2009), *film* de plástico o mediante transductores específicos (Castaings et al., 1996; Prego, 2010). El problema es que su eficiencia es inferior respecto a los acoplantes anteriores (Castaings et al., 1996).

Sin embargo, en el caso de los transductores de contacto de onda S se necesita un acoplante de alta viscosidad, debido a que las ondas S sólo se pueden propagar en sólidos o fluidos no viscosos (Chaston et al., 2008; Lind, 2008; Theobald et al., 2008). Existen acoplantes comerciales específicos (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010), pero también se utilizan pegamentos (Chaston et al., 2008; Theobald et al., 2008), resina *epoxy* (Krautkrämer et al., 1990; Ono, 2017) e incluso miel, una alternativa más económica (Lind, 2008; Ono, 2017; Piwakowski et al., 2004; Ramanathan, 2005). Es recomendable garantizar un acoplamiento rígido y constante mediante una sujeción física (Birgül, 2009; Gosálbez et al., 2018; Krautkrämer et al., 1990; Ono, 2017). Sin embargo, pese a utilizar transductores específicos de onda S y un gel altamente viscoso, existe todavía onda P en las señales recibidas, aunque de menor amplitud que la onda S. Este hecho se puede aprovechar para medir tanto la velocidad de la onda S como la de la onda P con unos transductores de onda S (Proceq, 2013). Sin embargo, las señales recibidas son sensibles al espesor de la capa de acoplante utilizado y la presión ejercida entre el transductor y el material, lo cual hay que tener en cuenta para garantizar la repetibilidad entre medidas (Goueygou et al., 2008; Molero, 2009; Vázquez et al., 2019b). Las alternativas que facilitan un acoplamiento constante y la implantación de un sistema de barrido automático son el acoplamiento por inmersión y por aire. No obstante, el primero dificulta la inspección de grandes estructuras y el último sufre de alta atenuación debido a las interfaces con el aire (Molero, 2009). Se detallarán en profundidad estas dos técnicas en el siguiente capítulo.

2.4.8. Parámetros ultrasónicos

La medición con transductores de contacto en incidencia normal mediante configuración *through-transmission* es el procedimiento más habitual y simple para la medición en materiales cementicios (Genovés et al., 2015a; Jung et al., 2000). La onda ultrasónica emitida por el transmisor se propaga a través del material de manera que parte de ella se refleja en las heterogeneidades (dispersión o *scattering*) y parte de ella se transmite y consigue llegar al receptor. Los poros y áridos son el principal motivo de retardo de la onda transmitida (Arizzi et al., 2013). La información que se obtiene a partir de la onda recibida es el tiempo de propagación del pulso transmitido y la diferencia entre la energía recibida frente a la transmitida (Molero, 2009). La interpretación de las señales recibidas es complicada debida a los aspectos microestructurales que afectan a la propagación de la onda (Arizzi et al., 2013). Los dos parámetros lineales habituales de los END por ultrasonidos son:

- La atenuación: es un parámetro bastante sensible a las heterogeneidades, capaz de distinguir microestructuras, permeabilidad o porosidad de materiales cementicios (Carrión et al., 2017; Genovés et al., 2017c; In et al., 2009) tanto en estado fresco como endurecido. La ecuación para calcular experimentalmente la atenuación de un material $\alpha_{mat}(t)$ [dB/cm] es (26):

$$\alpha_{mat}(t) [dB/cm] = \frac{E_{TX} - E_{RX}(t) + \alpha_{equip}}{d} \quad (26)$$

Siendo $E_{TX} [dB]$ la energía transmitida, $E_{RX} [dB]$ la energía recibida, α_{equip} la atenuación del equipamiento (cables, transductores, amplificadores, etc.) y d la longitud del material (Genovés et al., 2015b). La máxima longitud del material d que se puede alcanzar depende de varios factores: atenuación en el material, la potencia del transmisor, la calidad del receptor, la amplificación y la uniformidad de la estructura (Cawley et al., 1996).

- La velocidad del pulso ultrasónico o *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*: suele hacer referencia a la velocidad de la onda P (Genovés et al., 2017b; Popovics et al., 2010) al ser la onda más rápida y por tanto la más sencilla de detectar (F. W. Lee et al., 2016). La velocidad de la onda P c_p se puede calcular experimentalmente mediante la ecuación (27) (Carrión et al., 2017)

$$c_p = \frac{d}{t_p - t_{cal}} \quad (27)$$

Siendo t_p el tiempo de vuelo de la onda P y t_{cal} el tiempo de calibración obtenido al enfrentar los transductores (Liu et al., 2019). El tiempo de vuelo de la onda P t_p se puede estimar automáticamente a partir de un algoritmo que detecte cuando la señal recibida supera un umbral (calculado a partir de un porcentaje del nivel de ruido) (Genovés et al., 2015b; J. H. Lee et al., 1998; Zhu et al., 2011a), a partir del máximo de la correlación cruzada entre una señal dada y la primera señal recibida (Goueygou et al., 2008; Goueygou et al., 2009) y/o a partir de la transformada de Hilbert, con la que se obtiene la envolvente de la señal (Birgül, 2009; Lu et al., 2016). El tiempo de calibración obtenido al enfrentar los transductores se puede calcular también con las citadas técnicas.

La medición del tiempo de llegada de la onda S, t_s , suele ser complicada debido a que, como ya se ha apuntado anteriormente en el apartado “Acoplante”, se detecta inicialmente una onda P de menor amplitud (en comparación a la onda S) que afecta el cálculo de t_s (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010; Payan et al., 2007) pese a utilizar los medios adecuados (transductores específicos de onda S y gel altamente viscoso (Krüger et al., 2013)). Sin embargo, es posible separar temporalmente la onda P y la onda S si existe una gran distancia entre el transmisor y el receptor (Grosse et al., 2008) y si se excita con onda sinusoidal *burst* de pocos ciclos en vez de con onda sinusoidal continua (Molero, 2009; Rose, 2014). Algunas de las técnicas citadas para el cálculo del tiempo de vuelo de la onda t_p también se utilizan para calcular t_s , como la transformada Hilbert (Birgül, 2009) o la correlación cruzada (Chan, 2010; Ogino et al., 2015). No obstante, el algoritmo de detección automático de t_p por umbral no es recomendable para estimar t_s (Zhu et al., 2011a). Otras dos técnicas utilizadas para estimar el tiempo de vuelo de la onda S son el método de inicio-a-inicio o *start-to-start method* y el método pico-a-pico o *peak-to-peak method*. En ambos métodos, la señal transmitida es una señal sinusoidal *burst* de un único ciclo (Chan, 2010; Ogino et al., 2015; Sas et al., 2016). En el método de inicio-a-inicio, t_s se obtiene como la diferencia entre el tiempo de inicio de la señal transmitida respecto al tiempo de inicio de la onda S recibida. En cuanto al método de pico-a-pico, t_s se obtiene como la diferencia entre el tiempo donde se produce el pico de la señal transmitida respecto al tiempo donde se produce el pico de la onda S recibida. Un ejemplo de ambos métodos se ha representado en la Figura 36.

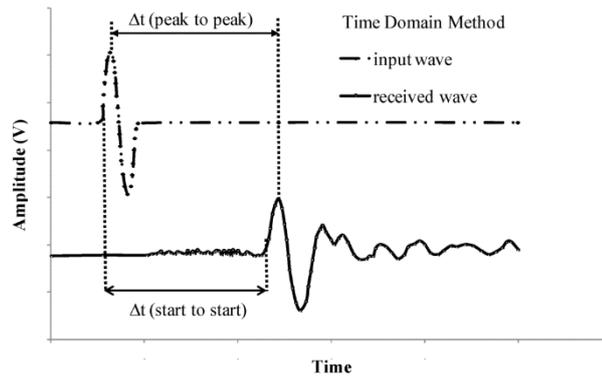


Figura 36. Métodos start-to-start y peak-to-peak para obtener el tiempo de vuelo de la onda S (“Figure 5”, por [Wojciech Sas](#), Katarzyna Gabryś, Emil Soból y Alojzy Szymański, licencia bajo [CC BY 4.0](#)) (Sas et al., 2016).

Una vez obtenido t_S con alguno de los métodos mencionados, la ecuación para calcular la velocidad de la onda S, c_S , es idéntica a la ecuación (27) (Chan, 2010; Sas et al., 2016):

$$c_S = \frac{d}{t_S - t_{cal}} \quad (28)$$

2.4.9. END por ultrasonidos en materiales

A partir de los parámetros ultrasónicos descritos anteriormente, las velocidades de las ondas P y S permiten, entre otras posibilidades, determinar las constantes elásticas (Genovés et al., 2015b) y caracterizar las propiedades microestructurales de los materiales cementicios (porosidad o micro-fisuras) (Arizzi et al., 2013). La definición de la densidad y las constantes elásticas en función de las velocidades de las ondas P y S son:

- Densidad ρ . Es la medida de lo compacto que es un material. A mayor densidad, más unidas están las partículas dentro de la estructura. Su ecuación es:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (29)$$

Donde m y V son la masa y el volumen del material, respectivamente.

- Coefficiente de Poisson ν . Relación entre las deformaciones transversales y longitudinales (V. A. González, 2011; Molero, 2009). Su rango de valores se sitúa entre 0 y 0.5. Como ejemplos, nos encontramos que para hormigón, el rango de valores del coeficiente de Poisson es habitualmente entre 0.15 y 0.25 (Popovics et al., 2010). Su ecuación es:

$$\nu = \frac{1 - 2 \left(\frac{c_S}{c_P}\right)^2}{2 - 2 \left(\frac{c_S}{c_P}\right)^2} \quad (30)$$

Si se reestructura la ecuación para obtener la velocidad de onda S c_S , se tiene lo siguiente (Jung et al., 2000):

$$c_s = c_p \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (31)$$

Partiendo del rango de valores del coeficiente de Poisson, esto implica una relación entre la velocidad de onda S y onda P entre 0 y 0.707.

- Módulo dinámico o elástico de Young E . Representa la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida (Gómez-Ullate, 2007; Molero, 2009; “Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010; Ryden et al., 2003). Su ecuación es²⁴ (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010; Su et al., 2009):

$$E = \frac{c_p^2 \rho (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (32)$$

- Constante de Lamé λ ²⁵²⁶. No tiene una interpretación física directa (Molero, 2009). Su ecuación es (Gómez-Ullate, 2007; Rose, 2014):

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (33)$$

- Constante de Lamé μ ²⁷. También se le denomina G, módulo de rigidez o constante transversal o de rigidez (V. A. González, 2011; Molero, 2009). Indica la resistencia al esfuerzo transversal aplicado (Molero, 2009). Su ecuación es (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010; Su et al., 2009):

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (34)$$

No obstante, estos END con ondas ultrasónicas P y S consumen mucho tiempo, ya que se necesitan múltiples puntos de medida para analizar globalmente una estructura. Como se ha explicado en el apartado “Tipos de ondas”, existen otros tipos de onda, como las ondas guiadas, que están formadas por la combinación de las ondas P y S (Rose, 2014) que presentan unas características especiales. Estas ondas guiadas son el eje central de esta tesis y se tratarán en profundidad en el siguiente capítulo.

²⁴ Otra posible ecuación es $E = 2\mu(1+\nu)$

²⁵ No confundir la primera constante de Lamé con la longitud de onda. Desafortunadamente, en la mayoría de bibliografía ambos parámetros se representan con λ .

²⁶ Otra posible ecuación es $\lambda = c_p^2 \rho - 2\mu$

²⁷ Otra posible ecuación es $\mu = c_s^2 \rho$

2.5. Conclusiones

En este capítulo se han presentado los materiales cementicios, concretamente los procesos de su formación (fraguado, endurecimiento, curado), los parámetros más representativos (relación agua/cemento, relación árido/cemento, tipos de resistencias, ...) y los distintos daños que padecen (ataque ácido, por sulfatos, daño térmico, ...). Para detectar esos daños, se han detallado los diferentes ensayos tanto destructivos como no destructivos, de entre los cuales se ha hecho especial hincapié en los basados en ultrasonidos. Se ha analizado la teoría de los ultrasonidos: los tipos de onda (onda P, onda S, ondas guiadas), el tipo de incidencia (normal, oblicua), el equipamiento necesario (transductores, acoplante) y los parámetros ultrasónicos (velocidad y atenuación) y mecánicos (constantes elásticas) más representativos.

3. Ondas guiadas

En este capítulo se presentan las ondas guiadas de Rayleigh y de Lamb, dos de las ondas guiadas más aplicadas en la práctica en materiales cementicios. Una de las técnicas más utilizadas para la excitación y recepción de estas ondas es la incidencia oblicua. Por ese motivo, se detallan distintas técnicas de acoplamiento que permiten la incidencia oblicua, como es el acoplamiento por cuñas sólidas; el acoplamiento por agua mediante inmersión o localizado mediante distintos elementos o el acoplamiento por aire. Por último, se exponen distintas técnicas de procesamiento de señal para representar las propiedades de las ondas guiadas, como la transformada de Fourier, el espectrograma o la transformada *wavelet*.

3.1. Introducción

Las ondas guiadas se han hecho muy populares en el ámbito de los END por ultrasonidos. Permiten la inspección de una estructura de una forma más rápida, sensible y económica en comparación con las ondas P y S (ver “Tipos de ondas”). Están formadas por la superposición de los desplazamientos de las partículas de las ondas P y S (Krautkrämer et al., 1990; Rose, 2014). Son capaces de inspeccionar una estructura de forma global a partir de una única medida, al contrario que las ondas P y S que requieren múltiples medidas para caracterizar una estructura (Jung et al., 2000; Rose, 2014). Además, pueden recorrer largas distancias en comparación a las ondas P y S manteniendo una relación señal-a-ruido o *signal-to-noise ratio (SNR)* razonable (Schaal et al., 2015; Wilcox et al., 2001).

Pese a que en el primer capítulo se ha hablado de medios infinitos donde únicamente están presentes las ondas P y S sin interactuar entre ellas (V. A. González, 2011), estos medios no existen en la práctica (Alleyne, 1991). No obstante, dependiendo de la longitud de onda utilizada frente a las dimensiones del objeto (largo, ancho y espesor) se pueden interpretar como infinitos (Figura 37 (a)), es decir, sin fronteras ni superficies (IAEA, 2002; Molero, 2009; Rossing et al., 2013; Sharma et al., 2014).

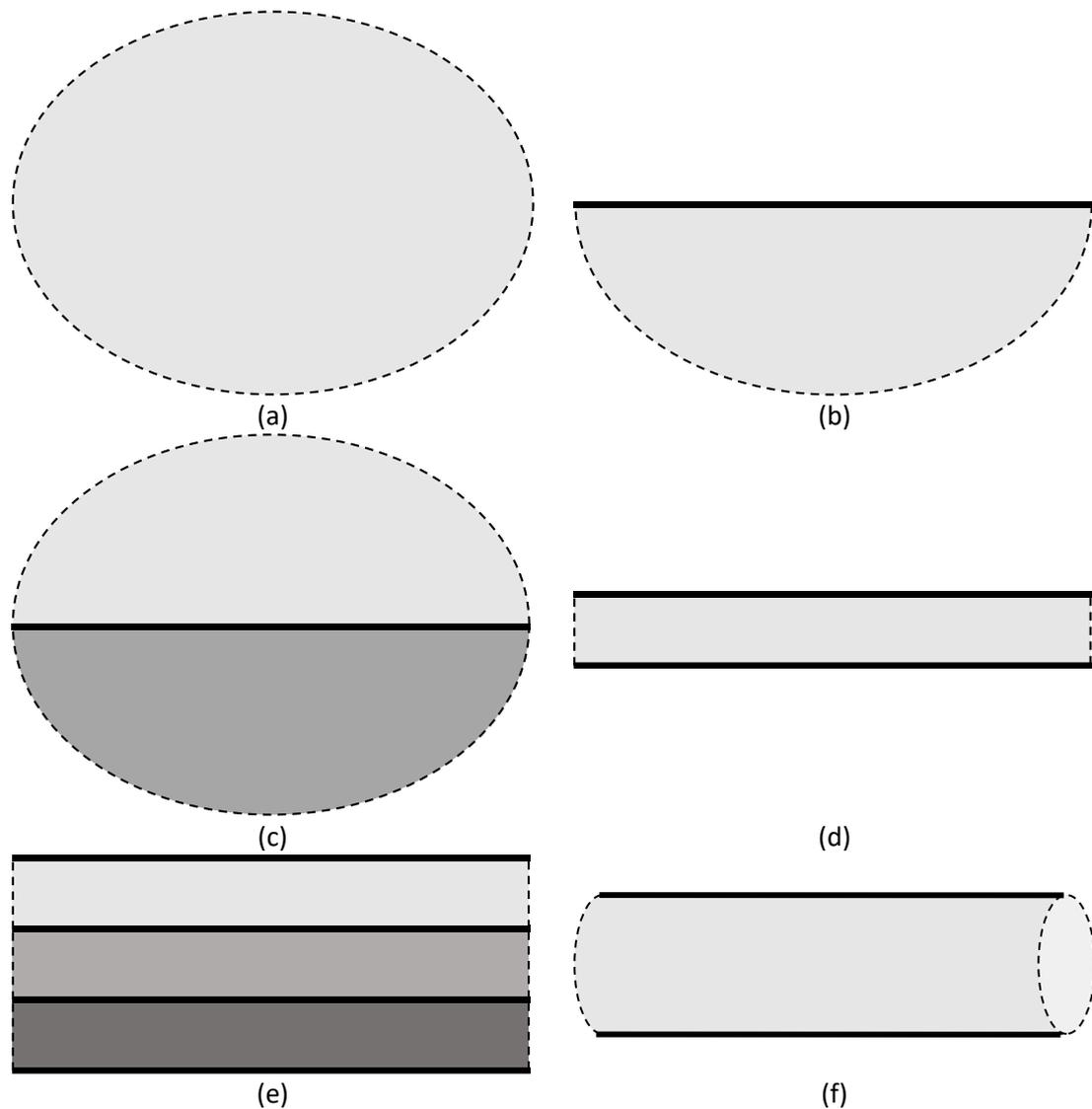


Figura 37. Ejemplos de distintos medios o estructuras donde se propagan las ondas (Rose, 2014; Schaal et al., 2015; Su et al., 2009): (a) Medio infinito; (b) Medio semi-infinito o semi-espacio; (c) Interfaz entre dos semi-espacios; (d) Placa; (e) Estructura multicapa; (f) Estructura cilíndrica. Las fronteras o límites de las guías de onda se han resaltado en negro y las partes infinitas se han dibujado con líneas discontinuas.

Por el contrario, las ondas guiadas no existen en estructuras infinitas, necesitan de fronteras o límites para propagarse, denominadas guías de onda o *waveguides* (Rose, 2014).

Si en la estructura a medir existe una única frontera (Figura 37 (b)) o superficie libre de fuerzas (Gómez-Ullate, 2007) (como si estuviera en el vacío), se le denomina medio semi-infinito, semi-espacio (V. A. González, 2011) o *half-space* (Alleyne, 1991; Prego, 2010; Viktorov, 1967). Pese a que en la práctica no existe esta condición, una estructura se puede considerar un semi-espacio si la longitud de onda de excitación es mucho menor que su espesor (por ejemplo, una estructura gruesa) (V. A. González, 2011; Rose, 2014; Schaal et al., 2015). En este caso, las ondas que se propagan en la superficie de un semi-espacio se denominan ondas de Rayleigh (Rose, 2014; Viktorov, 1967).

Si la estructura a medir consiste en una unión entre dos semi-espacios o medios semi-infinitos, en la interfaz de dicha unión también se generan ondas guiadas (Figura 37 (c)). Las ondas que

aparecen en la interfaz de dos medios sólidos son las ondas de Stoneley²⁸ (Gardner et al., 2013; Kundu, n.d.; Rose, 2014) y las ondas que surgen en la interfaz entre un medio fluido y otro sólido son las ondas de Scholte²⁹ (Harb et al., 2015; Kundu, 2004; Rose, 2014; Zhu et al., 2004).

Si la longitud de onda es mayor que el espesor de la estructura, esa estructura ya no se considera un semi-espacio, por lo que no se propagan ondas de Rayleigh, sino ondas de Lamb (Bezdek et al., 2006; Gómez-Ullate et al., 2006; Schaal et al., 2015). Las estructuras tipo placa son las guías de onda típicas de las ondas de Lamb (Figura 37 (d)), ya que su espesor suele ser relativamente pequeño en comparación con sus otras dos dimensiones. Las ondas de Lamb también se pueden propagar en estructuras de varias capas o multicapa, siempre y cuando se cumpla la condición anterior (Figura 37 (e)) (Birgani et al., 2015; Cheng et al., 2012; Su et al., 2009). En el caso de que la guía de onda sea una estructura cilíndrica (Figura 37 (f)), como una tubería o barra, las ondas que se propagan se les conoce como ondas guiadas cilíndricas o *cylindrical guided waves* (Na et al., 2003; Su et al., 2009).

Estas son las ondas guiadas más importantes que se pueden encontrar en la bibliografía, siendo la incidencia oblicua la técnica utilizada habitualmente para excitar y recibir las citadas ondas (Guo et al., 2001; Luppé et al., 1988; Piwakowski et al., 2004; Rose, 2014).

Finalmente, las ondas guiadas se pueden generar y recibir en diferentes materiales. Los más comunes son los metales (Alleyne et al., 1991; Ghosh et al., 1998a; Harb et al., 2015; Hayashi et al., 2003; Jia, 1997; Kim et al., 2002; Rose, 2014; Sharma et al., 2014; K. Xu et al., 2012), gracias a su homogeneidad y por los estándares de producción controlados que se siguen a la hora de fabricarlos (Keller et al., 2001; Mutlib et al., 2016; Prego, 2010). Sin embargo, también se ha trabajado con materiales cementicios, aunque en menor medida.

Entre las ondas guiadas que más se han utilizado en materiales cementicios, se encuentran las ondas de Rayleigh (Ghosh et al., 2015; Goueygou et al., 2004a; In et al., 2009; Kim et al., 2016; Kim et al., 2011; Neuenschwander et al., 2006; Piwakowski et al., 2004; Wardany et al., 2004) y en menor medida las ondas de Lamb (Ham et al., 2015; Jung et al., 2000; Y. H. Lee et al., 2016b; Ryden et al., 2003). Por tanto, se van a desarrollar en detalle en los siguientes apartados de la tesis, en especial las ondas de Lamb.

²⁸ En algunos textos también se le denomina Stonely (Kundu, 2004; Rose, 2014; Su et al., 2009).

²⁹ Las ondas de Scholte se consideran un caso especial de onda de Stoneley. De hecho, también se les puede encontrar con el nombre de onda de Stoneley-Scholte u onda de Scholte-Stoneley (Briers et al., 1994; Kundu, 2004; Moiseyenko et al., 2012; X. Xu et al., 2008).

3.2. Ondas de Rayleigh

Las ondas de Rayleigh (Figura 38) aparecen en la superficie de un semi-espacio homogéneo, isotrópico, lineal y elástico (Rose, 2014). El desplazamiento de sus partículas es elíptico (V. A. González, 2011) y se localiza cerca de la superficie (Alleyne, 1991), por eso se les conoce como ondas superficiales (Su et al., 2009; Worden, 2001).

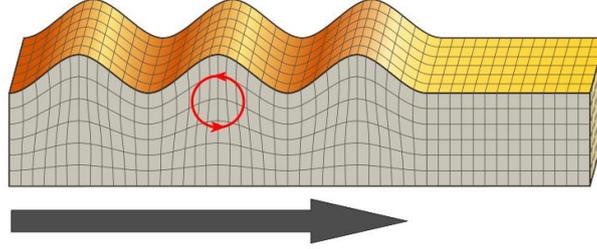


Figura 38. Desplazamiento de las partículas de las ondas de Rayleigh (“Rayleigh wave” por Д.Ильин, licencia bajo [CCO 1.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

La amplitud de estas ondas decae exponencialmente con la profundidad (Ólafsdóttir, 2014; Popovics et al., 2010). Concretamente, su profundidad de penetración es de aproximadamente una longitud de onda λ_R (Neuenschwander et al., 2006; “Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010; Wardany et al., 2004; S. Zhang et al., 2017). La ecuación de la longitud de onda λ_R es (Ecuación (35))

$$\lambda_R = \frac{c_R}{f} \quad (35)$$

Siendo c_R la velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh y f su frecuencia. Debido a su baja atenuación geométrica (Worden, 2001) en comparación con las ondas P y S, las ondas de Rayleigh son las que más daño causan en los terremotos (Alleyne, 1991; Rose, 2014; Worden, 2001). Aproximadamente, el 67 % de la energía liberada por un seísmo corresponde a las ondas de Rayleigh, seguido del 23 % a las ondas S y el 7 % a las ondas P (Y. H. Lee et al., 2016a; Ólafsdóttir, 2014). No obstante, en términos de velocidad, la tendencia es a la inversa, las ondas de Rayleigh son más lentas que las ondas P y S (Worden, 2001)

$$c_P > c_S > c_R \quad (36)$$

La velocidad de propagación de la onda de Rayleigh, c_R , suele tener un valor entre 90% (Neuenschwander et al., 2006) y 92% (Vu et al., 2016) de c_S y entre un 53 y 58% de c_P (Popovics et al., 2010). La velocidad de la onda de Rayleigh c_R se puede extraer de las ecuaciones (37) y (38) (Rose, 2014; Worden, 2001):

$$\eta^6 - 8\eta^4 + 8\eta^2(3 - 2\zeta^2) + 16(\zeta^2 - 1) = 0 \quad (37)$$

$$\eta = \frac{c_R}{c_S}, \zeta = \frac{c_S}{c_P} \quad (38)$$

Existen ecuaciones para c_R que relacionan las velocidades de las ondas P y S con las constantes elásticas (Krautkrämer et al., 1990; Y. H. Lee et al., 2016a; Popovics et al., 2010):

$$c_R = \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} c_S \quad (39)$$

$$c_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (40)$$

Las ondas de Rayleigh es un tipo de onda que por definición³⁰ no presenta dispersión³¹, es decir, su velocidad de propagación c_R no depende de la frecuencia (Jia, 1997; Worden, 2001). En este caso se les denomina ondas de Rayleigh puras (Staroszczyk, 1992). No obstante, se tienen que cumplir dos condiciones para que dichas ondas no sean dispersivas. La primera condición es que la estructura sólida sea de una única capa (monocapa) de espesor mucho más grande que λ_R . Como segunda condición, las heterogeneidades existentes en la estructura tienen que ser mucho más pequeñas que λ_R (Worden, 2001). En estructuras multicapa o en el caso de una capa sobre un semi-espacio³², el comportamiento de estas ondas es dispersivo³³ (Goueygou et al., 2004b; Kundu, 2004; Lakestani et al., 1995), por lo que en esos casos se les denomina ondas de Rayleigh dispersivas (Popovics et al., 2010).

El método más conocido para la generación eficiente de ondas de Rayleigh es a través de transductores ultrasónicos (habitualmente de onda P) en incidencia oblicua en una configuración *pitch-catch* (Goueygou et al., 2002; In et al., 2009; Viktorov, 1967; S. Zhang et al., 2017). La incidencia oblicua produce una conversión de ondas P o S en la cuña a ondas de Rayleigh en el material inspeccionado (In et al., 2009; Piwakowski et al., 2004). Al utilizar la configuración *pitch-catch*, únicamente se necesita acceso a una de las caras de la estructura, por lo que este tipo de configuración sería adecuado para END en materiales cementicios (Goueygou et al., 2004b; Kim et al., 2011; S. Zhang et al., 2017). El transductor receptor detecta las señales que se propagan a lo largo de la estructura, aportando información sobre su integridad entre el transmisor y el receptor (Figura 39)(Jung et al., 2000).



Figura 39. Configuración *pitch-catch* con incidencia oblicua.

Para las ondas de Rayleigh puras, el ángulo es el mismo para cualquier frecuencia de excitación (Rose, 2014). A este ángulo se le conoce como el tercer ángulo crítico θ_{cr3} y su ecuación es la siguiente (In et al., 2009; Viktorov, 1967; S. Zhang et al., 2017)

³⁰ Es decir, cuando la guía de onda es un semi-espacio homogéneo, isotrópico, lineal y elástico.

³¹ No confundir esta dispersión con el fenómeno de *scattering* debido a las heterogeneidades existentes en el medio, que en español se traduce como dispersión (ver "Atenuación de los ultrasonidos").

³² Otro tipo de ondas guiadas que se puede presentar en la estructura capa - semi-espacio son las ondas de Love (Jiménez, 2009; Rose, 2014).

³³ Las ondas P y S también son no dispersivas por definición, aunque sí pueden presentar dispersión en materiales con muchas heterogeneidades (Krautkrämer et al., 1990).

$$\theta_{cr3} = \sin^{-1} \left(\frac{c_1}{c_{2R}} \right) \quad (41)$$

Donde c_1 es la velocidad de propagación (normalmente onda P) del medio acoplante (plexiglás, teflón, agua, aire, etc.). No obstante, algunos investigadores también utilizan el segundo ángulo crítico para la generación y recepción de ondas de Rayleigh (Goueygou et al., 2008; Piwakowski et al., 2004).

Como es de esperar, al exhibir un gran desplazamiento de sus partículas en la superficie (Khalili et al., 2016), las ondas de Rayleigh se han utilizado en diversas aplicaciones de carácter superficial (Piwakowski et al., 2004). Entre dichas aplicaciones se encuentran la detección de fisuras superficiales (Figura 40 (a)) (Aggelis et al., 2008; Kim et al., 2014), la porosidad (Figura 40 (b)) (Goueygou et al., 2009), la carbonatación (Kim et al., 2016) y la medida de espesores (Figura 40 (c)) (Goueygou et al., 2004b; Lakestani et al., 1995).

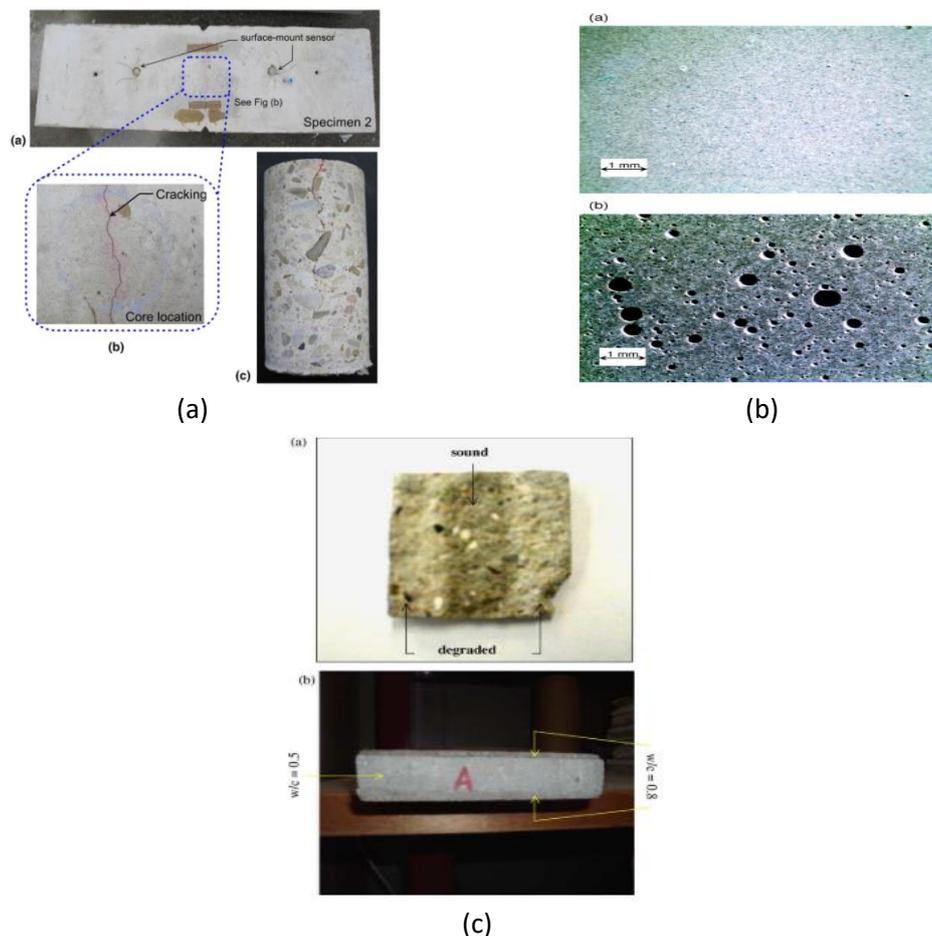


Figura 40. Ejemplo de aplicaciones de ondas de Rayleigh: (a) Fisuras superficiales (“Fig. 13”, por Seong-Hoon Kee y Boohyun Nam, licencia bajo [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)) (Kee et al., 2015); (b) Porosidad³⁴ (Punurai et al., 2007) y (c) Espesores³⁵ (Goueygou et al., 2004b).

³⁴ “Reprinted from Cement and Concrete Research, 37, Wonsiri Punurai, Jacek Jarzynski, Jianmin Qu, Jin-Yeon Kim, Laurence J. Jacobs, Kimberly E. Kurtis, Characterization of multi-scale porosity in cement paste by advanced ultrasonic techniques, 38-46, (2007), with permission from Elsevier”.

³⁵ “Reprinted from Ultrasonics, 42, M. Goueygou, B. Piwakowski, A. Fnine, M. Kaczmarek, F. Buyle-Bodin, NDE of two-layered mortar samples using high-frequency Rayleigh waves, 889-895, (2004), with permission from Elsevier”.

3.3. Ondas de Lamb

Las ondas de Lamb, a diferencia de las ondas de Rayleigh, no se producen en un semi-espacio, sino en un espacio delimitado por dos fronteras, una superior y otra inferior. Se utilizan frecuentemente en END por ultrasonidos debido a que pueden propagarse largas distancias con poca pérdida de energía (buena *SNR*) incluso en materiales atenuantes (en comparación a las ondas P y S) (Alleyne, 1991; Hayashi et al., 2003; Su et al., 2009). Al ser ondas que se propagan en dos dimensiones, se atenúan menos que las ondas P y S, que se propagan en tres dimensiones (Alleyne, 1991). Sin embargo, las ondas de Lamb presentan dos problemas principales (Gómez-Ullate et al., 2006; Sharma et al., 2014; Shelke et al., 2011; Su et al., 2009):

- Son dispersivas, es decir, sus velocidades de propagación (velocidad de fase y de grupo) dependen de la frecuencia (Su et al., 2009).
- Son multimodales, es decir, a mayor frecuencia de excitación, mayor es el número de modos de propagación (desplazamientos de las partículas) que aparecen en las señales recibidas (*Lamb Waves*, n.d.). Dichos modos se enumeran respecto al orden de aparición.

Las ondas de Lamb se propagan en placas lineales, homogéneas, isotrópicas y elásticas, con sus superficies (superior e inferior) libres de fuerzas (como si la placa estuviera en el vacío (Alleyne et al., 1991)) y dimensiones laterales mucho mayores (infinitas (Baid et al., 2015)) que el espesor (Birgani et al., 2015; B. Li et al., 2014; Su et al., 2009). Estas ondas se forman a partir de la interferencia constructiva de reflexiones de ondas P y S (de polarización vertical (Deán et al., 2009)) entre las superficies superior e inferior de la placa cuando la longitud de onda λ es mayor que el espesor de la placa $2h$ (Harb et al., 2015; Y. H. Lee et al., 2016b; Popovics et al., 2007; Rose, 2014). Una relación típica de la longitud de onda λ con el espesor de la placa $2h$ es la que figura en (Sharma et al., 2015)

$$2h \leq 3\lambda \quad (42)$$

$$\lambda = \frac{c_f}{f} \quad (43)$$

Donde c_f es la velocidad de fase de las ondas de Lamb. La velocidad de fase c_f se define como la velocidad a la que se propaga la fase de cualquier componente frecuencial que forma la onda (Harb et al., 2015).

Por otro lado, la velocidad de grupo es la que realmente se mide en los experimentos (Rose, 2014; Su et al., 2009) y se define como la velocidad a la que el frente de onda de cada modo se propaga (Karpenko, 2013). La velocidad de grupo c_g tiene la siguiente expresión (Ecuación (44)):

$$c_g = \frac{c_f^2}{c_f - f \frac{\partial c_f}{\partial f}} \quad (44)$$

En las ecuaciones (43) y (44) se observa la dependencia de las velocidades de fase y grupo con respecto a la frecuencia, es decir, la dispersión. Dependiendo de la dirección del desplazamiento de las partículas con respecto a la mitad de la placa, los modos de ondas de Lamb se pueden clasificar en modos antisimétricos (Figura 41 (a)) o modos simétricos (Figura 41 (b)) (etiquetados A_m y S_m , respectivamente, donde $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ indica el orden de aparición de cada modo). Tomando como referencia la mitad de la placa (representada en Figura 41 (a) y (b) por una línea

discontinua negra) se observa en la Figura 41 (a) que no existe simetría entre la parte superior e inferior de la placa, por esa razón a ese tipo de desplazamiento de partículas se le denomina antisimétrico. Por otro lado, se observa en la Figura 41 (b) que sí existe simetría entre la parte superior e inferior de la placa representada, por lo que a ese tipo de desplazamiento de partículas se le denomina simétrico.

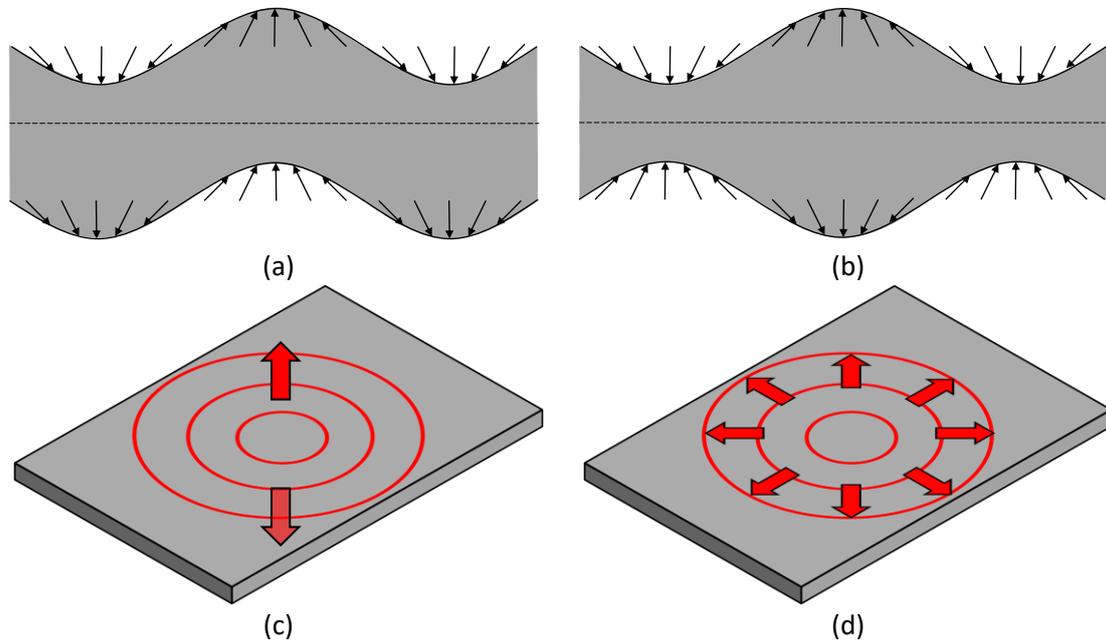


Figura 41. Desplazamiento de las partículas de los modos de Lamb antisimétricos (a) y simétricos (b) (“Figure 1”, por [Santiago Vázquez](#), Jorge Gosálbez, Ignacio Bosch, Alicia Carrión, Carles Gallardo y Jordi Payá, licencia bajo [CC BY 4.0](#)) (Vázquez et al., 2019b). Desplazamiento mayoritario de partículas fuera del plano para modos antisimétricos (c) y dentro del plano para modos simétricos (d) (Su et al., 2009).

Los modos antisimétricos presentan mayoritariamente un desplazamiento de partículas fuera del plano u *out-of plane displacement* (Figura 41 (c)) en la dirección transversal. Debido al desplazamiento mayoritario de las partículas en la dirección transversal, a los modos antisimétricos también se les denomina modos flexurales o flexionales. Por otro lado, los modos simétricos presentan mayoritariamente un desplazamiento de partículas radial en el plano o *in-plane displacement* (Figura 41 (d)) en la dirección longitudinal. Debido al desplazamiento mayoritario de las partículas en la dirección longitudinal, a los modos simétricos también se les denomina modos longitudinales (Galán et al., 2000; Gómez-Ullate, 2007; Sharma et al., 2015; Su et al., 2009).

3.3.1. Curvas de dispersión

Para una placa lineal homogénea, isotrópica y elástica con superficies libres de fuerzas y dimensiones laterales mayores que el espesor $2h$, la ecuación que representa los desplazamientos de los modos de Lamb antisimétricos es (Moll et al., 2010; Rose, 2014)

$$4k^2pq \sin(qh) \cos(ph) + (k^2 - q^2)^2 \sin(ph) \cos(qh) = 0 \quad (45)$$

Y para los desplazamientos de los modos de Lamb simétricos es

$$4k^2pq \sin(ph) \cos(qh) + (k^2 - q^2)^2 \sin(qh) \cos(ph) = 0 \quad (46)$$

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_P^2} - k^2, \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_S^2} - k^2 \quad (47)$$

Donde $k = \frac{\omega}{c_f}$ es el número de onda, $\omega = 2\pi f$ es la pulsación y c_P y c_S son las velocidades de la onda P y S del material de la placa, respectivamente.

Estas ecuaciones se conocen como ecuaciones de dispersión para ondas de Lamb o ecuaciones de Rayleigh-Lamb (Gibson et al., 2005). Las gráficas de las soluciones de estas ecuaciones de Rayleigh-Lamb con respecto a la frecuencia se conocen como curvas de dispersión. Un ejemplo de curvas de dispersión de velocidad de fase de una placa de mortero ($c_P = 4813$ m/s, $c_S = 3003$ m/s, $2h = 13$ mm) se muestra en la Figura 42. El algoritmo para calcular las raíces de dichas ecuaciones y obtener las curvas de dispersión está desarrollado en (Rose, 2014; Su et al., 2009). Lo habitual es la elección de las soluciones reales, las cuales representan los modos que se propagan en la placa (Rose, 2014; Ryden et al., 2003).

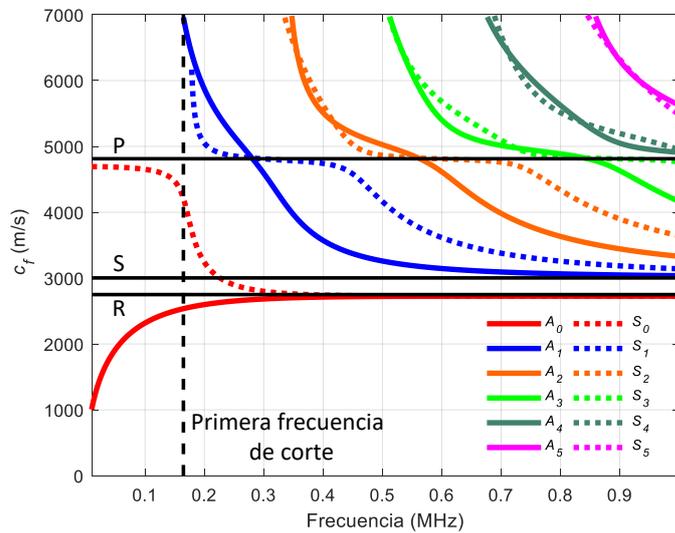


Figura 42. Curvas de dispersión de velocidad de fase de una placa de mortero. Los modos antisimétricos (A) se representan con líneas continuas y los modos simétricos (S) con líneas discontinuas. También se han representado mediante líneas continuas negras la onda P (P), la onda S (S) y la onda de Rayleigh (R).

Es recomendable normalizar la ecuación (45) por el parámetro p y la ecuación (46) por el parámetro q . Además, en algunos casos, se normalizan los ejes, multiplicando respecto al espesor $2h$ el eje de frecuencias o abscisas y dividiendo el eje de velocidades de fase u ordenadas por la velocidad de la onda S c_S de la placa, permitiendo así ahorrar tiempo de computación (Ryden et al., 2003).

Al salir de estructuras planas y de un solo material y pasar a estructuras multicapa o cilíndricas, las ecuaciones de las curvas de dispersión son más complicadas. Concretamente, para el caso de estructuras multicapa, se desarrollaron para su resolución métodos matriciales denominados *Transfer Matrix Method (TMM)* y *Global Matrix Method (GMM)* (Bezdek et al., 2012; Lowe, 1995; Su et al., 2009).

Centrándonos en los diferentes modos que podemos ver en las curvas de dispersión (Figura 42), podemos decir que los modos fundamentales de Lamb A_0 y S_0 existen para todas las frecuencias. Pero conforme nos movemos hacia altas frecuencias, estos modos fundamentales

se aproximan a la velocidad de la onda de Rayleigh (línea negra horizontal marcada con R en la Figura 42). Esto último sucede cuando el espesor de la placa ($2h$) es mayor que 5 longitudes de onda de Rayleigh λ_R (Alleyne, 1991; Prego, 2010), es decir (Ecuación (48))

$$2h > 5\lambda_R \quad (48)$$

En ese caso, los modos fundamentales A_0 y S_0 se combinan para formar una onda de Rayleigh. De hecho, las ecuaciones (45) y (46) se reducen a la ecuación de la onda de Rayleigh en un semi-espacio homogéneo (ecuación (37)) si la frecuencia tiende a infinito (Y. H. Lee et al., 2016b; Ryden et al., 2003). Incluso las técnicas de generación y detección de ondas de Lamb y Rayleigh y los procesados de señal son prácticamente las mismas (Rose, 2014; Worden, 2001). Por tanto, en esta tesis se van a tratar indistintamente ambas ondas.

Por otra parte, los modos superiores (A_m, S_m , cuando $m > 0$) se aproximan a la velocidad de la onda S de la placa (línea negra horizontal marcada con S en la Figura 42). También se puede apreciar que los modos superiores ($m > 0$) presentan frecuencias de corte, donde la velocidad de fase tiende a infinito (línea negra vertical discontinua en la Figura 42) (Kim et al., 2006; Rose, 2014).

Además, las curvas de dispersión de los modos simétricos (representados con líneas discontinuas en la Figura 42), presentan una parte horizontal (línea negra horizontal marcada con P en la Figura 42) donde la velocidad de fase c_f se aproxima a la velocidad de la onda P de la placa (Y. H. Lee et al., 2016b; Ryden et al., 2003).

Las curvas de dispersión de velocidad de fase no son las únicas que se pueden representar. A partir de este parámetro, se pueden obtener otros y representarlos como curvas de dispersión (o dependientes de la frecuencia), como la velocidad de grupo, el ángulo de incidencia, el número de onda o la atenuación³⁶. En la Figura 43 se representan las curvas de dispersión de algunos de los citados parámetros para la misma placa de mortero que en la Figura 42 ($c_p = 4813$ m/s, $c_s = 3003$ m/s, $2h = 13$ mm).

³⁶ La atenuación se define como la parte imaginaria del número de onda. Para más información, ver (Birgani et al., 2015; Sharma et al., 2014; Takiy et al., 2013).

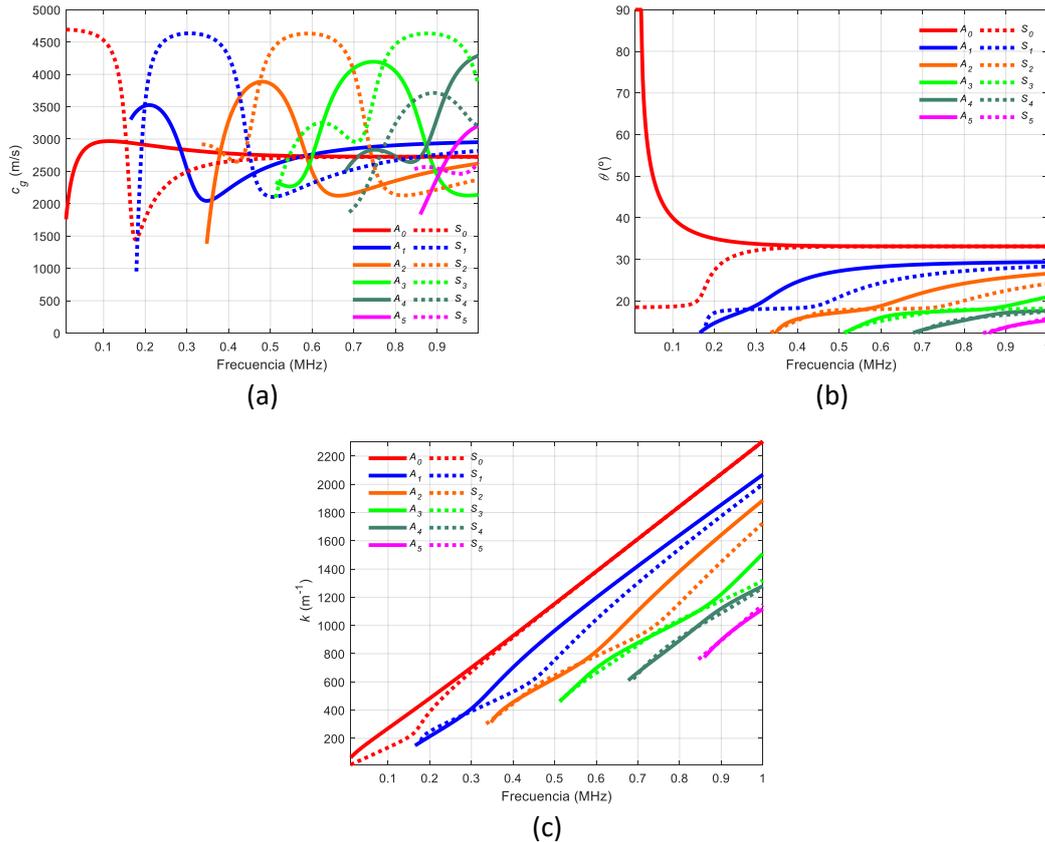


Figura 43. Curvas de dispersión de una placa de mortero ($c_p = 4813$ m/s, $c_s = 3003$ m/s, $2h = 13$ mm): (a) Velocidad de grupo c_g ; (b) Ángulo de incidencia θ (siendo el medio acoplante agua, de $c_1 = 1490$ m/s) y (c) Número de onda k .

Existen diferentes *softwares* para calcular y generar las curvas de dispersión. Entre ellos, destaca el software Disperse (Pavlakovic et al., 1997) el cual es capaz de generar curvas en diferentes materiales (teflón, titanio, materiales compuestos o *composite materials*, etc.), estructuras (monocapa, multicapa, cilíndricas, etc.) y configuraciones (vacío, acoplamiento por agua, acoplamiento por aire, etc.) (Su et al., 2009). Este *software* se ha utilizado ampliamente en diferentes estudios (Cheng et al., 2012; He et al., 2012; Kazys et al., 2014; Khalili et al., 2016; Panda et al., 2017; Sanderson, 2015; Sharma et al., 2014; Shelke et al., 2011). Otros códigos para el cálculo de curvas de dispersión se pueden encontrar en (Wathelet, 2008) y (Prego, 2010).

3.3.2. Curvas de dispersión – Metodología de trabajo

Como se aprecia en la Figura 42, a mayor frecuencia de excitación, mayor es el número de modos de Lamb que aparecen. Estos modos se solapan entre sí, dificultando el análisis de las señales recibidas. Para mejorar la interpretación de estas ondas dispersivas y multimodales, se pueden seguir las siguientes recomendaciones:

- Trabajar en una región de las curvas de dispersión de las velocidades de fase/grupo donde exista poca dispersión (excitando las frecuencias adecuadas). Esto último se da en regiones de las curvas donde las velocidades no varíen mucho con respecto a la frecuencia (Fan et al., 2018; Khalili et al., 2016; K. I. Lee et al., 2004; Su et al., 2009; K. Xu et al., 2012) En la Figura 44 se han representado las regiones de las curvas de dispersión de velocidad de fase de una placa de mortero (mismas características que Figura 42 y Figura 43, es decir, $c_p = 4813$ m/s, $c_s = 3003$ m/s, $2h = 13$ mm) donde los

modos fundamentales A_0 y S_0 no presentan dispersión. La dispersión se manifiesta en las señales como variaciones de amplitud y de forma conforme el ultrasonido se propaga por la placa (Alleyne et al., 1992b).

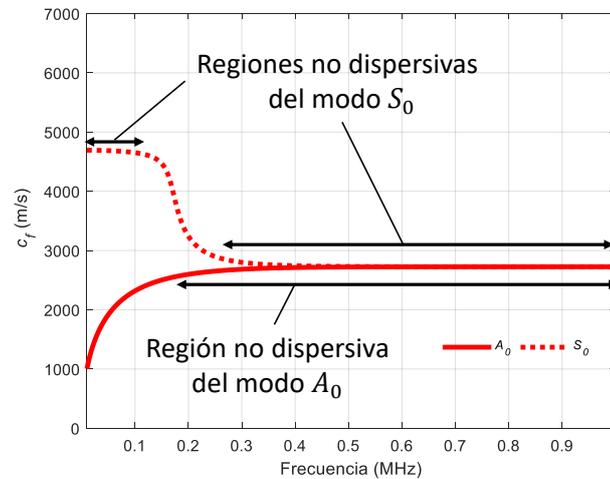


Figura 44. Regiones de las curvas de dispersión de los modos fundamentales A_0 y S_0 de una placa de mortero ($c_p = 4813$ m/s, $c_s = 3003$ m/s, $2h = 13$ mm) donde no se produce dispersión (Hayashi et al., 2003). No se han representado los modos superiores (A_m , S_m cuando $m > 0$) por simplicidad.

- Trabajar con señales de banda estrecha para reducir la dispersión y por consiguiente, el número de modos excitados (Michaels et al., 2013; Santos et al., 2000; Tindaro, 2009; K. Xu et al., 2012).
- Seleccionar una región frecuencial donde aparezcan modos con velocidades de grupo muy distintas entre sí (Figura 45), para poder separar dichos modos en el dominio del tiempo (Alleyne et al., 1992a; K. I. Lee et al., 2004; Sharma et al., 2015). Esto no siempre es posible, especialmente a altas frecuencias, donde además de aparecer muchos modos, las velocidades de grupo de todos ellos son normalmente similares (Alleyne et al., 1992a).

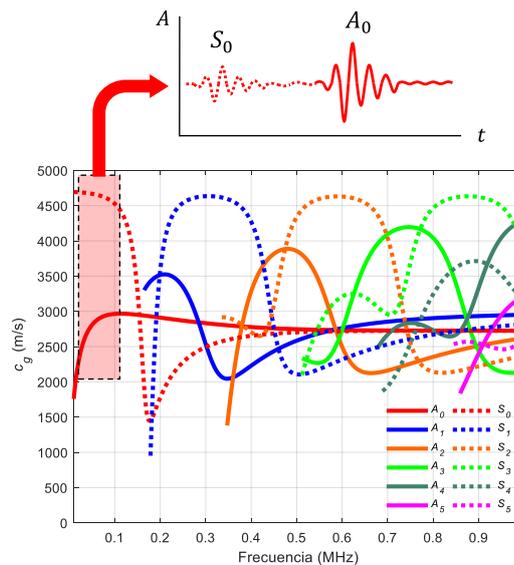


Figura 45. Selección de modos con velocidades de grupo muy distintas entre sí (curvas de dispersión de placa de mortero, $c_p = 4813$ m/s, $c_s = 3003$ m/s, $2h = 13$ mm)(Hayashi et al., 2003).

- Elegir frecuencias bajas donde se minimicen el número de modos en la señal recibida, es decir, trabajar en la parte izquierda de las curvas de dispersión (Panda et al., 2017). El escenario ideal es excitar un único modo porque esto permite una mejor identificación de daños o defectos (Santos et al., 2000) aunque siempre van a existir como mínimo dos modos de Lamb: los modos fundamentales A_0 y S_0 . La aparición de modos que no se han excitado puede indicar la presencia de defectos debido a la conversión de modos (Guo et al., 1993; Worden, 2001).

3.3.3. Detección de daños con ondas de Lamb

Los modos fundamentales de Lamb A_0 y S_0 se utilizan frecuentemente (Sharma et al., 2015) en detección de daños, ya que a bajas frecuencias, concretamente hasta la primera frecuencia de corte (ver Figura 42) son los únicos modos que existen (Alleyne et al., 1992b; Guo et al., 1993; Masurkar et al., 2015; Moll et al., 2010). Para acercarse a la zona frecuencial donde ambos modos existen, se puede trabajar con transductores de baja frecuencia central o procurar que el espesor de la placa inspeccionada sea lo más pequeño posible (a menor espesor, los modos superiores aparecen a mayores frecuencias).

Algunos de los defectos que pueden detectar las ondas de Lamb son delaminaciones (Guo et al., 1993), muescas o *notches* (Hayashi et al., 2003), grietas (Mutlib et al., 2016; Seale et al., 1998), falta de adhesión entre capas o *debonding* (Cheng et al., 2012) y corrosión (Ervin et al., 2009)³⁷. Dependiendo del tipo de defecto, un modo de Lamb puede ser más o menos sensible a él (Alleyne et al., 1992a; Sharma et al., 2015). Aquellos modos que presenten desplazamientos grandes en la dirección del espesor, como el modo A_0 , son más sensibles a daños superficiales, como grietas superficiales (Su et al., 2009). Mientras que modos con desplazamientos grandes en la dirección de propagación de la onda, como el modo S_0 , son más sensibles a cualquier defecto que exista en el espesor de la estructura, como delaminaciones (Guo et al., 1993; Halimi et al., 2013). Algunos procedimientos para detectar los defectos son:

- Cambios en las curvas de dispersión experimentales (Cheng et al., 2012; Ham et al., 2015).
- Cambios en la amplitud de las señales recibidas (Halimi et al., 2013; Mei et al., 2020; Sharma et al., 2014).
- Aparición o desplazamiento de picos en el dominio de la frecuencia (Eiras et al., 2013b; Halimi et al., 2013; Jung et al., 2001; K. I. Lee et al., 2004; Mei et al., 2020).
- Distribución del desplazamiento de partículas a lo largo del espesor de la placa (*mode shapes* o *wave structures*). Proporciona información importante para el entendimiento de la interacción de las ondas de Lamb con un defecto específico (Alleyne et al., 1991; Birgani et al., 2015; Karpenko, 2013).

Para detectar estos defectos adecuadamente, es necesaria una correcta generación y detección de ondas de Lamb y de Rayleigh. Para ello, existen diferentes técnicas y actuadores/sensores:

- Se suelen utilizar transductores ultrasónicos clásicos (piezoeléctricos) en incidencia oblicua (Figura 46 (a)). Aunque las ondas de Lamb (y las de Rayleigh) se pueden excitar y recibir en incidencia normal (Figura 46(b)), esta configuración no es tan eficiente como

³⁷ Algunas de las aplicaciones donde se han utilizado las ondas de Lamb son caracterización de materiales (Rogers, 1995), medición de espesores (K. Xu et al., 2012) o inspección de revestimientos (*coating*) (Y. C. Lee et al., 2001).

la incidencia oblicua (Luo et al., 2004; Mažeika et al., 2009; Rose, 2014; Shiotani et al., 2007; Worden, 2001). Sin embargo, es posible llegar a una excitación selectiva con incidencia normal.

- Algunos investigadores excitan distintos modos de Lamb cambiando la polaridad de cerámicas piezoeléctricas de titanato zirconato de plomo o *lead zirconate titanate (PZT)* (Figura 46 (c)) adheridas en la placa (Gómez-Ullate, 2007; Shelke et al., 2011).
- Otros investigadores modifican la frecuencia de excitación y la geometría de cerámicas piezoeléctricas dispuestas en línea o *Piezoelectric Wafer Active Sensors (PWAS)*³⁸ (Figura 46 (d)) para excitar de forma selectiva modos de Lamb (*Lamb wave tuning*) (Su et al., 2009). Estos actuadores y sensores deben de estar firmemente acoplados a la estructura a inspeccionar (Giurgiutiu, 2002). Presentan varias ventajas con respecto a los transductores ultrasónicos piezoeléctricos: son más baratos, más pequeños, necesitan menos potencia y se pueden insertar dentro de las estructuras para monitorizarlas (monitorización de la salud estructural o *Structural Health Monitoring (SHM)*). Por otro lado, sus desventajas son su fragilidad, que pueden presentar no linealidades en ciertas condiciones y que normalmente generan múltiples modos de Lamb (esto último nunca suele ser deseable porque dificulta la interpretación de las señales) (Giurgiutiu, 2002; Su et al., 2009).
- Otro tipo de sensores diferentes a los piezoeléctricos cuyo uso se está expandiendo son las redes de Bragg en fibra o *fibre Bragg grating (FBG)* (Figura 46 (c)) (F. Li et al., 2009; Ray et al., 2015).
- En materiales cementicios, se pueden generar ondas de Lamb y/o Rayleigh utilizando como fuente de excitación un martillo o una bola de metal (Aggelis et al., 2009; Y. H. Lee et al., 2016a; Ryden et al., 2003; Zhu et al., 2007) la cual genera múltiples modos de propagación con facilidad (Y. H. Lee et al., 2016b). Los modos generados se miden con sensores (habitualmente acelerómetros) adheridos al material (Figura 46 (e)).

³⁸PWAS consiste en una red de cerámicas PZT.

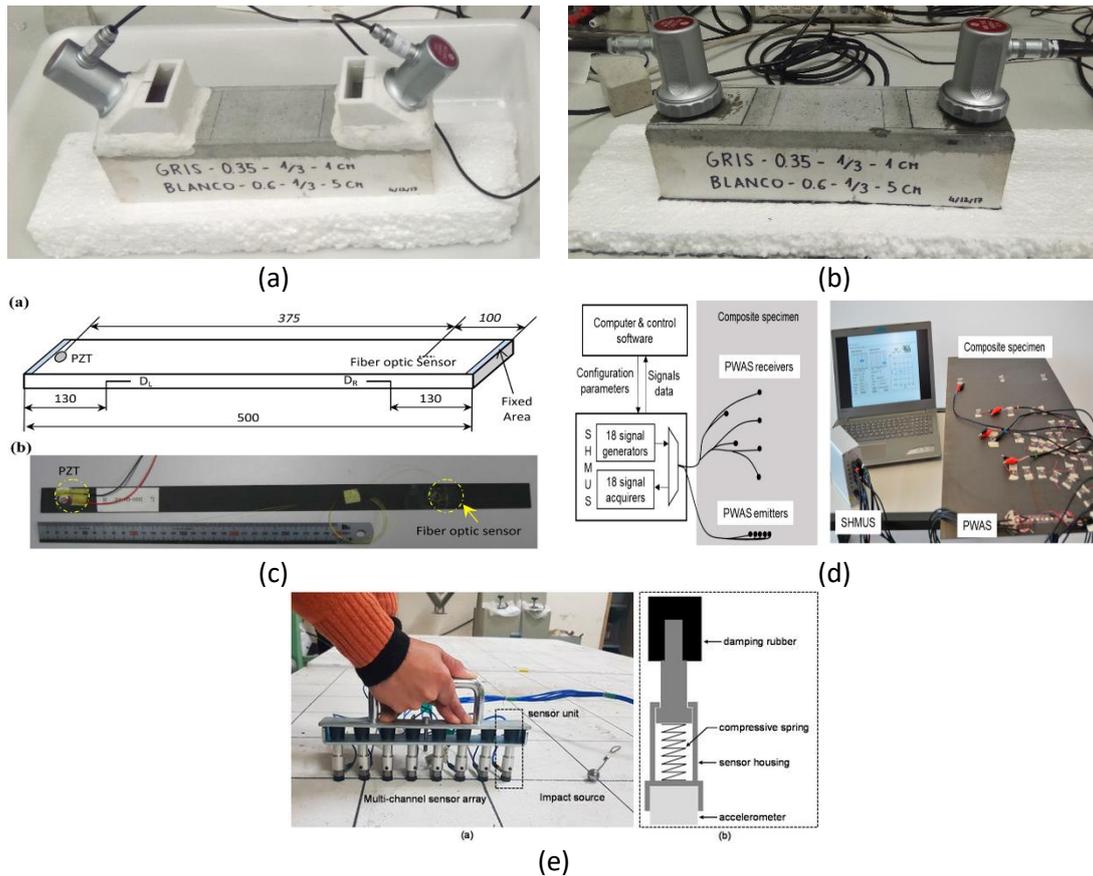


Figura 46. Técnicas y actuadores/sensores para la generación y detección de ondas de Lamb y de Rayleigh: (a) Incidencia oblicua; (b) Incidencia normal; (c) PZT y FBG ("Figure 5", por [Fucai Li](#), Hideaki Murayama, Kazuro Kageyama y Takehiro Shirai, licencia bajo [CC BY-NC-SA 3.0](#)) (F. Li et al., 2009); (d) PWAS ("Figure 1", por [Gerardo Aranguren](#), Josu Etxaniz, Sergio Cantero-Chinchilla, Jose M. Gil-Garcia y Muhammad Khalid Malik, licencia bajo [CC BY 4.0](#)) (Aranguren et al., 2020); (e) Bola de metal y acelerómetros ("Figure 6", por Seong-Hoon Kee, [Jin-Wook Lee](#) y Ma. Doreen Candelaria, licencia bajo [CC BY 4.0](#)) (Kee et al., 2020).

3.4. Generación de ondas de Lamb

A partir de las técnicas y actuadores/sensores citados anteriormente, en esta tesis se ha trabajado con transductores piezoeléctricos ultrasónicos en incidencia oblicua mediante la configuración *pitch-catch* (Figura 39 y Figura 46 (a)). La incidencia oblicua nos permite generar y detectar de forma selectiva distintos modos de ondas de Lamb, además de utilizar transductores piezoeléctricos de gran ancho de banda. Esta decisión se sustenta en las siguientes ventajas:

- La incidencia oblicua mediante configuración *pitch-catch* es una de las técnicas más utilizadas y estandarizadas.
- No es necesario tener acceso a las dos caras de la estructura, es suficiente con tener acceso a una de ellas.
- La posibilidad de excitar y recibir de forma selectiva los distintos modos de Lamb mediante la inclinación de transmisor y receptor.
- La posibilidad de disponer de un gran ancho de banda gracias al uso de transductores de banda ancha en transmisión y recepción.

El ángulo de incidencia θ es el ángulo crítico con el que se excita selectivamente un modo de Lamb de velocidad de fase c_f (Alleyne et al., 1992b; Hayashi et al., 2003; Kim et al., 2002)

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{c_1}{c_f}\right) \quad (49)$$

Donde c_1 es la velocidad de propagación (normalmente onda P) del medio acoplante (plexiglás, teflón, agua, aire, etc.) tanto en transmisión como en recepción. Al situar el receptor en el mismo ángulo que el transmisor se consigue una recepción eficiente o una mayor amplitud del modo excitado, disminuyendo la amplitud de otros modos (Alleyne et al., 1992b; Sharma et al., 2014).

Por tanto, para excitar y recibir un modo de Lamb en concreto, se debe elegir adecuadamente la frecuencia de excitación y el ángulo de inclinación respecto a la normal del transmisor y receptor (Halimi et al., 2013). Para ello, se pueden hacer uso de las curvas de dispersión del ángulo de incidencia θ (Figura 43 (b)) (Hayashi et al., 2003; Zeroug et al., 2003).

Es recomendable trabajar en una región frecuencial de las curvas de dispersión de ángulos de incidencia donde aparezcan modos con ángulos muy distintos entre sí (Alleyne et al., 1991; Castaings et al., 1996). En la Figura 47, se ha resaltado con un recuadro rosa una región frecuencial donde aparecen únicamente los dos modos fundamentales A_0 y S_0 . En este caso concreto, a una frecuencia de 49.68 kHz, el ángulo adecuado para excitar y recibir A_0 es 51.18° y el ángulo adecuado para excitar y recibir S_0 es 18.54° . Por tanto, si se selecciona una frecuencia de 50 kHz y un ángulo de 18° , el modo S_0 se excitará y se recibirá adecuadamente, mientras que el modo A_0 se excitará y se detectará ligeramente (Alleyne et al., 1991).

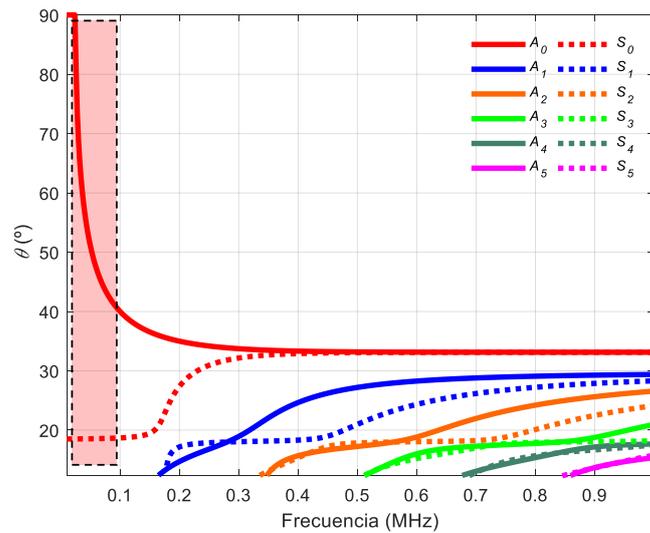


Figura 47. Ejemplo de región de trabajo recomendable de las curvas de dispersión de ángulos de incidencia θ .

Por otro lado, si no se dispone de las curvas teóricas, se puede buscar el ángulo de forma experimental, probando con distintas inclinaciones de los transductores y verificando con que ángulo se obtiene la máxima señal en recepción (Guo et al., 2001).

Es importante destacar que es muy complicado generar exclusivamente ondas de Lamb u ondas de Rayleigh. Habitualmente también se generan otros modos adicionales (Aggelis et al., 2010; Castaings et al., 2001; In et al., 2009; Qixian et al., 1996; Rogers, 1995; Santos et al., 2000). Esto es debido al ancho del haz emitido (divergencia del haz, ver “Transductores”), que incide con otros ángulos además del deseado (Guo et al., 2000; Zeroug et al., 2003). El ancho de banda de

la señal transmitida también influye en la excitación de otros modos. Nunca se genera una onda plana, puesto que el frente de ondas es finito.

A nivel teórico, al excitar con un ángulo en concreto, se está eligiendo una velocidad de fase, la cual se puede representar como una línea horizontal de excitación o activación en las curvas de dispersión de velocidad de fase. En otros trabajos, se habla de región de excitación (Castaings et al., 1996; Santos et al., 2000) en vez de línea de excitación. Según (Bezdek et al., 2012; Kim et al., 2002; Luo et al., 2004), si una línea de excitación interseca con una curva de dispersión de velocidad de fase de algún modo de Lamb, se produce un pico en la transformada de Fourier o *Fourier transform (FT)* de la señal recibida (Figura 48).

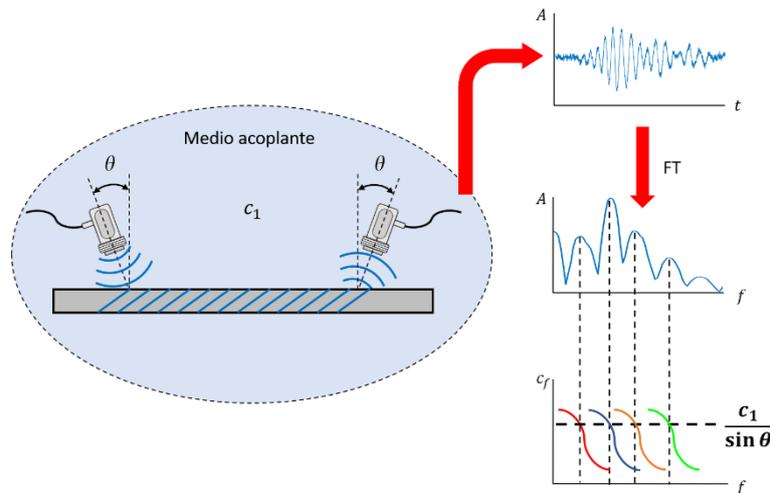


Figura 48. Concepto de línea de excitación (Balasubramaniam et al., 1991). Los picos de la FT coinciden con las intersecciones entre la línea de excitación y las curvas de dispersión teóricas.

Sin embargo, es posible mejorar la selectividad de un modo con unas condiciones adecuadas, por ejemplo, con un transductor de acoplamiento por aire (baja velocidad de propagación c_1) de gran diámetro D (Castaings et al., 2001), reduciendo así el ángulo de apertura de haz β (Ecuación (25)).

Se pueden usar distintas técnicas de acoplamiento para facilitar la inclinación de dichos transductores. Algunas de ellas son contacto con cuñas sólidas, inmersión completa en un fluido (habitualmente agua) y acoplamiento por aire. Todos los medios de acoplamiento utilizados deben de tener menor velocidad de propagación que las velocidades de los modos a excitar (Rose, 2014; Viktorov, 1967; S. Zhang et al., 2017).

3.4.1. Acoplamiento por cuñas sólidas

La técnica de contacto con cuñas sólidas consiste en utilizar transductores ultrasónicos (generalmente de onda P) y colocarlos en cuñas diseñadas con un cierto ángulo fijo o variable (Figura 49). Es posiblemente la técnica más comúnmente utilizada para la generación y detección de ondas de Lamb y de Rayleigh (Alleyne et al., 1996; Viktorov, 1967).

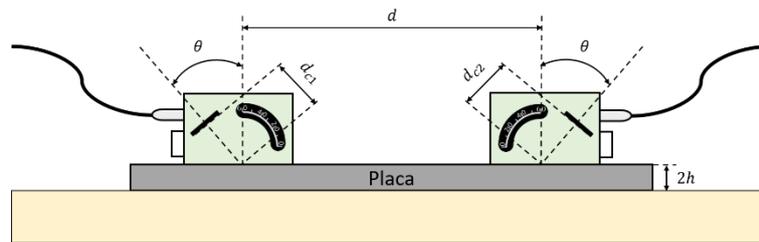


Figura 49. Acoplamiento por cuñas sólidas (“Figure 5”, por [Santiago Vázquez](#), Jorge Gosálbez, Ignacio Bosch, Alicia Carrión, Carles Gallardo y Jordi Payá, licencia bajo [CC BY 4.0](#)) (Vázquez et al., 2019b).

Estas cuñas pueden ser de diferentes materiales, como por ejemplo metacrilato³⁹ (Alleyne et al., 1991; Birgani et al., 2015; Hayashi et al., 2003; S. Zhang et al., 2017), teflón (Goueygou et al., 2004a; In et al., 2009; Piwakowski et al., 2004; Vu et al., 2015) o resina epoxy (Pant, 2014). Incluso existen modelos comerciales de transductores con cuña (habitualmente de metacrilato) que permiten la variación del ángulo (Halimi et al., 2013; MCGovern et al., 2016; Mei et al., 2020; “Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010).

Como ya se indicó en el apartado “Acoplante”, es necesario un material acoplante para garantizar una transmisión de energía adecuada (Hayashi et al., 2003) entre las interfaces transductor-cuña y cuña-material (Bezdek et al., 2012; Piwakowski et al., 2004; Worden, 2001). Sin embargo, las señales recibidas son sensibles al espesor del acoplante utilizado, la presión ejercida entre las interfaces transductor-cuña y cuña-material, lo plana que sea la superficie de inspección (Piwakowski et al., 2004) y las reflexiones que se producen dentro de las cuñas (Guo et al., 1993; Sharma et al., 2014).

Las técnicas que no requieren contacto pueden solucionar estos inconvenientes, permitiendo un acoplamiento constante y la posibilidad de escanear automática y rápidamente la estructura con resultados repetibles (Alleyne et al., 1992b; Briers et al., 1997; Molero, 2009; Santos et al., 2005) en comparación al caso de contacto directo.

3.4.2. Acoplamiento por agua

El acoplamiento por agua es uno de los más conocidos y utilizados para inspeccionar materiales cementicios. Existen dos formas de realizar dicho acoplamiento: mediante inmersión completa de la estructura a analizar o mediante acoplamiento a partir de distintos elementos, como columnas de agua, contenedores cónicos, globos o cuñas (Goueygou et al., 2008; Jung et al., 2000; Keller et al., 2001; Lluveras, 2017; Molero, 2009; Neuenschwander et al., 2006).

3.4.2.1. Acoplamiento por inmersión

La técnica de inmersión consiste en sumergir completamente los transductores y la placa a medir en un tanque relleno de un fluido (habitualmente agua⁴⁰, Figura 50) (Kim et al., 2002; Neuenschwander et al., 2006; Sharma et al., 2015). Se recomienda que exista bastante cantidad

³⁹ El metacrilato se puede encontrar en la literatura con diferentes nombres (Punurai, 2006): Plexiglas, Lucite, Perspex, Acrylite, Acrylic, Polyimido, PMMA, etc.

⁴⁰ Una velocidad de propagación en el agua típica es 1490 m/s (Ghosh et al., 1998a; R. Zhang et al., 2001).

de agua tanto por encima como por debajo de la placa (o, en términos de longitud de onda, que haya un semi-espacio de agua por encima y por debajo de la placa) (Bar-Cohen et al., 2001).

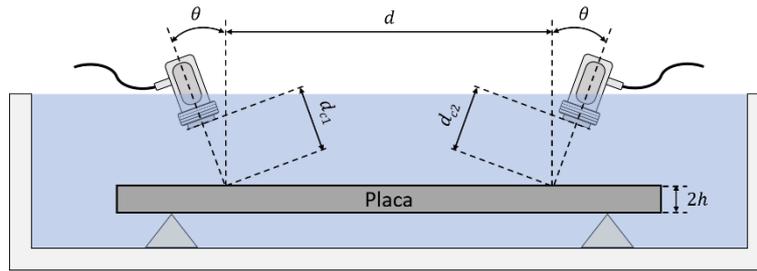


Figura 50. Acoplamiento por agua mediante inmersión. La placa la sujetan dos bloques de poliestireno (Vázquez et al., 2019b).

Se suelen utilizar transductores específicos de inmersión (Molero, 2009; Sharma et al., 2015), que son transductores de onda P con una capa de acoplamiento de una impedancia acústica cercana al agua, con lo que se transmite y se recibe más señal (“Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers”, 2010). No obstante, se pueden obtener buenos resultados con transductores de contacto, como se demuestra en (Lliveras, 2017; Mažeika et al., 2009; Molero et al., 2012).

Los transductores no están en contacto directo, están alejados de la placa una distancia determinada. Las ondas que se reciben no son ondas de Lamb o de Rayleigh puras, si no *leaky Lamb waves (LLW)* o *leaky Rayleigh waves (LRW)* (Kim et al., 2002; K. I. Lee et al., 2004; Neuenschwander et al., 2006; Santos et al., 2005), las cuales se forman a partir de la fuga de energía de las ondas de Lamb o Rayleigh que se propagan por la placa al medio que la rodea (agua, aire). Las velocidades de las ondas de Lamb puras y las de las *LLW* se pueden considerar iguales si la impedancia acústica (o densidad) del medio que rodea a la placa es pequeña en comparación con la impedancia (o densidad) de la propia placa (lo mismo sucede con las ondas de Rayleigh puras y las *LRW*) (Alleyne, 1991; Castaings et al., 1996; Jia, 1997; Y. C. Lee et al., 2001).

Sin embargo, esta técnica presenta algunos inconvenientes. Por un lado la señal recibida está formada por *LLW* (o *LRW*) y otras contribuciones indeseadas, como las reflexiones que se producen en la superficie del agua, en las paredes del tanque (fondo, laterales), entre las caras de los transductores y la placa o la onda directa entre transmisor y receptor (Ghosh et al., 1998a; Sharma et al., 2015) que contaminan la señal recibida dificultando su posterior procesado. Algunas de estas contribuciones indeseadas se representan en rojo (junto con la onda de Lamb excitada que se representa en verde) en la Figura 51.

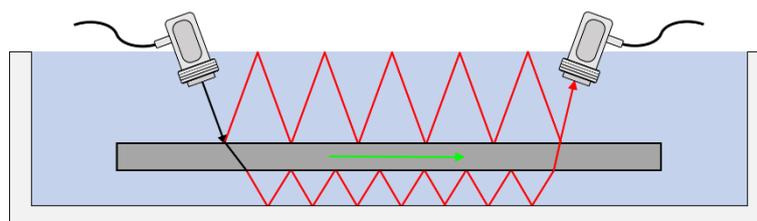


Figura 51. Algunas de las contribuciones indeseadas que aparecen en el montaje de inmersión (Ghosh et al., 1998a).

Para resolver el problema de estas contribuciones indeseadas, algunos investigadores han colocado material aislante en el fondo del tanque y entre los transductores (K. I. Lee et al., 2004) o han incrementado la separación entre la placa y otras superficies (paredes del tanque y superficie del agua) (Kim et al., 2002; Sharma et al., 2015).

Otro de los problemas existentes es que el modo de Lamb excitado puede sufrir una gran atenuación, debido a la fuga de energía de la placa al medio acoplante, por lo que no se pueden alcanzar grandes distancias de propagación (Alleyne et al., 1992a; Alleyne et al., 1992b; Sharma et al., 2014) y por tanto, no es recomendable emplear esta técnica para medir grandes estructuras (Castaings et al., 1996; Molero, 2009). Un modo de Lamb que se atenúa sensiblemente en inmersión es el modo A_0 (Sharma et al., 2015; Su et al., 2009; Zeroug et al., 2003). No sucede lo mismo con el otro modo fundamental, el modo S_0 (Mažeika et al., 2009; Santos et al., 2005; Su et al., 2009).

3.4.2.2. Acoplamiento localizado

Para solucionar estos problemas, algunos investigadores evitan sumergir la placa completamente y emplean acoplamiento localizado por agua (Figura 52) a partir de *water jets* (Castaings et al., 1996; Krautkrämer et al., 1990), columnas de agua (Alleyne et al., 1992b), contenedores cónicos (Ghosh et al., 1998b; Jung et al., 2000), globos (Goueygou et al., 2008; Vázquez et al., 2019c) o cuñas de agua (Briers et al., 1997; Declercq et al., 2005; Goueygou et al., 2008; Jia, 1997; Lakestani et al., 1995). Son destacables los contenedores cónicos, que por su geometría cónica reducen las reflexiones internas y ayudan a focalizar el haz ultrasónico, reduciendo el rango angular (Ghosh et al., 1998b).

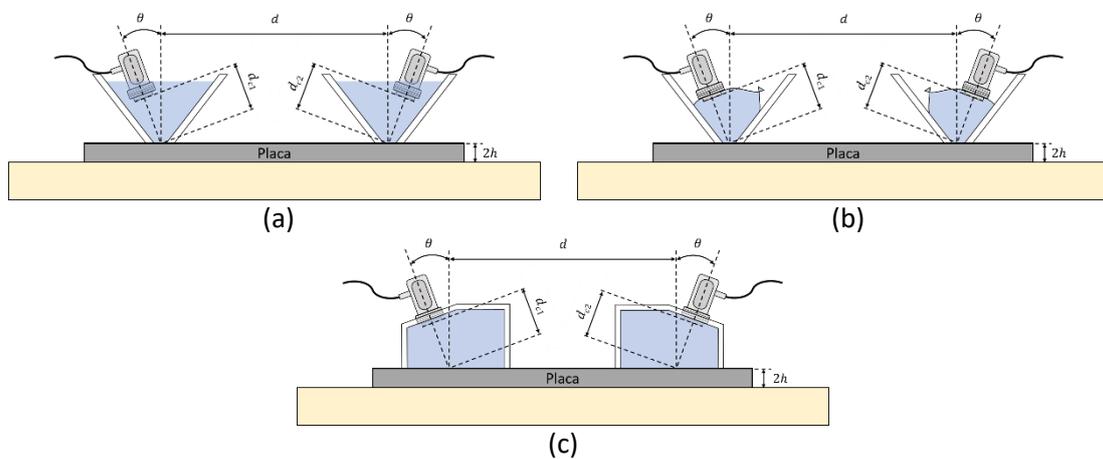


Figura 52. Acoplamiento por agua localizado: (a) contenedores cónicos (Vázquez et al., 2019b); (b) globos y (c) cuñas.

Pese a estas soluciones, el acoplamiento localizado por agua no es viable para inspeccionar estructuras verticales (Guo et al., 2001), a altas temperaturas (Castaings et al., 2001) o aquellas donde esté prohibido contaminar con algún acoplante (Alleyne et al., 1992b; Padiyar et al., 2011).

3.4.3. Acoplamiento por aire

El acoplamiento por aire⁴¹ es probablemente la mejor solución de acoplamiento (Figura 53). Mantiene las ventajas de la técnica de inmersión (acoplamiento constante, rapidez y posibilidad de automatización) y elimina algunos de los problemas de contribuciones indeseadas, excepto por la onda directa que llega por el aire, la cual se puede atenuar con una barrera acústica colocada entre ambos transductores (Castaings et al., 2001; Gosálbez et al., 2018) o por las reflexiones entre las caras de los transductores y el material a medir (Fan et al., 2016; Kim et al., 2016).

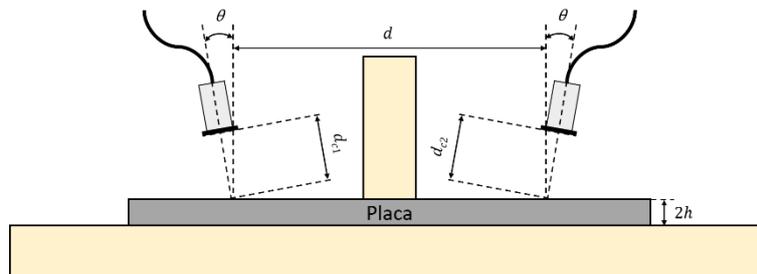


Figura 53. Acoplamiento por aire ("Figure 13", por Santiago Vázquez, Jorge Gosálbez, Ignacio Bosch, Alicia Carrión, Carles Gallardo y Jordi Payá, licencia bajo [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)) (Vázquez et al., 2019b).

Al igual que sucedía en inmersión, se suelen utilizar transductores específicos de acoplamiento por aire, con una capa de acoplamiento que posee una impedancia acústica cercana al aire (Hillger et al., 2012). Además, de nuevo las ondas que se detectan son *LLW* o *LRW* (Fan et al., 2018; Harb et al., 2015; In et al., 2009; Zhu et al., 2002).

Existen dos tipos de transductores de acoplamiento por aire: capacitivos y piezoeléctricos (Gómez, 2004; Gosálbez et al., 2018). Los transductores capacitivos suelen ofrecer un ancho de banda mayor que los piezoeléctricos (Castaings et al., 2001). En algunos trabajos se han utilizado micrófonos como sensores (In et al., 2009; Zhu et al., 2008). Sin embargo, las señales recibidas por acoplamiento por aire muestran una *SNR* baja debido a la alta atenuación presente en el aire (Hayashi et al., 2003; Hillger et al., 2012). Esta gran atenuación se debe principalmente a la gran diferencia entre la impedancia del aire y del cristal piezoeléctrico (Castaings et al., 2001; Gómez, 2004). Por tanto, se antoja necesario amplificar en las etapas de transmisión y recepción y realizar promediado de las señales recibidas (Hayashi et al., 2003; Kim et al., 2016). Además del problema de la baja *SNR*, existen modos que son difíciles de excitar y detectar con acoplamiento por aire, como el modo S_0 , por su desplazamiento radial en el plano o *in-plane displacement* (Castaings et al., 1996; Fan et al., 2016; Mažeika et al., 2009). No obstante, el modo A_0 se considera adecuado para la técnica de acoplamiento por aire debido a su gran desplazamiento fuera de plano u *out-of-plane displacement* (Castaings et al., 2001; Harb et al., 2015; Hayashi et al., 2003; Padiyar et al., 2011). Por otro lado, los transductores de acoplamiento por aire pueden ser sensibles al alineamiento (Castaings et al., 1996).

Otras técnicas sin contacto que se pueden aplicar son láser en transmisión y/o interferómetro láser en recepción (Harb et al., 2015; Schöpfer et al., 2013; Tsuyuki et al., 2006). Entre sus ventajas, se encuentra la posibilidad de medir directamente el desplazamiento de la superficie, el gran ancho de banda de la señal recibida (Popovics et al., 2010) y la alta reproducibilidad o repetitividad de sus resultados (Tsuyuki et al., 2006). Pese a que sí que hay trabajos donde se ha

⁴¹ Una velocidad de propagación en el aire típica es 343 m/s (Fan et al., 2018; Gosálbez et al., 2018).

utilizado este tipo de equipamiento en materiales cementicios (Kurahashi et al., 2013; Tsuyuki et al., 2006) el gran ancho de banda de una fuente láser no es recomendable en dichos materiales por su heterogeneidad (In et al., 2009), por la poca reflectividad que ofrece su habitualmente rugosa superficie⁴² (Kee et al., 2010; Kurahashi et al., 2013) y por su alto coste económico (Castaings et al., 1996).

Adicionalmente, existen configuraciones híbridas para la generación y recepción de ondas de Lamb: contacto-acoplamiento por aire (Hayashi et al., 2003), acoplamiento por aire-interferómetro láser (Harb et al., 2015), acoplamiento por agua-interferómetro láser (Jia, 1997) y/o contacto-interferómetro láser (Abraham et al., 2012).

Una opción que existe para identificar los modos generados por estas técnicas es contrastar⁴³ las curvas de dispersión teóricas y experimentales (Bezdek et al., 2012; Gómez-Ullate et al., 2006; Hayashi et al., 2003; Ryden et al., 2003; Shelke et al., 2011). En el siguiente apartado, se detallan como obtener las curvas de dispersión experimentales mediante técnicas de procesado de señal.

3.5. Procesado de señal - Representación de ondas de Lamb

Las curvas de dispersión experimentales se pueden obtener con distintos procesados de señal y distintas técnicas. Es complicado medir las velocidades de fase y grupo en el dominio del tiempo debido a la presencia de múltiples modos, por lo que se suele acudir al dominio de la frecuencia para obtenerlas (Edalati et al., 2005; Schöpfer et al., 2013).

Las curvas de velocidad de fase c_f (o número de onda k) experimentales se pueden obtener a partir de la transformada de Fourier en 2 dimensiones o *two-dimensional fast Fourier Transform (2D-FFT)* (Alleyne et al., 1991; Khalili et al., 2016). Este método requiere la adquisición de distintas ondas equiespaciadas que se pueden adquirir desplazando el transmisor (Alleyne et al., 1991) o el receptor (Hayashi et al., 2003) a lo largo de la placa. Con esta técnica, la identificación de modos de manera individual es posible (Moll et al., 2010). En la Figura 54, se muestra un diagrama de número de onda k con respecto a la frecuencia, generado a partir de las señales de 50 receptores equiespaciados de un experimental simulado, donde se transmite con un ángulo adecuado para la excitación del modo fundamental simétrico S_0 . Se combina en la misma figura tanto el mapa de k vs frecuencia obtenido mediante el procesado de la *2D-FFT* (imagen de fondo en tonos amarillos y verdes) como las curvas de dispersión teóricas de k (curvas rojas). Se puede comprobar que el modo S_0 se excita adecuadamente, ya que existe una buena correspondencia entre el nivel de señal de la *2D-FFT* (en amarillo) y la curva teórica del modo S_0 (curva discontinua roja).

⁴² Se suele utilizar cinta metálica adhesiva (Abraham et al., 2012; Popovics et al., 2010) para mejorar la reflectividad de las superficies de materiales.

⁴³ Al contrastar o solapar las curvas de dispersión teóricas con experimentales se también se pueden obtener distintos parámetros, como las velocidades de onda S y/o Rayleigh, el coeficiente de Poisson, el módulo de Young y el espesor de la placa (Y. H. Lee et al., 2016b; Ryden et al., 2003).

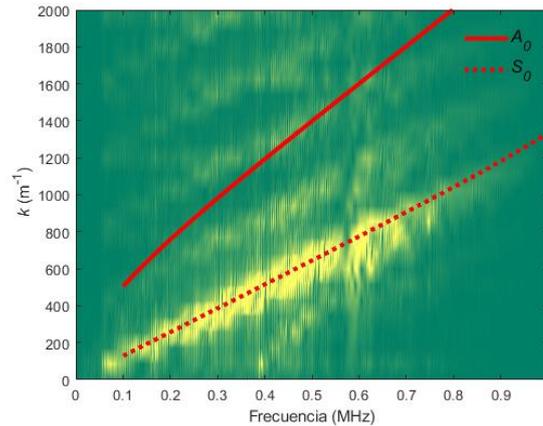


Figura 54. Ejemplo de curvas de dispersión experimentales de número de onda k vs frecuencia obtenido de la 2D-FFT.

Aparte de la 2D-FFT, otras técnicas que requieren el desplazamiento del transmisor o receptor para obtener las velocidades de fase se puede encontrar en (Grondel et al., 1999). Otro procedimiento para medir las curvas de dispersión de velocidad de fase experimentales es variando la inclinación de los transductores y recibiendo las distintas señales. A cada señal recibida se le aplica la transformada de Fourier o *Fourier transform (FT)*, y de cada FT se obtienen los picos o valles para construir las curvas de velocidad de fase experimentales (Balasubramaniam et al., 1991; Ghosh et al., 1998a; Kim et al., 2002; R. Zhang et al., 2001) (ver Figura 48). Se recomienda un sistema automatizado para modificar los ángulos del transmisor y/o del receptor (Harb et al., 2015; Kim et al., 2002; Vázquez et al., 2019a). Las curvas de dispersión de velocidad de grupo experimentales se pueden construir a partir de representaciones tiempo-frecuencia o *time-frequency representations (TFR)* de las señales recibidas, como la transformada de Fourier de tiempo reducido o *short-time Fourier transform (STFT)*, la transformada *wavelet* o *wavelet transform (WT)*, el escalograma, la distribución Wigner-Ville o la transformada *chirplet* (Kuttig et al., 2006; Niethammer et al., 2001; Prosser et al., 1999; Zima et al., 2015). Estas técnicas requieren una única señal recibida (Rose, 2014), lo cual es muy práctico y consume menos tiempo que las técnicas de velocidades de fase anteriores⁴⁴. Sin embargo, las TFR presentan problemas debido al principio de incertidumbre de Heisenberg, lo que hace imposible tener simultáneamente una resolución perfecta tanto en tiempo como en frecuencia (Niethammer et al., 2001; Shelke et al., 2011).

En este trabajo, se ha decidido trabajar con el espectrograma. Es una técnica de procesamiento de señal que, con la ayuda de una ventana deslizante, selecciona un número de muestras determinado de una señal temporal y aplica la FT a dichas muestras. El proceso se repite a lo largo de la señal para, finalmente, obtener una TFR que muestra la energía del contenido frecuencial de la señal con respecto al tiempo (Rose, 2014).

A partir del espectrograma se han obtenido las curvas de velocidad de grupo experimentales. Esta técnica se ha utilizado ampliamente en estudios previos de ondas de Lamb (Baid et al., 2015; Bezdek et al., 2012; Shelke et al., 2011; K. Xu et al., 2012), y permite identificar los diferentes modos de ondas de Lamb (Rose, 2014). La STFT de una señal se calcula a partir de su expresión (Benz et al., 2003; Niethammer et al., 2001):

⁴⁴ Las velocidades de grupo también se pueden obtener desplazando el transmisor o el receptor (Harb et al., 2015; Kim et al., 2002; Mei et al., 2020).

$$S(f, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau)h(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (50)$$

Donde $h(t)$ representa la señal de enventanamiento para el recorte temporal de $s(t)$. El espectrograma representa la densidad espectral de energía o *energy density spectrum* de una STFT y su ecuación es

$$E(f, t) = |S(f, t)|^2 \quad (51)$$

Si se utiliza una señal de banda ancha (como la señal *chirp*), se pueden excitar distintos modos en un rango de frecuencia amplio y con una sola señal (Gómez-Ullate et al., 2006; Shelke et al., 2011), lo cual implica obtener un único espectrograma⁴⁵. No obstante, existen trabajos donde se realiza una variación o barrido frecuencial mediante señales de banda estrecha (como las señales *burst*) (J. Chen et al., 2010; Ray et al., 2015; Rose, 2014; Safaeinili et al., 1996a). Pese a que excitar con señales de banda estrecha requiere más tiempo, la energía inyectada es mayor en cada frecuencia de excitación (McGovern et al., 2016; Michaels et al., 2013; Vázquez et al., 2019a).

En esta tesis, se han realizado barridos frecuenciales con distintas señales sinusoidales tipo *burst*, cuya ecuación es (Genovés et al., 2015b):

$$x_n(t) = A \sin(2\pi f_n t) \cdot \text{rect}\left(\frac{t - N_c/2f_n}{N_c/f_n}\right) \quad (52)$$

Donde A es la amplitud de la señal, f_n es la frecuencia de excitación, N_c es el número de ciclos y $\text{rect}(t)$ es la función rectángulo centrado en cero y de ancho unidad. El número de ciclos N_c con el que se ha trabajado en esta tesis son 5 y 10 ciclos, valores habituales en la bibliografía.

Estas señales *burst* se han emitido a las placas y por cada señal recibida, se ha obtenido un espectrograma. Todos estos espectrogramas se han combinado en uno sólo, de ahora en adelante denominado espectrograma combinado (Bezdek et al., 2012; Rose, 2014).

La velocidad de grupo se puede obtener a partir de los espectrogramas, ya que esta velocidad de grupo también se define como el cociente entre la distancia de propagación y el tiempo de vuelo del ultrasonido en la placa. Por lo que del eje de tiempos del espectrograma, la velocidad de grupo experimental se puede calcular como (Ecuación (53)) (Grondel et al., 1999; K. I. Lee et al., 2004; Sharma et al., 2014)

$$c_g = \frac{d}{t - t_c - t_{cal}} \quad (53)$$

Donde t_{cal} es el tiempo de calibración obtenido al enfrentar los transductores y t_c es el retardo aproximado producido en el medio acoplante, el cual se puede obtener de las siguientes relaciones (Ecuación (54))

$$t_c = t_{c1} + t_{c2} = \frac{d_{c1}}{c} + \frac{d_{c2}}{c} = \frac{d_c}{c} \quad (54)$$

Donde t_{c1} y t_{c2} son los tiempos de vuelo de la señal ultrasónica cuando viaja por el medio acoplante del transmisor a la placa y de la placa al receptor, respectivamente; d_{c1} y d_{c2} son las

⁴⁵ Esto supone también entrar en regiones no dispersivas y dispersivas (siendo esto último un problema, como se ha explicado anteriormente).

distancias de propagación del transmisor a la placa y de la placa al receptor, respectivamente, y d_c es la suma de ambas distancias d_{c1} y d_{c2} . Siempre que sea posible, esas distancias se recomiendan que sean mayores o iguales a la distancia de campo cercano N (ver ecuación (24)) para trabajar en campo lejano (Gosálbez et al., 2018; Jia, 1997; Rajana et al., 1995).

Como se ha explicado anteriormente, si los transductores están muy cerca de la placa, se producen reflexiones indeseadas entre la cara del transductor y la placa. Sin embargo, en algunos trabajos esta distancia se ajusta acorde a la amplitud recibida (Ghosh et al., 1998a) o a la repetitividad del experimento (Sharma et al., 2014), obteniendo buenos resultados. Otra solución para evitar el cálculo de distancias es utilizar medidas de velocidad de fase (Alleyne et al., 1991; Ghosh et al., 1998a; Kim et al., 2002).

En cada experimental, los transductores y el medio acoplante influyen en la amplitud y en el dominio frecuencial de las señales recibidas. Al analizar el dominio frecuencial, se observan las frecuencias donde el modo de Lamb excitado presenta un mayor nivel de señal, es decir, las frecuencias donde el modo de Lamb es más sensible. Para este fin, se han obtenido las curvas de sensibilidad del sistema o *system sensitivity curves* (SSC) (Greve et al., 2005; Vázquez et al., 2019b). El diagrama que representa la construcción de las SSC y del espectrograma combinado se encuentra en la Figura 55. El proceso para la construcción de ambos procesados es el siguiente:

- 1) Se inspecciona una placa para la excitación y detección de ondas de Lamb. Se transmiten una serie de señales sinusoidales *burst* de diferentes frecuencias: f_1, f_2, \dots, N_f , donde N_f es el número de frecuencias de excitación.
- 2) Se reciben las ondas de Lamb que se han excitado en la placa y se obtienen las transformadas de Fourier (FT) y los espectrogramas (mediante la transformada de Fourier de tiempo reducido o STFT) de dichas señales. También se obtienen las FT de las señales transmitidas.
- 3) Para construir el espectrograma combinado, se extrae una porción de cada espectrograma simple⁴⁶ que incluya la frecuencia de excitación y se normaliza dicha porción por la propia frecuencia de excitación. Las porciones se representan en la Figura 55 mediante rectángulos de líneas discontinuas blancas en los espectrogramas simples $E_1(f, t)$ y $E_{N_f}(f, t)$. Por tanto, un espectrograma combinado está formado por N_f porciones de espectrogramas simples obtenidos de N_f señales recibidas.
- 4) Las SSC se construyen a partir de los valores absolutos de las FT de las señales recibidas $(|Y_1(f_1)|, |Y_2(f_2)|, \dots, |Y_{N_f}(f_{N_f})|)$ y transmitidas $(|X_1(f_1)|, |X_2(f_2)|, \dots, |X_{N_f}(f_{N_f})|)$ mediante la ecuación (55). Los valores absolutos se representan en la Figura 55 mediante círculos azules sobre las cuatro FT, $|Y_1|$, $|Y_{N_f}|$, $|X_1|$ y $|X_{N_f}|$. Dichas curvas sirven para destacar la región de interés del espectrograma combinado, es decir, aquellas frecuencias donde el modo excitado presenta una mayor SNR. En la SSC de ejemplo de la Figura 55, existe un mayor nivel de señal entre $f_{mín}$ y $f_{máx}$, por lo que el espectrograma combinado se analiza en ese rango frecuencial, es decir, entre las dos líneas verticales discontinuas negras que unen el espectrograma combinado y la SSC. Se han difuminado las zonas tanto

⁴⁶ Se les ha denominado espectrogramas simples para poder diferenciarlos del espectrograma combinado.

de los espectrogramas simples como del espectrograma combinado que no son de interés.

$$SSC(f_n) = \frac{|Y_n(f_n)|}{|X_n(f_n)|} \quad (55)$$

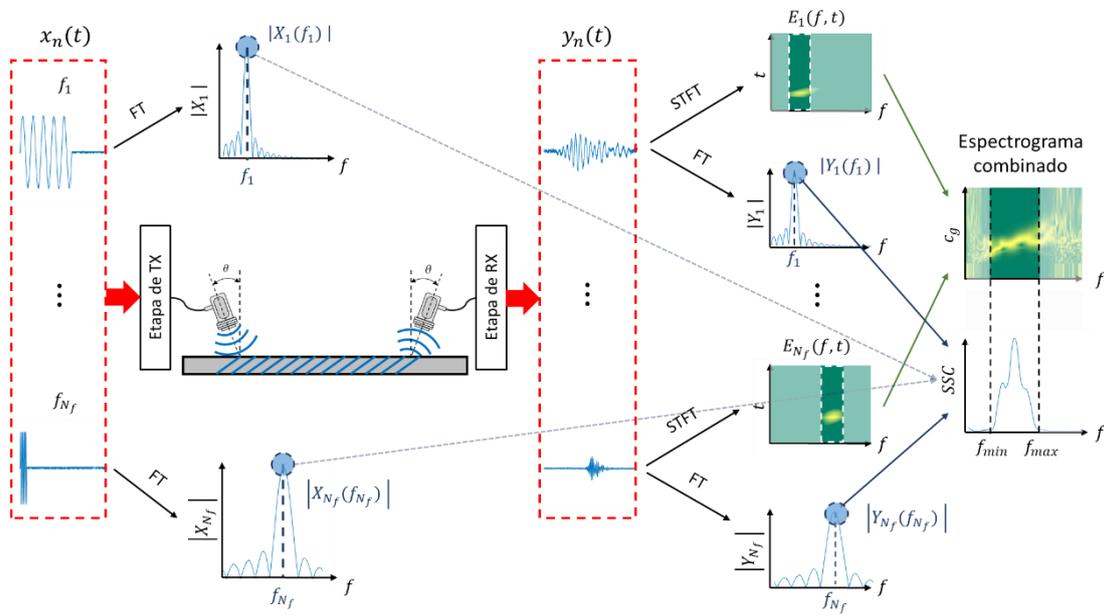


Figura 55. Diagrama de generación del espectrograma combinado y de las curvas de sensibilidad del sistema (SSC). Las etapas de transmisión (TX) y recepción (RX) incluyen parte del equipamiento empleado en el experimental (amplificadores, generador de señal, osciloscopio, etc.) (Vázquez et al., 2019b).

3.6. Conclusiones

En este capítulo se han desarrollado las ondas guiadas de Rayleigh y las ondas de Lamb, que son las más utilizadas en materiales cementicios. Se han expuesto las características principales de cada onda (ecuaciones, tipos de desplazamiento, aplicaciones prácticas, etc.), especialmente de las ondas de Lamb. Se han presentado las curvas de dispersión, las distintas técnicas de acoplamiento que utilizan la incidencia oblicua como base (cuñas sólidas, agua y aire) y las técnicas de procesamiento de señal más utilizadas a la hora de representar las ondas de Lamb.

4. Medidas experimentales

En este capítulo, se realizan medidas experimentales con diferentes configuraciones de acoplamiento en placas de distintos materiales para la excitación y recepción de modos de Lamb, en especial de los modos fundamentales A_0 y S_0 . Se seleccionan placas metálicas debido a su homogeneidad, a su estructura tipo placa, a su alta velocidad y a su espesor reducido, aspectos que facilitan la identificación de los diferentes modos. Las técnicas de acoplamiento utilizadas en dichas placas son: acoplamiento por cuñas sólidas, acoplamiento por agua (inmersión total o de forma localizada mediante contenedores cónicos y globos) y acoplamiento por aire (mediante transductores piezoeléctricos y capacitivos). Remarcar que a las curvas empíricas obtenidas en los experimentales se les han solapado las curvas teóricas para verificar la correcta excitación de los modos. Por último y como resultado de este capítulo, se identifican y optimizan los métodos de generación y detección de ondas guiadas para trasladarlos a la inspección de placas de materiales cementicios, concretamente mortero gris y tablas de cemento reforzadas con fibras de vidrio (GRC).

4.1. Introducción

Una vez revisada la teoría de las ondas de Lamb, los modos existentes y el comportamiento de dichas ondas, en este capítulo se han inspeccionado distintos tipos de materiales mediante diferentes técnicas de acoplamiento que permiten la incidencia oblicua, concretamente acoplamiento por cuñas sólidas, acoplamiento por agua y acoplamiento por aire, para la generación y detección de los modos de dichas ondas, en especial los modos fundamentales A_0 y S_0 .

Para la generación y detección de dichos modos, a partir de las curvas de dispersión de ángulos del material a inspeccionar, se ha elegido un ángulo fijo en transmisión y recepción para un rango frecuencial determinado. Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos del material en cuestión y los ángulos elegidos indican los modos de Lamb que se deben de excitar. El rango frecuencial se ha controlado mediante la emisión de N_f señales sinusoidales burst de $N_c = 5$ y 10 ciclos de diferentes frecuencias (f) (dependiendo de la frecuencia central de los transductores utilizados y su ancho de banda)⁴⁷. No obstante, también se han utilizado señales de banda ancha como las señales *chirp* (Figura 56 (b)). En la Figura 56 (c) se observa la diferencia entre la *FT* de una señal sinusoidal *burst* y la *FT* de una señal *chirp* emitidas durante un experimental.

⁴⁷ En otros casos, ese rango frecuencial viene dado por señales *chirp*, que presentan un gran ancho de banda en comparación a las señales sinusoidales *burst*.

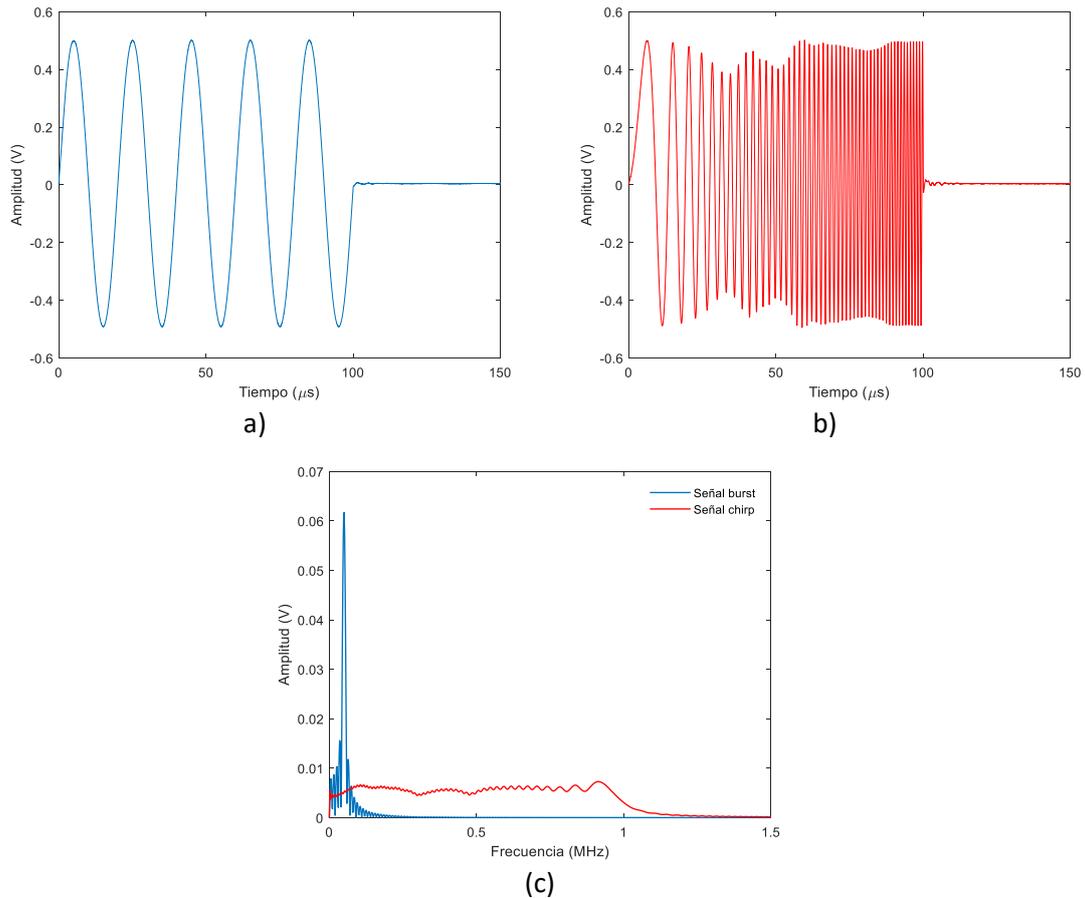


Figura 56. (a) Ejemplo de señal burst; (b) Ejemplo de señal chirp; (c) Ejemplo de FT de señal burst y señal chirp.

Al realizar el barrido frecuencial mediante la inyección de N_f señales sinusoidales *burst*, a cada una de las N_f señales recibidas (relativa a una frecuencia transmitida) se le ha aplicado el espectrograma mediante la función *spectrogram* de MATLAB (*Spectrogram*, n.d.) que presenta los siguientes parámetros de entrada:

- Ventana de tipo *Hamming*, de duración temporal w calculada mediante la Ecuación (56)

$$w = \frac{N_c}{f} \quad (56)$$

Donde N_c es el número de ciclos y f una de las frecuencias excitadas. Todos los espectrogramas simples que forman el espectrograma combinado presentan el mismo tamaño de ventana. Algunos de los valores de ventana utilizados son $10 \mu s$, $20 \mu s$ y $40 \mu s$.

- Frecuencia de muestreo de la señal recibida f_s . Algunos de los valores de f_s utilizados son 10 MHz, 25 MHz y 50 MHz.
- Número de muestras de solapamiento entre las secciones enventanadas, el cual se ha calculado mediante un porcentaje. Se ha utilizado un valor de 75 %.
- Número de puntos de la FT aplicada en cada sección enventanada de la señal. Se ha utilizado un valor de 2^{14} .

El espectrograma combinado, resultado de combinar los distintos espectrogramas simples obtenidos de las señales recibidas (ver “Procesado de señal - Representación de ondas de Lamb”) representa en realidad las curvas de dispersión de velocidad de grupo experimentales.

A dichas curvas experimentales se les han superpuesto las curvas de velocidad de grupo teóricas para identificar los modos generados de ondas de Lamb en cada una de las distintas técnicas de acoplamiento empleadas. Una buena correspondencia entre las curvas teóricas y experimentales implica una generación y detección de modos exitosa.

Como se ha expuesto en el apartado “Procesado de señal - Representación de ondas de Lamb”, las curvas de sensibilidad de cada sistema (SSC) se han incluido junto al tándem curvas teóricas más curvas experimentales para resaltar el rango frecuencial donde existe un nivel de señal relevante. Las frecuencias mínima y máxima de las SSC se han marcado mediante dos líneas verticales negras discontinuas y se han difuminado las áreas donde el nivel de señal es muy reducido. Como criterio, se han situado en las frecuencias donde la amplitud de la SSC cae un 90 % con respecto a su máximo. Las SSC se pueden construir a partir de señales de banda estrecha y señales de banda ancha y los resultados son muy similares, como se observa en la Figura 57.

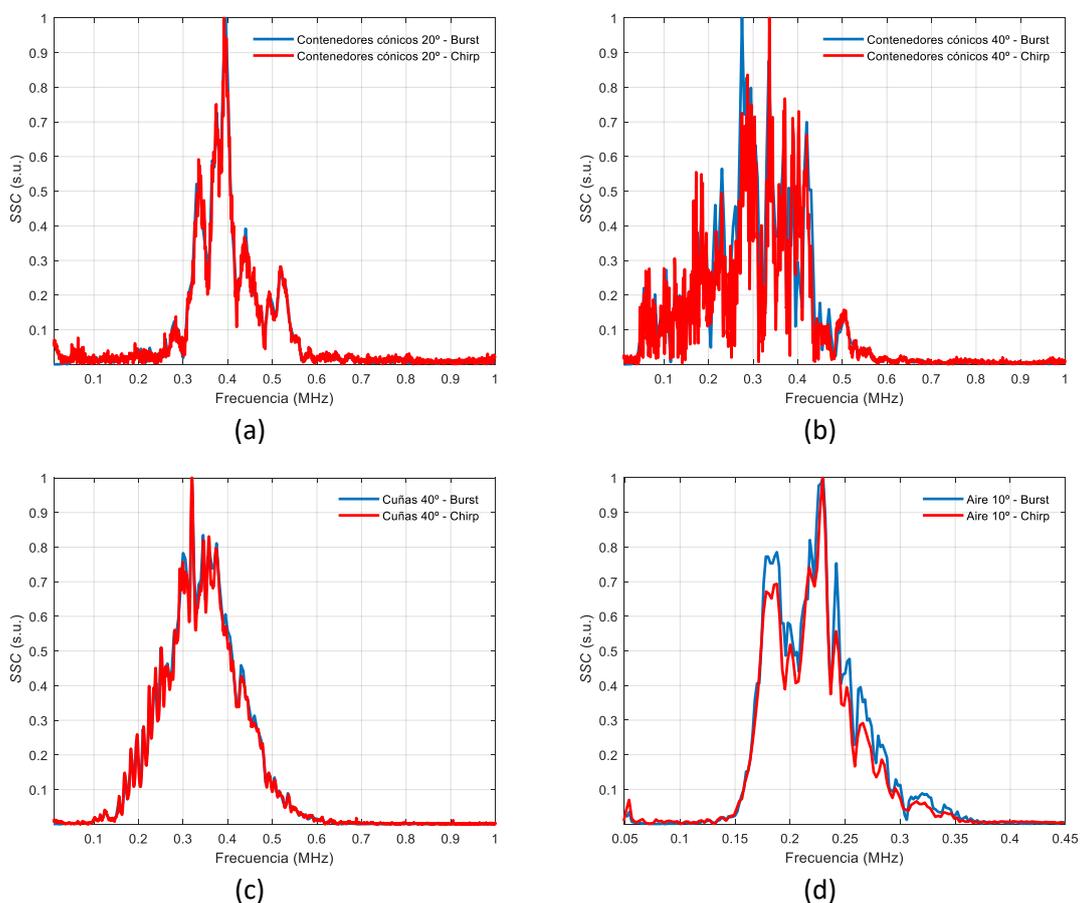


Figura 57. Comparación entre SSC construidas con burst y chirp: (a) Medidas de contenedores cónicos a 20°; (b) Medidas de contenedores cónicos a 40°; (c) Medidas de cuñas a 40°; (d) Medidas de acoplamiento por aire a 10°.

Nótese que la SSC construida con una señal *chirp* es en realidad la *FT* de la señal recibida, mientras que la SSC construida con señales *burst* está compuesta de los valores de las *FT* de N_f señales recibidas. Este hecho implica una reducción de los tiempos de adquisición de señales y procesado (Genovés et al., 2016).

Para que la comparación entre las curvas teóricas y experimentales sea lo más precisa posible, es de suma importancia que los parámetros involucrados en ambos tipos de curvas se obtengan de la forma más precisa posible, especialmente en materiales heterogéneos como los materiales cementicios. Esto obliga, por un lado, a tener precisión en las medidas para obtener las

velocidades de las ondas P y S que se emplean para generar las curvas de dispersión teóricas. Por otro lado, también se necesita precisión en los parámetros empleados durante las medidas experimentales para que las diferencias entre los resultados experimentales y teóricos no sean atribuibles al procedimiento de medida. Algunos de esos parámetros son:

- Ángulos en transmisión (TX), θ
- Ángulo en recepción (RX), θ
- Distancia entre el transmisor (TXOR) y la placa, d_{c1}
- Distancia entre receptor (RXOR) y la placa, d_{c2}
- Distancia de propagación por la placa, d
- Velocidad de onda P de la placa, c_P
- Velocidad de onda S de la placa, c_S
- Espesor de la placa, $2h$

En cada experimental se han detallado los parámetros geométricos, de equipamiento y de postprocesado. Los transductores se han colocado en una configuración *pitch-catch*, la mayoría sujetos por piezas construidas con impresora 3D o con pinzas especiales (Pinzas Triplex, VidraFOC). Los transductores se han separado lo suficiente de los bordes de las placas para retrasar las reflexiones y evitar interferencias con los modos generados (Greve et al., 2005; Schaal et al., 2015).

Un transductor actúa como emisor (izquierda) y otro como receptor (derecha) (Figura 58). Para mantener las condiciones de superficie libre de las placas (Deán et al., 2009; Gómez-Ullate, 2007; Shelke et al., 2011) se ha colocado una base de material aislante, poliestireno expandido o *expanded polystyrene (EPS)*, en todos los montajes.

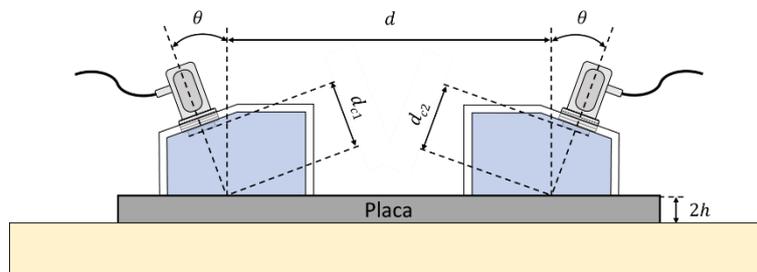


Figura 58. Ejemplo de montaje experimental de ondas de Lamb.

Se ha diseñado un sistema para poder controlar las distancias y los ángulos en cada experimental. Las distancias se han medido con un calibre, mientras que la inclinación de los transductores se ha medido mediante un inclinómetro formado por una placa de Arduino (Figura 59 (a)) (Mega 2560, Arduino) y dos acelerómetros (MPU-6050, Invensense) (Figura 59 (b)).

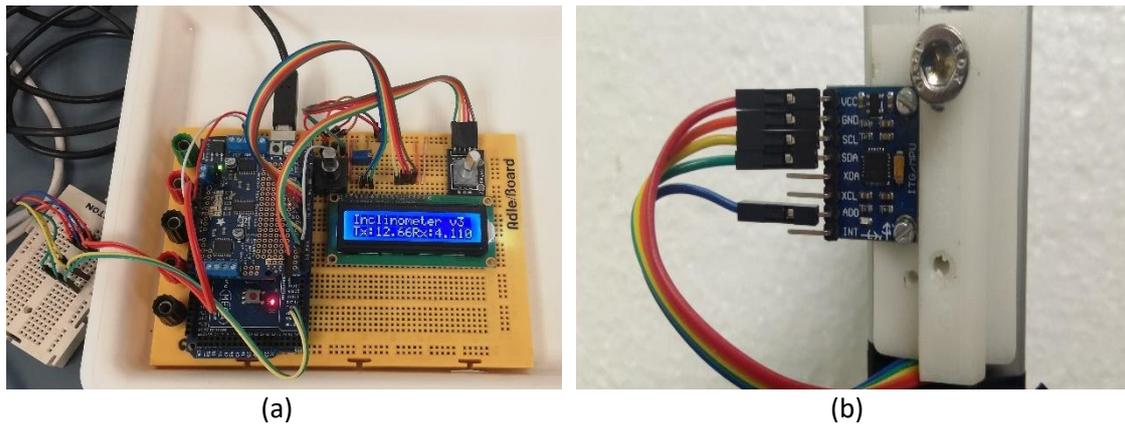


Figura 59. (a) Placa de Arduino; (b) Acelerómetro.

Los generadores de funciones y osciloscopios utilizados en los experimentales se han controlado desde un ordenador portátil, mediante una interfaz gráfica de usuario o *Graphical User Interface (GUI)* programada en lenguaje MATLAB y desarrollada por el grupo de investigación (Carrión et al., 2018) (ver Figura 60).

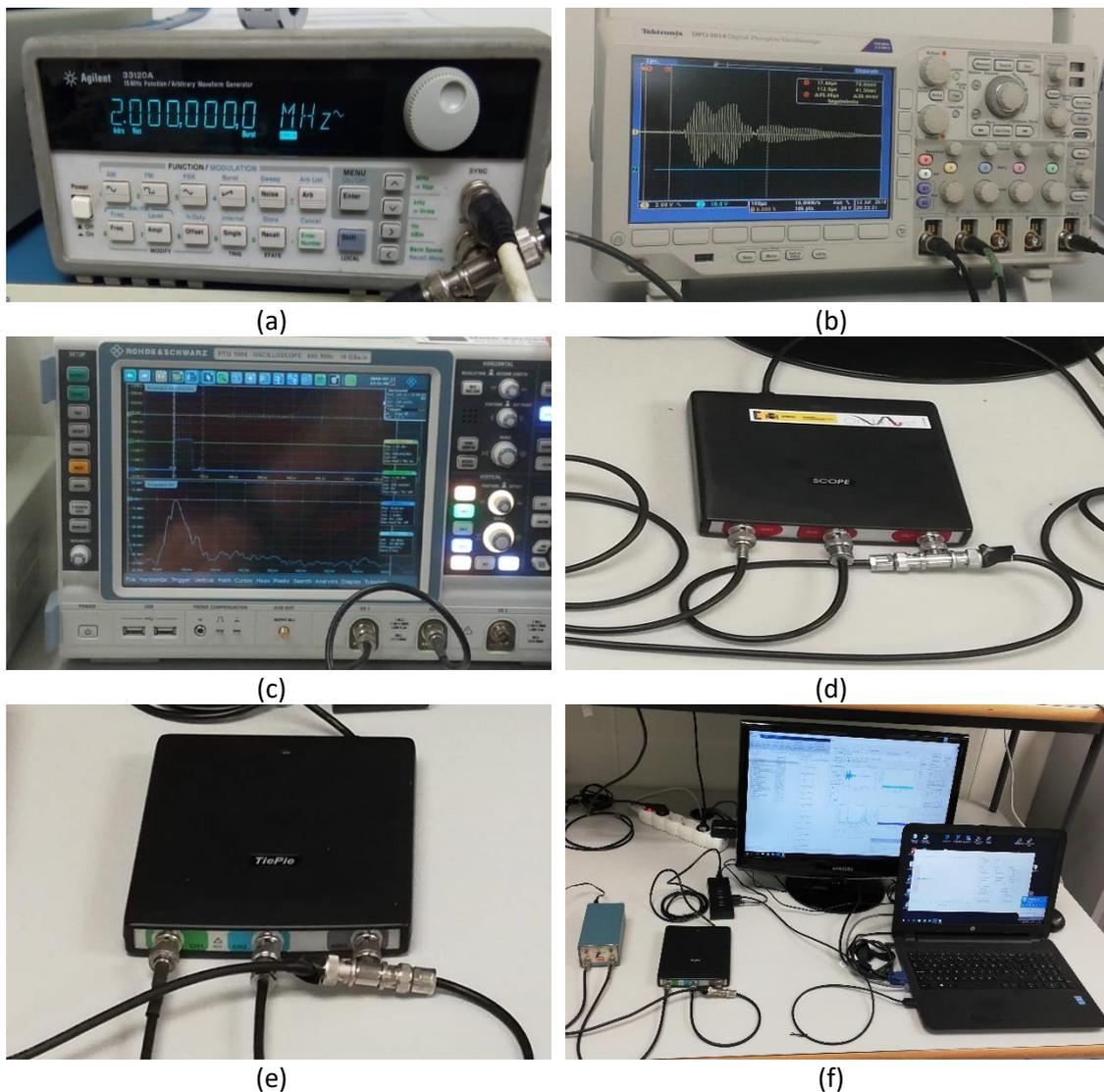


Figura 60. (a) Generador de funciones Agilent 33120A; (b) Osciloscopio DPO3014; (c) Osciloscopio Rohde RTO 1004; (d) Generador de funciones más osciloscopio programable Handyscope HS5; (e) Generador de funciones más osciloscopio programable Handyscope HS5; (f) Ejemplo de control del HS5 mediante la GUI de MATLAB.

Se ha tenido especial cuidado en la elección del voltaje de las señales emitidas para evitar problemas de saturación de las señales recibidas (Figura 61). El rango vertical de los osciloscopios se han ajustado a la amplitud máxima para evitar una pobre cuantificación de las señales (Zhu et al., 2011a).

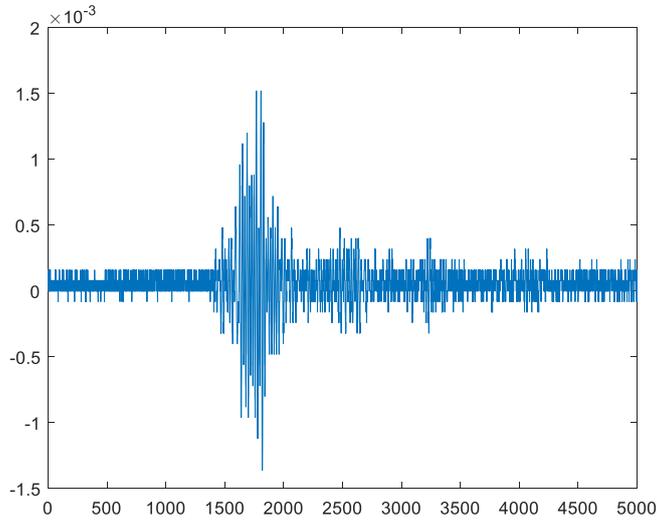
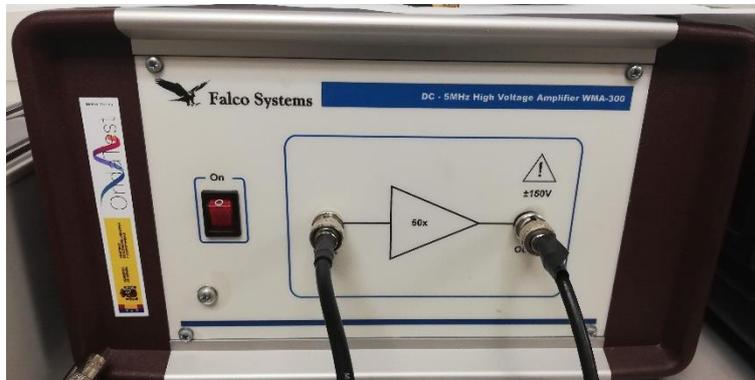


Figura 61. Ejemplo de señal pobremente cuantificada.

Se han utilizado amplificadores en las etapas de transmisión y recepción cuando ha sido conveniente (Figura 62). Habitualmente se utilizan en experimentales de ondas de Lamb.



(a)



(b)



(c)

Figura 62. Amplificadores utilizados: (a) WMA-300, Falco Systems (transmisión); (b) AMPLUS-32, Dasel Sistemas (recepción); (c) 5660C, Panametrics (recepción).

El acoplamiento eléctrico (Greve et al., 2008; Jain et al., 2002) y otros efectos indeseados (como reflexiones o la contribución directa que llega por el agua o aire) se han eliminado de las señales en la etapa de postprocesado (Figura 63).

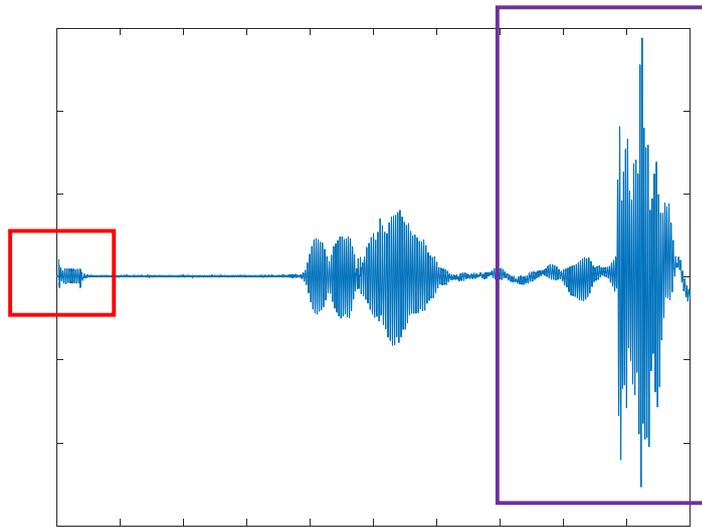


Figura 63. Señal con acoplamiento eléctrico (recuadro rojo) y contribución directa entre el transmisor y el receptor que llega por el agua (recuadro morado).

A modo de resumen, en la Tabla 1 se muestran los materiales y las técnicas de acoplamiento planteadas en las medidas experimentales.

Tabla 1. Materiales y tecnologías de acoplamiento aplicadas en las medidas experimentales.

	Materiales homogéneos			Materiales heterogéneos				
	Acero inoxidable	Aluminio anodizado	Aluminio	Mortero				GRC
	1 mm	2 mm	2 mm	2.5 mm	5 mm	7.5 mm	13 mm	16 mm
Transductores de cuña de plexiglás	✓	✓						
Inmersión completa	✓	✓						
Contenedores cónicos de agua	✓				✓			✓
Globos de agua	✓							
Transductores acoplados por aire	✓		✓	✓	✓	✓		✓
Cuñas de agua de 40°				✓	✓	✓	✓	

4.2. Medidas experimentales en materiales homogéneos

En este apartado, se han realizado medidas experimentales sobre placas metálicas para obtener las curvas de dispersión experimentales. Las placas metálicas se han inspeccionado con las técnicas de acoplamiento por cuñas de plexiglás, acoplamiento por agua mediante inmersión completa de la placa o acoplamiento localizado mediante elementos (contenedores cónicos, globos) y acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos y capacitivos.

4.2.1. Introducción y materiales empleados

Los materiales homogéneos que se han inspeccionado han sido acero inoxidable, aluminio anodizado y aluminio. Los datos principales de dichos materiales metálicos se reúnen en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos de las placas metálicas

Parámetros	Acero inoxidable	Aluminio anodizado	Aluminio
Dimensiones (longitud x ancho x espesor) (mm ³)	530 x 27 x 1	600 x 40 x 2	500 x 500 x 2
Velocidad de onda P c_P (m/s)	5851	6320	6320
Velocidad de onda S c_S (m/s)	3056	3130	3130

Las dimensiones de las placas se han medido con un calibre y flexómetro. Remarcar que teóricamente la dimensión del espesor de la placa tendría que ser mucho menor que la dimensión de ancho. Ahora bien, en (F. Li et al., 2009; Shelke et al., 2011; Singh et al., 2007) se demuestra que se obtienen buenos resultados en la generación y recepción de ondas de Lamb a pesar de no cumplir de forma estricta esta condición. Las velocidades de onda P y onda S del acero inoxidable y del aluminio anodizado se han obtenido de ("Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers", 2010; Shelke et al., 2011; Waltisberg et al., 2008) y no se han medido experimentalmente porque no se podían garantizar la propagación de varias longitudes de onda a lo largo del espesor de las placas. Pese a haberse obtenido los valores de velocidad de la bibliografía y no experimentalmente, se han obtenido buenas coincidencias al contrastar las curvas teóricas con las curvas experimentales (espectrograma combinado).

La generación de ondas de Lamb en placas metálicas se ha llevado a cabo con las siguientes técnicas de acoplamiento: acoplamiento por cuñas de plexiglás, acoplamiento por agua mediante inmersión, contenedores cónicos y globos y por último acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos y capacitivos.

4.2.2. Acoplamiento por cuñas sólidas

El esquema y la fotografía del montaje experimental de contacto directo con cuñas de plexiglás en placas metálicas se encuentra en la Figura 64.

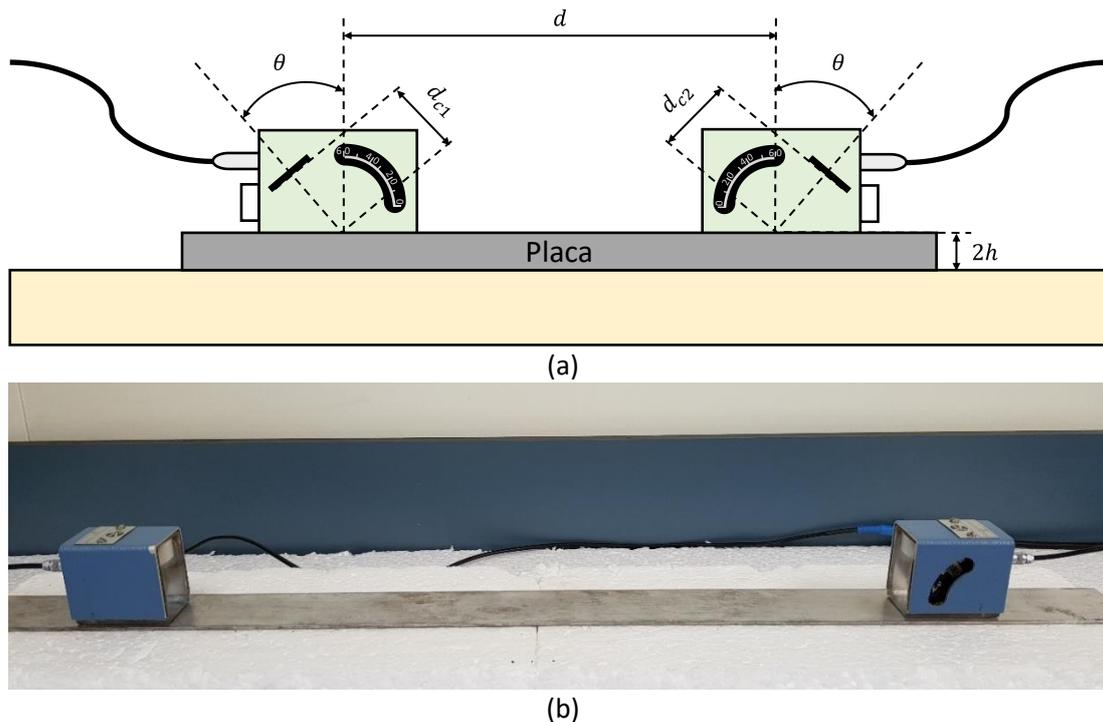


Figura 64. Acoplamiento por cuñas de plexiglás: (a) Esquema; (b) Fotografía (“Figure 5”, por [Santiago Vázquez](#), Jorge Gosálbez, Ignacio Bosch, Alicia Carrión, Carles Gallardo y Jordi Payá, licencia bajo [CC BY 4.0](#))(Vázquez et al., 2019b).

Se han utilizado una pareja de transductores de onda P de ángulo variable (MUBW 2N, Krautkramer) de frecuencia central f_c igual a 2 MHz tanto para la excitación como para la detección de ondas de Lamb en las placas de acero inoxidable y aluminio anodizado. El elemento activo de estos transductores (9 mm de largo x 8 mm de ancho) se encuentra dentro de la cuña de plexiglás, cuya velocidad de onda P es de 2730 m/s. El ángulo de dichos transductores se puede variar con facilidad entre 0° y 60° . Para acoplar las cuñas de plexiglás a la placa y garantizar una transmisión adecuada de energía, se ha utilizado vaselina (Panreac) como acoplante.

4.2.2.1. Acero inoxidable

Los parámetros de este experimental están reflejados en la Tabla 3. El transmisor se ha excitado con señales sinusoidales *burst* de 10 ciclos mediante un generador de señal programable (33120A, Agilent Technologies). El rango frecuencial de las señales sinusoidales *burst* es de 1 MHz a 3 MHz, en incrementos de 20 kHz. Las señales recibidas se han amplificado 40 dB (5660C, Panametrics) y a continuación, se han adquirido mediante un osciloscopio digital (DPO3014, Tektronix) con una frecuencia de muestreo de 25 MHz (lo que implica un intervalo temporal de $400\mu s$), 10000 muestras y promediado cada 32 trazas.

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por plexiglás en la placa de acero inoxidable se representan en la Figura 65.

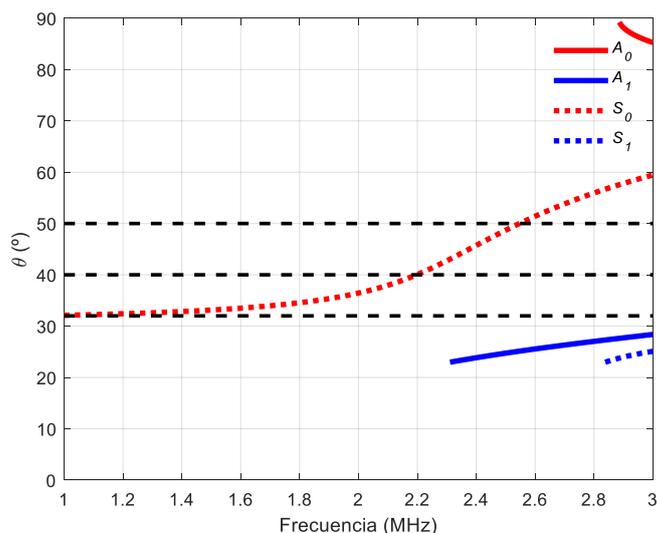


Figura 65. Curvas de ángulo para acoplamiento por cuñas de plexiglás en placa de acero inoxidable.

Los ángulos elegidos son 32° , 40° y 50° . Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y los ángulos elegidos son:

- En 32° se produce una intersección con el modo S_0 en 1 MHz, aunque entre 1 y 1.6 MHz la curva del modo S_0 presenta una tendencia constante (ángulos cercanos a 32°).
- En 40° se produce una intersección con el modo S_0 en 2.2 MHz.
- En 50° se produce una intersección con el modo S_0 en 2.55 MHz.

En teoría, el modo A_0 no se puede generar debido a que el ángulo máximo que alcanzan los transductores es de 60° y el rango angular teórico del modo A_0 (aproximadamente entre 85° y 90°) está muy alejado de ese ángulo. Además, el rango frecuencial del modo A_0 (aproximadamente entre 2.9 y 3 MHz) también se encuentra alejado de la f_c de 2 MHz de los transductores.

En la Figura 66, se han representado los espectrogramas combinados de velocidad de grupo para los ángulos elegidos junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y las SSC.

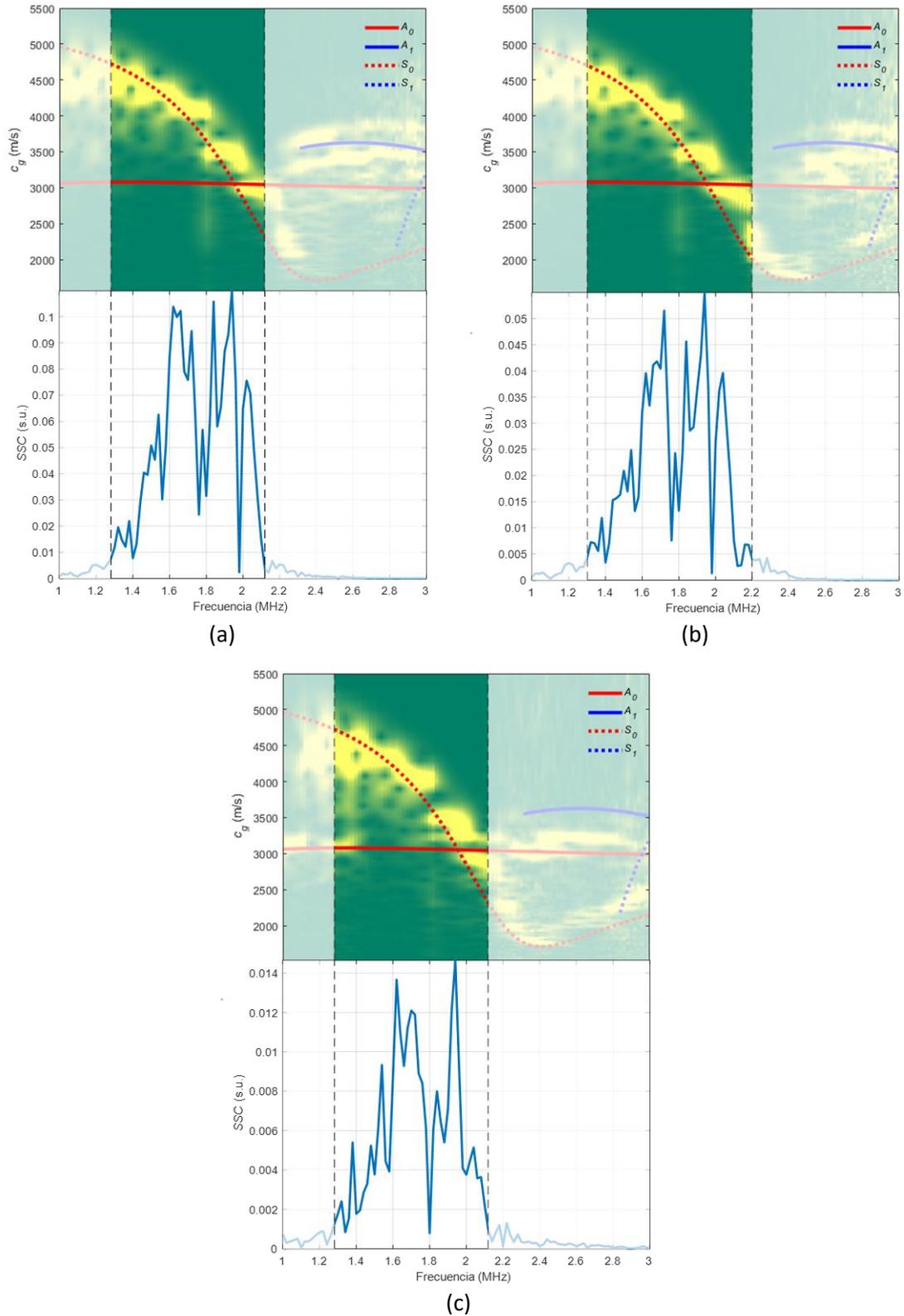


Figura 66. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por cuñas de plexiglás en placa de acero inoxidable: (a) 32° ; (b) 40° ; (c) 50° .

Los resultados para cada ángulo son:

- En 32°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo S_0 (curva discontinua roja) entre 1.28 y 2.12 MHz.
- En 40°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo S_0 entre 1.3 y 2.2 MHz.
- En 50°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo S_0 entre 1.28 y 2.12 MHz.

Tabla 3. Parámetros del experimental de acoplamiento por cuñas de plexiglás en placa de acero inoxidable.

Parámetros de la placa			
Material	Acero inoxidable		
Espesor	1 mm		
Parámetros geométricos			
Ángulo en transmisión, θ	32°	40°	50°
Ángulo en recepción, θ	32°	40°	50°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	14.2 mm	15.7 mm	18.7 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	14.2 mm	15.7 mm	18.7 mm
Distancia de propagación por la placa, d	455 mm	449.9 mm	441.4 mm
Parámetros del equipamiento			
Frecuencia inicial	1 MHz		
Frecuencia final	3 MHz		
Incremento frecuencial	20 kHz		
Número de frecuencias	101		
Frecuencia de muestreo, f_s	25 MHz		
Número de muestras	10000		
Intervalo temporal	400 μs		
Número de ciclos, N_c	10		
Amplitud, V_p	10 V		
Promediado	32		
Amplificación en transmisión (equipamiento)	-		
Amplificación en recepción (equipamiento)	40 dB (5660C)		
Generador de funciones	33120A		
Osciloscopio	DPO3014		
Transductores (frecuencia central, f_c)	MUBW-2N (2 MHz)		
Acoplante (velocidad si procede)	Vaselina		
Parámetros del postprocesado			
Ventana de espectrograma	10 μs		
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %		
Número de puntos de las FT de cada ventana	2^{14}		
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	500		
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0		
Rango frecuencial que marca la SSC	1.28-2.12 MHz	1.3-2.2 MHz	1.28-2.12 MHz

4.2.2.2. Aluminio anodizado

Los parámetros de este experimental están reflejados en la Tabla 4. A partir de la velocidad de onda P del plexiglás, se han obtenido las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para la placa de aluminio anodizado (Figura 67). Como las velocidades (onda P y onda S) y el espesor del material cambian respecto al acero inoxidable, se puede comprobar que tanto las curvas de ángulos como las de velocidad de grupo también cambian.

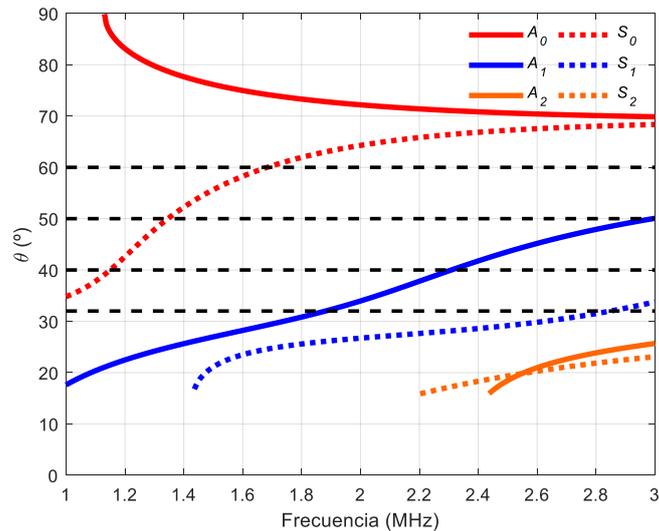


Figura 67. Curvas de ángulo para acoplamiento por cuñas de plexiglás en placa de aluminio anodizado.

Los ángulos elegidos son 32°, 40°, 50° y 60°. Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y los ángulos elegidos son:

- En 32° se produce una intersección con el modo A_1 en 1.88 MHz y con el modo S_1 en 2.85 MHz.
- En 40° se produce una intersección con el modo S_0 en 1.15 MHz y con el modo A_1 en 2.31 MHz.
- En 50° se produce una intersección con el modo S_0 en 1.35 MHz y con el modo A_1 en 2.99 MHz.
- En 60° se produce una intersección con el modo S_0 en 1.68 MHz.

En la Figura 68, se han representado los espectrogramas combinados de velocidad de grupo para los ángulos elegidos junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y las SSC.

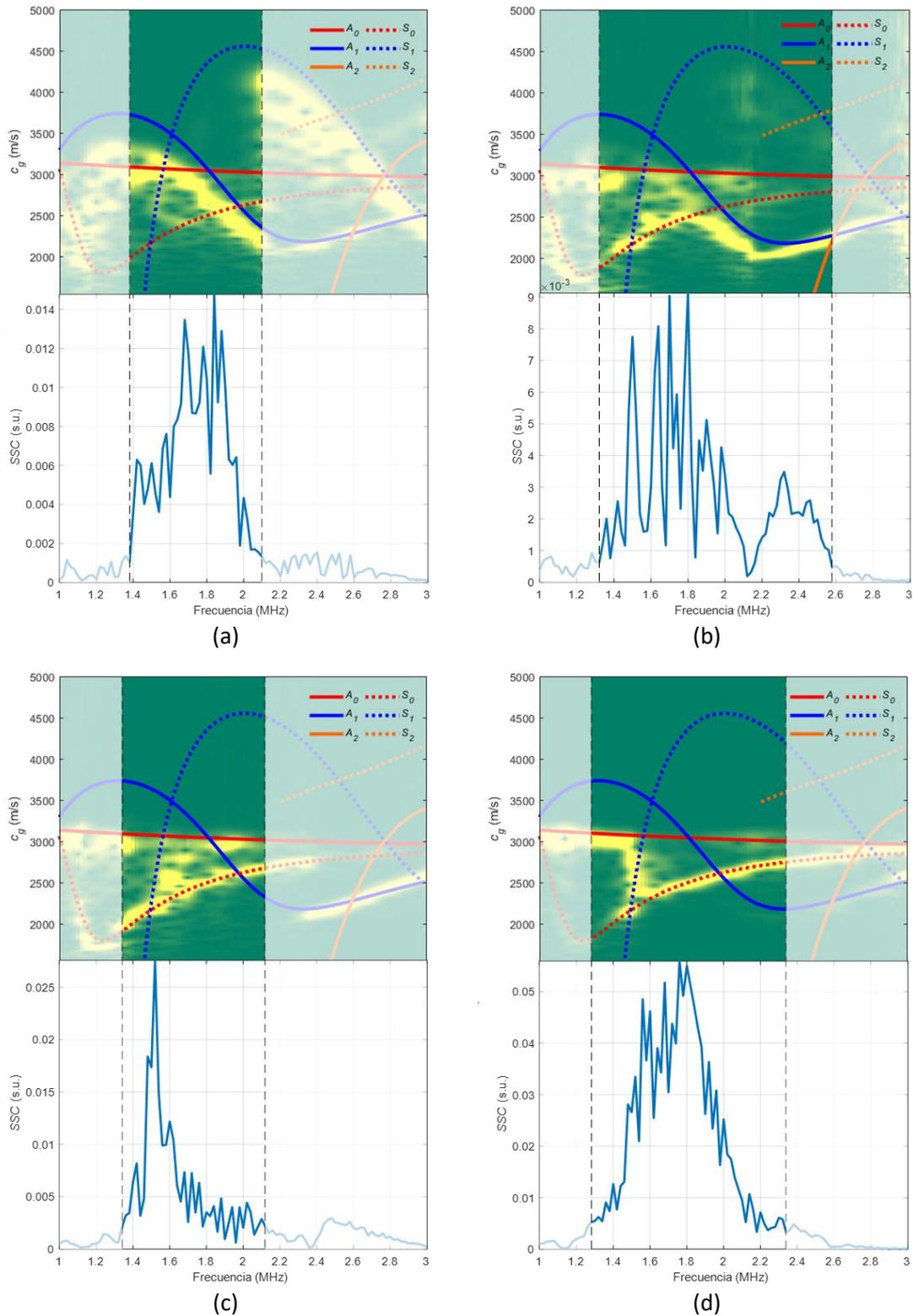


Figura 68. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por cuñas de plexiglás en placa de aluminio anodizado: (a) 32°; (b) 40°; (c) 50°; (d) 60°.

Los resultados para cada ángulo son:

- En 32°: Existe una correspondencia aproximada entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo A_1 (curva continua azul) entre 1.6 y 2.1 MHz.

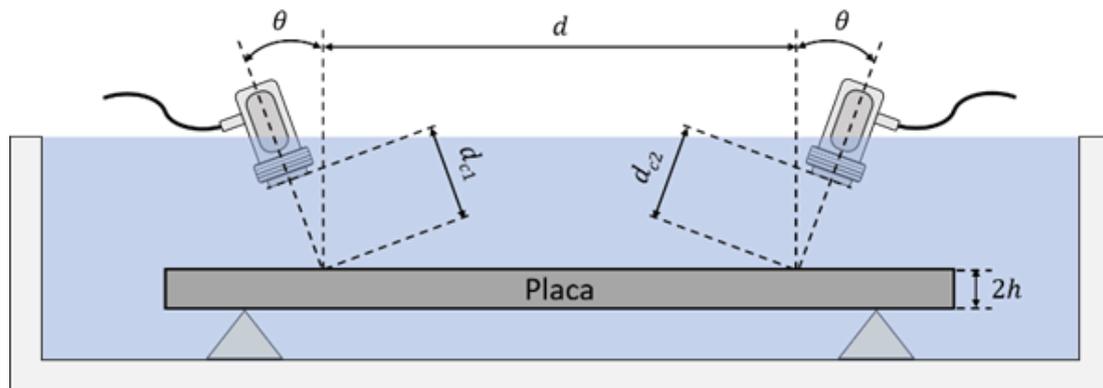
- En 40°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal del espectrograma combinado y la curva del modo S_0 (curva discontinua roja) entre 1.4 y 1.8 MHz y una buena correspondencia entre el nivel de señal del espectrograma combinado y la curva del modo A_1 entre 1.8 y 2.58 MHz.
- En 50°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva del modo S_0 entre 1.34 y 2.12 MHz.
- En 60°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva del modo S_0 entre 1.4 y 2.34 MHz.

Tabla 4. Parámetros del experimental de acoplamiento por cuñas de plexiglás en placa de aluminio anodizado.

Parámetros de la placa				
Material	Aluminio anodizado			
Espesor	2 mm			
Parámetros geométricos				
Ángulo en transmisión, θ	32°	40°	50°	60°
Ángulo en recepción, θ	32°	40°	50°	60°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	14.2 mm	15.7 mm	18.7 mm	24 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	14.2 mm	15.7 mm	18.7 mm	24 mm
Distancia de propagación por placa, d	455.0 mm	449.9 mm	441.4 mm	428.4 mm
Parámetros del equipamiento				
Frecuencia inicial	1 MHz			
Frecuencia final	3 MHz			
Incremento frecuencial	20 kHz			
Número de frecuencias	101			
Frecuencia de muestreo, f_s	25 MHz			
Número de muestras	10000			
Intervalo temporal	400 μs			
Número de ciclos, N_c	10			
Amplitud, V_p	10 V			
Promediado	32			
Amplificación en transmisión (equipamiento)	-			
Amplificación en recepción (equipamiento)	40 dB (5660C)			
Generador de funciones	33120A			
Osciloscopio	DPO3014			
Transductores (frecuencia central, f_c)	MUBW-2N (2 MHz)			
Acoplante (velocidad si procede)	Vaselina			
Parámetros del postprocesado				
Ventana de espectrograma	10 μs			
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %			
Número de puntos de las FT de cada ventana	2^{14}			
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	500			
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0			
Rango frecuencial que marca la SSC	1.38-2.1 MHz	1.32-2.58 MHz	1.34-2.12 MHz	1.28-2.34 MHz

4.2.3. Acoplamiento por agua mediante inmersión – Transductores de inmersión

El esquema y la fotografía del montaje experimental de inmersión mediante tanque de agua en placas metálicas se encuentra en la Figura 69.



(a)



(b)

Figura 69. Acoplamiento por agua mediante inmersión: (a) Esquema; (b) Fotografía (Vázquez et al., 2019b).

En esta configuración, la placa se encuentra sumergida en un tanque de agua, por lo que las ondas que se van a recibir no son ondas de Lamb puras, si no *leaky Lamb waves (LLW)*. La placa se ha elevado mediante dos bases de EPS para reducir las reflexiones del fondo del tanque (Sharma et al., 2014; Sharma et al., 2015). Para eliminar parte de la contribución directa que llega por el agua, se ha reducido la ventana temporal de adquisición. Esto último se ha conseguido aumentando la frecuencia de muestreo f_s y manteniendo constante el número de muestras. La velocidad de onda P en el agua es de 1490 m/s (Ghosh et al., 1998a; R. Zhang et al., 2001). En la técnica de inmersión se ha trabajado con transductores específicos de inmersión y con transductores de banda ancha de onda P.

Los transductores de inmersión utilizados son los A314S-SU, Olympus, Panametrics (Figura 70 (a)) con una frecuencia central f_c de 1 MHz y un diámetro del elemento activo de 18 mm para inspeccionar las placas de acero inoxidable y aluminio anodizado. Su curva de calibración se encuentra en la Figura 70 (b).

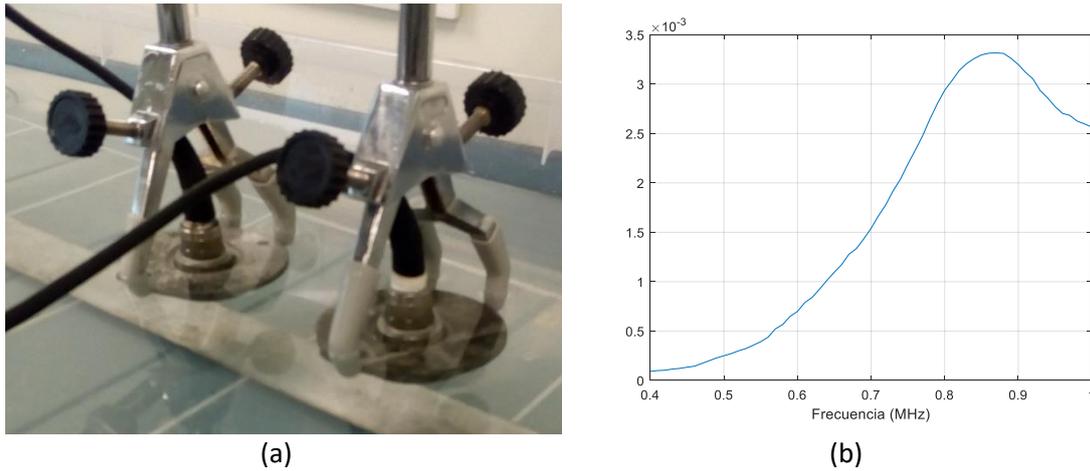


Figura 70. (a) Transductores de inmersión; (b) Curva de calibración de los transductores de inmersión.

4.2.3.1. Acero inoxidable

Los parámetros del experimental de inmersión para inspeccionar la placa de acero inoxidable están reflejados en la Tabla 5. El rango frecuencial de las señales sinusoidales *burst* es de 0.7 MHz a 1.5 MHz, en incrementos de 10 kHz. Las señales recibidas se han amplificado 32 dB (AMPLUS-32, Dasel Sistemas) y a continuación, se han adquirido mediante un osciloscopio digital (DPO3014, Tektronix) con una frecuencia de muestreo de 50 MHz, 10000 muestras (lo que implica un intervalo temporal de $200\mu s$) y promediado de 32 trazas.

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por agua en la placa de acero inoxidable se representan en la Figura 71.

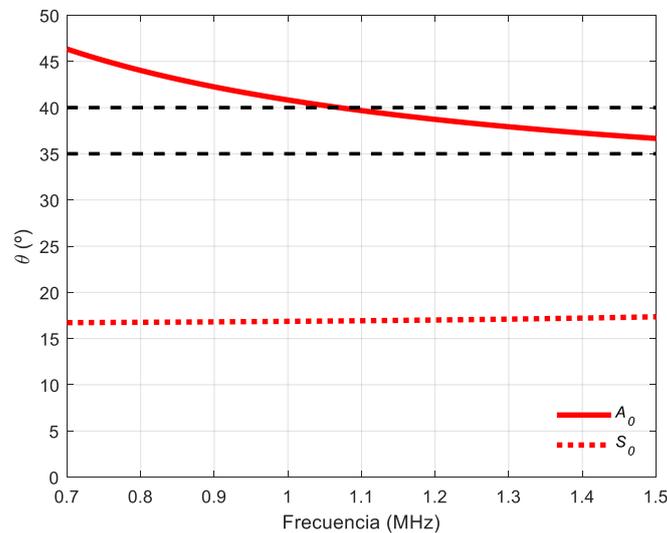


Figura 71. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de acero inoxidable (transductores de inmersión).

Los ángulos elegidos son 35° y 40° . Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y los ángulos elegidos son:

- En 35° no se produce ninguna intersección. Lo que puede suceder es que se excite el modo A_0 por ancho de haz.
- En 40° se produce una intersección con el modo A_0 en 1.07 MHz.

En la Figura 72, se han representado los espectrogramas combinados de velocidad de grupo para los ángulos elegidos junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y las SSC.

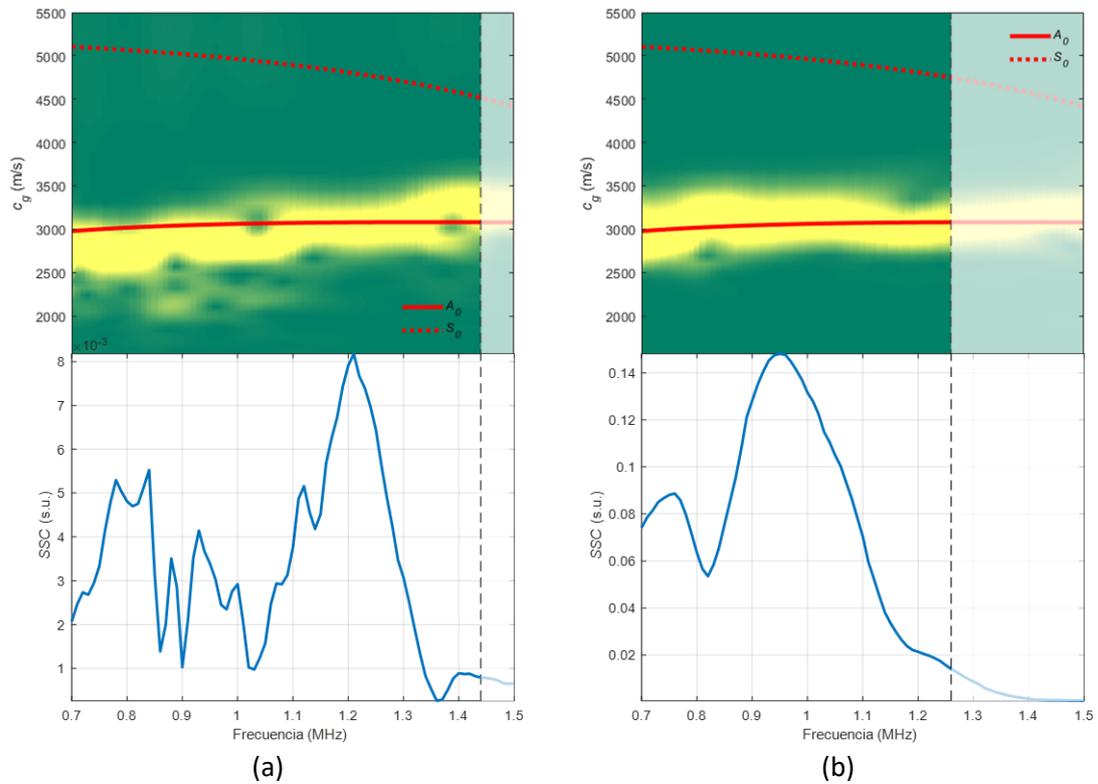


Figura 72. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante inmersión en placa de acero inoxidable (transductores de inmersión): (a) 35°; (b) 40°.

Los resultados para cada ángulo son:

- En 35°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 0.7 y 1.44 MHz.
- En 40°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo A_0 entre 0.7 y 1.26 MHz.

Tabla 5. Parámetros del experimental de acoplamiento por agua mediante inmersión en placa de acero inoxidable (transductores de inmersión).

Parámetros de la placa		
Material	Acero inoxidable	
Espesor	1 mm	
Parámetros geométricos		
Ángulo en transmisión, θ	35°	40°
Ángulo en recepción, θ	35°	40°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	61 mm	65.3 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	61 mm	65.3 mm
Distancia de propagación por la placa, d	175 mm	
Parámetros del equipamiento		
Frecuencia inicial	0.7 MHz	
Frecuencia final	1.5 MHz	
Incremento frecuencial	10 kHz	
Número de frecuencias	81	
Frecuencia de muestreo, f_s	50 MHz	
Número de muestras	10000	
Intervalo temporal	200 μs	
Número de ciclos, N_c	10	
Amplitud, V_p	10 V	
Promediado	32	
Amplificación en transmisión (equipamiento)	-	
Amplificación en recepción (equipamiento)	32 dB (AMPLUS-32)	
Generador de funciones	33120A	
Osciloscopio	DPO3014	
Transductores (frecuencia central, f_c)	A314S-SU (1 MHz)	
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)	
Parámetros del postprocesado		
Ventana de espectrograma	10 μs	
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %	
Número de puntos de las FT de cada ventana	2^{14}	
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	1000	
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0	
Rango frecuencial que marca la SSC	0.7-1.44 MHz	0.7-1.26 MHz

4.2.3.2. Aluminio anodizado

En cuanto a la inspección de la placa de aluminio anodizado mediante inmersión, los parámetros del experimental están reflejados en la Tabla 6. El rango frecuencial de las señales sinusoidales *burst* es de 0.5 a 1.5 MHz, en incrementos de 20 kHz.

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por agua en la placa de aluminio anodizado se representan en la Figura 73.

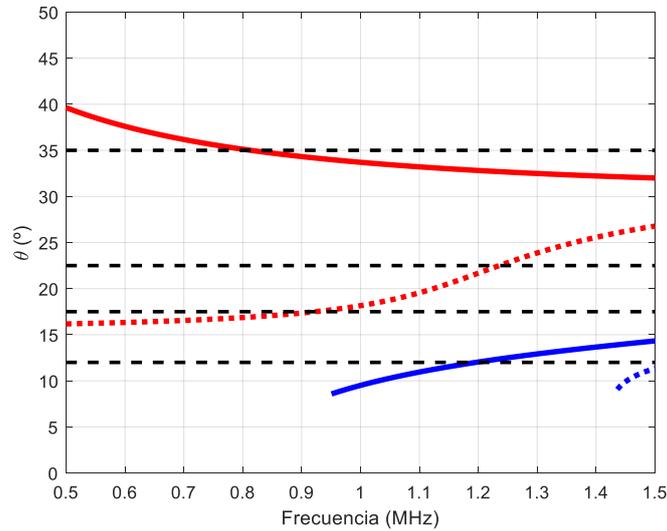


Figura 73. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de aluminio anodizado (transductores de inmersión).

Los ángulos elegidos son 12° , 17.5° , 22.5° y 35° . Se producen distintas intersecciones entre las curvas de ángulos y los ángulos elegidos, concretamente:

- En 12° se produce una intersección con el modo A_1 en 1.2 MHz.
- En 17.5° se produce una intersección con el modo S_0 en 0.92 MHz.
- En 22.5° se produce una intersección con el modo S_0 en 1.24 MHz.
- En 35° se produce una intersección con el modo A_0 en 0.81 MHz.

En la Figura 74, se han representado los espectrogramas combinados de velocidad de grupo para los ángulos elegidos junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y las SSC.

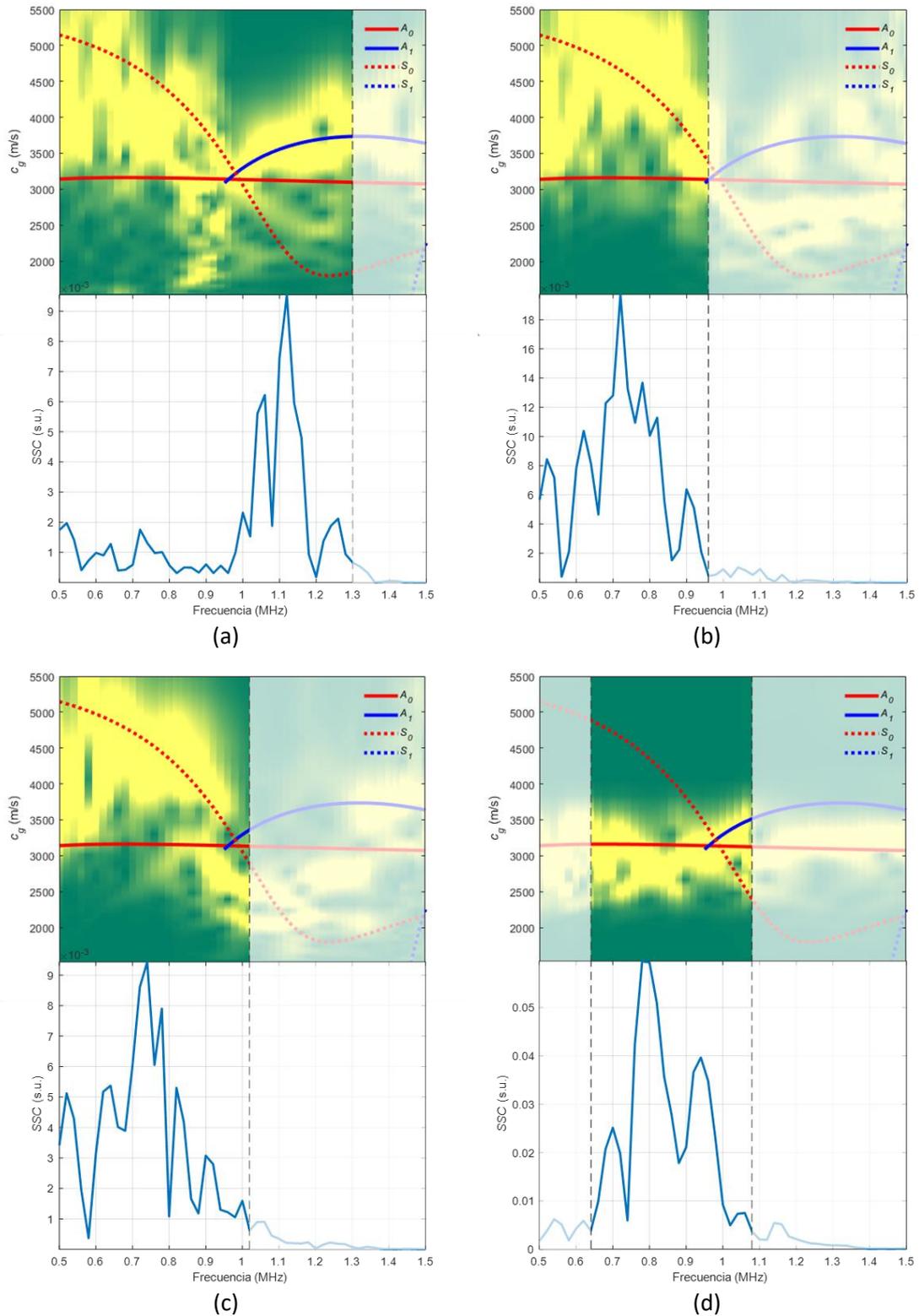


Figura 74. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante inmersión en placa de aluminio anodizado (transductores de inmersión): (a) 12°; (b) 17.5°; (c) 22.5°; (d) 35°.

Los resultados para cada ángulo son:

- En 12°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo A_1 (curva continua azul) entre 0.96 y 1.3 MHz.

- En 17.5°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo S_0 (curva discontinua roja) entre 0.5 y 0.96 MHz.
- En 22.5°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo S_0 entre 0.5 y 0.96 MHz.
- En 35°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 0.64-1.02 MHz.

Tabla 6. Parámetros del experimental de acoplamiento por agua mediante inmersión en placa de aluminio anodizado (transductores de inmersión).

Parámetros de la placa				
Material	Aluminio anodizado			
Espesor	2 mm			
Parámetros geométricos				
Ángulo en transmisión, θ	12°	17.5°	22.5°	35°
Ángulo en recepción, θ	12°	17.5°	22.5°	35°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	61 mm			
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	61 mm			
Distancia de propagación por la placa, d	175 mm			
Parámetros del equipamiento				
Frecuencia inicial	0.5 MHz			
Frecuencia final	1.5 MHz			
Incremento frecuencial	20 kHz			
Número de frecuencias	51			
Frecuencia de muestreo, f_s	50 MHz			
Número de muestras	10000			
Intervalo temporal	200 μs			
Número de ciclos, N_c	10			
Amplitud, V_p	10 V			
Promediado	32			
Amplificación en transmisión (equipamiento)	-			
Amplificación en recepción (equipamiento)	32 dB (AMPLUS-32)			
Generador de funciones	33120A			
Osciloscopio	DPO3014			
Transductores (frecuencia central, f_c)	A314S-SU (1 MHz)			
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)			
Parámetros del postprocesado				
Ventana de espectrograma	10 μs			
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %			
Número de puntos de las FT de cada ventana	2^{14}			
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	1000			
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0			
Rango frecuencial que marca la SSC	0.5-1.3 MHz	0.5-0.96 MHz	0.5-1.02 MHz	0.64-1.08 MHz

4.2.4. Acoplamiento por agua mediante inmersión – Transductores de banda ancha

Se han utilizado una pareja de transductores de banda ancha de onda P (K2SC, General Electric, Figura 75 (a)) con una frecuencia central f_c de 2 MHz y un diámetro del elemento activo de 24 mm para inspeccionar la placa de acero inoxidable. La curva de calibración de dichos transductores se encuentra en la Figura 75 (b).

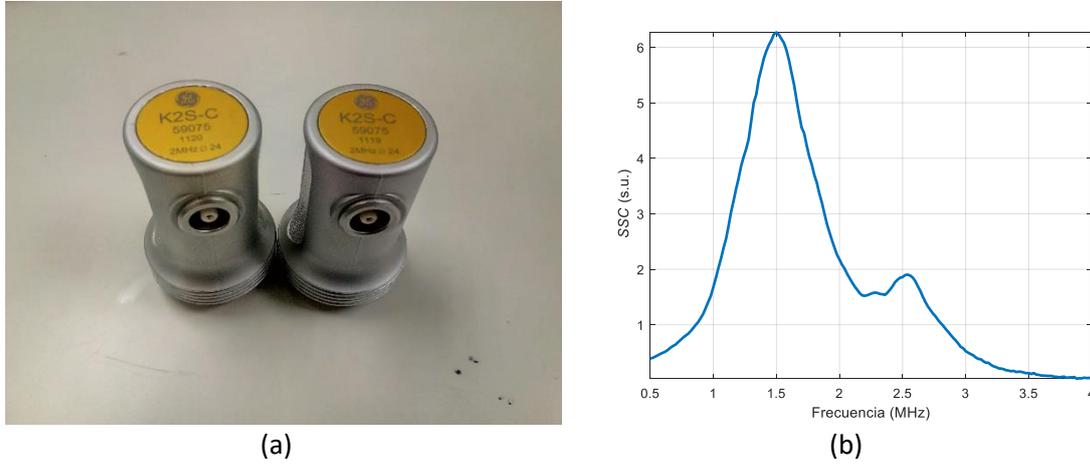


Figura 75. (a) Transductores K2SC; (b) Curva de calibración de los transductores K2SC.

Los parámetros del experimental de inmersión para inspeccionar la placa de acero inoxidable están reflejados en la Tabla 7. El rango frecuencial de las señales sinusoidales *burst* es de 1 MHz a 3 MHz, en incrementos de 20 kHz. Las señales recibidas se han amplificado 40 dB (5660C, Panametrics).

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por agua en la placa de acero inoxidable se representan en la Figura 76. Son las mismas curvas que aparecen en la Figura 71, salvo que en este caso están representadas en un rango frecuencial mayor debido a que la frecuencia central de los transductores de banda ancha (2 MHz) es mayor que la frecuencia central de los transductores de inmersión (1 MHz). Se puede comprobar la gran diferencia existente entre estas curvas de ángulo donde el medio acoplante es agua (Figura 76) respecto a las curvas de ángulo donde el medio acoplante es plexiglás (Figura 65).

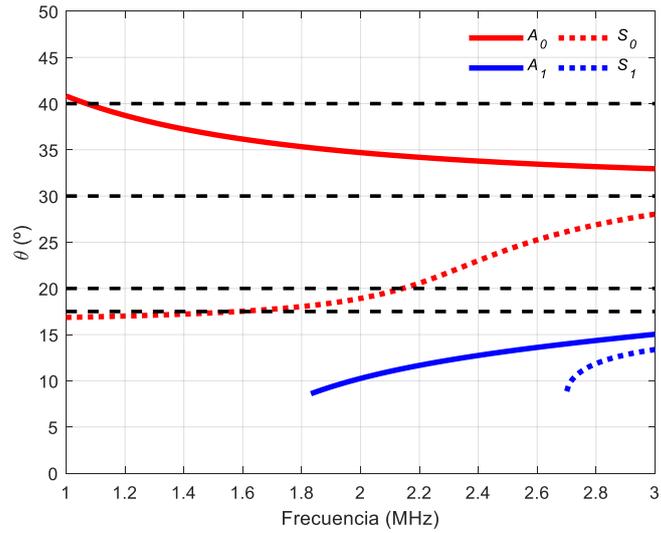


Figura 76. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de acero inoxidable (transductores de banda ancha).

Los ángulos elegidos son 17.5° , 20° , 30° y 40° . Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y los ángulos elegidos son:

- En 17.5° se produce una intersección con el modo S_0 en 1.58 MHz.
- En 20° se produce una intersección con el modo S_0 en 2.14 MHz.
- En 30° no se produce ninguna intersección. Lo que puede suceder es que se exciten tanto el modo S_0 como el A_0 (Ren et al., 2017; Safaeinili et al., 1996a, 1996b).
- En 40° se produce una intersección con el modo A_0 en 1.07 MHz.

En la Figura 77, los espectrogramas combinados de velocidad de grupo para los ángulos elegidos se representan junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y las SSC.

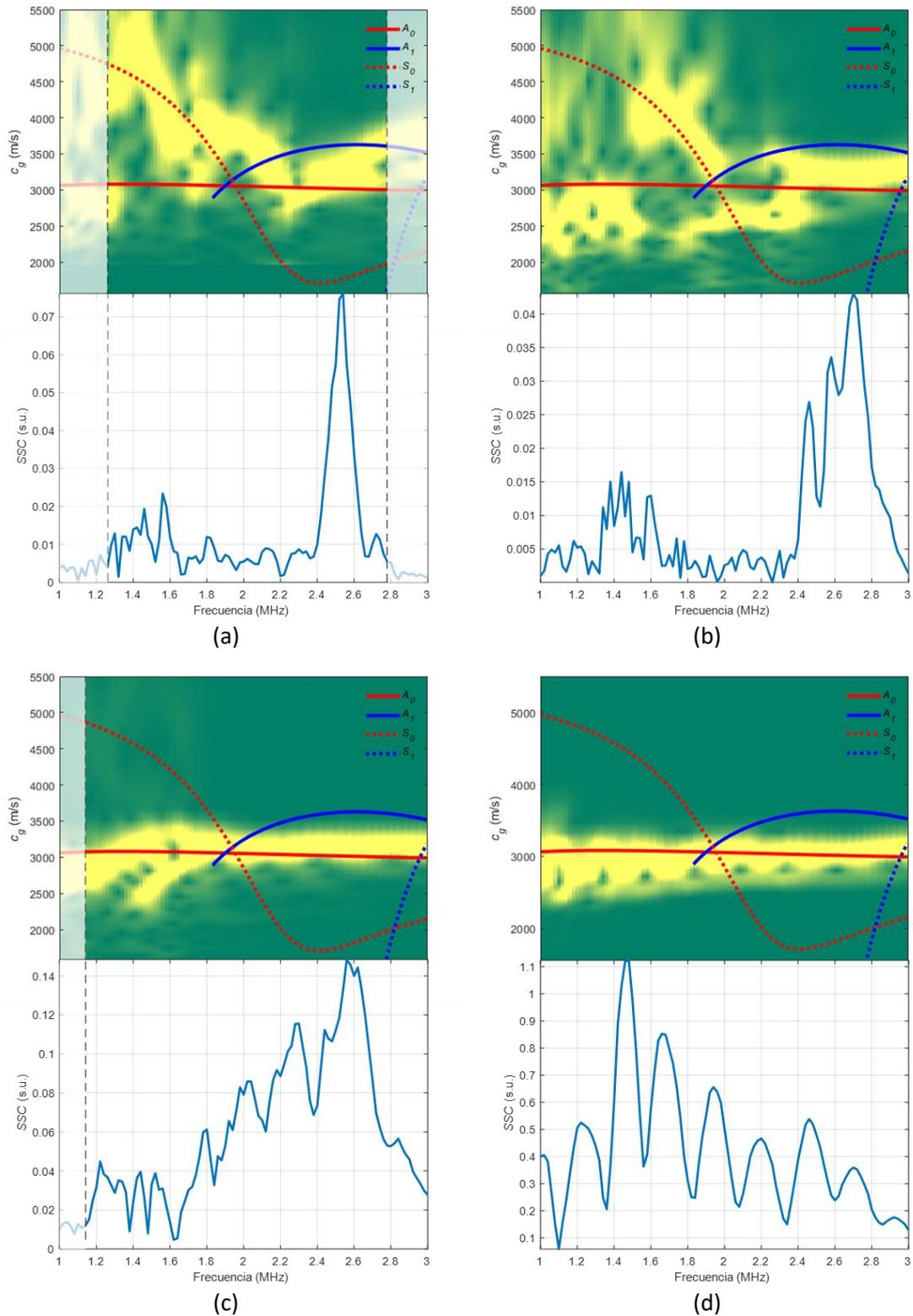


Figura 77. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante inmersión en placa de acero inoxidable (transductores de banda ancha): (a) 17.5°; (b) 20°; (c) 30°; (d) 40°.

Los resultados para cada ángulo son:

- En 17.5°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo S_0 (curva discontinua roja) entre 1.26 y 1.85 MHz.

- En 20°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo S_0 entre 1.5 y 1.9 MHz y entre 2 y 2.1 MHz.
- En 30°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 1.14 y 3 MHz.
- En 40°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo A_0 entre 1 y 3 MHz.

Tabla 7. Parámetros del experimental de acoplamiento por agua mediante inmersión en placa de acero inoxidable (transductores de banda ancha).

Parámetros de la placa				
Material	Acero inoxidable			
Espesor	1 mm			
Parámetros geométricos				
Ángulo en transmisión, θ	17.5°	20°	30°	40°
Ángulo en recepción, θ	17.5°	20°	30°	40°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	45 mm			55 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	45 mm			55 mm
Distancia de propagación por la placa, d	130 mm	120 mm		110 mm
Parámetros del equipamiento				
Frecuencia inicial	1 MHz			
Frecuencia final	3 MHz			
Incremento frecuencial	20 kHz			
Número de frecuencias	101			
Frecuencia de muestreo, f_s	50 MHz			
Número de muestras	10000			
Intervalo temporal	200 μs			
Número de ciclos, N_c	10			
Amplitud, V_p	10 V			
Promediado	32			
Amplificación en transmisión (equipamiento)	-			
Amplificación en recepción (equipamiento)	40 dB (5660C)			
Generador de funciones	33120A			
Osciloscopio	DPO3014			
Transductores (frecuencia central, f_c)	K2SC (2 MHz)			
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)			
Parámetros del postprocesado				
Ventana de espectrograma	5 μs			
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %			
Número de puntos de las FT de cada ventana	2 ¹⁴			
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	1000			
Muestras eliminadas por otras causas (final)	3500	3000	2000	1000
Rango frecuencial que marca la SSC	1.26-2.78 MHz	1-3 MHz	1.14-3 MHz	1-3 MHz

4.2.5. Acoplamiento por agua mediante contenedores cónicos

El esquema y la fotografía del montaje experimental de contenedores cónicos rellenos de agua en placas metálicas se encuentra en la Figura 78.

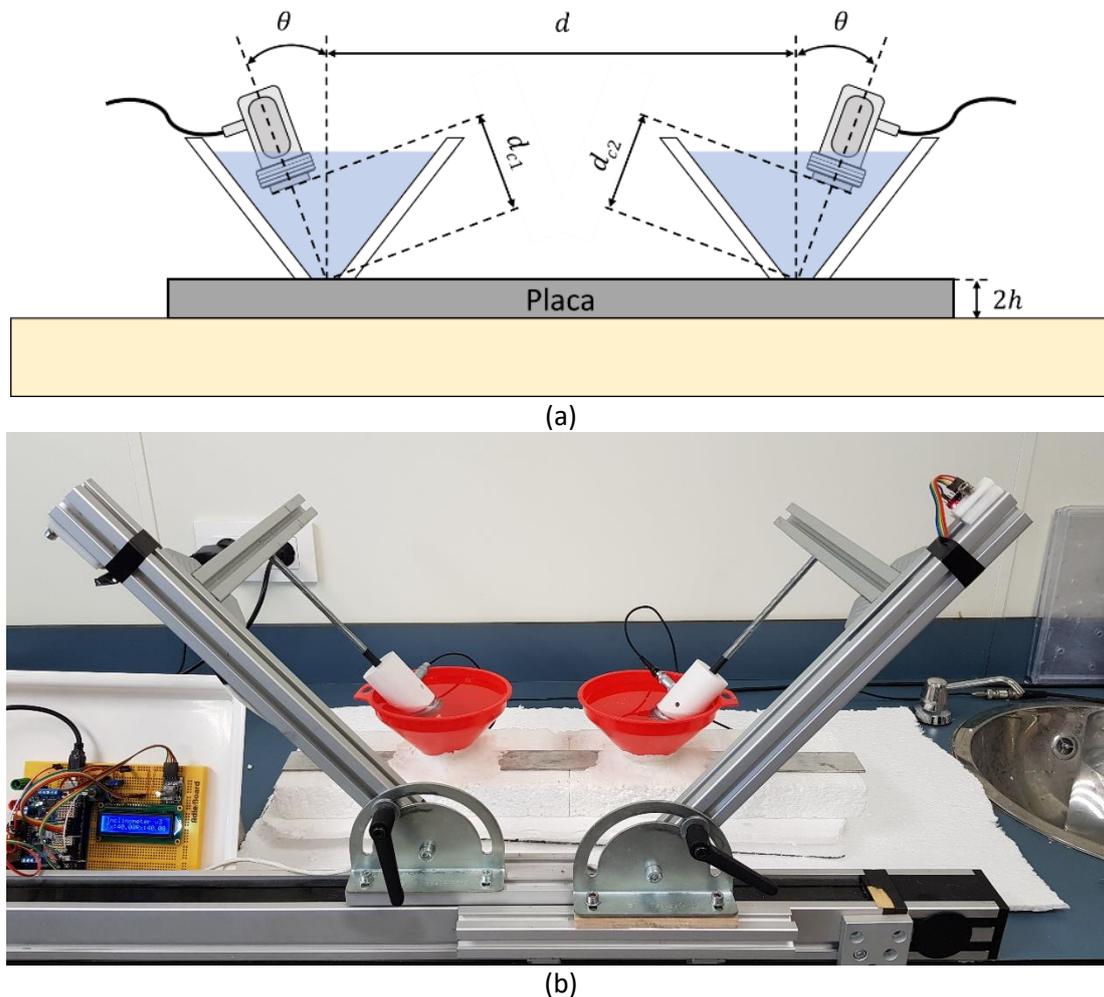


Figura 78. Acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos: (a) Esquema; (b) Fotografía (Vázquez et al., 2019b).

Los contenedores cónicos se han diseñado siguiendo las indicaciones de (Ghosh et al., 1998a; Ghosh et al., 1998b) y tratan de evitar que la probeta este completamente en inmersión. El diseño de los contenedores cónicos ayuda a focalizar el haz ultrasónico (lo que se traduce en un rango angular más pequeño), elimina la onda directa que se propaga por el agua y reduce las reflexiones que aparecen en el experimental de inmersión (fondo del tanque, paredes laterales, etc.). El ángulo máximo que se puede alcanzar lo limita la geometría de los contenedores cónicos y se han empleado los transductores de banda ancha de onda P K2SC descritos en el apartado “Acoplamiento por agua mediante inmersión – Transductores de banda ancha” para la excitación y detección de ondas de Lamb en la placa de acero inoxidable.

Los parámetros de este experimental están reflejados en la Tabla 8. Las señales transmitidas se han amplificado por un factor de 50 (WMA-300, Falco Systems). Las señales recibidas se han adquirido con una frecuencia de muestreo de 25 MHz, 10000 muestras (lo que implica un intervalo temporal de $400 \mu s$) y promediado de 16 trazas.

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por agua en la placa de acero inoxidable se representan en la Figura 79.

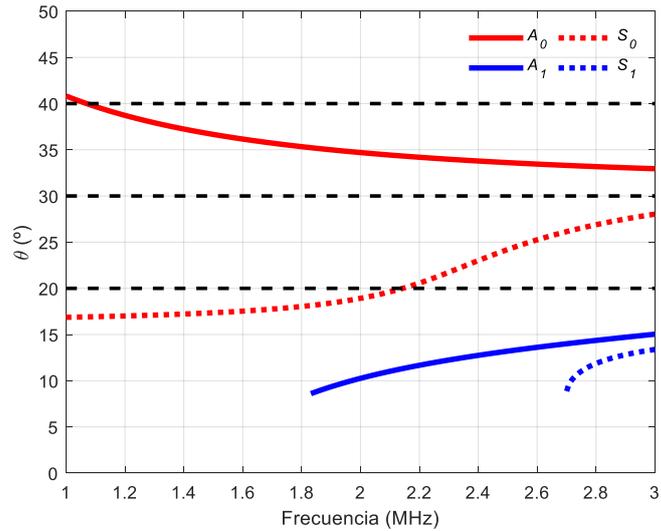


Figura 79. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua mediante contenedores cónicos en placa de acero inoxidable.

Los ángulos elegidos son 20° , 30° y 40° . Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y los ángulos elegidos son:

- En 20° se produce una intersección con el modo S_0 en 2.14 MHz.
- En 30° no se produce ninguna intersección. Lo que puede suceder es que se exciten tanto el modo S_0 como el A_0 (Ren et al., 2017; Safaeinili et al., 1996a, 1996b).
- En 40° se produce una intersección con el modo A_0 en 1.07 MHz.

En la Figura 80, se han representado los espectrogramas combinados de velocidad de grupo para los ángulos elegidos junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y las SSC.

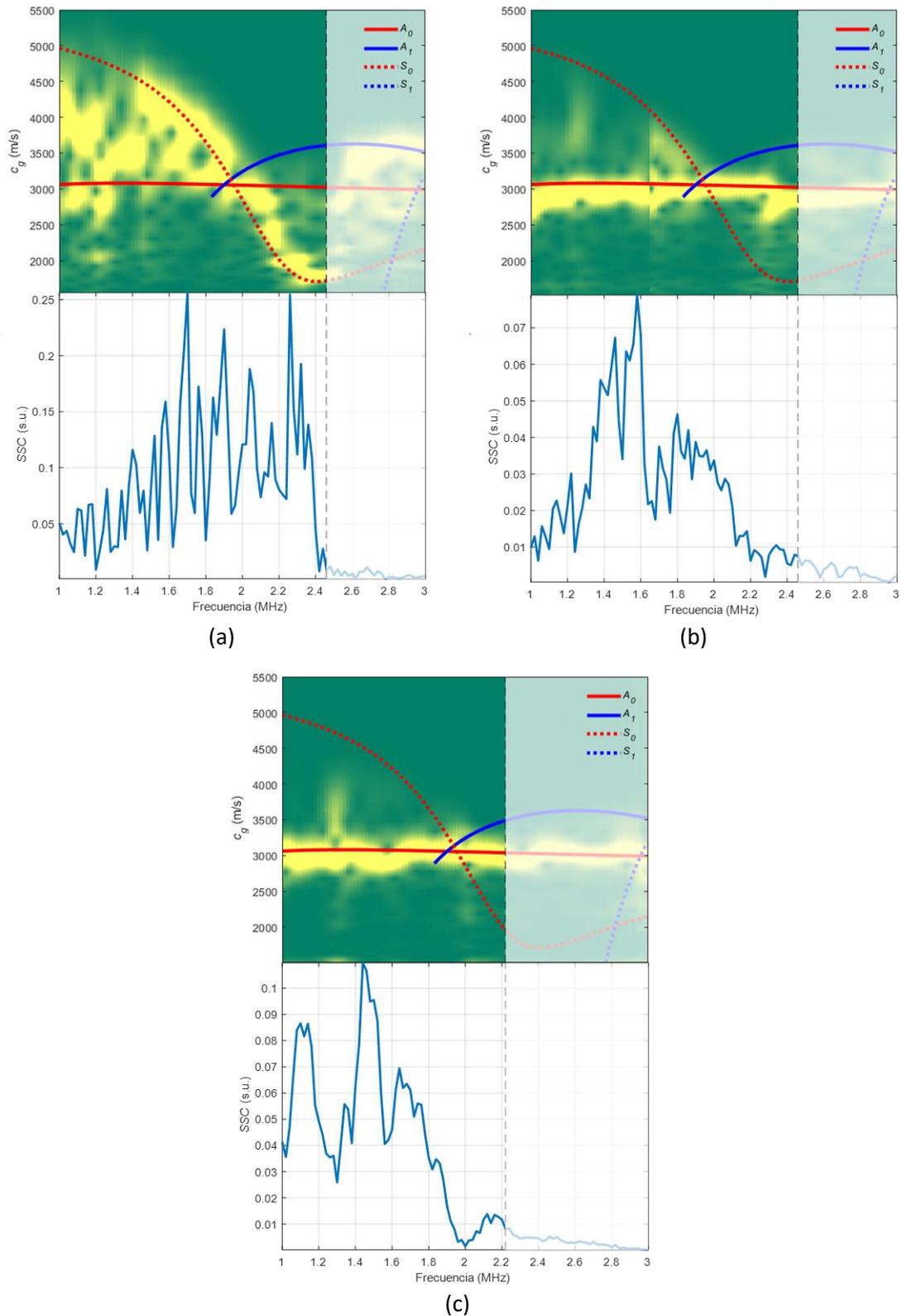


Figura 80. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placa de acero inoxidable: (a) 20°; (b) 30°; (c) 40°.

Los resultados para cada ángulo son:

- En 20°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo S_0 (curva discontinua roja) entre 1.43 y 2.46 MHz.
- En 30°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal del espectrograma combinado y la curva del modo A_0 (curva continua roja) entre 1 y 2.46 MHz.
- En 40°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva del modo A_0 entre 1 y 2.22 MHz.

Tabla 8. Parámetros del experimental de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placa de acero inoxidable.

Parámetros de la placa			
Material	Acero inoxidable		
Espesor	1 mm		
Parámetros geométricos			
Ángulo en transmisión, θ	20°	30°	40°
Ángulo en recepción, θ	20°	30°	40°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	30 mm	40 mm	45 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	30 mm	40 mm	45 mm
Distancia de propagación por la placa, d	205 mm		
Parámetros del equipamiento			
Frecuencia inicial	1 MHz		
Frecuencia final	3 MHz		
Incremento frecuencial	20 kHz		
Número de frecuencias	101		
Frecuencia de muestreo, f_s	25 MHz		
Número de muestras	10000		
Intervalo temporal	400 μs		
Número de ciclos, N_c	10		
Amplitud, V_p	3 V	6 V	
Promediado	16		
Amplificación en transmisión (equipamiento)	x50 (WMA-300)		
Amplificación en recepción (equipamiento)	32 dB (AMPLUS-32)		
Generador de funciones	33120A		
Osciloscopio	DPO3014		
Transductores (frecuencia central, f_c)	K2SC (2 MHz)		
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)		
Parámetros del postprocesado			
Ventana de espectrograma	10 μs		
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %		
Número de puntos de las FT de cada ventana	2 ¹⁴		
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	500	1000	
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0		
Rango frecuencial que marca la SSC	1-2.46 MHz		1-2.22 MHz

4.2.6. Acoplamiento por agua mediante globos

El esquema y la fotografía del montaje experimental de globos rellenos de agua en placas metálicas se encuentra en la Figura 81.

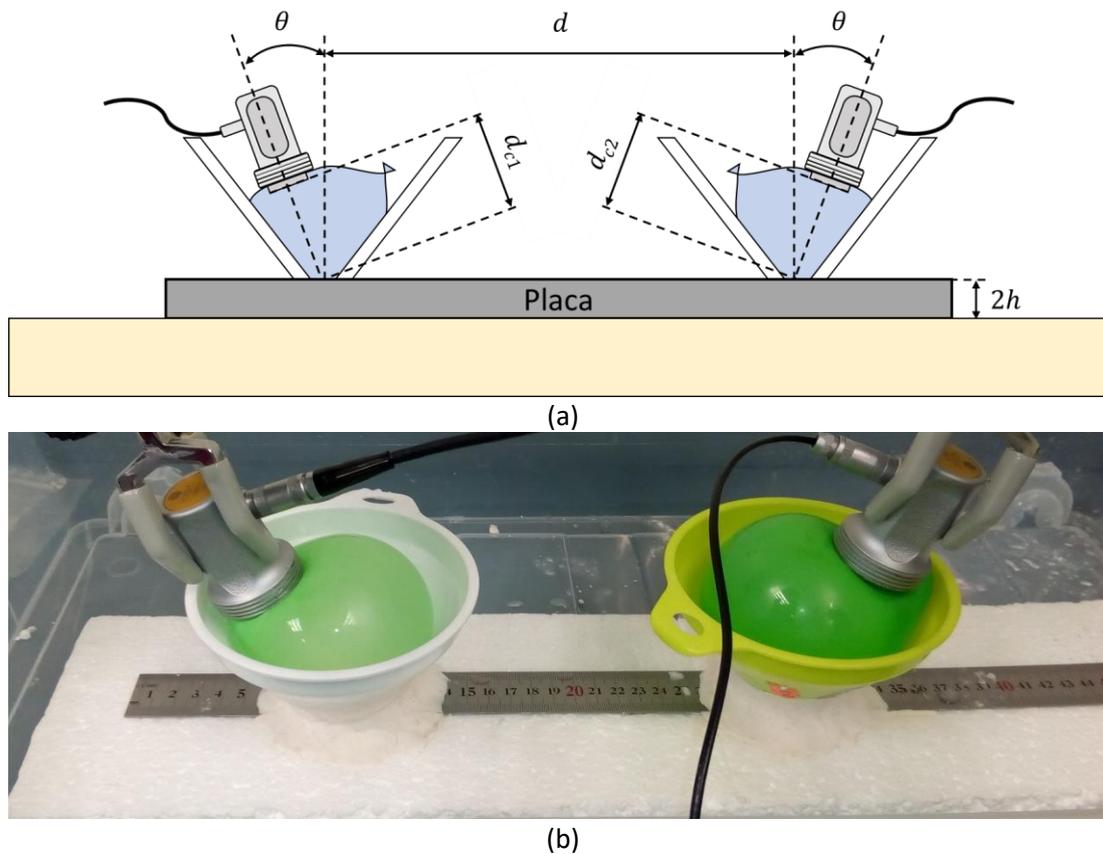


Figura 81. Acoplamiento localizado por agua mediante globos: (a) Esquema; (b) Fotografía.

Con esa disposición, se evita la fuga de agua, manteniendo las ventajas del experimental de contenedores cónicos rellenos de agua: focalización del haz ultrasónico, eliminación de la onda directa que se propaga por el agua y reducción de reflexiones. Los contenedores cónicos junto con la plastilina en la base ayudan a fijar los globos y evitar que se muevan. Las interfaces transductor-globo y globo-placa se han humedecido con agua para garantizar una transferencia suficiente de energía. No obstante, es una técnica que no presenta una gran repetibilidad (Goueygou et al., 2008). Se han empleado los transductores de banda ancha de onda P K2SC descritos en el apartado “Acoplamiento por agua mediante inmersión – Transductores de banda ancha” para la excitación y detección de ondas de Lamb en la placa de acero inoxidable.

Los parámetros de este experimental están reflejados en la Tabla 9. Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por agua en la placa de acero inoxidable se representan en la Figura 82.

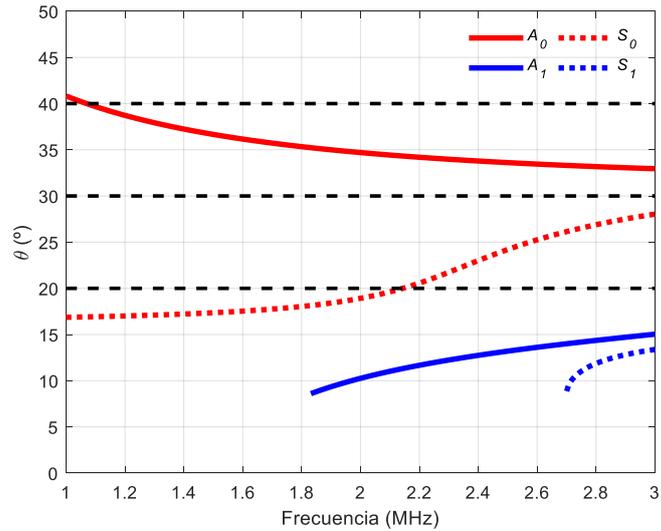


Figura 82. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua mediante globos en placa de acero inoxidable.

Los ángulos elegidos son 20° , 30° y 40° . Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y los ángulos elegidos son:

- En 20° se produce una intersección con el modo S_0 en 2.14 MHz.
- En 30° no se produce ninguna intersección. Lo que puede suceder es que se exciten tanto el modo S_0 como el A_0 (Ren et al., 2017; Safaeinili et al., 1996a, 1996b).
- En 40° se produce una intersección con el modo A_0 en 1.07 MHz.

En la Figura 83, se han representado los espectrogramas combinados de velocidad de grupo para los ángulos elegidos junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y las SSC.

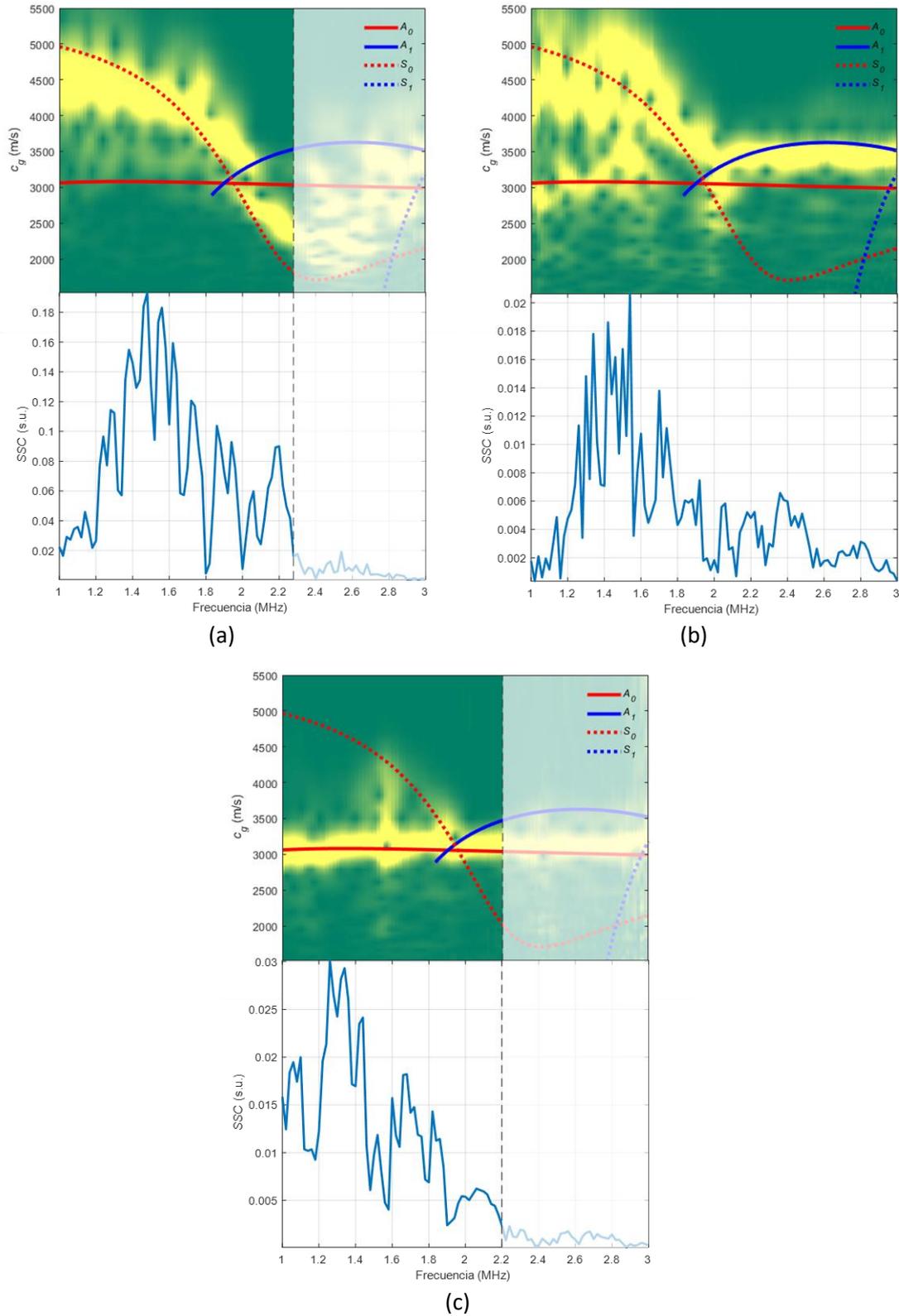


Figura 83. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante globos en placa de acero inoxidable: (a) 20°; (b) 30°; (c) 40°.

Los resultados para cada ángulo son:

- En 20°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo S_0 (curva discontinua roja) entre 1 y 2.28 MHz.
- En 30°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal del espectrograma combinado y la curva del modo S_0 entre 1 y 1.8 MHz.
- En 40°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva del modo A_0 entre 1 y 2.2 MHz.

Se observa que las curvas experimentales de acoplamiento localizado por contenedores cónicos (Figura 80) y de acoplamiento localizado por globos (Figura 83) son similares, lo que implica que las interfaces del material de los globos no influyen significativamente en las medidas experimentales, ya que tanto el acoplante como la disposición de los experimentales es la misma.

Tabla 9. Parámetros del experimental de acoplamiento localizado por agua mediante globos en placa de acero inoxidable.

Parámetros de la placa			
Material	Acero inoxidable		
Espesor	1 mm		
Parámetros geométricos			
Ángulo en transmisión, θ	20°	30°	40°
Ángulo en recepción, θ	20°	30°	40°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	75 mm		
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	75 mm		
Distancia de propagación por la placa, d	205 mm		
Parámetros del equipamiento			
Frecuencia inicial	1 MHz		
Frecuencia final	3 MHz		
Incremento frecuencial	20 kHz		
Número de frecuencias	101		
Frecuencia de muestreo, f_s	25 MHz		
Número de muestras	10000		
Intervalo temporal	400 μ s		
Número de ciclos, N_c	10		
Amplitud, V_p	3 V	6 V	
Promediado	16		
Amplificación en transmisión (equipamiento)	x50 (WMA-300)		
Amplificación en recepción (Equipamiento)	32 dB (AMPLUS-32)		
Generador de funciones	33120A		
Osciloscopio	DPO3014		
Transductores (frecuencia central, f_c)	K2SC (2 MHz)		
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)		
Parámetros del postprocesado			
Ventana de espectrograma	10 μ s		
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %		
Número de puntos de las FT de cada ventana	2^{14}		
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	1000		
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0		
Rango frecuencial que marca la SSC	1-2.28 MHz	1-3 MHz	1-2.2 MHz

4.2.7. Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos

La técnica de acoplamiento por aire mantiene las ventajas de la técnica de inmersión (acoplamiento constante, rapidez, posibilidad de automatización y facilidad de modificar los ángulos) eliminando la necesidad del agua y la existencia de contribuciones indeseadas en las señales recibidas, como las que se generan en la superficie del agua o en las paredes y el fondo del tanque de inmersión. La desventaja principal del acoplamiento por aire son las elevadas pérdidas que se producen en las interfaces aire-placa y placa-aire.

En la técnica de acoplamiento por aire se ha trabajado con transductores piezoeléctricos y transductores capacitivos de rangos frecuenciales diferentes. Con los transductores piezoeléctricos se ha inspeccionado la placa de acero inoxidable y con los transductores capacitivos se ha inspeccionado la placa de aluminio. La velocidad de onda P en el aire es de 343 m/s (Fan et al., 2018; Gosálbez et al., 2018).

El esquema y la fotografía del montaje experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la placa de acero inoxidable se encuentra en la Figura 84.

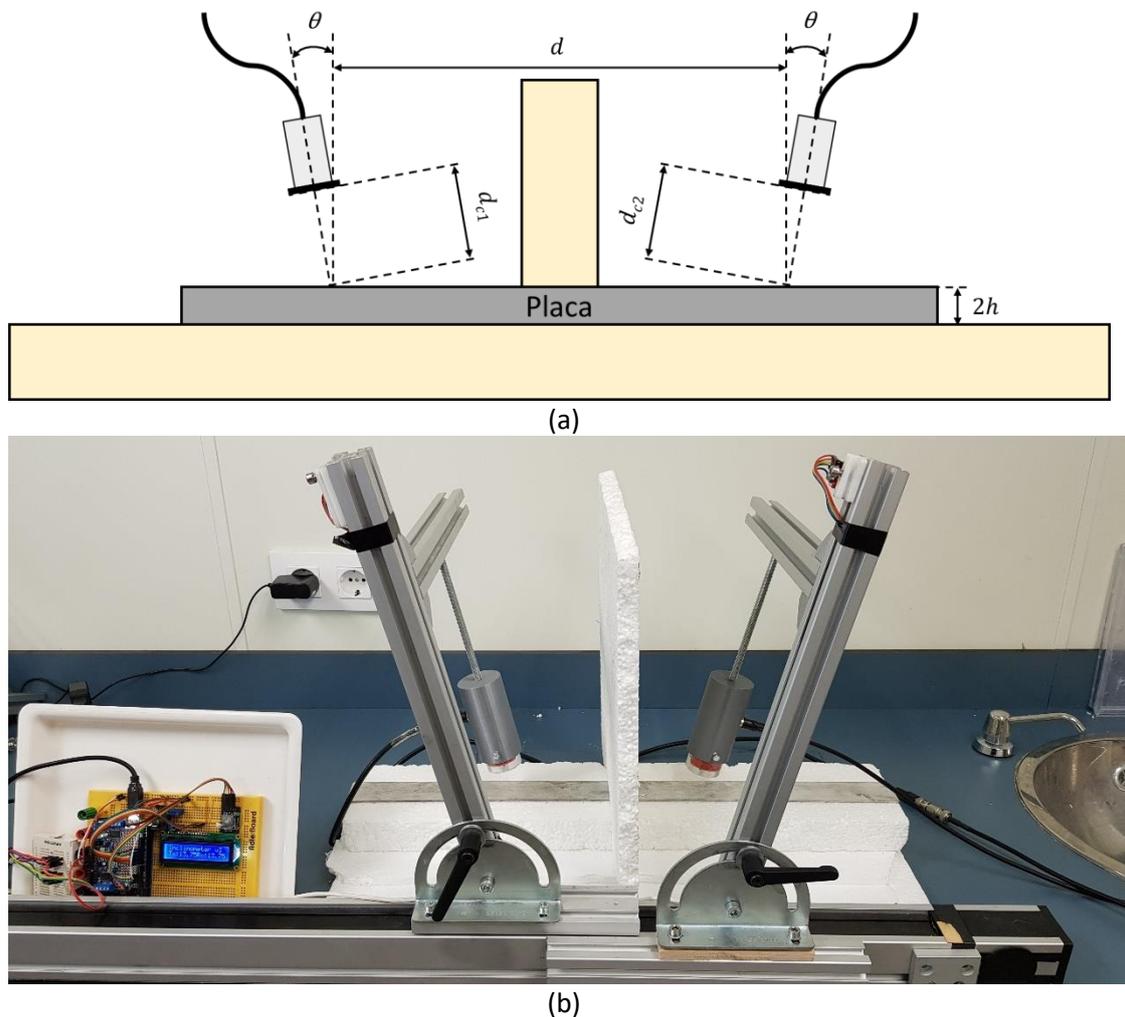


Figura 84. Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos: (a) Esquema; (b) Fotografía ("[Figure 13](#)", por [Santiago Vázquez](#), Jorge Gosálbez, Ignacio Bosch, Alicia Carrión, Carles Gallardo y Jordi Payá, licencia bajo [CC BY 4.0](#)) (Vázquez et al., 2019b).

Se ha colocado una plancha vertical de EPS para bloquear la onda directa que se propaga por el aire. Se han utilizado dos parejas de transductores piezoeléctricos de acoplamiento por aire de frecuencias centrales f_c de 250 kHz y 500 kHz y un diámetro del elemento activo de 32 mm para

la excitación y detección de ondas de Lamb en la placa de acero inoxidable (se puede encontrar información de estos transductores en (Gómez, 2004; Sancho-Knapik et al., 2012)).

Los parámetros de este experimental están reflejados en la Tabla 10. El transmisor se ha excitado con señales sinusoidales *burst* de 5 ciclos para minimizar los problemas que provoca el acoplamiento eléctrico (posible solapamiento entre la réplica de la señal transmitida con señal recibida útil). Su rango frecuencial es de:

- 0.05 MHz a 0.55 MHz, en incrementos de 5 kHz para los transductores de $f_c = 0.25$ MHz.
- 0.2 MHz a 0.8 MHz, en incrementos de 5 kHz para los transductores de $f_c = 0.5$ MHz

Las señales recibidas se han amplificado 40 dB (5660C, Panametrics) y a continuación, se han adquirido mediante un osciloscopio digital (RTO 1004, Rohde & Schwartz) con una frecuencia de muestreo de 25 MHz, 10000 muestras (lo que implica un intervalo temporal de $400 \mu s$) y promediado de 32 trazas.

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por aire en la placa de acero inoxidable se representan en la Figura 85.

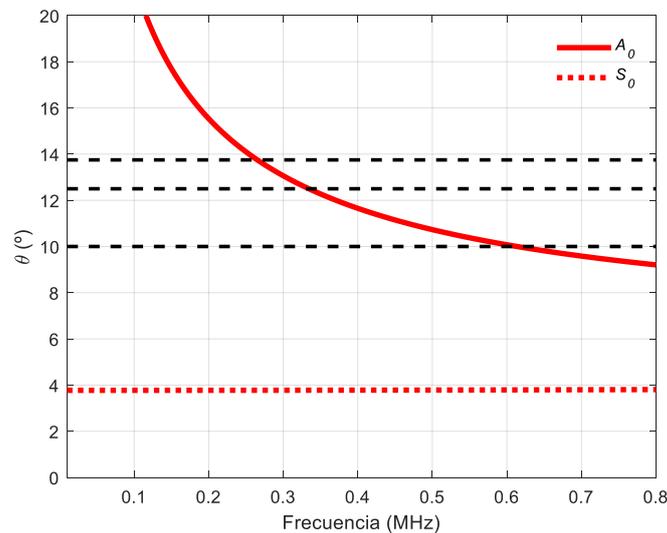


Figura 85. Curvas de ángulo para acoplamiento por aire en placa de acero inoxidable.

El hecho de que el medio acoplante sea el aire, implica un cambio respecto a las curvas angulares y de dispersión obtenidas anteriormente. Se observa una tendencia basándose en las curvas de ángulo de los distintos medios acoplantes en la placa de acero inoxidable: a menor velocidad de onda P del medio acoplante, menor rango angular. Los ángulos elegidos son 10° , 12.5° y 13.75° .

Se producen distintas intersecciones entre las curvas de ángulos y los ángulos elegidos, concretamente:

- En 10° se produce una intersección con el modo A_0 en 0.61 MHz (transductores de $f_c = 0.5$ MHz).
- En 12.5° se produce una intersección con el modo A_0 en 0.33 MHz ($f_c = 0.25$ MHz).
- En 13.75° se produce una intersección con el modo A_0 en 0.26 MHz ($f_c = 0.25$ MHz).

Se han elegido estos ángulos porque intersectaban con la curva de ángulos del modo A_0 en frecuencias cercanas a las frecuencias centrales de los transductores. Concretamente, para la pareja de transductores de $f_c = 0.25$ MHz, las frecuencias de intersección son de 0.33 MHz y

0.26 MHz, mientras que para la pareja de transductores de $f_c = 0.5$ MHz, la frecuencia de intersección es de 0.61 MHz.

Se han realizado distintas medidas con ángulos cercanos al ángulo teórico de S_0 (curva discontinua roja) pero el nivel de señal recibido no ha sido suficiente como para detectarlo. Esto se debe al débil desplazamiento de partículas del modo S_0 , que no logra radiar suficiente energía al aire (Castaings et al., 1996).

En la Figura 86, se han representado los espectrogramas combinados de velocidad de grupo para los ángulos elegidos junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y las SSC.

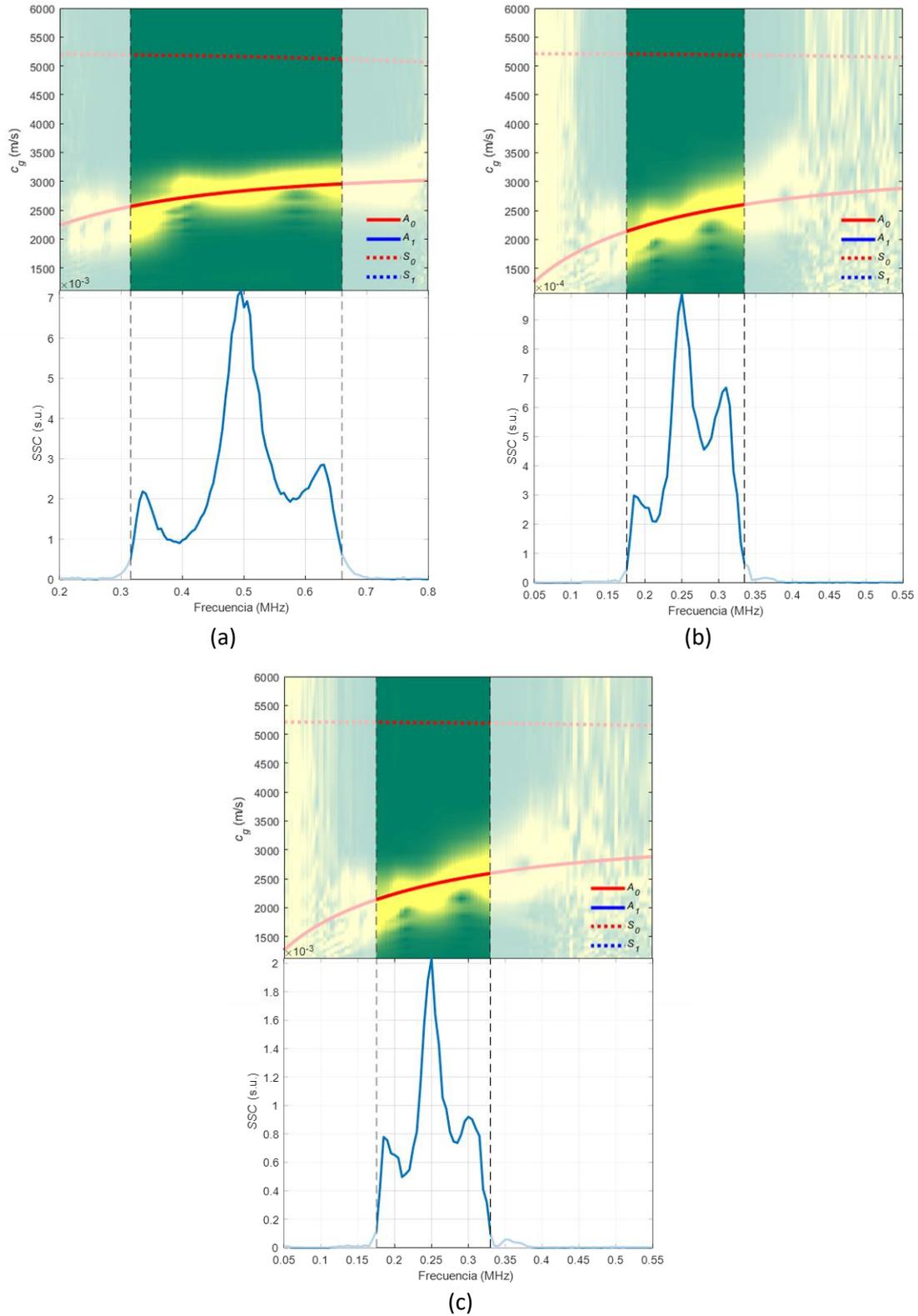


Figura 86. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de acero inoxidable: (a) 10° ($f_c = 500$ kHz); (b) 12.5° ($f_c = 250$ kHz); (c) 13.75° ($f_c = 250$ kHz).

Los resultados para cada ángulo son:

- En 10°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 0.32 y 0.66 MHz.
- En 12.5°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo A_0 entre 0.18 y 0.34 MHz.
- En 13.75°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo S_0 entre 0.18 y 0.33 MHz.

Tabla 10. Parámetros del experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de acero inoxidable.

Parámetros de la placa			
Material	Acero inoxidable		
Espesor	1 mm		
Parámetros geométricos			
Ángulo en transmisión, θ	10°	12.5°	13.75°
Ángulo en recepción, θ	10°	12.5°	13.75°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	30 mm	33 mm	
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	30 mm	33 mm	
Distancia de propagación por la placa, d	200 mm		
Parámetros del equipamiento			
Frecuencia inicial	0.2 MHz	0.05 MHz	
Frecuencia final	0.8 MHz	0.55 MHz	
Incremento frecuencial	5 kHz		
Número de frecuencias	121	101	
Frecuencia de muestreo, f_s	25 MHz		
Número de muestras	10000		
Intervalo temporal	400 μs		
Número de ciclos, N_c	5		
Amplitud, V_p	6 V		
Promediado	32		
Amplificación en transmisión (equipamiento)	x50 (WMA-300)		
Amplificación en recepción (equipamiento)	40 dB (5660C)		
Generador de funciones	33120A		
Osciloscopio	RTO 1004		
Transductores (frecuencia central, f_c)	$f_c = 0.5$ MHz	$f_c = 0.25$ MHz	
Acoplante (velocidad si procede)	Aire (343 m/s)		
Parámetros del postprocesado			
Ventana de espectrograma	10 μs	20 μs	
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %		
Número de puntos de las FT de cada ventana	2^{14}		
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	1000	3000	
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0		
Rango frecuencial que marca la SSC	0.32-0.66 MHz	0.18-0.34 MHz	0.18-0.33 MHz

4.2.8. Acoplamiento por aire mediante transductores capacitivos

El esquema y la fotografía del montaje experimental de acoplamiento por aire con transductores capacitivos en la placa de aluminio se encuentra en la Figura 87.

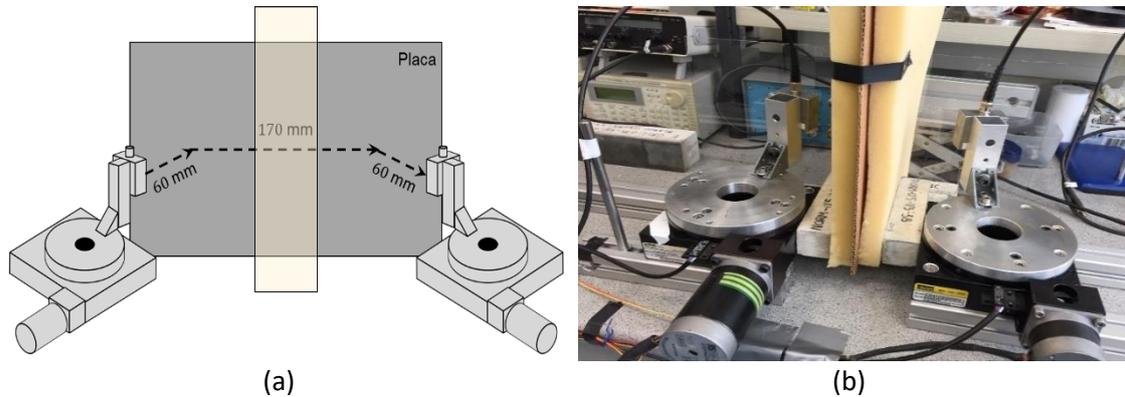


Figura 87. Acoplamiento por aire mediante transductores capacitivos: (a) Esquema; (b) Fotografía (Vázquez et al., 2019a).

Se ha colocado una plancha vertical de material aislante para bloquear la onda directa que se propaga por el aire. Se han utilizado un par de transductores capacitivos acoplados por aire (Series 600 Environmental Grade Transducers, SensComp) con una frecuencia central f_c de 50 kHz y un diámetro de elemento activo de 38 mm para la excitación y detección de ondas de Lamb en la placa de aluminio (Fan et al., 2018; Gosálbez et al., 2018). La curva de calibración de estos transductores se puede encontrar en la Figura 88 .

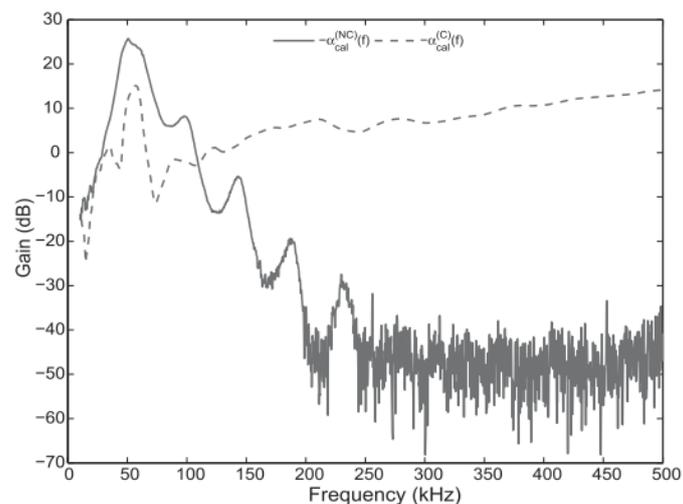


Figura 88. Calibración de los transductores capacitivos de acoplamiento por aire⁴⁸ (Gosálbez et al., 2018).

Se han medido las curvas de dispersión de ángulo y fase experimentales mediante variación tanto angular como frecuencial. El ángulo de inclinación de ambos transductores se controla a partir de mesas rotatorias (Figura 87 (b)). La variación frecuencial se ha realizado mediante

⁴⁸ "Reprinted from Ultrasonics, 88, J. Gosálbez, W.M.D. Wright, W. Jiang, A. Carrión, V. Genovés, I. Bosch, Airborne non-contact and contact broadband ultrasounds for frequency attenuation profile estimation of cementitious materials, 148-156, (2018), with permission from Elsevier."

señales sinusoidal *burst* y señales *chirp*. Una de las ventajas de emitir señales *chirp* frente a señales sinusoidales *burst* es la reducción en la duración del experimental (Genovés et al., 2016).

Los parámetros del experimental de acoplamiento por aire en la placa de aluminio están reflejados en la Tabla 11. El transmisor se ha excitado con numerosas señales sinusoidales *burst* de 5 ciclos y con una señal *chirp* en cada ángulo mediante un generador de señal programable (Handyscope HS5, TiePie *engineering*). El rango frecuencial de las señales *burst* transmitidas es de 10 kHz a 250 kHz en incrementos de 5 kHz. El ancho de banda de la señal *chirp* está comprendido entre 10 kHz y 250 kHz.

Las señales recibidas se han amplificado por un factor de 100 (5113, EG&G Instruments) y a continuación, se han adquirido mediante un osciloscopio digital (Handyscope HS5, TiePie *engineering*) con una frecuencia de muestreo de 10 MHz, 20000 muestras (lo que implica un intervalo temporal de 2 ms) y promediado de 16 trazas.

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por aire en la placa de aluminio se representan en la Figura 89.

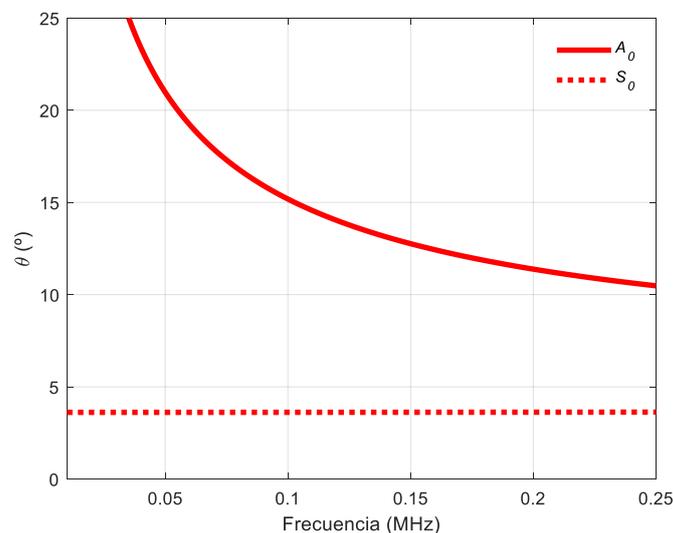


Figura 89. Curvas de ángulo para acoplamiento por aire en placa de aluminio.

El rango angular varía desde 0° a 40° en saltos de 0.25° , por lo que teóricamente se deberían de excitar tanto el modo A_0 como el modo S_0 .

El hecho de tener un muestreo angular de 159 ángulos implica que el procesado de señal tiene que ser adaptado y en vez de obtener la representación de velocidad de grupo vs frecuencia, se obtendrá velocidad de fase vs frecuencia. Para obtener estas curvas, se han distinguido dos casos, uno para las señales *burst* de banda estrecha y otro para la señal *chirp* de banda ancha:

- Para el caso de las señales *burst*. Se construye la curva $SSC(\theta, f)$ a partir de los 159 ángulos evaluados (variable θ) y normalizando el valor de amplitud máximo entre todas las frecuencias f (59 registros) medidas para ese ángulo concreto. Posteriormente, la variable del ángulo θ se convierte a velocidad de fase c_f mediante la ecuación (57)

$$c_f = \frac{c_{aire}}{\sin \theta} \quad (57)$$

Donde c_{aire} es la velocidad de onda P en el aire (343 m/s).

- Para el caso de las señales de banda ancha. A diferencia de lo que ocurría para las señales de banda estrecha, se tiene una única señal para cada uno de los 159 ángulos medidos, por tanto, las curvas SSC se obtienen como:

$$SSC(\theta, f) = \frac{|X_\theta(f)|}{\max|X_\theta(f)|} \quad (58)$$

$$X_\theta(f) = TF\{x_\theta(t)\} \quad (59)$$

Donde $x_\theta(t)$ es la señal medida y recibida al excitar con una señal *chirp* para el ángulo θ . Al igual que antes, las curvas SSC se convierten a velocidad de fase mediante la ecuación (57).

A las curvas de dispersión experimentales (de banda estrecha o de banda ancha) se le han solapado las curvas de dispersión teóricas para comprobar la generación y detección de modos de ondas de Lamb, al igual que sucede con el espectrograma combinado.

En la Figura 90, se han representado las curvas de dispersión experimentales junto con las curvas de dispersión teóricas de ángulos y velocidad de fase para los dos tipos de excitación: de banda estrecha y de banda ancha. Se ha aplicado una corrección de haz de 13° para compensar la divergencia de haz a bajas frecuencias, por ello los ejes verticales llegan hasta 27° .

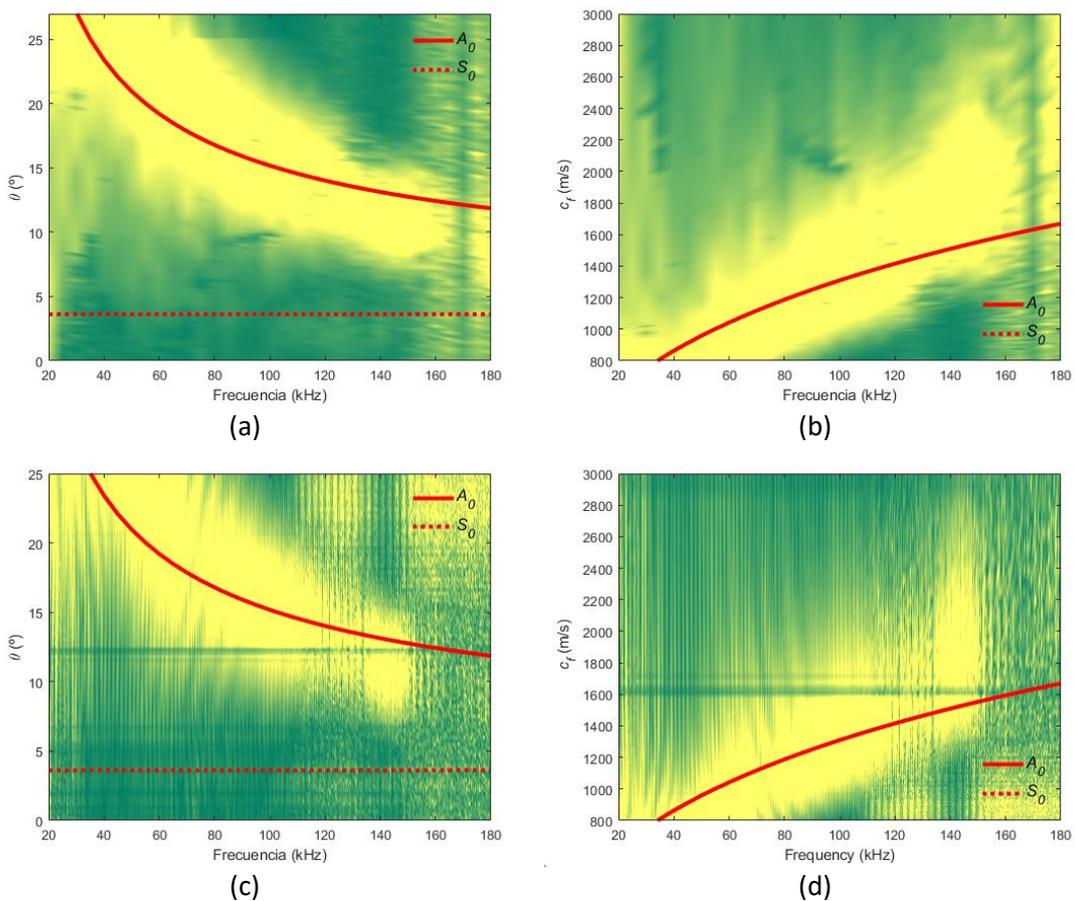


Figura 90. Curvas experimentales de ángulo y velocidad de fase para excitación de banda estrecha ((a) y (b)) y para excitación de banda ancha ((c) y (d)) (Vázquez et al., 2019a).

Los resultados son:

- En (a) y (b) existe una buena correspondencia entre la curva de dispersión experimental (en amarillo) y la curva de dispersión teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 20 y 180 kHz.
- En (c) y (d) existe una buena correspondencia entre la curva de dispersión experimental (en amarillo) y la curva de dispersión teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 20 y 150 kHz.

El modo S_0 no ha sido excitado y detectado debido a su débil desplazamiento de partículas. Se comprueba que los resultados con señales de banda estrecha y banda ancha son similares, aunque existen algunas diferencias:

- El ancho de banda útil alcanza mayores frecuencias con la excitación de señales de banda estrecha (180 kHz) que con la excitación de señales de banda ancha (150 kHz). Esto se debe a que las señales de banda estrecha inyectan más energía en cada frecuencia fundamental.
- El tiempo de realización de medidas es menor cuando se utiliza la excitación de señales de banda ancha (159 señales *chirp* emitidas) que cuando se utilizan señales de banda estrecha (7791 señales sinusoidales *burst* emitidas).

Tabla 11. Parámetros del experimental de acoplamiento por aire mediante transductores capacitivos en placa de aluminio.

Parámetros de la placa	
Material	Aluminio
Espesor	2 mm
Parámetros geométricos	
Ángulo en transmisión, θ	0°:0.25°:40°
Ángulo en recepción, θ	0°:0.25°:40°
Número de ángulos	159
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	60 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	60 mm
Distancia de propagación por la placa, d	170 mm
Parámetros del equipamiento	
Frecuencia inicial (<i>burst</i> y <i>chirp</i>)	10 kHz
Frecuencia final (<i>burst</i> y <i>chirp</i>)	250 kHz
Incremento frecuencial (<i>burst</i>)	5 kHz
Número de frecuencias/ángulo (<i>burst</i>)	49
Número total de sinusoidales <i>burst</i>	7791
Número total de señales <i>chirp</i>	159
Frecuencia de muestreo, f_s	10 MHz
Número de muestras	20000
Intervalo temporal	2 ms
Número de ciclos, N_c (<i>burst</i>)	5
Amplitud, V_p	2 V
Promediado	16
Amplificación en transmisión (equipamiento)	x50 (WMA-300)
Amplificación en recepción (equipamiento)	x100 (5113)
Generador de funciones	Handyscope HS5
Osciloscopio	Handyscope HS5
Transductores (frecuencia central, f_c)	Series 600 Environmental Grade Transducers (50 kHz)
Acoplante (velocidad si procede)	Aire (343 m/s)
Parámetros del postprocesado	
Número de puntos de las <i>FT</i> utilizadas	2 ¹⁵
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	0
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0

4.3. Medidas experimentales en materiales heterogéneos

Una vez se han inspeccionado materiales homogéneos con diferentes técnicas de acoplamiento para la excitación y detección de ondas de Lamb, se ha pasado a inspeccionar placas de materiales de mayor complejidad, esto es, materiales heterogéneos como el mortero gris y cemento reforzado con fibra de vidrio o *glass-fibre reinforced cement (GRC)*. Los datos principales de dichos materiales heterogéneos se reúnen en la Tabla 12.

Tabla 12. Datos de las placas cementicias.

Parámetros	Mortero gris	GRC
Dimensiones (longitud x ancho x espesor) (mm ³)	240 x 60 x 2.5	322 x 50 x 16
	240 x 60 x 5	
	240 x 60 x 7.5	
	240 x 60 x 13	
Velocidad de onda P c_p (m/s)	4813	3977
Velocidad de onda S c_s (m/s)	3003	2248

Todas las placas de material cementicio utilizadas han sido fabricadas por el Grupo de Investigación en Química de los Materiales de Construcción (GIQUIMA) del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) (Figura 91).



(a)



(b)



(c)

Figura 91. Placas cementicias: (a) mortero de 2.5 mm; (b) mortero de 5, 7.5, y 13 mm; (c) GRC de 16 mm.

Para inspeccionar los materiales cementicios mediante ondas guiadas, se ha seleccionado el acoplamiento por agua localizado mediante contenedores cónicos y cuñas y el acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos. El acoplamiento por cuñas sólidas de plexiglás se tenido que descartar por los siguientes motivos:

- La f_c de los transductores de cuñas de plexiglás (2 MHz) es una frecuencia muy alta para inspeccionar materiales tan atenuantes como el mortero y el GRC.
- La velocidad de onda P del plexiglás (2730 m/s) es una velocidad mucho más alta que el agua (1490 m/s) y aire (343 m/s). Esa velocidad imposibilita la generación de modos que presenten una velocidad de fase menor que 2730 m/s debido a la ley de Snell. El plexiglás es un medio acoplante más apropiado para materiales metálicos, mientras que el agua (Jung et al., 2000; Molero, 2009), el aire (Abraham et al., 2012; Gosálbez et al., 2018) o el teflón (1350 m/s) (Piwakowski, 2004; Krautkrämer et al., 1990) son materiales acoplantes muy utilizados en materiales cementicios.

Todas las medidas de ondas guiadas se han realizado en la superficie o cara lisa de las placas cementicias (Birgül, 2009) dejando la cara de enrase como parte inferior de la probeta (Goueygou et al., 2009). Las placas de mortero se han mantenido envueltas en *film* de plástico después de realizar cada experimental para evitar carbonatación o secado (Carrión et al., 2018). Además, se ha utilizado una f_s menor (10 MHz) que en las medidas anteriores para incrementar el intervalo temporal de las señales, dado que las velocidades en los materiales cementicios son más bajas que en materiales metálicos. Como se ha señalado en la “Introducción” de este capítulo, dada la heterogeneidad de los materiales cementicios, es especialmente crítica la medición precisa de sus velocidades de onda P y onda S para obtener las curvas de dispersión teóricas, necesarias para conocer los modos de ondas de Lamb excitados a partir de la comparación con las curvas experimentales.

4.3.1. Medidas de velocidad de onda P y onda S

Las velocidades de onda P y S de las placas cementicias se han obtenido experimentalmente mediante el método *UPV* (Genovés et al., 2017b; Popovics et al., 2010). En el caso del mortero gris, para un cálculo más preciso de sus velocidades, el GIQUIMA del ICITECH ha fabricado probetas (ejemplares) específicos de forma prismática y de dimensiones 160x40x40 mm³ de cemento gris (CEM I-52,5R) (Pérez, 2015) conforme al procedimiento que marca la norma UNE EN 196-1:2005 (Vázquez et al., 2019b). En el caso del GRC, se han medido las velocidades directamente en la placa.

Para medir la velocidad de la onda P, c_p , se ha utilizado una configuración *through-transmission* enfrentando un par de transductores de onda P de f_c 500 kHz (K0,5SC, General Electric) acoplados con vaselina a lo largo de la longitud d de las probetas, garantizando la emisión de varias longitudes de onda por cada dimensión del material (Figura 92 (a)).

Se ha realizado un barrido frecuencial (10 kHz a 1 MHz en saltos de 5 kHz) de sinusoidales *burst* de 5 ciclos (199 señales) con el fin poder de poder medir la velocidad para diferentes frecuencias de excitación a partir del tiempo de vuelo, $t_p(f)$, estimado por umbral de energía. El mismo procedimiento se ha realizado para los transductores enfrentados (Figura 92 (b)) con el fin de obtener el tiempo de calibración asociado a cada frecuencia $t_{cal}(f)$ (Carrión et al., 2017; Liu et al., 2019)

$$c_P(f) = \frac{d}{t_P(f) - t_{cal}(f)} \quad (60)$$

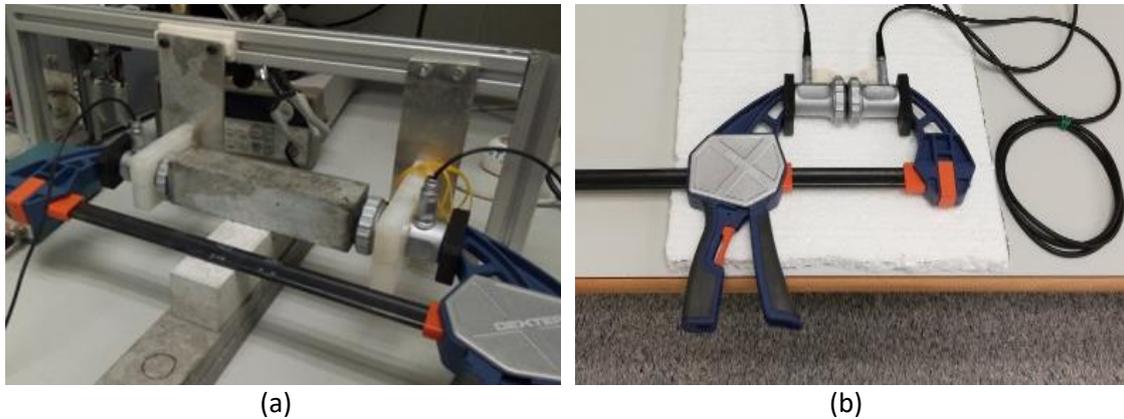


Figura 92. (a) Medida de onda P en probeta de mortero gris; (b) Medida del tiempo de calibración de los transductores de onda P.

El umbral para obtener $t_P(f)$ ha sido del 10 % sobre el fondo de ruido y para obtener $t_{cal}(f)$ del 50 %. Al aplicar la ecuación (60), se ha obtenido una curva de velocidad de onda P, c_P , cuyo promedio es igual a 4813 m/s para el mortero gris (curva azul en Figura 93) y 3977 m/s para la placa de GRC (curva roja en Figura 93).

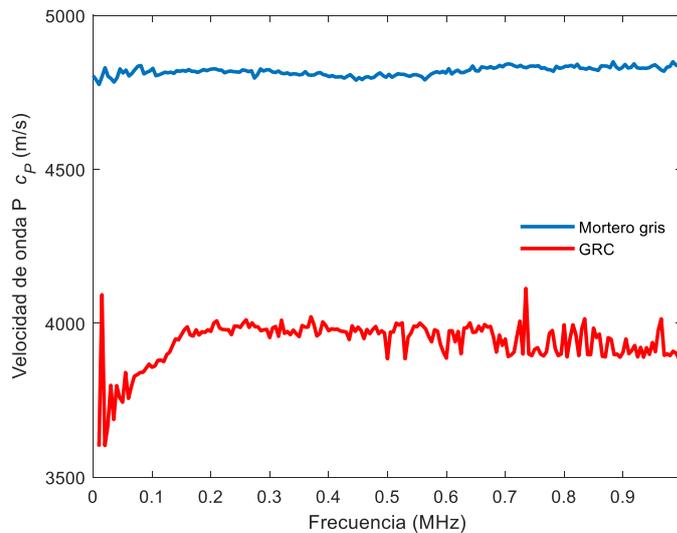


Figura 93. Velocidad de onda P del mortero gris y del GRC.

Por otro lado, para medir la onda S (Figura 94), se ha empleado un par de transductores de onda S de f_c 500 kHz (V151-RM, Panametrics) y acoplante de onda S (SWC-2, Olympus).

Se han inyectado las mismas señales que en la calibración anterior y a las señales adquiridas se les ha aplicado de nuevo el algoritmo de detección del tiempo de llegada con un umbral del 50% para obtener el t_{cal} de los transductores de onda S enfrentados.

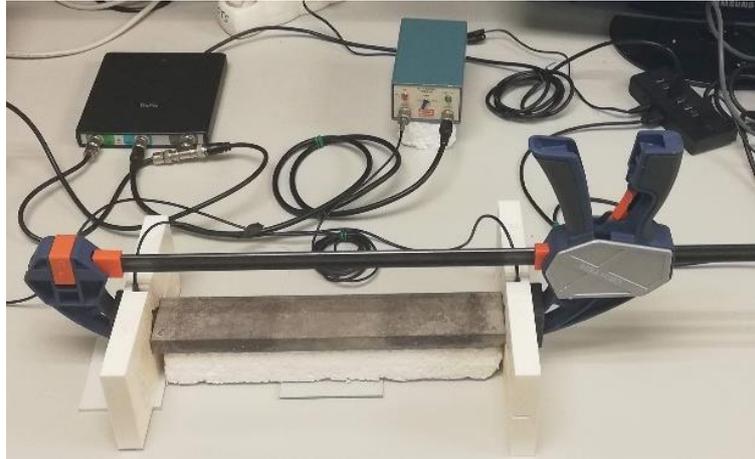


Figura 94. Medida de onda S en placa de GRC.

Sin embargo, para obtener la velocidad de onda S, c_S , en las probetas prismáticas de mortero y en la placa de GRC, se ha empleado otro procedimiento distinto para identificar $t_S(t)$, ya que, aunque los transductores son de onda S, presentan cierta sensibilidad para onda P, lo que contamina la llegada de la onda S con onda P (ver “Parámetros ultrasónicos”). Para subsanar esto, se ha aplicado la envolvente (Birgül, 2009) en las señales recibidas de las probetas prismáticas de mortero gris para identificar $t_S(t)$ mediante un umbral del 90 % respecto al máximo de la envolvente (Figura 95 (a)). En el caso de la placa de GRC, este método no daba buenos resultados, por lo que se ha utilizado el método pico-a-pico o *peak-to-peak method* explicado en el capítulo 2 (Chan, 2010), seleccionando de forma empírica los picos de las señales recibidas y obteniendo el tiempo $t_S(t)$ a partir de la diferencia entre el tiempo del pico de la señal transmitida respecto al primer pico prominente de la señal recibida (Figura 95 (b)). El barrido frecuencial utilizado para la placa de GRC ha sido el mismo que en las probetas de mortero gris, pero de un único ciclo.

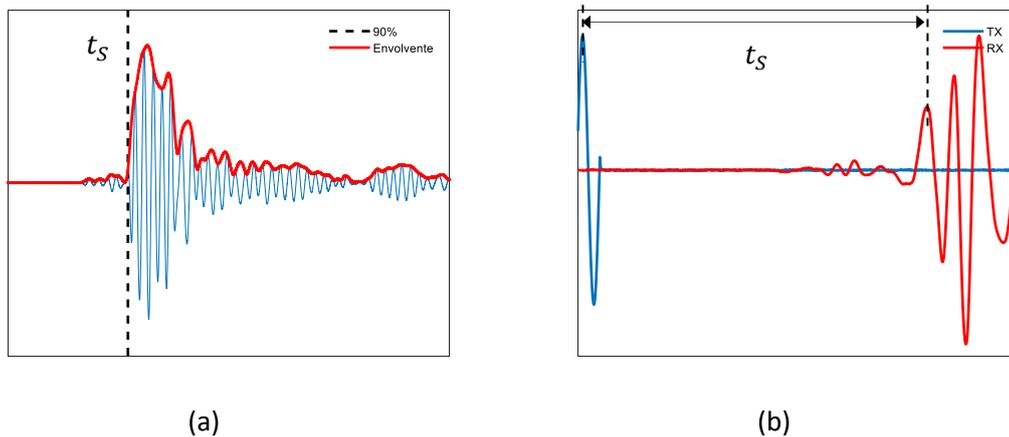


Figura 95. (a) Método de la envolvente; (b) Método peak-to-peak.

La fiabilidad de ambos métodos se ha verificado en una pieza de calibración de velocidad de onda S conocida (3255 ± 15 m/s) (Figura 96).

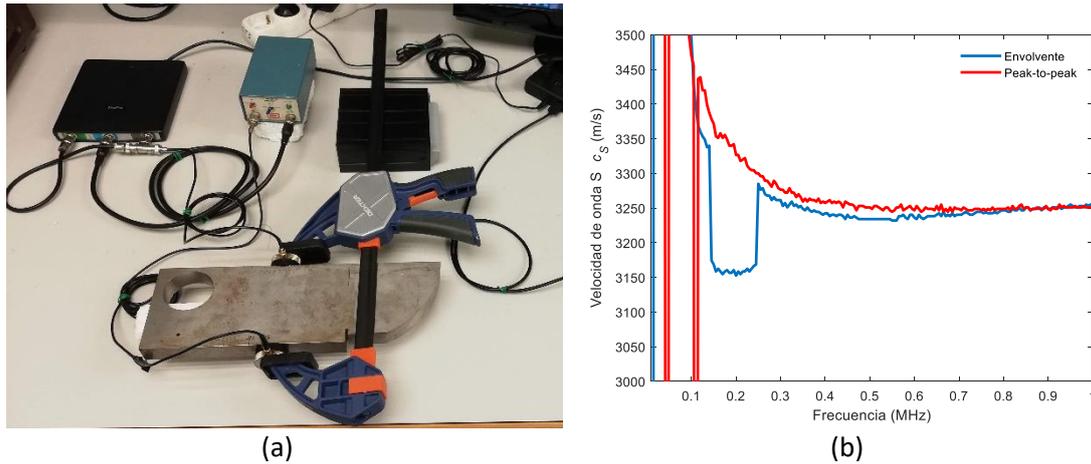


Figura 96. (a) Medida de onda S en pieza de calibración; (b) Velocidad de onda S en pieza de calibración a partir de los métodos de la envolvente (curva azul) y el método peak-to-peak (curva roja).

De nuevo, al aplicar la ecuación (60), se ha obtenido una curva de velocidad de onda S , c_S , cuyo promedio es igual a 3003 m/s para el mortero gris (curva azul en Figura 97) y 2248 m/s para la placa de GRC (curva roja en Figura 97).

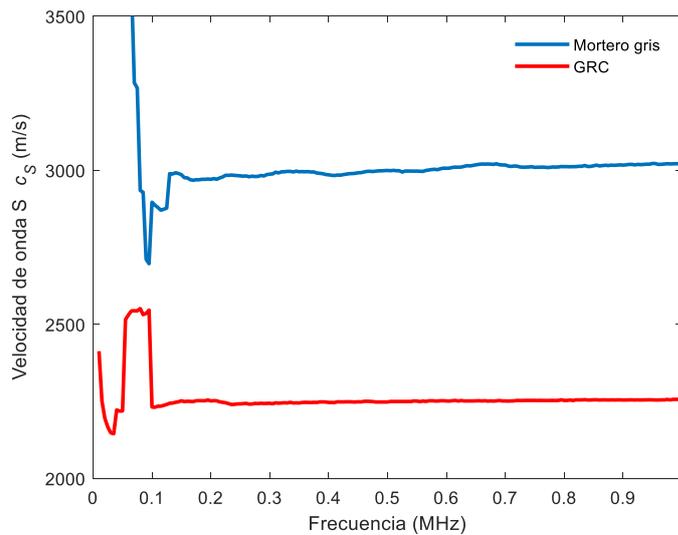


Figura 97. Velocidad de onda S del mortero gris y del GRC.

4.3.2. Preprocesado

En el caso de las probetas de GRC, debido a que sus velocidades son menores que las del acero y aluminio y a que su grosor es relativamente considerable (16 mm), aparecen varios modos de Lamb en las señales recibidas (Figura 98).

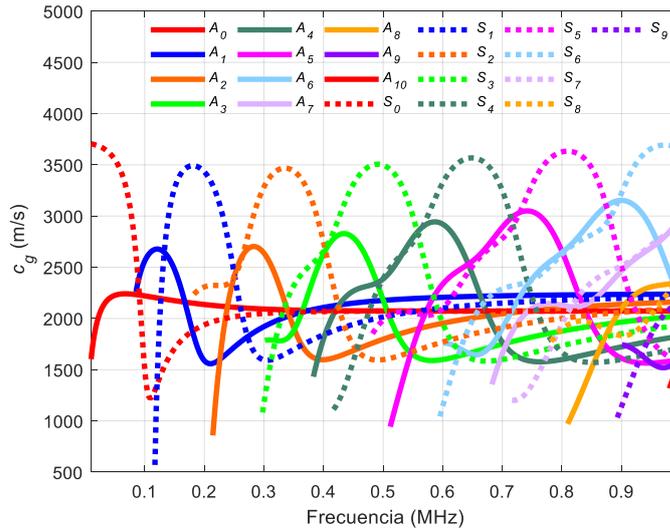


Figura 98. Curvas de dispersión de velocidad de grupo de la placa de GRC utilizada.

Para solucionar esto, se ha utilizado un protocolo de procesado diferente al de las medidas de placas metálicas y de mortero. A partir de las intersecciones entre las curvas de ángulo y los ángulos elegidos, se ha establecido una máscara de un ancho aproximado de 30 kHz en los espectrogramas combinados de las medidas de GRC. Esta máscara solo deja pasar el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado presente en dichas intersecciones, anulando el resto del espectrograma combinado. Además, para visualizar mejor los modos previsiblemente excitables, se han eliminado de las curvas teóricas los modos que no sufren intersecciones con la vertical del ángulo utilizado y se ha representado una magnificación en la región de interés que marcan las SSC, tanto en el espectrograma combinado como en la propia SSC (Figura 99).

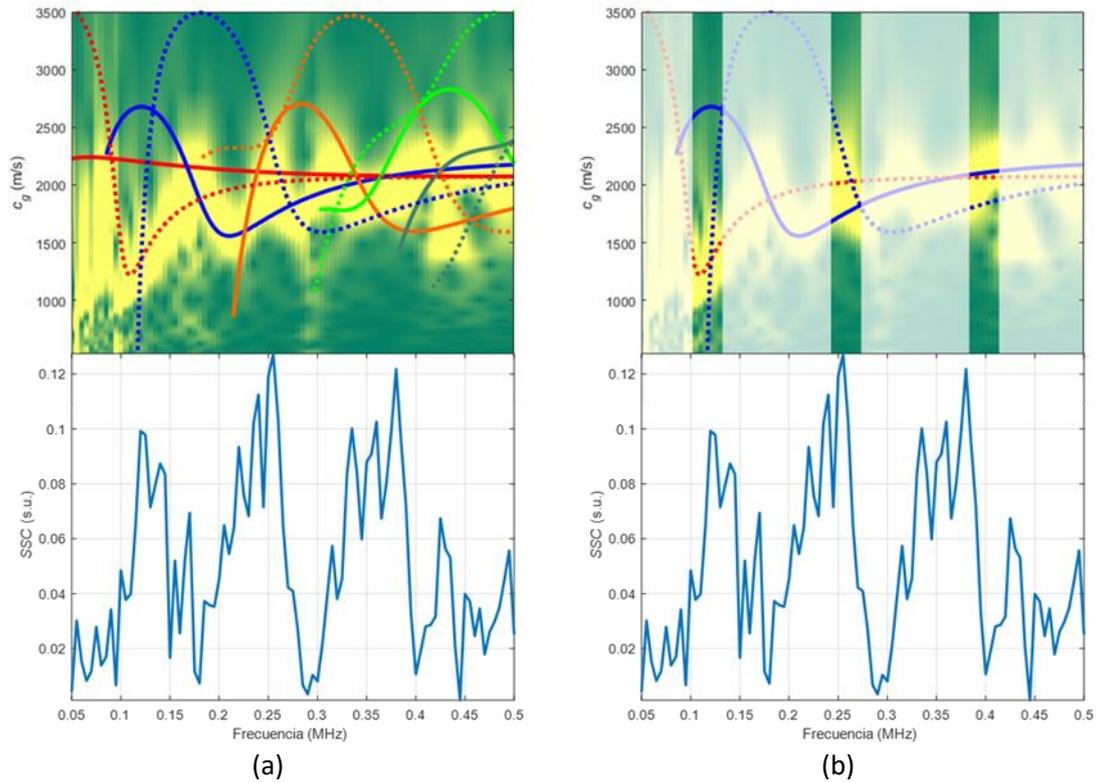
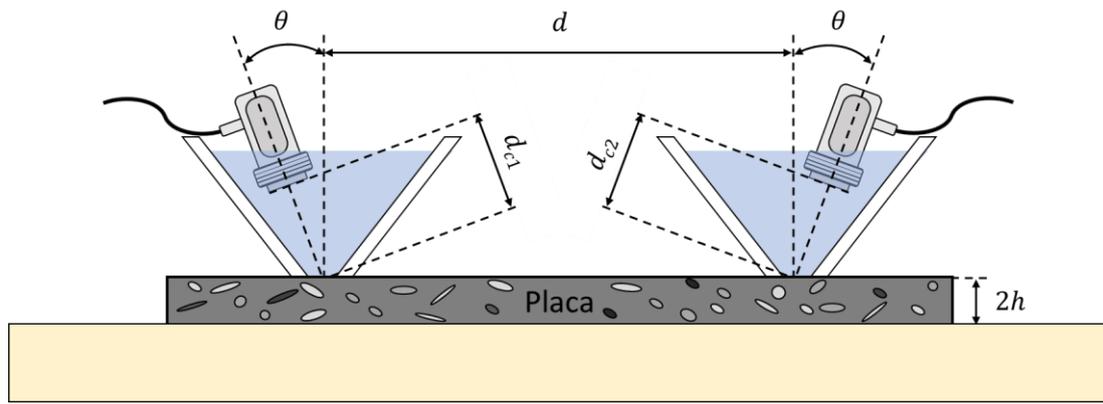


Figura 99. Ejemplo de espectrograma combinado de curvas teóricas y SSC, sin máscara (a) y con máscara (b).

4.3.3. Acoplamiento por agua mediante contenedores cónicos

En materiales cementicios se ha decidido utilizar el acoplamiento localizado por agua para evitar la fuga de energía que sucede en inmersión (que limita la distancia de propagación del ultrasonido por la placa) y reducir las reflexiones, mejorando la interpretación de las señales recibidas. Esto último cobra especial relevancia en el análisis de materiales heterogéneos donde el número de modos es mayor que en el caso de las probetas homogéneas. Se han utilizado dos experimentales: acoplamiento localizado mediante contenedores cónicos y cuñas rellenas de agua.

El esquema y la fotografía del montaje experimental de contenedores cónicos rellenos de agua en placas cementicias se encuentran en la Figura 100.



(a)



(b)

Figura 100. Acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placas cementicias: (a) Esquema; (b) Fotografía (Vázquez et al., 2019b).

Las características de este montaje son las mismas que el experimental de contenedores cónicos utilizado en la inspección de placas metálicas (ver “Acoplamiento por agua mediante contenedores cónicos”).

4.3.3.1. Mortero 5 mm

Los parámetros de este experimental están reflejados en la Tabla 13. Se han utilizado un par de transductores de banda ancha de onda P (K0,5SC, General Electric) con una frecuencia central f_c de 0.5 MHz y un diámetro del elemento activo de 24 mm para la excitación y detección de ondas de Lamb en la placa de mortero gris de 5 mm.

Su rango frecuencial es de 10 kHz a 1 MHz, en incrementos de 5 kHz. Las señales recibidas se han amplificado 40 dB (5660C, Panametrics). Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por agua en la placa de mortero gris de 5 mm se representan en la Figura 101. Aquí se puede comprobar que, a pesar de ser un material cementicio de velocidad similar al GRC, el hecho que su espesor sea menor reduce el número de modos generados.

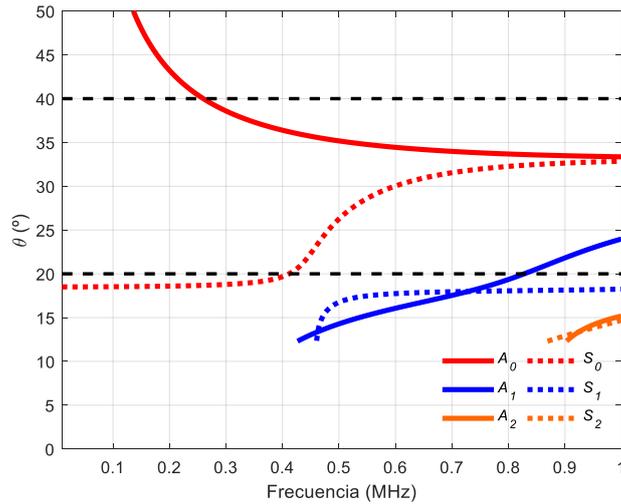


Figura 101. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de mortero gris de 5 mm de espesor (contenedores cónicos).

Los ángulos elegidos son 20° y 40° . Se producen distintas intersecciones entre las curvas de ángulos y los ángulos elegidos, concretamente:

- En 20° se produce una intersección con el modo S_0 en 0.41 MHz y con el modo A_1 en 0.83 MHz.
- En 40° se produce una intersección con el modo A_0 en 0.26 MHz.

En la Figura 102, se han representado los espectrogramas combinados de velocidad de grupo para los ángulos elegidos junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y las SSC.

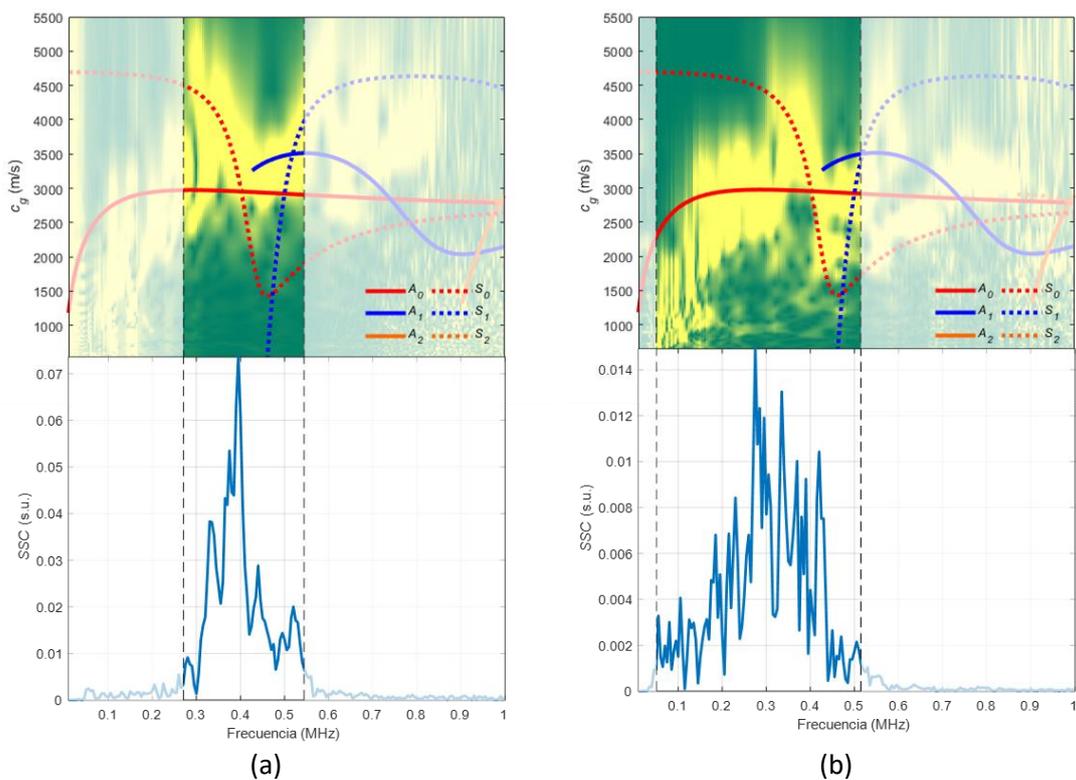


Figura 102. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placa de mortero gris de 5 mm de espesor: (a) 20° ; (b) 40° .

Los resultados para cada ángulo son:

- En 20°: Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo S_0 (curva discontinua roja) entre 0.3 y 0.38 MHz; y una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo A_1 entre 0.43 y 0.55 MHz.
- En 40°: Existe una correspondencia aceptable entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 0.14 y 0.34 MHz.

Tabla 13. Parámetros del experimental de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placa de mortero gris de 5 mm de espesor.

Parámetros de la placa		
Material	Mortero gris	
Espesor	5 mm	
Parámetros geométricos		
Ángulo en transmisión, θ	20°	40°
Ángulo en recepción, θ	20°	40°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	75 mm	
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	75 mm	
Distancia de propagación por la placa, d	210 mm	
Parámetros del equipamiento		
Frecuencia inicial	10 kHz	
Frecuencia final	1 MHz	
Incremento frecuencial	5 kHz	
Número de frecuencias	199	
Frecuencia de muestreo, f_s	10 MHz	
Número de muestras	10000	
Intervalo temporal	1 ms	
Número de ciclos, N_c	5	
Amplitud, V_p	3 V	
Promediado	32	
Amplificación en transmisión (equipamiento)	-	
Amplificación en recepción (equipamiento)	40 dB (5660C)	
Generador de funciones	33120A	
Osciloscopio	DPO3014	
Transductores (frecuencia central, f_c)	K0,5SC (0.5 MHz)	
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)	
Parámetros del postprocesado		
Ventana de espectrograma	20 μ s	
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %	
Número de puntos de las FT de cada ventana	2^{14}	
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	0	
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0	
Rango frecuencial que marca la SSC	0.27-0.55 MHz	0.05-0.52 MHz

4.3.3.2. GRC 16 mm

Los parámetros de este experimental están reflejados en la Tabla 14. Se han utilizado un par de transductores de banda ancha de onda P (K1SC, General Electric) con una frecuencia central f_c de 1 MHz y un diámetro del elemento activo de 24 mm para la excitación y detección de ondas de Lamb en la placa de GRC.

Estas señales se han amplificado por un factor de 50 (WMA-300, Falco Systems) y su rango frecuencial es de 50 kHz a 500 kHz, en incrementos de 5 kHz. Las señales recibidas se han amplificado 32 dB (AMPLUS-32, Dasel Sistemas) y a continuación, se han adquirido mediante un osciloscopio digital (DPO3014, Tektronix) con una frecuencia de muestreo f_s de 10 MHz, 10000 muestras (lo que implica un intervalo temporal de 1 ms) y promediado de 16.

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por agua en la placa de GRC se representan en la Figura 103.

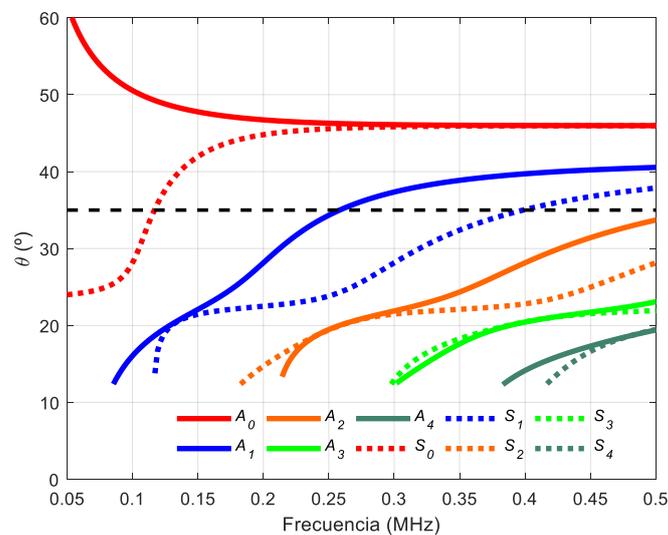


Figura 103. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de GRC.

El ángulo elegido es 35° . Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y el ángulo elegido son:

- En 35° se produce una intersección con el modo S_0 en 0.12 MHz, con el modo A_1 en 0.26 MHz y con el modo S_1 en 0.4 MHz.

En la Figura 104, se han representado los espectrogramas combinados de velocidad de grupo para los ángulos elegidos (con y sin máscara, ver "Preprocesado") junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y las SSC.

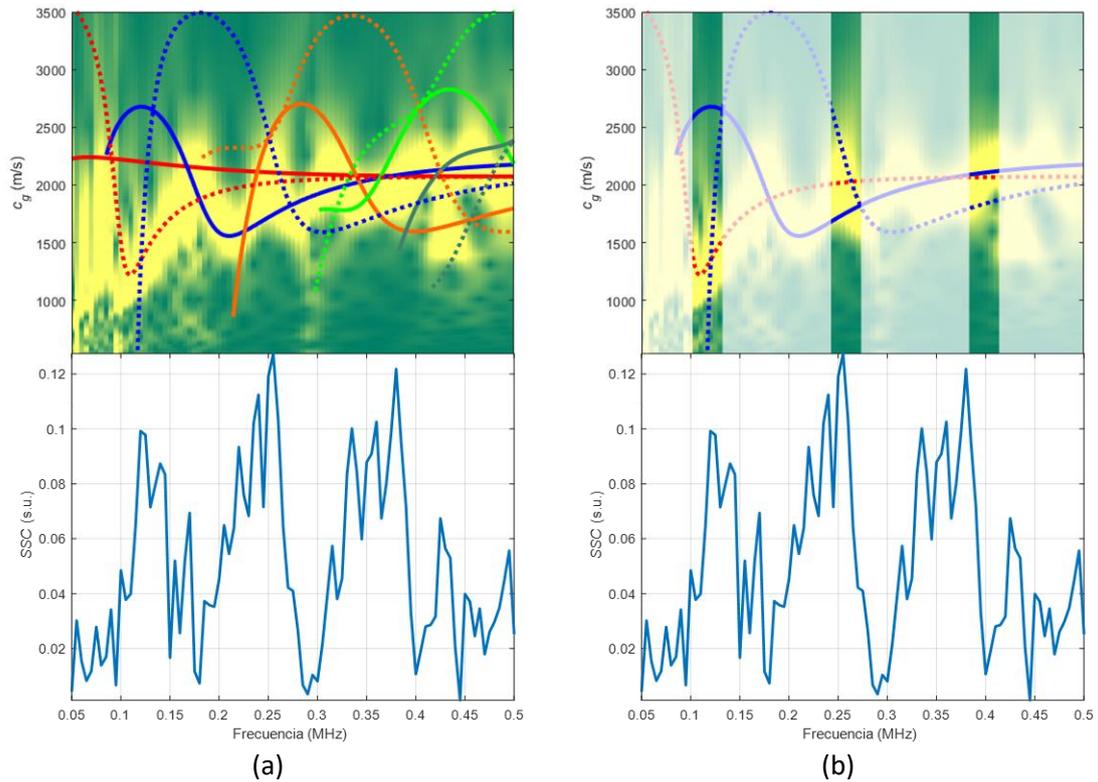


Figura 104. Espectrogramas combinados sin máscara (a) y con máscara (b), curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placa de GRC.

Los resultados para el ángulo elegido 35° son:

- Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo S_0 (curva discontinua roja) entre 0.1 y 0.13 MHz.
- Existe una correspondencia aceptable entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo A_1 (curva continua azul) entre 0.24 y 0.27 MHz.
- Existe una mala correspondencia entre el nivel de señal normalizado y la curva teórica del modo S_1 (curva discontinua azul) entre 0.38 y 0.41 MHz.

Tabla 14. Parámetros del experimental de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos en placa de GRC.

Parámetros de la placa	
Material	GRC
Espesor	16 mm
Parámetros geométricos	
Ángulo en transmisión, θ	35°
Ángulo en recepción, θ	35°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	60 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	60 mm
Distancia de propagación por la placa, d	220 mm
Parámetros del equipamiento	
Frecuencia inicial	50 kHz
Frecuencia final	500 kHz
Incremento frecuencial	5 kHz
Número de frecuencias	91
Frecuencia de muestreo, f_s	10 MHz
Número de muestras	10000
Intervalo temporal	1 ms
Número de ciclos, N_c	10
Amplitud, V_p	3 V
Promediado	16
Amplificación en transmisión (equipamiento)	x50 (WMA-300)
Amplificación en recepción (equipamiento)	32 dB (AMPLUS-32)
Generador de funciones	33120A
Osciloscopio	DPO3014
Transductores (frecuencia central, f_c)	K1SC (1 MHz)
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)
Parámetros del postprocesado	
Ventana de espectrograma	40 μ s
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %
Número de puntos de las FT de cada ventana	2^{14}
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	0
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0
Rango frecuencial que marca la SSC	0.05-0.5 MHz

4.3.4. Acoplamiento por agua mediante cuñas

El esquema y la fotografía del montaje experimental de acoplamiento por agua mediante cuñas se encuentra en la Figura 105. En este caso, al ser cuñas fijas, el montaje es más estable.

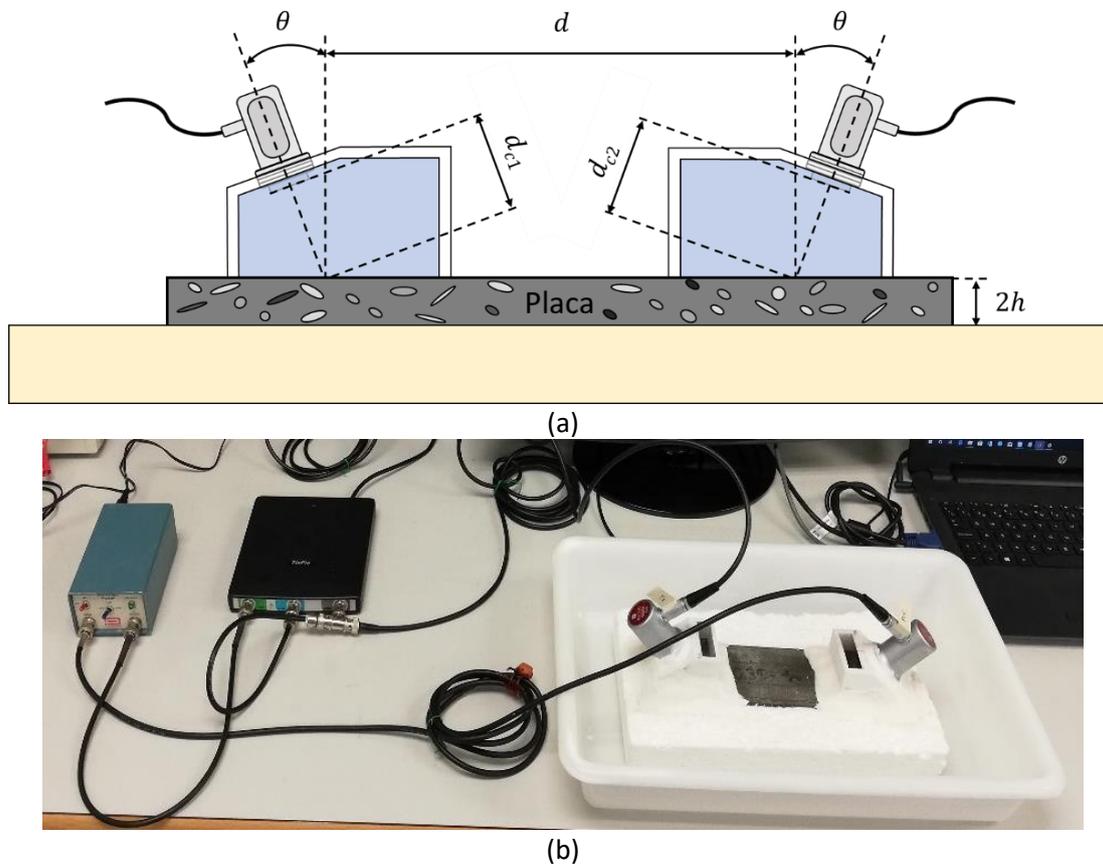


Figura 105. Acoplamiento localizado por agua mediante cuñas en placas cementicias: (a) Esquema; (b) Fotografía.

Las cuñas de agua se han diseñado con el software SolidWorks y se han fabricado con impresora 3D. Presentan un ángulo concreto, el cual se ha decidido a partir de las curvas teóricas de ángulo del material cementicio correspondiente. Concretamente se ha fabricado una pareja de cuñas de 40° (Figura 106 (b)). El material plástico de impresora 3D es un material muy atenuante que no debería generar excesivas reflexiones dentro de las cuñas (Veneziani et al., 2016). Las cuñas se han rellenado con agua.

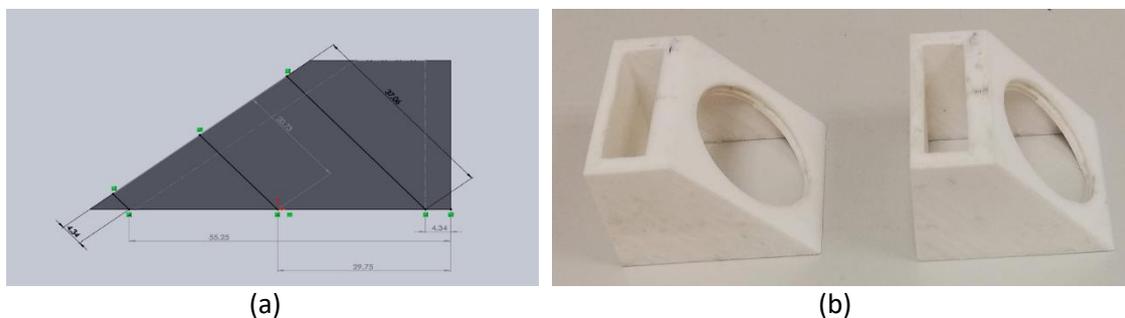


Figura 106. (a) Modelo de SolidWorks de la cuña de 40°; (a) Cuñas de 40° impresa.

Las ventajas del uso de cuñas respecto a contenedores cónicos son:

- Medición más precisa de las distancias involucradas en el cálculo de la velocidad de grupo: distancia TXOR-placa, d_{c1} , distancia placa-RXOR, d_{c2} y distancia recorrida por la placa, d . Todas estas distancias se pueden obtener del modelo de SolidWorks de la cuña (Figura 106 (a)). Se ha realizado una corrección de 3 mm en d_{c1} y d_{c2} debido a que la cara del transductor se introduce dentro de la cuña.
- Posibilidad de enroscar los transductores gracias al diseño de la cuña, lo que lo convierte en un sistema más estable y que ofrece mayor repetibilidad.

No obstante, se han perdido las ventajas de focalización de haz debido a la base estrecha de los contenedores cónicos y la reducción de reflexiones dentro del contenedor debido a la forma cónica (Vázquez et al., 2019b).

Los parámetros de este experimental están reflejados en la Tabla 15. El transmisor se ha excitado con señales sinusoidales *burst* de 5 ciclos mediante un generador de señal programable (Handyscope HS3, TiePie engineering). Las señales recibidas se han amplificado 40 dB (5660C, Panametrics) y a continuación, se han adquirido mediante un osciloscopio digital (Handyscope HS3, TiePie engineering) con una frecuencia de muestreo f_s de 10 MHz, 20000 muestras (lo que implica un intervalo temporal de 2 ms) y promediado de 8 trazas.

4.3.4.1. Mortero 2.5 mm

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por agua en la placa de mortero de 2.5 mm se representan en la Figura 107 .

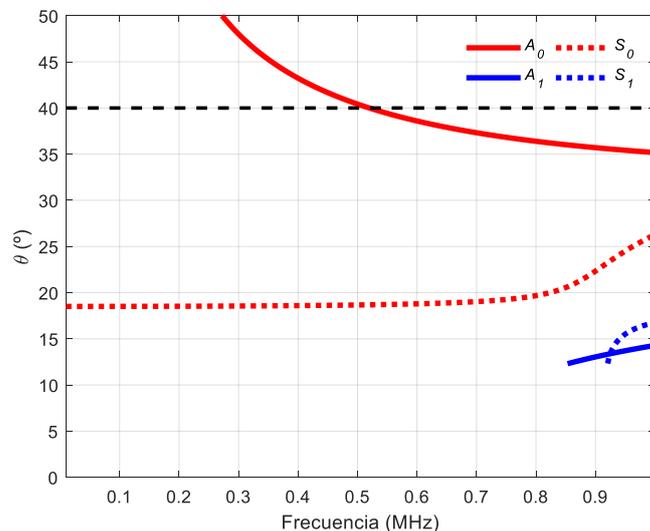


Figura 107. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de mortero gris de 2.5 mm de espesor.

El ángulo elegido es 40° . Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y el ángulo elegido son:

- En 40° se produce una intersección con el modo A_0 (curva continua roja) en 0.52 MHz.

En la Figura 108, se ha representado el espectrograma combinado de velocidad de grupo para el ángulo elegido junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y la SSC.

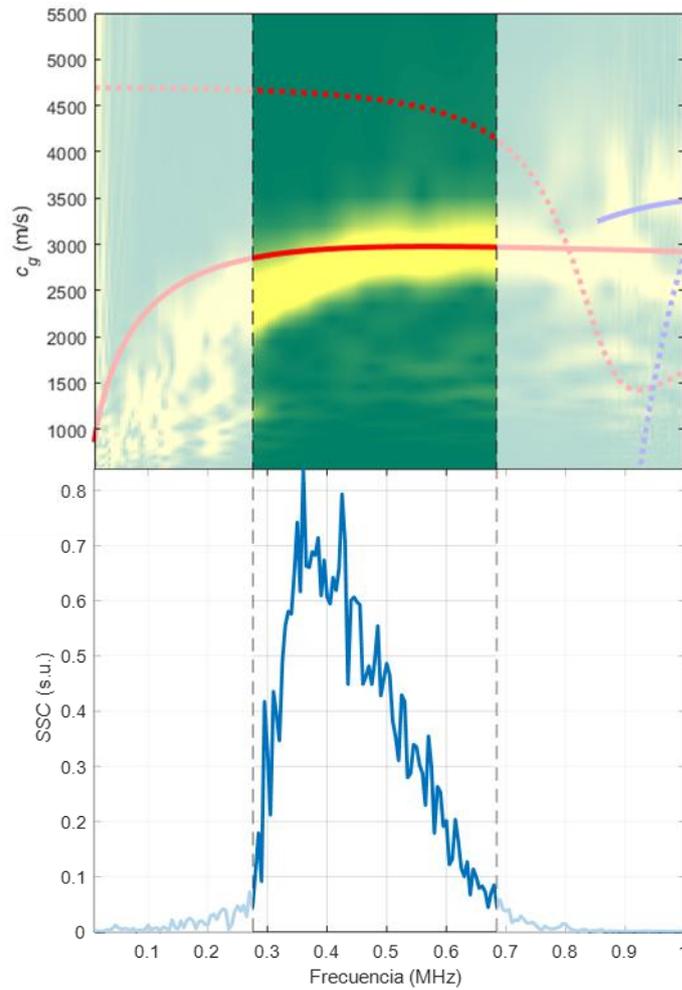


Figura 108. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en placa de mortero gris de 2.5 mm de espesor.

Los resultados para el ángulo de 40° son:

- Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 0.42 y 0.69 MHz.

4.3.4.2. Mortero 5 mm

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por agua en la placa de mortero de 5 mm se representan en la Figura 109. Si se compara dicha figura con la Figura 107, se puede apreciar como al aumentar el espesor de la probeta el número de modos es mayor para el mismo rango frecuencial.

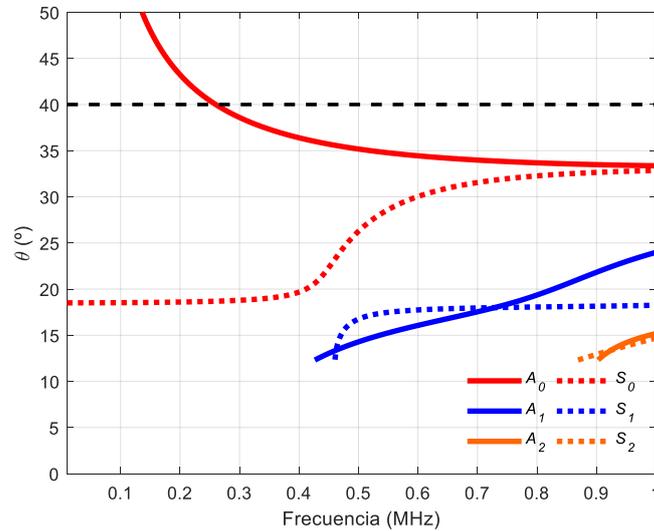


Figura 109. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de mortero gris de 5 mm de espesor (cuña 40°).

El ángulo elegido es 40°. Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y el ángulo elegido son:

- En 40° se produce una intersección con el modo A_0 (curva continua roja) en 0.26 MHz.

En la Figura 110, se ha representado el espectrograma combinado de velocidad de grupo para los ángulos elegidos junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y la SSC.

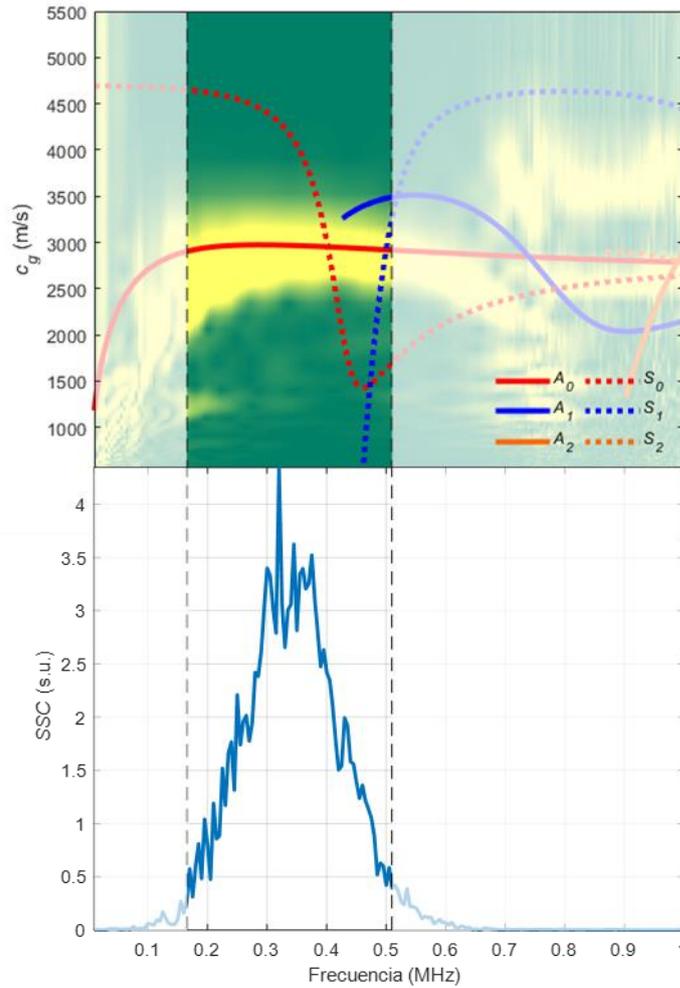


Figura 110. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en placa de mortero gris de 5 mm de espesor.

Los resultados para el ángulo de 40° elegido son:

- Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 0.17 y 0.51 MHz.

4.3.4.3. Mortero 7.5 mm

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por agua en la placa de mortero de 7.5 mm se representan en la Figura 111.

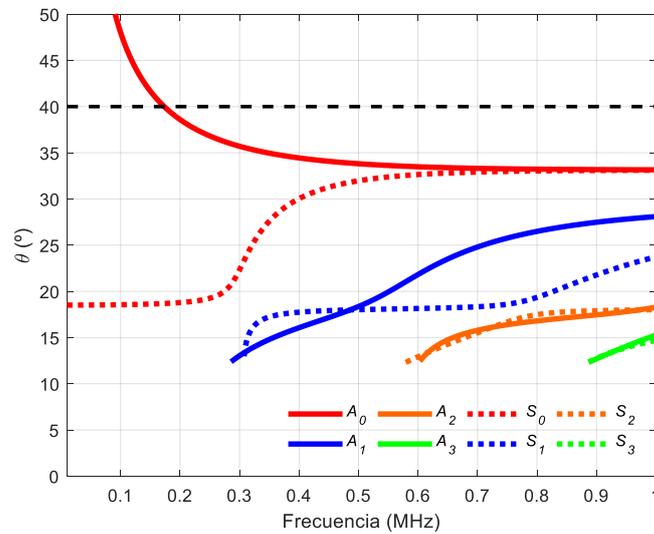


Figura 111. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de mortero gris de 7.5 mm de espesor.

El ángulo elegido es 40° . Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y el ángulo elegido son:

- En 40° se produce una intersección con el modo A_0 (curva continua roja) en 0.17 MHz.

En la Figura 112, se ha representado el espectrograma combinado de velocidad de grupo para el ángulo elegido junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y la SSC.

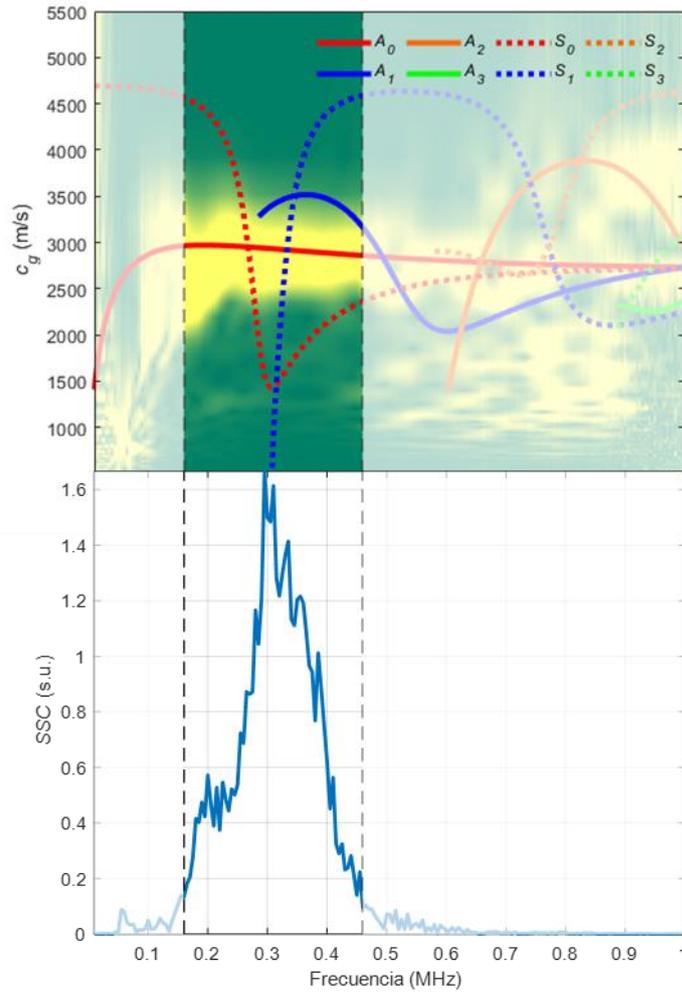


Figura 112. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en placa de mortero gris de 7.5 mm de espesor.

Los resultados para el ángulo de 40° elegido son:

- Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 0.16 y 0.46 MHz.

4.3.4.4. Mortero 13 mm

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por agua en la placa de mortero de 13 mm se representan en la Figura 113.

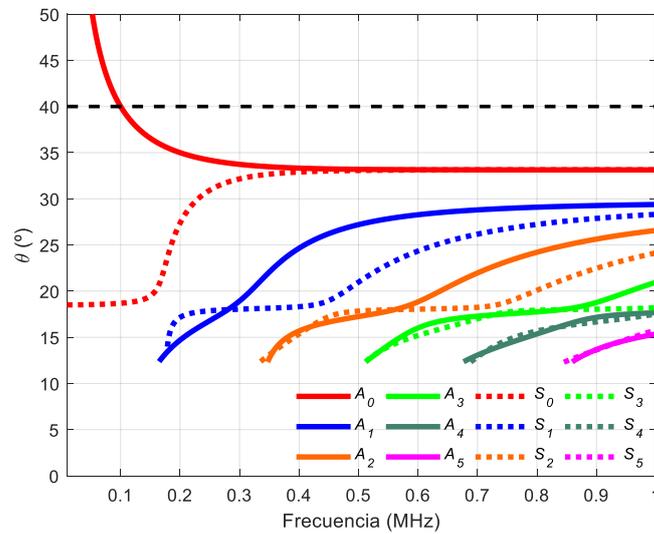


Figura 113. Curvas de ángulo para acoplamiento por agua en placa de mortero gris de 13 mm de espesor.

El ángulo elegido es 40° . Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y el ángulo elegido son:

- En 40° se produce una intersección con el modo A_0 (curva continua roja) en 0.1 MHz.

En la Figura 114, se ha representado el espectrograma combinado de velocidad de grupo para el ángulo elegido junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y la SSC.

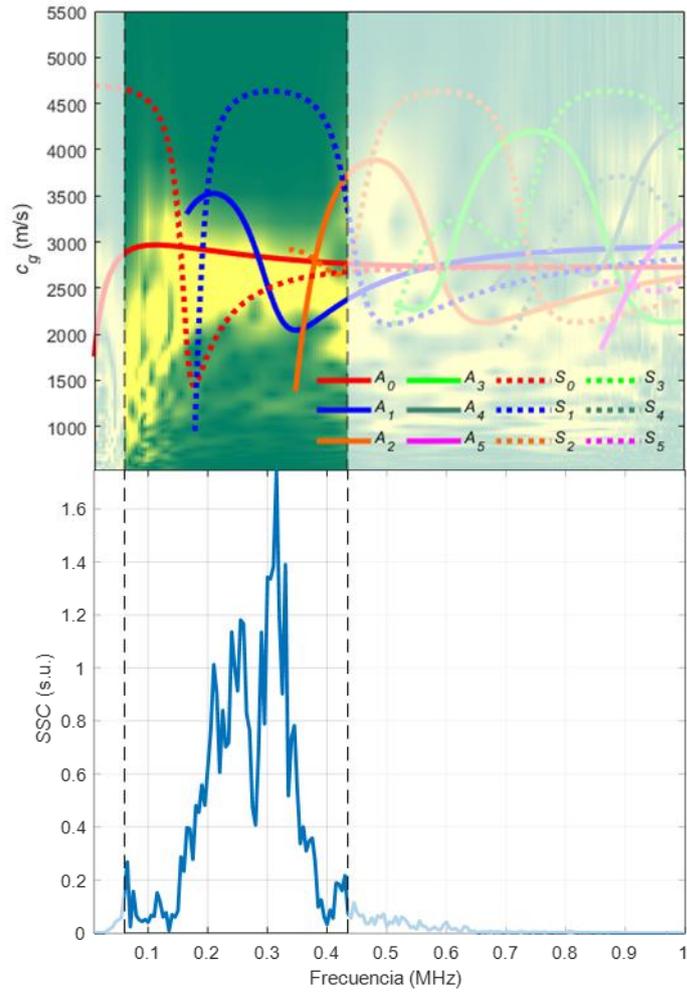


Figura 114. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en placa de mortero gris de 13 mm de espesor.

Los resultados para el ángulo de 40° elegido son:

- Existe una correspondencia aceptable entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 0.135 y 0.385 MHz.

Tabla 15. Parámetros del experimental de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en placas de mortero gris de distintos espesores.

Parámetros de la placa				
Material	Mortero gris			
Espesor	2.5 mm	5 mm	7.5 mm	13 mm
Parámetros geométricos				
Ángulo en transmisión, θ	40°			
Ángulo en recepción, θ	40°			
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	17.7 mm			
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	17.7 mm			
Distancia de propagación por la placa, d	174.5 mm			
Parámetros del equipamiento				
Frecuencia inicial	10 kHz			
Frecuencia final	1 MHz			
Incremento frecuencial	5 kHz			
Número de frecuencias	199			
Frecuencia de muestreo, f_s	10 MHz			
Número de muestras	20000			
Intervalo temporal	2 ms			
Número de ciclos, N_c	5			
Amplitud, V_p	2 V	0.5 V	2 V	
Promediado	8			
Amplificación en transmisión (equipamiento)	-			
Amplificación en recepción (equipamiento)	40 dB (5660C)			
Generador de funciones	Handyscope HS3			
Osciloscopio	Handyscope HS3			
Transductores (frecuencia central, f_c)	K0,5SC (0.5 MHz)			
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)			
Parámetros del postprocesado				
Ventana de espectrograma	20 μ s			
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %			
Número de puntos de las FT de cada ventana	2 ¹⁴			
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	0			
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0			
Rango frecuencial que marca la SSC	0.28-0.69 MHz	0.17-0.51 MHz	0.16-0.46 MHz	0.06-0.44 MHz

4.3.5. Estudio de la saturación de la probeta de mortero sobre las curvas de dispersión

El hecho de trabajar con probetas de cemento añade una incertidumbre adicional ya que este tipo de material puede presentar grados de humedad (o saturación) distintos en función de cómo se almacenen. Pueden presentar un estado de saturación del 100 % si se almacenan en cámara húmeda o en inmersión o pueden presentar un nivel inferior de saturación si dejan al aire. Es por ello por lo que se ha estudiado el efecto de la saturación de agua en una placa de mortero gris, para comprobar si se modifican las curvas experimentales de dispersión. Para ello, se monitorizó su masa cada día (Figura 115) durante dos meses hasta que ésta se estabilizó (Goueygou et al., 2009). La masa inicial fueron 171 g y la masa final 168.77 g sobre una placa de dimensiones 240 x 60 x 5 mm³ (largo x ancho x espesor).



Figura 115. Medición de masa de la placa de mortero gris de 5 mm de espesor.

La siguiente figura (Figura 116) es una comparativa entre la placa de 5 mm de mortero gris saturada dos meses (sumergida en agua) frente a la misma placa después de haber sufrido un proceso de secado durante dos meses a una temperatura de 36.7 °C. Dicha placa se ha medido con cuñas de 40° antes y después del proceso de secado. Se han seleccionado para cada frecuencia emitida el valor máximo de cada señal en recepción.

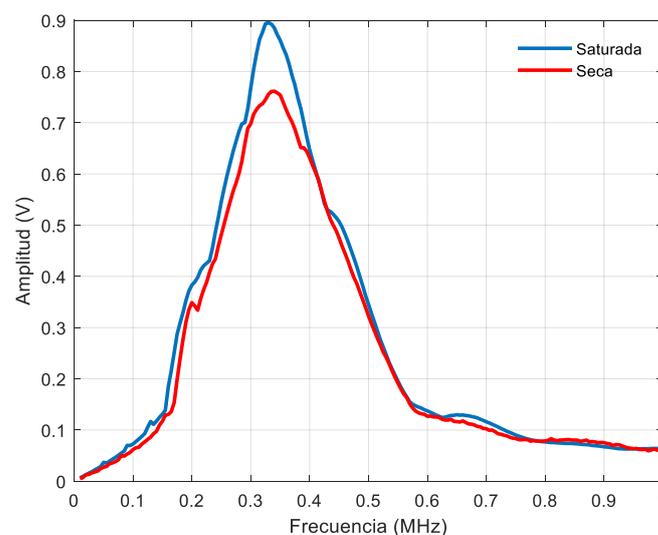


Figura 116. Comparativa de amplitud máxima respecto a la frecuencia entre la placa de mortero de 5 mm saturada y seca.

Se observa que ambas curvas son muy próximas entre sí. Si comparamos entre espectrogramas combinados, se obtiene lo siguiente (Figura 117).

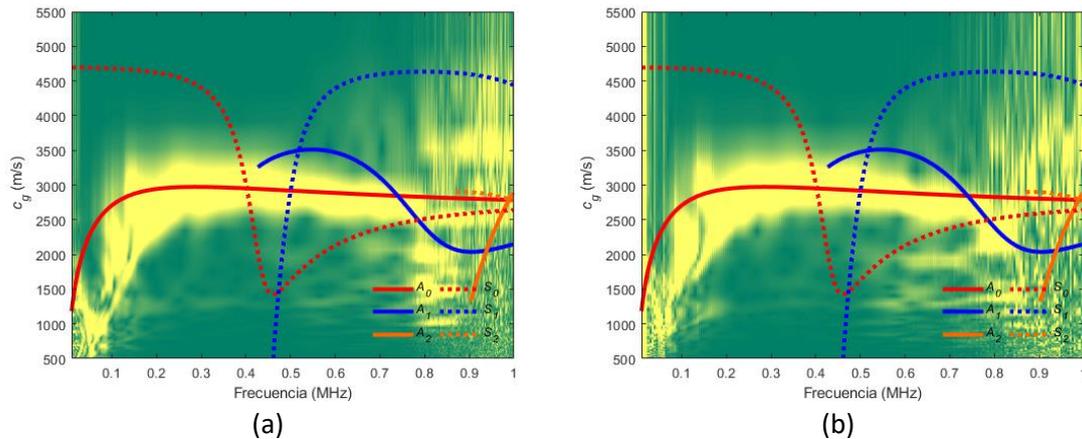


Figura 117. Espectrograma combinado y curvas teóricas de la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° entre la placa de mortero de 5 mm saturada (a) y seca (b).

Se comprueba que ambos espectrogramas son casi idénticos, por lo que se demuestra que el nivel de saturación o agua presente en el mortero gris no influye en los diagramas experimentales.

4.3.6. Discusión entre contenedores cónicos vs cuñas

Si se contrastan los espectrogramas combinados de las medidas de contenedores cónicos y cuñas en la placa de mortero gris de 5 mm, se obtienen los siguientes resultados (Figura 118).

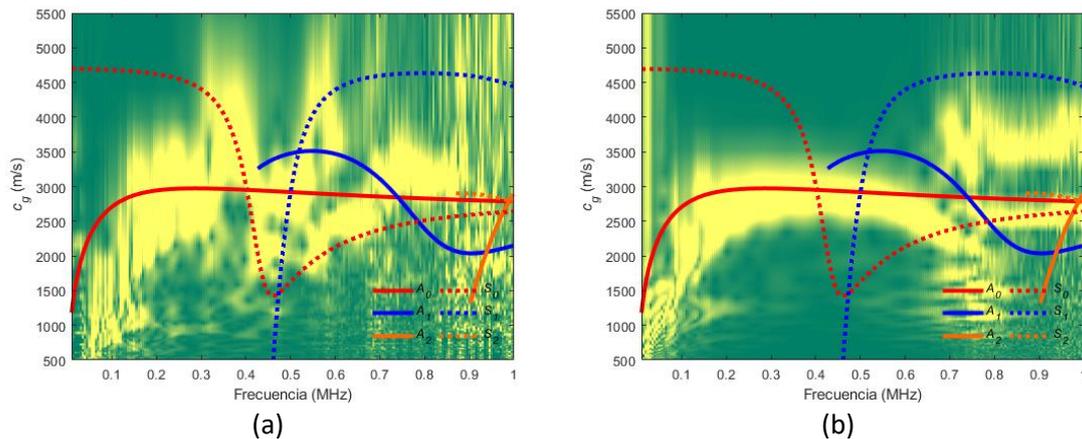


Figura 118. Espectrogramas combinados y curvas teóricas de la técnica de acoplamiento localizado por: (a) contenedores cónicos; (b) cuñas.

Y si se comparan las SSC (normalizadas respecto a su máximo) de contenedores cónicos y cuñas de ángulo 40° se obtiene lo siguiente (Figura 119):

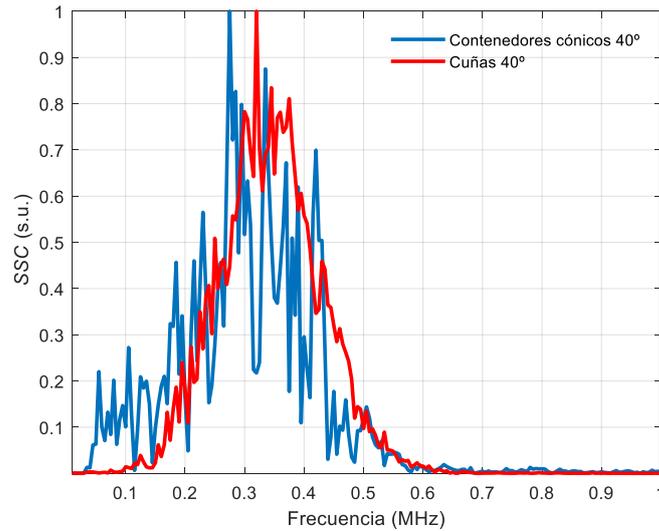


Figura 119. Comparativa de SSC de las técnicas de acoplamiento localizado por agua mediante contenedores cónicos y cuñas en placa de mortero gris de 5 mm.

El máximo de la SSC de contenedores cónicos aparece a una frecuencia ligeramente inferior (0.28 MHz) en comparación a la SSC de cuña (0.32 MHz). Sin embargo, el ancho de banda de la SSC de contenedores cónicos es ligeramente superior que el mostrado por la SSC de cuña y se encuentra desplazado hacia el rango de baja frecuencia. Se observa que tanto los espectrogramas combinados como las SSC de contenedores cónicos y cuña para un ángulo de 40° difieren sensiblemente.

Concretamente, la buena correspondencia entre el nivel de señal del espectrograma combinado de cuña de 40° y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) alcanza mayores frecuencias que en el caso de contenedores cónicos. Esto puede ser debido a que, en el caso de los contenedores cónicos, parte del haz ultrasónico no incide en el círculo de la base del contenedor, provocando reflexiones en las paredes de dicho contenedor y generando otros modos indeseados. En la etapa de recepción, el contenedor cónico también puede ocasionar problemas de reflexiones que dificulten la detección del modo deseado (A_0) frente a otros modos que se generan de forma colateral. En el caso de la cuña a 40°, el rango angular no lo delimita la base estrecha, por lo que se consigue un correcto seguimiento del modo A_0 , al excitarse principal y únicamente este modo con mayor energía frente a otros modos indeseados.

4.3.7. Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos

El esquema y la fotografía del montaje experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placas cementicias se encuentra en la Figura 120.

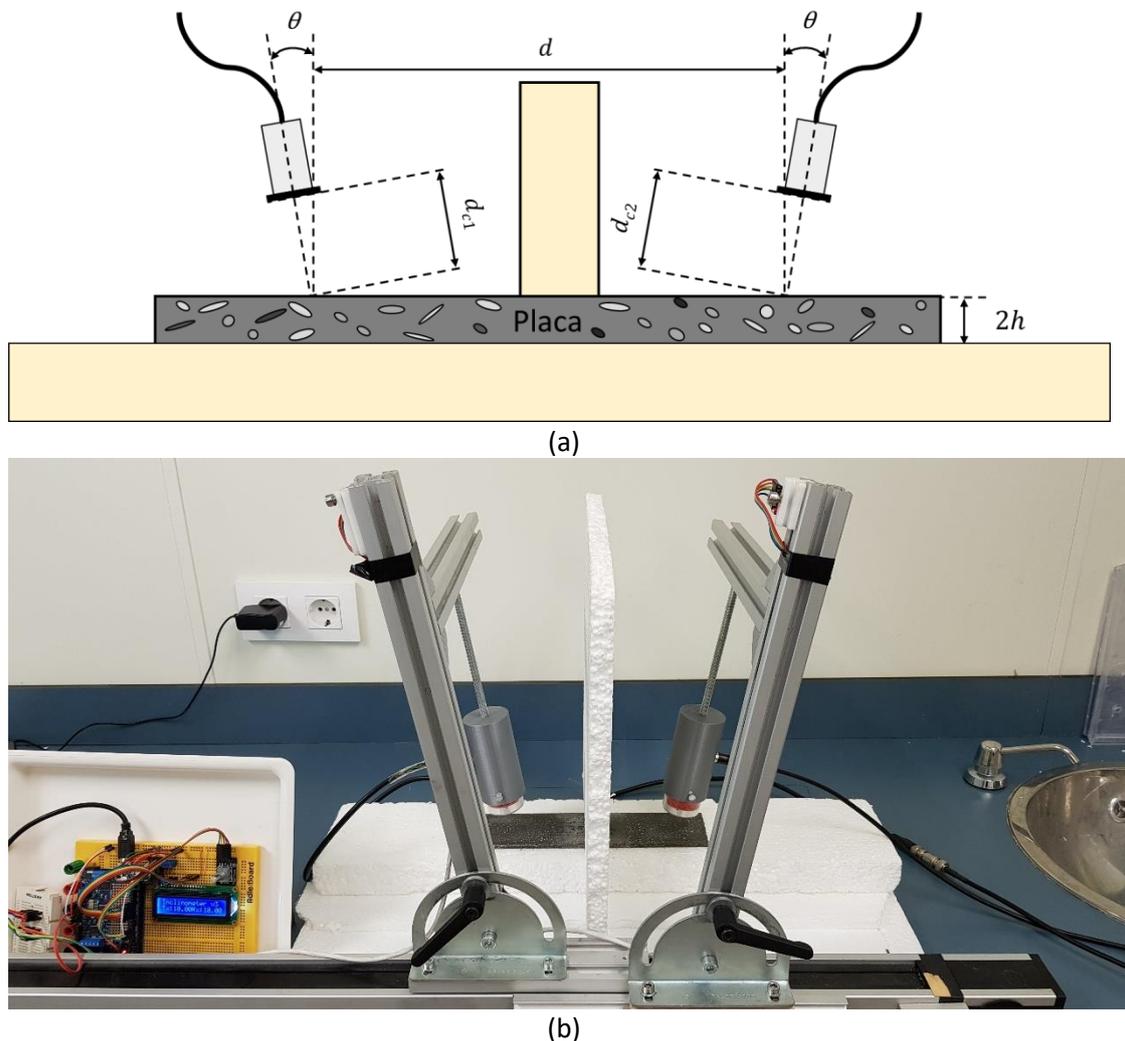


Figura 120. Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placas cementicias: (a) Esquema; (b) Fotografía (“Figure 19”, por [Santiago Vázquez](#), Jorge Gosálbez, Ignacio Bosch, Alicia Carrión, Carles Gallardo y Jordi Payá, licencia bajo [CC BY 4.0](#)) (Vázquez et al., 2019b).

Las características de este montaje son las mismas que el experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos utilizado en la inspección de placas metálicas (ver “Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos”). No obstante, existen algunos cambios. Para estas medidas, se ha utilizado el par de transductores piezoeléctricos de acoplamiento por aire de menor frecuencia central ($f_c=250$ kHz) para trabajar en regiones de las curvas donde existan pocos modos y por razones de atenuación. Además, en las medidas de mortero gris, se ha aplicado un filtro paso bajo de frecuencia de corte 500 kHz para reducir el ruido de las señales. Con esta técnica, se han medido las placas de mortero gris (excepto la de 13 mm de espesor) y la placa de GRC.

4.3.7.1. Mortero 2.5 mm

Los parámetros de este experimental están reflejados en la Tabla 16. El rango frecuencial de las señales emitidas es de 50 kHz a 450 kHz, en incrementos de 2 kHz.

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por aire en la placa de mortero de 2.5 mm se representan en la Figura 121.

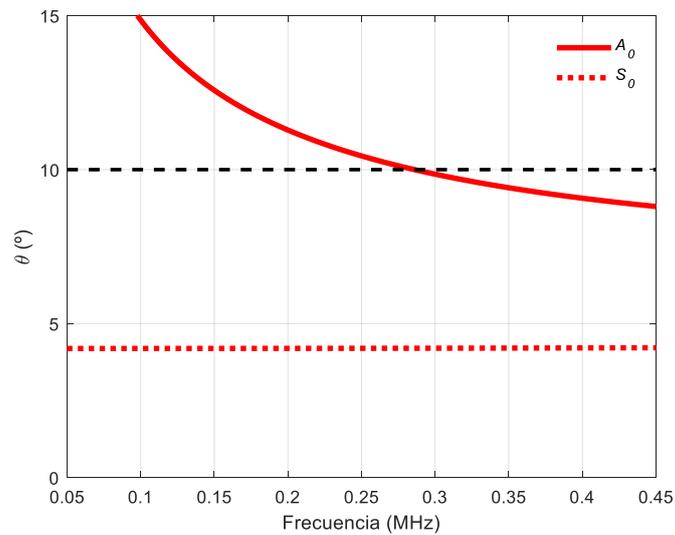


Figura 121. Curvas de ángulo para acoplamiento por aire en placa de mortero gris de 2.5 mm de espesor.

El ángulo elegido es 10° . Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y el ángulo elegido son:

- En 10° se produce una intersección con el modo A_0 (curva continua roja) en 0.29 MHz.

En la Figura 122, se ha representado el espectrograma combinado de velocidad de grupo para el ángulo elegido junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y la SSC.

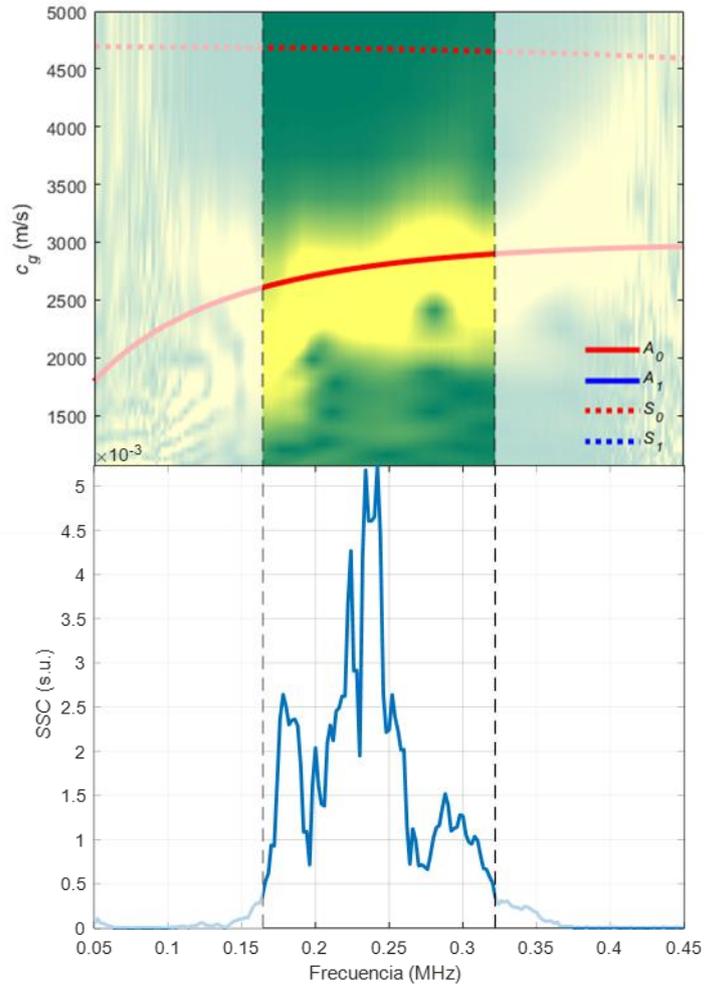


Figura 122. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de mortero gris de 2.5 mm de espesor.

Los resultados para el ángulo de 10° elegido son:

- Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 0.16 y 0.32 MHz.

4.3.7.2. Mortero 5 mm

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por aire en la placa de mortero de 5 mm se representan en la Figura 123.

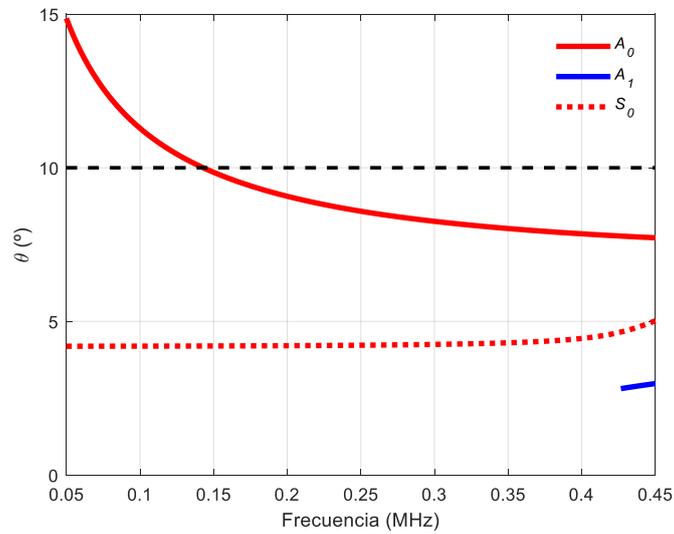


Figura 123. Curvas de ángulo para acoplamiento por aire en placa de mortero gris de 5 mm de espesor.

El ángulo elegido es 10° . Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y el ángulo elegido son:

- En 10° se produce una intersección con el modo A_0 (curva continua roja) en 0.14 MHz.

En la Figura 124, se ha representado el espectrograma combinado de velocidad de grupo para el ángulo elegido junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y la SSC.

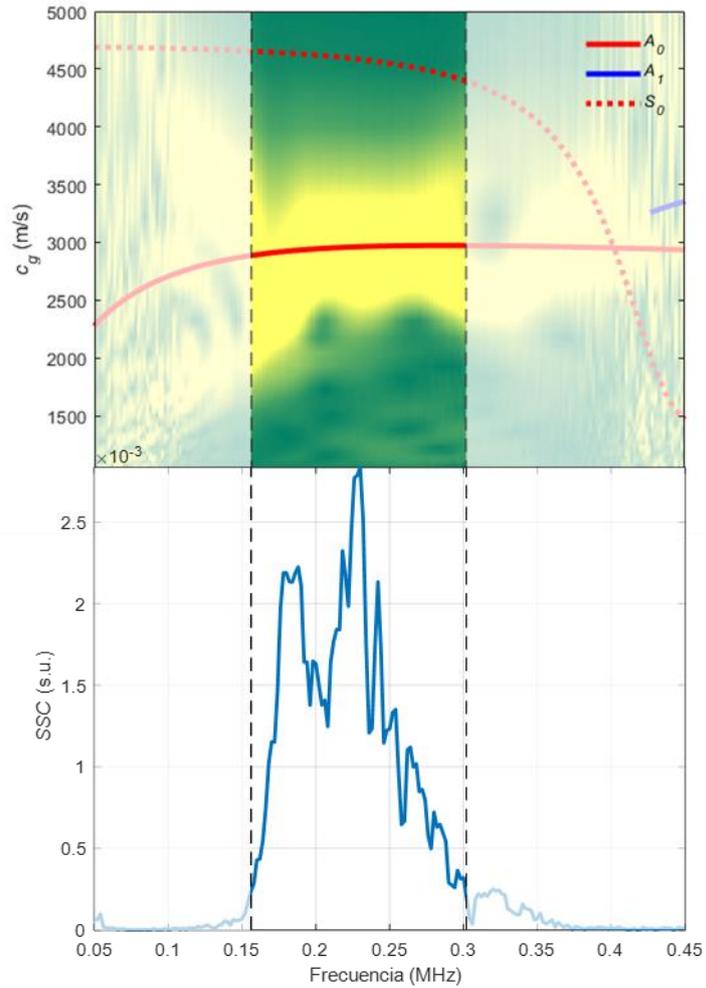


Figura 124. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de mortero gris de 5 mm de espesor.

Los resultados para el ángulo de 10° elegido son:

- Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 0.16 y 0.30 MHz.

4.3.7.3. Mortero 7.5 mm

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por aire en la placa de mortero de 7.5 mm se representan en la Figura 125.

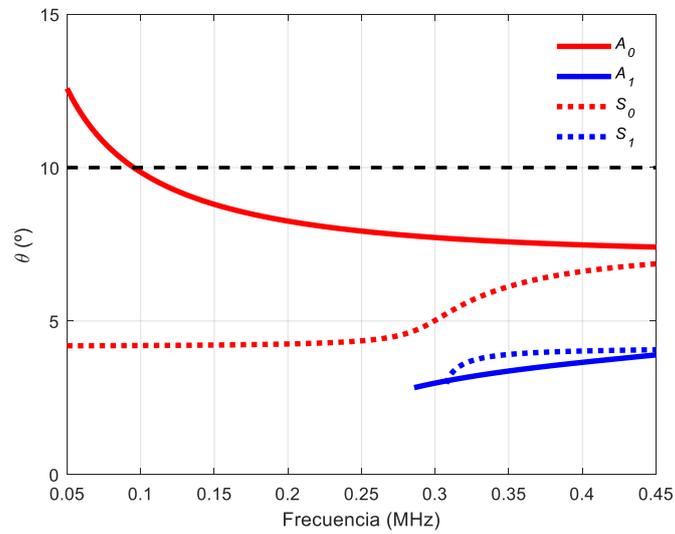


Figura 125. Curvas de ángulo para acoplamiento por aire en placa de mortero gris de 7.5 mm de espesor.

El ángulo elegido es 10° . Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y el ángulo elegido son:

- En 10° se produce una intersección con el modo A_0 (curva continua roja) en 0.1 MHz.

En la Figura 126, se ha representado el espectrograma combinado de velocidad de grupo para el ángulo elegido junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y la SSC.

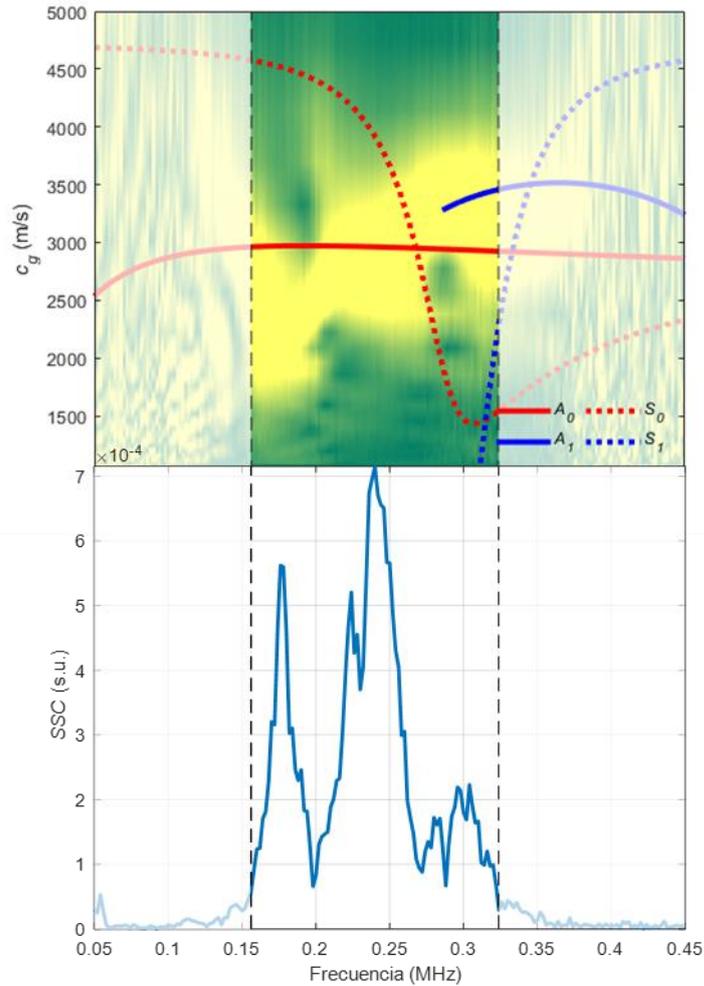


Figura 126. Espectrograma combinado, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de mortero gris de 7.5 mm de espesor.

Los resultados para el ángulo de 10° elegido son:

- Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo A_0 (curva continua roja) entre 0.2 y 0.27 MHz.
- Se observa también la excitación de los modos S_0 y A_1 . No obstante, la intersección entre el ángulo de 10° y la curva de ángulos del modo A_0 se produce a una frecuencia externa al ancho de banda de los transductores.

Tabla 16. Parámetros del experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placas de mortero gris de distintos espesores.

Parámetros de la placa			
Material	Mortero gris		
Espesor	2.5 mm	5 mm	7.5 mm
Parámetros geométricos			
Ángulo en transmisión, θ	10°		
Ángulo en recepción, θ	10°		
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	35 mm	32 mm	40 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	35 mm	32 mm	40 mm
Distancia de propagación por la placa, d	168 mm		
Parámetros del equipamiento			
Frecuencia inicial	50 kHz		
Frecuencia final	450 Hz		
Incremento frecuencial	2 kHz		
Número de frecuencias	201		
Frecuencia de muestreo, f_s	10 MHz		
Número de muestras	20000		
Intervalo temporal	2 ms		
Número de ciclos, N_c	5		
Amplitud, V_p	6 V		
Promediado	32		
Amplificación en transmisión (equipamiento)	x50 (WMA-300)		
Amplificación en recepción (equipamiento)	40 dB (5660C)		
Generador de funciones	33120A		
Osciloscopio	RTO 1004		
Transductores (frecuencia central, f_c)	$f_c = 0.25$ MHz		
Acoplante (velocidad si procede)	Aire (343 m/s)		
Parámetros del postprocesado			
Ventana de espectrograma	20 μ s		
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %		
Número de puntos de las FT de cada ventana	2 ¹⁴		
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	500		
Muestras eliminadas por otras causas (final)	16000		
Rango frecuencial que marca la SSC	0.16-0.32 MHz	0.16-0.3 MHz	0.16-0.32 MHz

4.3.7.4. GRC 16 mm

Los parámetros de este experimental están reflejados en la Tabla 17. El transmisor se ha excitado con señales sinusoidales *burst* de 5 ciclos mediante un generador de señal programable. Estas señales se han amplificado por un factor de 50 (WMA-300, Falco Systems) y su rango frecuencial es de 50 kHz a 550 kHz, en incrementos de 5 kHz. Las señales recibidas se han amplificado 40 dB (5660C, Panametrics) y a continuación, se han adquirido mediante un osciloscopio digital (RTO 1004, Rohde & Schwartz) con una frecuencia de muestreo de 10 MHz, 10000 muestras (lo que implica un intervalo temporal de 1 ms) y promediado de 32 trazas.

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por aire en la placa de GRC se representan en la Figura 127.

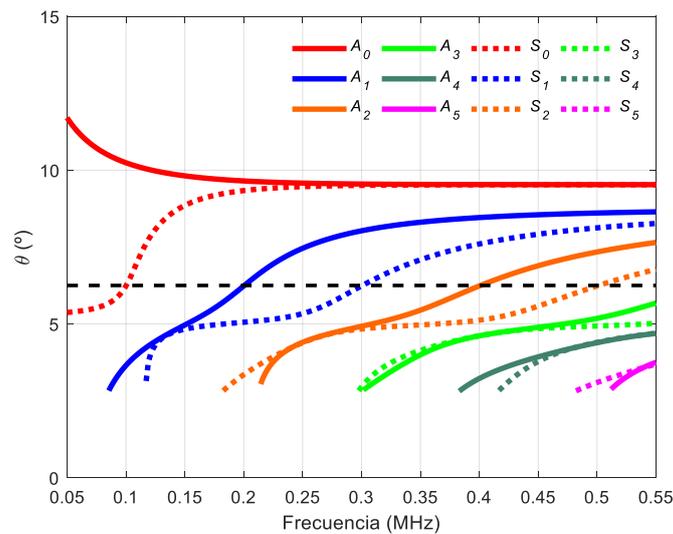


Figura 127. Curvas de ángulo para acoplamiento por aire en placa de GRC.

El ángulo elegido es de 6.25° , ya que se producen distintas intersecciones entre las curvas de ángulos y el ángulo elegido, concretamente:

- En 6.25° se produce una intersección con el modo S_0 (curva discontinua roja) en 0.1 MHz, con el modo A_1 (curva continua azul) en 0.2 MHz, con el modo S_1 (curva discontinua azul) en 0.3 MHz, con el modo A_2 (curva continua naranja) en 0.4 MHz y con el modo S_2 (curva discontinua naranja) en 0.5 MHz.

En la Figura 128, se ha representado el espectrograma combinado de velocidad de grupo para el ángulo elegido (con y sin máscara, ver "Preprocesado") junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo y las SSC. Únicamente se han revisado los modos que se excitan dentro del rango que marca la SSC.

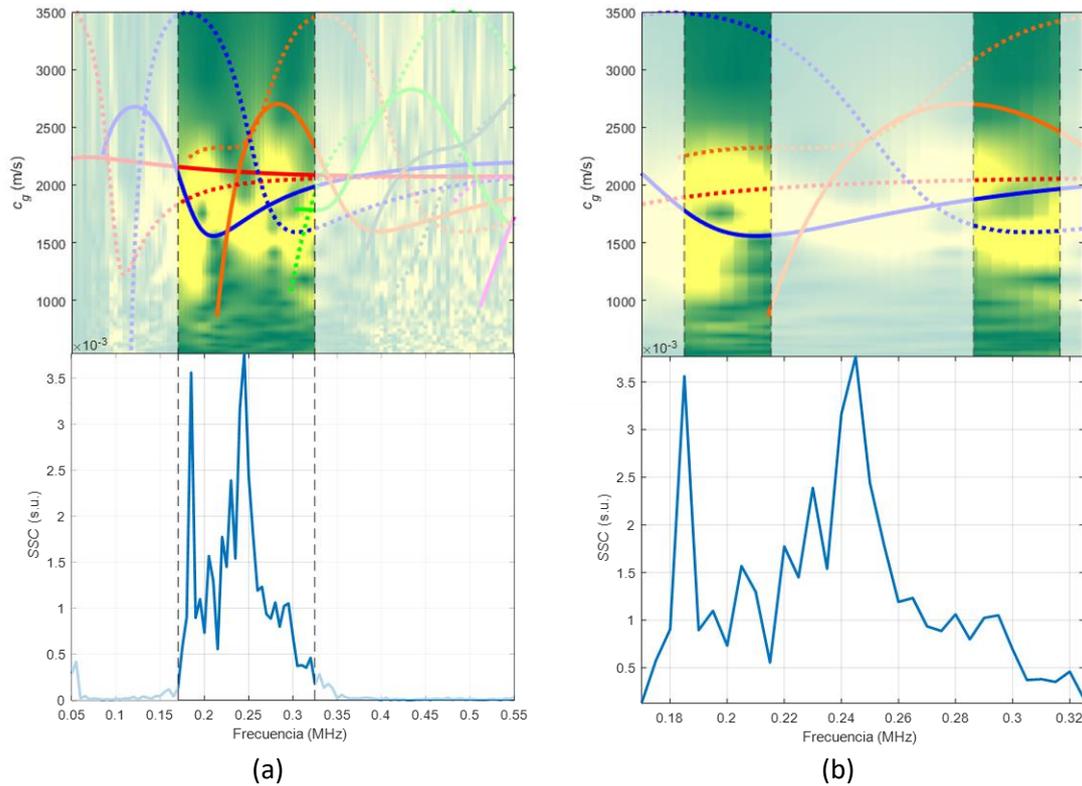


Figura 128. Espectrogramas combinados sin máscara (a) y con máscara (b), curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de GRC.

Los resultados para el ángulo de 6.25° elegido son:

- Existe una correspondencia aceptable entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica del modo A_1 (curva continua azul) entre 0.18 y 0.21 MHz
- Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado y la curva teórica del modo S_1 (curva discontinua azul) entre 0.29 y 0.32 MHz.

Tabla 17. Parámetros del experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en placa de GRC.

Parámetros de la placa	
Material	GRC
Espesor	16 mm
Parámetros geométricos	
Ángulo en transmisión, θ	6.25°
Ángulo en recepción, θ	6.25°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	40 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	40 mm
Distancia de propagación por la placa, d	220 mm
Parámetros del equipamiento	
Frecuencia inicial	50 kHz
Frecuencia final	550 kHz
Incremento frecuencial	5 kHz
Número de frecuencias	101
Frecuencia de muestreo, f_s	10 MHz
Número de muestras	10000
Intervalo temporal	1 ms
Número de ciclos, N_c	5
Amplitud, V_p	6 V
Promediado	32
Amplificación en transmisión (equipamiento)	x50 (WMA-300)
Amplificación en recepción (equipamiento)	40 dB (5660C)
Generador de funciones	33120A
Osciloscopio	RTO 1004
Transductores (frecuencia central, f_c)	$f_c = 0.25$ MHz
Acoplante (velocidad si procede)	Aire (343 m/s)
Parámetros del postprocesado	
Ventana de espectrograma	40 μ s
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %
Número de puntos de las FT de cada ventana	2^{14}
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	2000
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0
Rango frecuencial que marca la SSC	0.17-0.33 MHz

4.4. Conclusiones

En este capítulo, se ha realizado un amplio número de experimentales en el que se han involucrado distintos medios acoplantes, distintos tipos de transductores y distintos tipos de materiales yendo desde materiales más homogéneos o sencillos hacia materiales más heterogéneos o complejos. Se han inspeccionado inicialmente materiales metálicos, que son una referencia en las medidas de ondas guiadas, para evaluar las diferentes técnicas de acoplamiento y elegir las más adecuadas para inspeccionar materiales cementicios de mayor complejidad, como el mortero gris y el cemento reforzado de fibra de vidrio (*GRC*). Dependiendo de la técnica de acoplamiento utilizada, es recomendable excitar unos modos de Lamb específicos, especialmente los dos modos fundamentales de Lamb, A_0 y S_0 , debido a que, en bajas frecuencias, son los únicos que existen, para así facilitar la interpretación de las señales recibidas. Concretamente:

- El acoplamiento por aire se recomienda como primera opción para excitar y detectar el modo A_0 y no se recomienda para el modo S_0 , debido a que éste último modo radia al aire mucha menos energía que el modo A_0 (Castaings et al., 1996).
 - Es una técnica idónea para los END debido a que no se requiere acoplante, se puede automatizar y permite variar el ángulo de incidencia con facilidad.
 - Se han obtenido buenas correspondencias entre curvas teóricas y experimentales tanto con transductores piezoeléctricos como capacitivos en placas metálicas y con transductores piezoeléctricos en cementicias.
- En el acoplamiento por agua se recomienda, como primera opción para excitar y detectar, el modo S_0 , aunque también se ha comprobado que es posible excitar y detectar el modo A_0 , pese a que otros autores (Mažeika et al., 2009) afirman que es un modo que sufre una alta atenuación en agua
 - Se recomienda el acoplamiento localizado mediante cuñas y mediante contenedores cónicos (en ese orden) en detrimento del acoplamiento por agua mediante inmersión completa de la placa, debido a los buenos resultados obtenidos gracias a la eliminación de reflexiones y otras contribuciones indeseadas.
 - No obstante, hay que tener en cuenta la mayor complejidad del montaje experimental, concretamente para evitar la fuga de agua.
 - Se han obtenido buenas correspondencias entre curvas teóricas y experimentales tanto con transductores de inmersión como de contacto de banda ancha en placas metálicas y cementicias.
- El acoplamiento directo por cuñas sólidas es viable para excitar el modo S_0 siempre y cuando la velocidad de onda P del medio acoplante sea mucho menor que las velocidades de onda P y S de la placa a inspeccionar. Dicha condición se cumple más fácilmente en metales que en materiales cementicios.
 - No se recomienda dicho acoplamiento para el modo A_0 , al requerir unos ángulos de incidencia muy elevados (Hayashi et al., 2003).
 - Se han obtenido buenas correspondencias entre curvas teóricas y experimentales en placas metálicas.

A modo de resumen, en la Tabla 18 se incluyen la viabilidad de las distintas técnicas de acoplamiento realizadas a la hora de excitar los distintos modos de Lamb.

Tabla 18. Viabilidad de excitación de modos de Lamb de las distintas técnicas de acoplamiento utilizadas.

	Materiales homogéneos			Materiales heterogéneos				
	Acero inoxidable	Aluminio anodizado	Aluminio	Mortero gris				GRC
	1 mm	2 mm	2 mm	2.5 mm	5 mm	7.5 mm	13 mm	16 mm
Transductores de cuña de plexiglás	Viable para modo S_0	Viable para modos S_0 y A_1						
Inmersión completa	Viable para modos A_0 y S_0	Viable para modos A_0 , S_0 y A_1						
Contenedores cónicos de agua	Viable para modo A_0 y S_0				Viable para modos S_0 y A_0			Viable para modos S_0 y A_1
Globos de agua	Viable para modo A_0 y S_0							
Transductores acoplados por aire	Viable para modo A_0		Viable para modo A_0	Viable para modo A_0	Viable para modo A_0	Viable para modo A_0		Viable para modo A_1 y S_1
Cuñas de agua de 40°				Viable para modo A_0	Viable para modo A_0	Viable para modo A_0	Viable para modo A_0	

5. Aplicaciones de ondas guiadas en materiales cementantes

En este capítulo se presentan dos aplicaciones en las que se han utilizado ondas guiadas para inspeccionar materiales cementicios con diferentes daños, concretamente: el daño por carbonatación y el envejecimiento de fibras en placas de cemento reforzado con fibra de vidrio o *glass-fibre reinforced cement (GRC)*.

La carbonatación genera una capa de degradación en el material cementicio de un espesor determinado. Este tipo de daño es especialmente crítico en estructuras de hormigón armado. Dicho espesor se suele estimar mediante ensayos destructivos, por lo que sería interesante encontrar una alternativa no destructiva. En el apartado de “Daño por carbonatación”, se ha estudiado cómo estimar dicho espesor carbonatado a partir de unas probetas fabricadas con dos capas de diferente mortero, donde el espesor es conocido, uniforme y está controlado. Para ello, se han generado y detectado ondas de Rayleigh dispersivas mediante las técnicas de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas y acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos. Dichas ondas son conocidas por ser sensibles a la existencia de capas de degradación superficiales.

El envejecimiento de las fibras en el *GRC* aumenta considerablemente la fragilidad de dicho material. Se produce principalmente debido a la exposición continuada a las condiciones medioambientales, pero se puede forzar mediante procesos de envejecimiento acelerados como la inmersión de placas de *GRC* en agua caliente durante varios días para estudiar dicho fenómeno. Dicho envejecimiento se suele estimar mediante ensayos destructivos, por lo que sería interesante encontrar una alternativa no destructiva. Debido a su estructura tipo placa, se han excitado y detectado ondas de Lamb en placas de *GRC* que han sufrido un proceso de envejecimiento durante 28 días mediante la técnica de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas.

En ambas aplicaciones, las ondas guiadas excitadas han sido sensibles a los daños producidos en los materiales cementicios. A modo de resumen, en la Tabla 19 se muestran los materiales y las técnicas de acoplamiento planteadas en las aplicaciones de ondas guiadas.

Tabla 19. Materiales y tecnologías de acoplamiento planteadas en las aplicaciones de ondas guiadas.

	Carbonatación					Envejecimiento fibras GRC				
	Bicapa			Sin carbonatar	Carbonatada	Sin envejecer			Envejecidas	
	5 mm mortero gris	10 mm mortero gris	20 mm mortero gris			M1	M2	M3	M1	M3
Cuñas de agua de 20°						✓	✓	✓	✓	✓
Cuñas de agua de 40°	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Transductores acoplados por aire		✓	✓							

5.1. Daño por carbonatación

Algunos de los daños que ocurren en los materiales cementicios son debidos a la carbonatación (ver “Daños en materiales cementicios”). Durante dicho proceso, se forma carbonato cálcico (CaCO_3) en el hormigón debido a la penetración de dióxido de carbono (CO_2) del aire que reacciona con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) presente en el cemento (Vu et al., 2015). La carbonatación en sí no supone un problema para el cemento, ya que produce una reducción de la porosidad (Arizzi et al., 2013) y un aumento del módulo dinámico y la resistencia a la compresión (Eiras et al., 2016). Ahora bien, si la carbonatación se produce en hormigón armado y alcanza las armaduras metálicas genera corrosión sobre ellas, reduciendo la vida útil del material y poniendo en riesgo la estructura cementicia (Bouchaala et al., 2011; Eiras et al., 2016; Villain et al., 2007).

El daño por carbonatación es un daño por gradiente que va desde el exterior de la estructura hacia el interior y por ello es importante determinar cuál es el espesor de la capa carbonatada (Figura 129). El ensayo destructivo (ED) habitual para determinar este espesor es a partir de un indicador de pH, conocido como fenolftaleína, que se aplica a una superficie de material cementicio recién cortada o destruida (ver “Daños en materiales cementicios”) (Bouchaala et al., 2011; Eiras et al., 2016; Villain et al., 2007).



Figura 129. Ejemplo de probeta de mortero poco carbonatada (izquierda) y de probeta de mortero muy carbonatada (derecha).

Sin embargo, este procedimiento implica dañar la estructura cementicia, por lo que es muy importante poder conocer el espesor de la capa carbonatada mediante ensayos no destructivos (END). Algunos de los END utilizados en probetas o ejemplares carbonatados son ensayos de impacto-eco (Eiras et al., 2016) o de ultrasonidos (Arizzi et al., 2013; Bouchaala et al., 2011). En otros trabajos se destaca la sensibilidad de los parámetros no lineales (armónicos de orden superior) frente a los parámetros lineales (velocidad, atenuación) en la detección de la carbonatación (Bouchaala et al., 2011; Eiras et al., 2016; Kim et al., 2016).

Dentro de los END por ultrasonidos, existen artículos donde se trabaja con ondas guiadas ultrasónicas, como las ondas de Rayleigh dispersivas (Kim et al., 2016; Vu et al., 2015). Estas ondas guiadas son sensibles a la existencia de capas en materiales cementicios (Cho et al., 2001; Goueygou et al., 2004b; Popovics et al., 2010; Wardany et al., 2004). Desafortunadamente, la capa que provoca la carbonatación no es uniforme, como se puede comprobar en la Figura 129 y aumenta de manera no lineal con el paso del tiempo (Figura 130) (Arizzi et al., 2013; Kim et al., 2016).

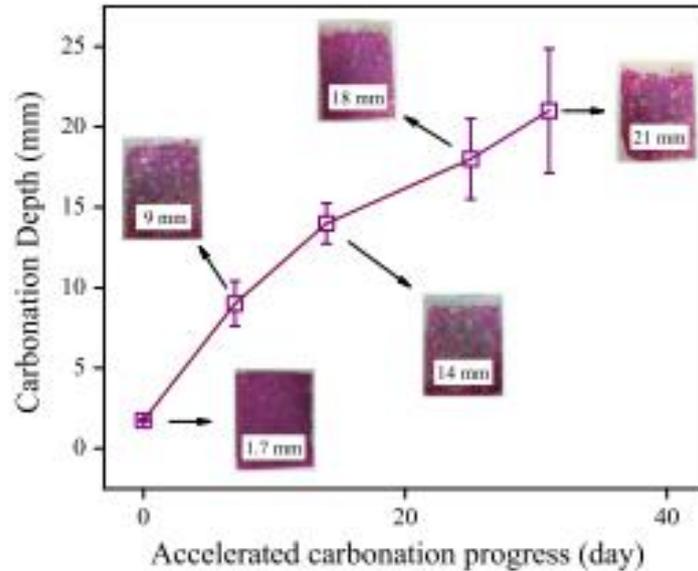


Figura 130. Profundidad de carbonatación con respecto al tiempo (Kim et al., 2016).

Atendiendo a las limitaciones descritas anteriormente, donde el perfil y la evolución de la carbonatación no son uniformes, no resulta idóneo tratar de estimar directamente el espesor de carbonatación sin una referencia clara de lo que nos vamos a encontrar. Una opción para estimar dicho espesor en mejores condiciones consiste en fabricar probetas o especímenes de dos capas distintas de mortero que simulen el efecto de carbonatación. De esta forma, el valor del espesor “carbonatado” es conocido, está controlado y es uniforme (Goueygou et al., 2004b).

Según (Arizzi et al., 2013; Cazalla et al., 1999) la carbonatación incrementa la velocidad de onda P y disminuye la atenuación, por lo que se asume que la capa carbonatada presenta mayor velocidad de onda P y menor atenuación que el material sin carbonatar. Por tanto, la capa de mortero que simula la capa carbonatada debe presentar mayor velocidad de onda P y menor atenuación que el mortero que representa el material no carbonatado.

Es por ello, que en esta sección haremos un primer estudio de dos tipos de cemento junto con dos tipos de dosificaciones para validar la elección de los mismos respecto a la parte carbonatada y la parte sin carbonatar atendiendo a las velocidades y a las atenuaciones. Posteriormente, se explicará la fabricación y medición de las probetas bicapas propiamente dicha.

5.1.1. Fabricación y caracterización de materiales para la simulación del proceso de carbonatación

Tal y como se apuntado anteriormente, la carbonatación incrementa la velocidad de onda P y disminuye su atenuación, por lo que se asume que la capa de mortero carbonatada presentará mayor velocidad de onda P y menor atenuación que la de mortero no carbonatado. Para este proceso, se han fabricado diversas probetas de mortero prismáticas de dimensiones 160x40x40 mm³ (longitud x ancho x espesor) a partir de dos tipos de cemento Portland distintos, cemento gris (CEM I-52,5R) y cemento blanco (CEM II/A-L 42,5R) (Carrión et al., 2017; Martínez, 2017; Pérez, 2015), utilizando dos valores de relación agua/cemento (*w/c*) distintas, 0.35 y 0.6 para simular las diferentes velocidades de onda P y atenuaciones requeridas.

Al material de las probetas de mortero fabricadas con cemento gris se le ha denominado mortero gris y al material de las probetas de mortero fabricadas con cemento blanco se le ha denominado mortero blanco. El objetivo de usar cemento con diferentes colores es para verificar posteriormente y de forma visual el cemento y, por tanto, el espesor que simula la zona carbonatada. Las distintas probetas de mortero gris y blanco de distintas relaciones w/c han sido fabricadas por el Grupo de Investigación en Química de los Materiales de Construcción (GIQUIMA) del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València (UPV). Concretamente, se han realizado cuatro amasadas (o dosificaciones) diferentes obteniendo tres probetas por dosificación (marcadas como A, B y C). Es decir, se han obtenido doce probetas en total, tal y como se muestra en la Figura 131 y en la Figura 132:

Figura 131. Información acerca de las probetas fabricadas: relaciones agua/cemento, tipo de cemento y número de ejemplares por amasada.

		Relación w/c	
		0.6	0.35
Cemento	Blanco (CEM II/A-L 42,5 R)	3 probetas	3 probetas
	Gris (CEM I-52,5 R)	3 probetas	3 probetas



Figura 132. Probetas de mortero gris y blanco. Empezando por la izquierda: tres probetas de mortero blanco de w/c 0.35, tres probetas de mortero gris de w/c 0.35, tres probetas de mortero blanco de w/c 0.6 y tres probetas de mortero gris de w/c 0.6.

La relación árido/cemento (a/c) de todas estas probetas es de 3:1. Para más información de la fabricación de las probetas, consultar (Carrión et al., 2017; Vázquez et al., 2019b). Los parámetros que se han obtenido de las probetas son la velocidad de onda P c_p y la atenuación $\alpha(f)$. Se ha trabajado con la pareja de transductores K0,5SC de frecuencia central 500 kHz junto con el equipo de generación y adquisición Handyscope HS3.



Figura 133. Montaje utilizado para las medidas de velocidad de onda P y atenuación en las probetas de mortero gris y blanco.

La metodología para medir la velocidad de onda P es la misma que se ha seguido en el capítulo 4 (ver “Medidas de velocidad de onda P y onda S”). Se ha realizado un barrido frecuencial de

sinusoidal *burst* de 5 ciclos, desde 10 kHz a 1 MHz, con saltos de 5 kHz. En el algoritmo de detección automático por umbral para obtener el tiempo de llegada de cada una de las señales recibidas, se ha utilizado un umbral del 50 % (Genovés et al., 2015b).

En cuanto a la atenuación, se ha empleado una señal *chirp* de banda ancha cuyo espectro abarca desde 10 kHz hasta 1 MHz. Al ser una medida de atenuación, es crítico tomar la amplitud de la señal correctamente. Para evitar posibles errores debido a cambios del nivel de presión o cantidad de acoplante, se han transmitido 20 señales *chirp* por probeta. Antes de transmitir cada señal, los transductores se desacoplan y se vuelven a acoplar manualmente. De este modo, en la etapa de postprocesado para cada una de estas 20 señales recibidas se obtiene la atenuación (ecuación (26)) para calcular la dispersión entre medidas y obtener finalmente una atenuación promedio por probeta.

En la Figura 134 se observan las velocidades de onda P con respecto a la frecuencia resultantes de promediar cada probeta A, B y C de mortero blanco (de w/c 0.6 y 0.35) y de mortero gris (de w/c 0.6 y 0.35).

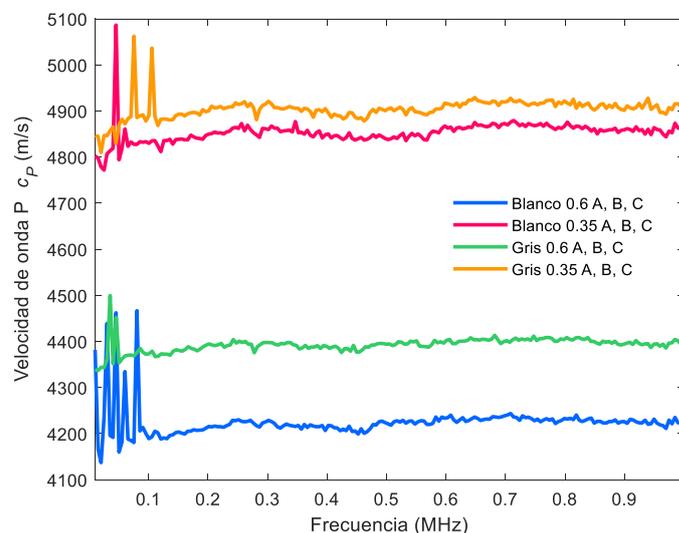


Figura 134. Velocidades de onda P promedio de las probetas A, B y C de mortero blanco de w/c 0.6 y 0.35, y mortero gris de w/c 0.6 y 0.35.

Se comprueba que las velocidades de onda P de los morteros de menor w/c (0.35) son mayores que las velocidades de onda P de w/c mayor (0.6), como se esperaba teóricamente (Molero, 2009). Además, el mortero gris muestra velocidades ligeramente más rápidas que el mortero blanco para misma relación w/c (Carrión et al., 2017). Esta diferencia es más acentuada en el caso de w/c 0.6.

En el caso de la atenuación, en la Figura 135 se muestran las 4 curvas de atenuación, siendo cada una de ellas el promedio de las 60 señales obtenidas por cada tipo de mortero (20 señales/probeta x 3 probetas).

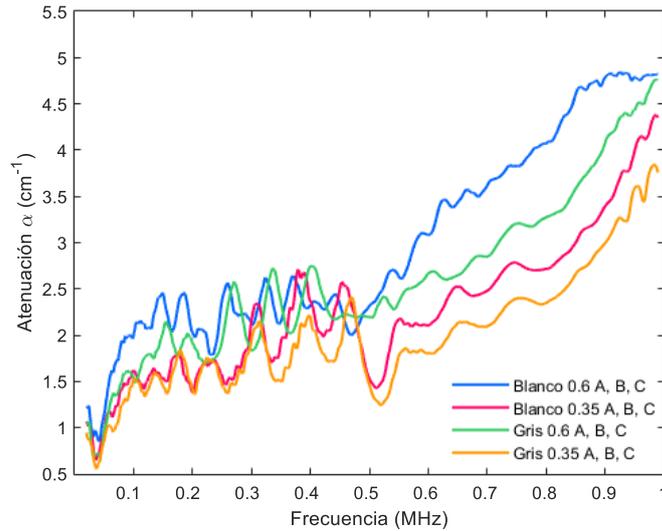


Figura 135. Atenuaciones promedio de las probetas A, B y C de mortero blanco de w/c 0,6 y 0,35 y de mortero gris de w/c 0,6 y 0,35.

Se observa que las amasadas con w/c 0.6 presentan una atenuación ligeramente superior a las amasadas con relaciones w/c 0.35. Esta diferencia es más notable a partir de aproximadamente 500kHz. Al igual que ocurría con las velocidades (pero en sentido contrario) el cemento gris presenta una atenuación ligeramente menor que el blanco (para una misma relación w/c). Esta diferencia es más acentuada en el caso de w/c 0.6 y más notable a partir de aproximadamente 500 kHz (Martínez, 2017). Por tanto, a partir de estas probetas se observa que la relación w/c es el factor que marca la diferencia principal entre ellas: la velocidad de onda P es mayor para una relación w/c de 0.35 que para una relación w/c de 0.6, y la atenuación es menor para una relación w/c de 0.35 que para una relación de w/c de 0.6. Además, es posible discriminar el tipo de cemento empleado (gris o blanco) para la misma relación w/c . Las curvas de mortero gris frente a blanco de la misma w/c presentan una mayor velocidad de onda P y una menor atenuación (Martínez, 2017).

5.1.2. Fabricación de probetas bicapa

Vistas las características ultrasónicas de cada una de las dosificaciones anteriores y recordando que la carbonatación se traduce en un incremento de la velocidad de onda P y una reducción de la atenuación, el GIQUIMA ha fabricado probetas bicapa con dos tipos de amasadas distintas, donde la capa superior está compuesta de mortero gris de w/c 0.35, la cual simula la capa de carbonatación con un espesor concreto y controlado, y la parte inferior de mortero blanco de w/c 0.6, que representa la parte sin carbonatar con un espesor mayor que la capa de mortero gris. Estas dosificaciones corresponden a los dos extremos “ultrasónicos” obtenidos en el apartado anterior.

De esta forma, las probetas bicapa se pueden interpretar como una estructura (Figura 136) formada por una capa o placa de un espesor finito $2h$ (mortero gris) sobre un semi-espacio (mortero blanco) de un espesor infinito (Goueygou et al., 2004b; Kim et al., 2016; Popovics et al., 2010; Rose, 2014; Vaziri Astaneh et al., 2016). En este tipo de estructuras, pueden existir dos tipos de ondas guiadas: las ondas de Rayleigh dispersivas y las ondas de Love.

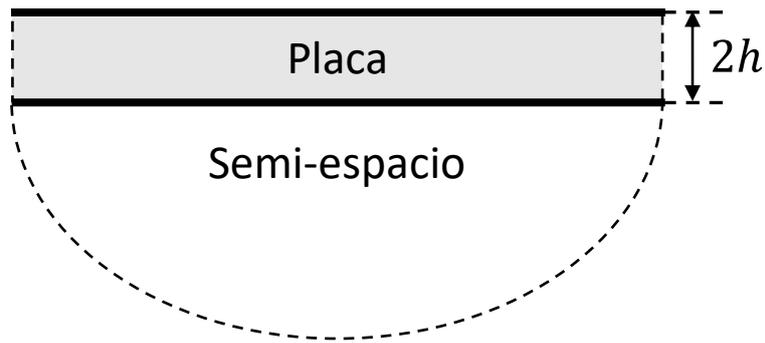


Figura 136. Placa sobre un semi-espacio.

La posibilidad de cuantificar el espesor de mortero gris serviría como antesala para cuantificar el espesor de la capa degradada que se genera en los procesos de carbonatación. Para este proceso se han realizado dos amasadas que han dado lugar a las siguientes probetas:

- Probetas bicapa de dimensiones $240 \times 60 \times 60 \text{ mm}^3$ (longitud x ancho x espesor) donde el espesor de 60mm se divide en:
 - Una probeta de 5 mm de mortero gris (capa superior) y 55 mm de mortero blanco (parte inferior).
 - Dos probetas de 10 mm de mortero gris (capa superior) y 50 mm de mortero blanco (parte inferior).
 - Dos probetas de 20 mm de mortero gris (capa superior) y 40 mm de mortero blanco (parte inferior).
- Probetas de control de dimensiones $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ (longitud x ancho x espesor):
 - Tres probetas de mortero gris.
 - Tres probetas de mortero blanco.



(a)



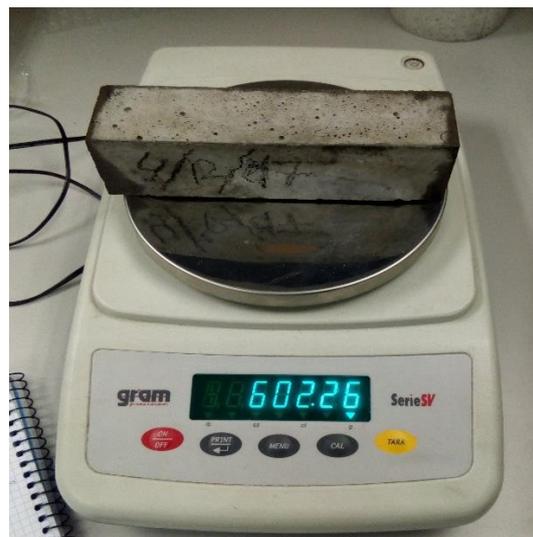
(b)

Figura 137. (a) Probetas bicapa de dimensiones 240x60x60 mm³; (b) Probetas prismáticas de dimensiones 160x40x40 mm³ de mortero gris y blanco.

A partir de las probetas prismáticas de control (Figura 137 (b)), se han vuelto a medir los valores de velocidad de onda P c_p , velocidad de onda S c_s así como los valores de densidad ρ de los morteros gris y blanco, todo ello con el fin de corroborar los resultados del apartado anterior. La velocidad de onda P en los mortero gris y blanco se ha obtenido mediante el mismo equipamiento y procedimiento que en “Fabricación y caracterización de materiales para la simulación del proceso de carbonatación”. La velocidad de onda S en los morteros gris y blanco se ha obtenido mediante el mismo equipamiento y procedimiento que en el capítulo 4 (ver “Medidas de velocidad de onda P y onda S”)(Figura 138 (a)). La densidad se ha obtenido aplicando la ecuación (29) del capítulo 2, donde la masa se ha medido con ayuda de una báscula (Figura 138 (b)) y el volumen a partir de sus dimensiones (largo, ancho y espesor).



(a)



(b)

Figura 138. (a) Medición de velocidad de onda S en una probeta de mortero blanco; (b) Medida de masa de una probeta de mortero gris.

En la Figura 139 se representan las curvas de velocidad de onda P y onda S promedio de las probetas de mortero gris y blanco de la Figura 137 (b) respecto a la frecuencia.

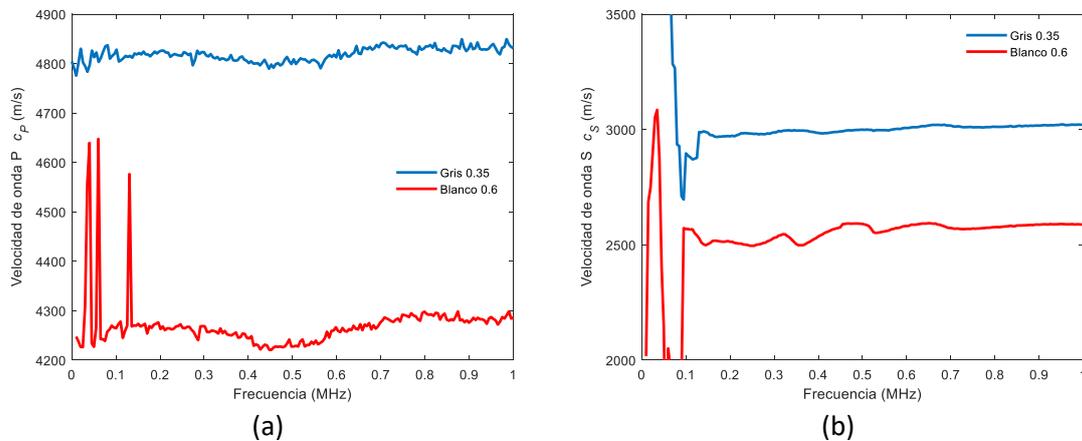


Figura 139. (a) Velocidades de onda P de mortero gris y blanco; (b) Velocidades de onda S de mortero gris y blanco.

En la Tabla 20 se reúnen los valores promedio de onda P, onda S y densidad de los mortero gris y blanco. De hecho, los valores de onda P y S del mortero gris de las placas del capítulo 4 son iguales que los que se han incluido en esta tabla.

Tabla 20. Datos de los morteros gris y blanco.

Parámetros	Mortero gris	Mortero blanco
Velocidad de onda P c_P (m/s)	4813	4264
Velocidad de onda S c_S (m/s)	3003	2563
Densidad ρ (kg/m ³)	2334.04	2134.61

5.1.3. Fundamento teórico de las ondas de Rayleigh dispersivas en probetas bicapa

En las probetas bicapa que se han fabricado, la velocidad de la onda S del mortero gris es mayor que la velocidad de la onda S del mortero blanco. Según (Jiménez, 2009; Rose, 2014), esta condición implica la no existencia de ondas de Love en las probetas bicapa fabricadas. Sin embargo, las ondas de Rayleigh dispersivas sí que pueden existir en estas condiciones y sus velocidades de propagación y otros parámetros (velocidad de fase, velocidad de grupo y ángulos de inclinación), al igual que sucedía con las ondas de Lamb, también se pueden representar mediante curvas de dispersión debido a su dependencia frecuencial.

Las curvas de dispersión teóricas de ondas de Rayleigh dispersivas de las probetas de dos capas de distinto mortero se han calculado con el *software Geopsy* (Popovics et al., 2010; Wathelet, 2008). Dicho *software* se ejecuta desde el símbolo del sistema y tiene como parámetros de entrada la velocidad de onda P c_P , velocidad de onda S c_S , espesor $2h$ y densidad ρ de cada capa. En Figura 140 (b) se ha incluido un ejemplo de documento de texto con el modelo para una probeta bicapa, con una capa superior de 5 mm de mortero gris y un semi-espacio de mortero blanco.

```

Administrador: Símbolo del sistema
\geosypack-win64-3.2.1\bin>gpd
Bicapa5mm_4.model.txt -R 20 -s frequency -step 5000 -max 100000 > Bicapa_5mm_fase_4.txt
Reading file 'Bicapa5mm_4.model.txt'...

\geosypack-win64-3.2.1\bin>gpd
Bicapa10mm_4.model.txt -R 20 -s frequency -step 5000 -max 100000 > Bicapa_10mm_fase_4.txt
Reading file 'Bicapa10mm_4.model.txt'...

\geosypack-win64-3.2.1\bin>gpd
Bicapa10mm_4.model.txt -R 20 -group -s frequency -step 5000 -max 100000 > Bicapa_10mm_grupo_4.txt
Reading file 'Bicapa10mm_4.model.txt'...

\geosypack-win64-3.2.1\bin>gpd
Bicapa20mm_4.model.txt -R 20 -s frequency -step 5000 -max 100000 > Bicapa_20mm_fase_4.txt
Reading file 'Bicapa20mm_4.model.txt'...

\geosypack-win64-3.2.1\bin>gpd
Bicapa20mm_4.model.txt -R 20 -group -s frequency -step 5000 -max 100000 > Bicapa_20mm_grupo_4.txt
Reading file 'Bicapa20mm_4.model.txt'...

\geosypack-win64-3.2.1\bin>_

```

(a)

```

Bicapa5mm_4.model: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
# My first model: one layer over a half-space
# First line: number of layers
2
# One line per layer:
# Thickness(m), Vp (m/s), Vs (m/s) and density (kg/m3)
0.005 4813 3003 2334.04
# Last line is the half-space, its thickness is ignored but the first column is still mandatory
0 4264 2563 2134.61

```

(b)

Figura 140. (a) Ejemplo de ejecución del software Geopsy; (b). Ejemplo de modelo para una probeta bicapa de 5 mm de mortero gris y 55 mm de mortero blanco.

Utilizando este software, en la Figura 141 se muestran las curvas de velocidad de fase c_f (Figura 141 (a)), velocidad de grupo c_g (Figura 141 (b)), ángulos de inclinación θ (Figura 141 (c)) y número de onda k (Figura 141 (d)) de las probetas bicapa para tres casos:

- Mortero gris de espesor 5 mm + semi-espacio de mortero blanco.
- Mortero gris de espesor 10 mm + semi-espacio de mortero blanco.
- Mortero gris de espesor 20 mm + semi-espacio de mortero blanco.

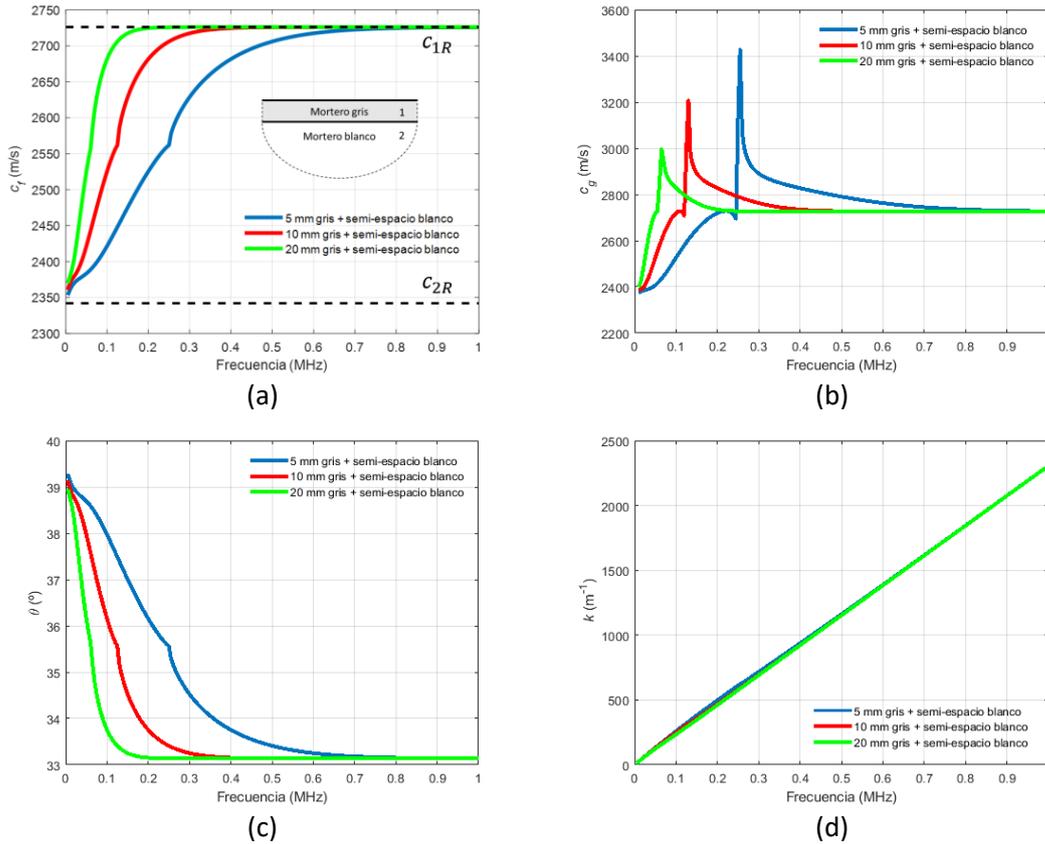


Figura 141. Curvas de dispersión de ondas de Rayleigh dispersivas de tres probetas bicapa de diferentes espesores de capa superior de mortero gris (5, 10 y 20 mm): (a) Velocidad de fase c_f ; (b) Velocidad de grupo c_g ; (c) Ángulo de inclinación θ (siendo el medio acoplante agua, de $c_1=1490$ m/s) y (d) Número de onda k .

Como sucede en (Popovics et al., 2010; Rose, 2014) al ser las velocidades de onda P y onda S de la capa superior mayores que las velocidades de onda P y onda S del semi-espacio inferior, aparece un único modo de onda de Rayleigh dispersiva para cada probeta bicapa. En la Figura 141 (a) se observa que, a bajas frecuencias, la velocidad de fase tiende a la velocidad de la onda de Rayleigh del medio 2, es decir, el mortero blanco (línea horizontal marcada como c_{2R}). En ese caso, la longitud de onda es mucho mayor que la capa de mortero gris, por lo que la influencia de dicha la capa disminuye en la propagación de la onda. Sin embargo, a altas frecuencias, la velocidad de fase tiende a la velocidad de la onda de Rayleigh del medio 1, es decir, al mortero gris (línea horizontal marcada como c_{1R}). En ese caso, la longitud de onda es mucho menor que el espesor de la capa de mortero gris, lo cual implica que la influencia del semi-espacio blanco disminuye en la propagación de la onda (Popovics et al., 2010; Rose, 2014). Por tanto, la profundidad de penetración de las ondas de Rayleigh aumenta al disminuir la frecuencia. Dicha profundidad de penetración es igual a una longitud de onda λ_R (Ecuación (35)), que en el caso particular de las probetas bicapa es igual al cociente entre la velocidad de la onda de Rayleigh de la capa superior de mortero gris c_{1R} respecto a la frecuencia inyectada f (Ecuación (61)).

$$\lambda_R = \frac{c_{1R}}{f} \quad (61)$$

Se recomienda que la profundidad sea del orden del espesor de la capa superior para poder ser sensible a ella (Goueygou et al., 2004b; Vu et al., 2016). Por ejemplo, si el espesor de la capa superior de mortero gris $2h$ es de 5 mm, la profundidad de penetración o la longitud de onda

de Rayleigh λ_R debe de ser como mínimo igual a 5 mm, es decir, $2h = \lambda_R = 5$ mm. Al despejar la frecuencia inyectada f de la ecuación (61) se obtiene la ecuación (62)

$$f = \frac{c_{1R}}{2h} \quad (62)$$

Si la velocidad de onda de Rayleigh c_{1R} de la capa superior es de 2726 m/s, la frecuencia inyectada f donde la profundidad de penetración es igual al espesor de la capa superior es 0.55 MHz.

En las curvas existe una transición entre la velocidad de onda de Rayleigh del semi-espacio inferior a la velocidad de onda de Rayleigh de la capa superior al aumentar la frecuencia. Conforme aumenta el espesor de la capa superior, esta transición se produce cada vez a menores frecuencias, lo cual se aprecia en la Figura 141 (a) y Figura 141 (b) al comparar, por ejemplo, la curva azul (capa de 5 mm de mortero gris) respecto a la curva verde (capa de 20 mm de mortero gris) (Goueygou et al., 2004b).

Por tanto, no es de extrañar que se hayan utilizado las ondas de Rayleigh para detectar capas de degradación o varias capas de material en diferentes estructuras (Cho et al., 2001; Goueygou et al., 2004b; Gupta et al., 2017; Kazemirad et al., 2013; Kim et al., 2016; Kim et al., 2011; Lakestani et al., 1995; Vu et al., 2015; Wardany et al., 2004; Yan et al., 2016). Para su excitación y detección en materiales cementicios, algunas de las técnicas que se han encontrado en la bibliografía implican el desplazamiento del transmisor o receptor, o el uso de varios sensores acoplados en la estructura. Algunos ejemplos son:

- En (Goueygou et al., 2004b) se utiliza una pareja de transductores piezoeléctricos montados en cuñas de teflón y se realiza un escaneado espacial del receptor para inspeccionar probetas de dos capas de mortero.
- En (Kim et al., 2016) se utiliza un transductor montado en una cuña de teflón (transmisor) y un transductor acoplado por aire (receptor), realizando un escaneado espacial con éste último para inspeccionar probetas carbonatadas.
- En (Cho et al., 2001; Wardany et al., 2004) se utiliza una bola de metal (transmisor) como impacto y varios acelerómetros (receptores) para inspeccionar probetas de varias capas.

Sin embargo, no se ha encontrado bibliografía donde se realice un barrido frecuencial con señales de banda estrecha para controlar la profundidad de penetración de las ondas de Rayleigh y ser sensibles a la existencia de distintas capas de material cementicio. En este apartado, se ha utilizado el acoplamiento localizado por agua mediante cuñas y el acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos para la generación y detección de ondas de Rayleigh dispersivas en las probetas bicapa de los dos amasadas que se han fabricado. También se ha utilizado el acoplamiento localizado por agua mediante cuñas para la generación y detección de ondas de Rayleigh dispersivas en una probeta carbonatada. En cuanto al procesado de señal, se va a seguir el mismo procedimiento que en el capítulo 3 (ver "Procesado de señal - Representación de ondas de Lamb") para las probetas bicapa y la probeta carbonatada: comparación entre curvas de dispersión teóricas (calculadas con *Geopsy*) y experimentales (espectrograma combinado) de velocidad de grupo, además de la obtención de las curvas de sensibilidad del sistema (SSC) para destacar el rango frecuencial de interés. Al contrario que en el capítulo 4, se ha decidido aumentar el ancho de banda de interés que marcan las SSC situando las líneas verticales discontinuas en las frecuencias (mínima y máxima) donde el máximo de la SSC cae un 99 %. También se va a incluir una línea vertical para marcar la frecuencia donde la

profundidad de penetración (o la longitud de onda de Rayleigh λ_R) es igual al espesor de la capa superior de mortero gris.

5.1.4. Probetas bicapa - Acoplamiento por agua mediante cuñas

5.1.4.1. Descripción del experimental

Para medir las probetas bicapa de las amasadas 1 y 2 se han utilizado las mismas cuñas de 40° que se emplearon en el capítulo 4. Pese a que no se produce intersección entre el ángulo de 40° y las curvas de ángulos de incidencia de las distintas probetas bicapa (Figura 141 (c)), se asume que el ancho de haz es capaz de generar el modo de onda de Rayleigh dispersiva deseado. Es una de las técnicas que mejores resultados ha ofrecido en materiales cementicios en el capítulo 4, permitiendo una gran repetitividad y una medición precisa de las distancias involucradas en el montaje. Destacar que, al igual que en el capítulo 4, las probetas reposan en planchas de poliestireno expandido (EPS) para mantener las condiciones de superficie libre de fuerzas (Deán et al., 2009; Gómez-Ullate, 2007; Shelke et al., 2011) El esquema del montaje experimental de acoplamiento por agua mediante cuñas se encuentra en la Figura 142.

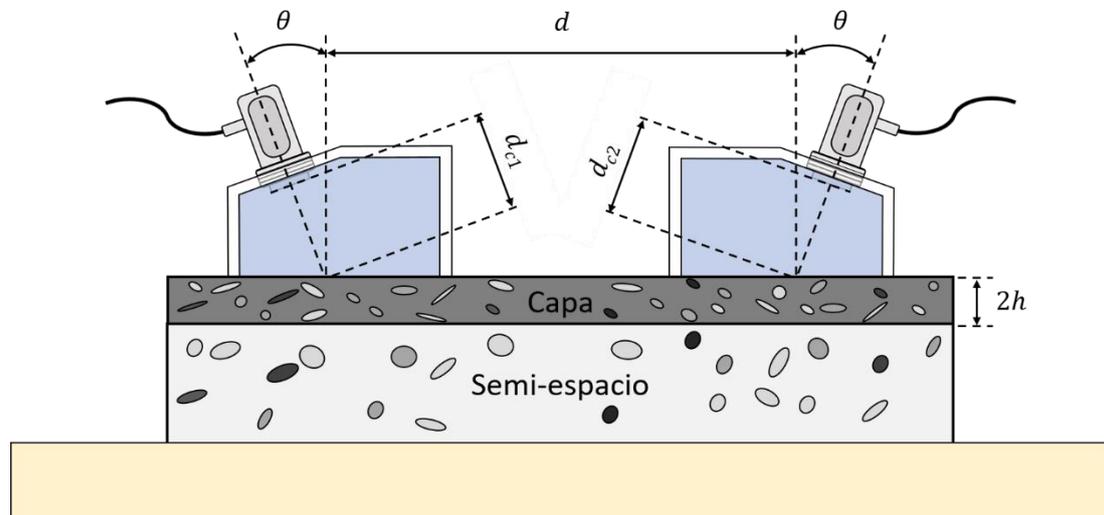


Figura 142. Esquema de acoplamiento por agua mediante cuñas en probeta bicapa.

Se ha utilizado una pareja de transductores de banda ancha de onda P (K0,5SC, General Electric) con una frecuencia central f_c de 0.5 MHz y un diámetro del elemento activo de 24 mm para la excitación y detección de ondas de Rayleigh dispersivas en las probetas bicapa de mortero gris y blanco. El transmisor se ha excitado con señales sinusoidales *burst* de 5 ciclos mediante un generador de señal programable (Handyscope HS3, TiePie engineering). Su rango frecuencial es de 10 kHz a 1 MHz, en incrementos de 5 kHz.

Las señales recibidas se han amplificado 40 dB (5660C, Panametrics) y a continuación, se han adquirido mediante un osciloscopio digital (Handyscope HS3, TiePie engineering) con una frecuencia de muestreo f_s de 50 MHz, 20000 muestras (lo que implica un intervalo temporal de 400 μs) y promediado de 8 trazas.

Así mismo y por facilitar la nomenclatura, etiquetaremos las probetas haciendo mención únicamente al espesor de la capa de mortero gris. Se entiende que el resto del espesor de la probeta hasta llegar a los 60mm corresponde al mortero blanco. Se han medido dos probetas de las mismas características, pero de distinta amasada para comprobar si ofrecen resultados similares.

5.1.4.2. Probeta bicapa de 5mm

En la Figura 143 se encuentra una fotografía del montaje experimental de acoplamiento localizado por cuñas de agua en la probeta bicapa de 5 mm de capa de mortero gris y 55 mm de mortero blanco de la amasada 2.



Figura 143. Acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en la probeta de 5 mm de mortero gris y 55 mm de mortero blanco de la amasada 2.

En la Figura 144, se ha representado el espectrograma combinado. En este caso, la línea vertical discontinua negra (marcada con $\lambda_R=5$ mm) se sitúa en 0.55 MHz, donde $c_{1R} = 2726$ m/s y el espesor de dicha capa es $2h = 5$ mm.

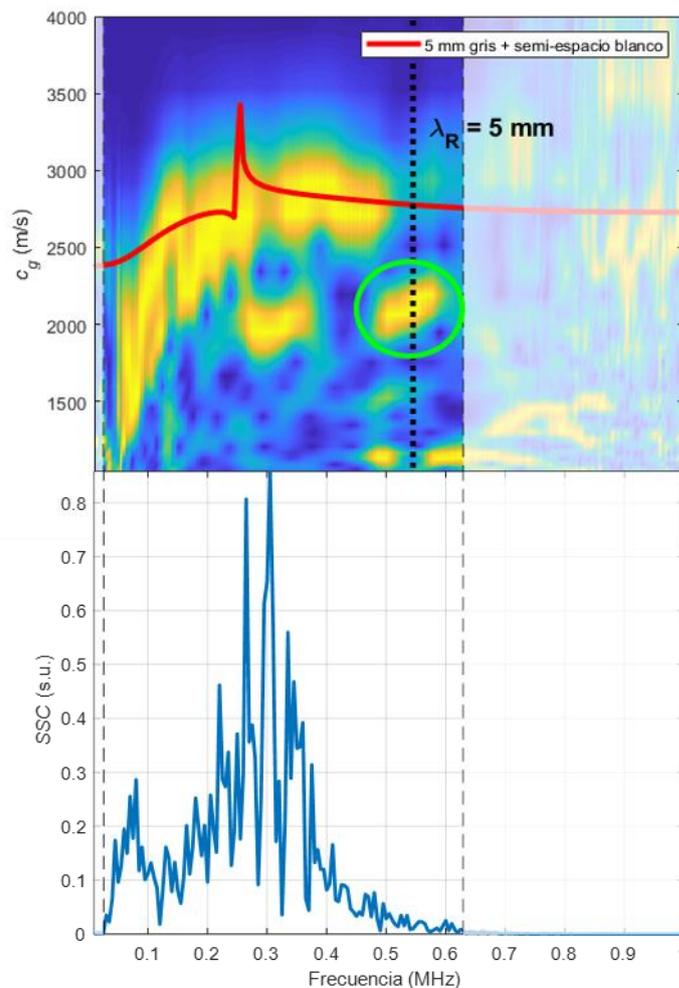


Figura 144. Espectrograma combinado, curva teórica y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en probeta bicapa de 5 mm de mortero gris y 55 mm de mortero blanco de la amasada 2.

Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica de capa de 5 mm de mortero gris (curva roja continua) entre 0.11 y 0.49 MHz. Aparece una discontinuidad en el nivel de señal del espectrograma combinado alrededor de 0.55 MHz (la frecuencia donde $\lambda_R = 2h = 5$ mm), aunque también se observa otra discontinuidad alrededor de 0.3 MHz.

En la Tabla 22 se encuentra un resumen de los parámetros de interés del montaje experimental de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en la probeta de 5 mm de mortero gris.

Tabla 21. Resumen de parámetros del montaje de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en la probeta de 5 mm de mortero gris de la amasada 2.

Parámetros de la probeta	
Material de la capa superior	Mortero gris
Espesor de la capa superior	5 mm
Material del semi-espacio inferior	Mortero blanco
Espesor del semi-espacio inferior	55 mm
Parámetros geométricos	
Ángulo en transmisión, θ	40°
Ángulo en recepción, θ	40°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	17.7 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	17.7 mm
Distancia de propagación por la placa, d	174.5 mm
Parámetros del equipamiento	
Frecuencia inicial	10 kHz
Frecuencia final	1 MHz
Incremento frecuencial	5 kHz
Número de frecuencias	199
Frecuencia de muestreo, f_s	50 MHz
Número de muestras	20000
Intervalo temporal	400 μ s
Número de ciclos, N_c	5
Amplitud, V_p	3 V
Promediado	8
Amplificación en transmisión (equipamiento)	-
Amplificación en recepción (equipamiento)	40 dB (5660C)
Generador de funciones	Handyscope HS3
Osciloscopio	Handyscope HS3
Transductores (frecuencia central, f_c)	K0,5SC (0,5 MHz)
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)
Parámetros del postprocesado	
Ventana de espectrograma	20 μ s
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %
Número de puntos de las FT de cada ventana	2^{14}
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	2000
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0
Rango frecuencial que marca la SSC	0.03-0.63 MHz

5.1.4.3. Probetas bicapa de 10mm

En la Figura 145 se muestra una fotografía del montaje experimental de acoplamiento localizado por cuñas de agua en las probetas bicapa de 10 mm de capa de mortero gris.

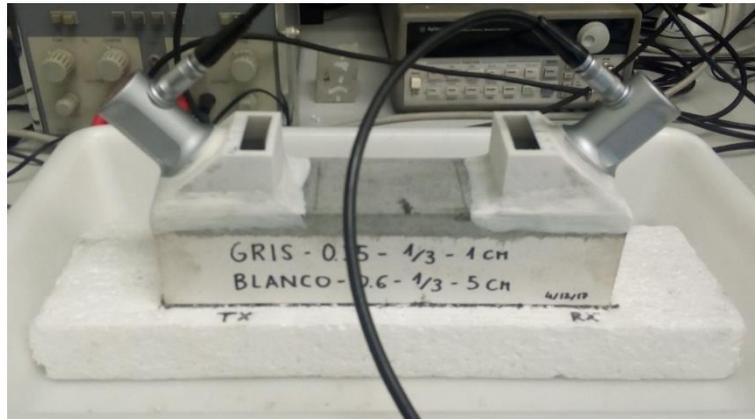


Figura 145. Acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en la probeta de 10 mm de mortero gris.

En la Figura 146, se han representado los espectrogramas combinados de velocidad de grupo junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo, la SSC y las verticales discontinuas negras (marcadas con $\lambda_R=10$ mm) que se sitúan en 0.27 MHz, la frecuencia que se obtiene al resolver la ecuación (62), donde la velocidad de la onda de Rayleigh de la capa de mortero gris es $c_{1R} = 2726$ m/s y el espesor de dicha capa es $2h = 10$ mm.

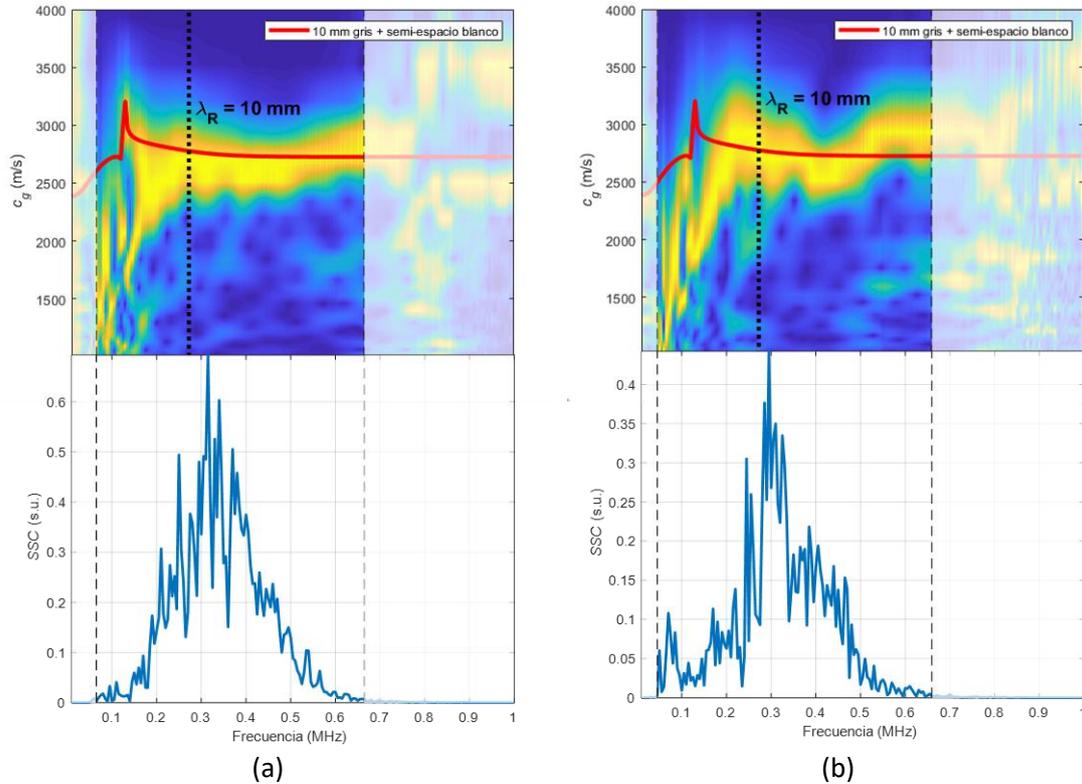


Figura 146. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en probetas bicapa de 10 mm de mortero gris.

En ambas probetas bicapa, se observa una buena correspondencia entre el nivel de señal del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica de capa de 10 mm de mortero gris y semi-espacio de mortero blanco (curva teórica roja) entre 0.15 y 0.66 MHz. No se observa ningún cambio o discontinuidad en el nivel de señal del espectrograma combinado alrededor de 0.27 MHz (la frecuencia donde $\lambda_R = 2h = 10$ mm).

En la Tabla 22 se encuentra un resumen de los parámetros de interés del montaje experimental.

Tabla 22. Resumen de parámetros del montaje de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en las probetas de 10 mm de mortero gris.

Parámetros de la probeta	
Material de la capa superior	Mortero gris
Espesor de la capa superior	10 mm
Material del semi-espacio inferior	Mortero blanco
Espesor del semi-espacio inferior	50 mm
Parámetros geométricos	
Ángulo en transmisión, θ	40°
Ángulo en recepción, θ	40°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	17.7 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	17.7 mm
Distancia de propagación por la placa, d	174.5 mm
Parámetros del equipamiento	
Frecuencia inicial	10 kHz
Frecuencia final	1 MHz
Incremento frecuencial	5 kHz
Número de frecuencias	199
Frecuencia de muestreo, f_s	50 MHz
Número de muestras	20000
Intervalo temporal	400 μ s
Número de ciclos, N_c	5
Amplitud, V_p	5 V
Promediado	8
Amplificación en transmisión (equipamiento)	-
Amplificación en recepción (equipamiento)	40 dB (5660C)
Generador de funciones	Handyscope HS3
Osciloscopio	Handyscope HS3
Transductores (frecuencia central, f_c)	K0,5SC (0,5 MHz)
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)
Parámetros del postprocesado	
Ventana de espectrograma	20 μ s
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %
Número de puntos de las FT de cada ventana	2 ¹⁴
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	2000
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0
Rango frecuencial que marca la SSC	0.07-0.67 MHz

5.1.4.4. Probetas bicapa de 20mm

En la Figura 147 se encuentra una fotografía del montaje experimental de acoplamiento localizado por cuñas de agua en las probetas bicapa de 20 mm de capa de mortero gris.



Figura 147. Acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en la probeta de 20 mm de mortero gris.

En la Figura 148 (b), se han representado los espectrogramas combinados. En este caso las líneas verticales discontinuas negras (marcada con $\lambda_R=20$ mm) se sitúan en 0.14 MHz, obtenida al resolver la ecuación (62) asumiendo ahora que el espesor de la capa es $2h = 20$ mm. En la Figura 148 (a) y (c) se ha representado una ampliación entre 0.01 y 0.3 MHz de la Figura 148 (b) y (d) respectivamente, para una mejor visualización de ese rango frecuencial.

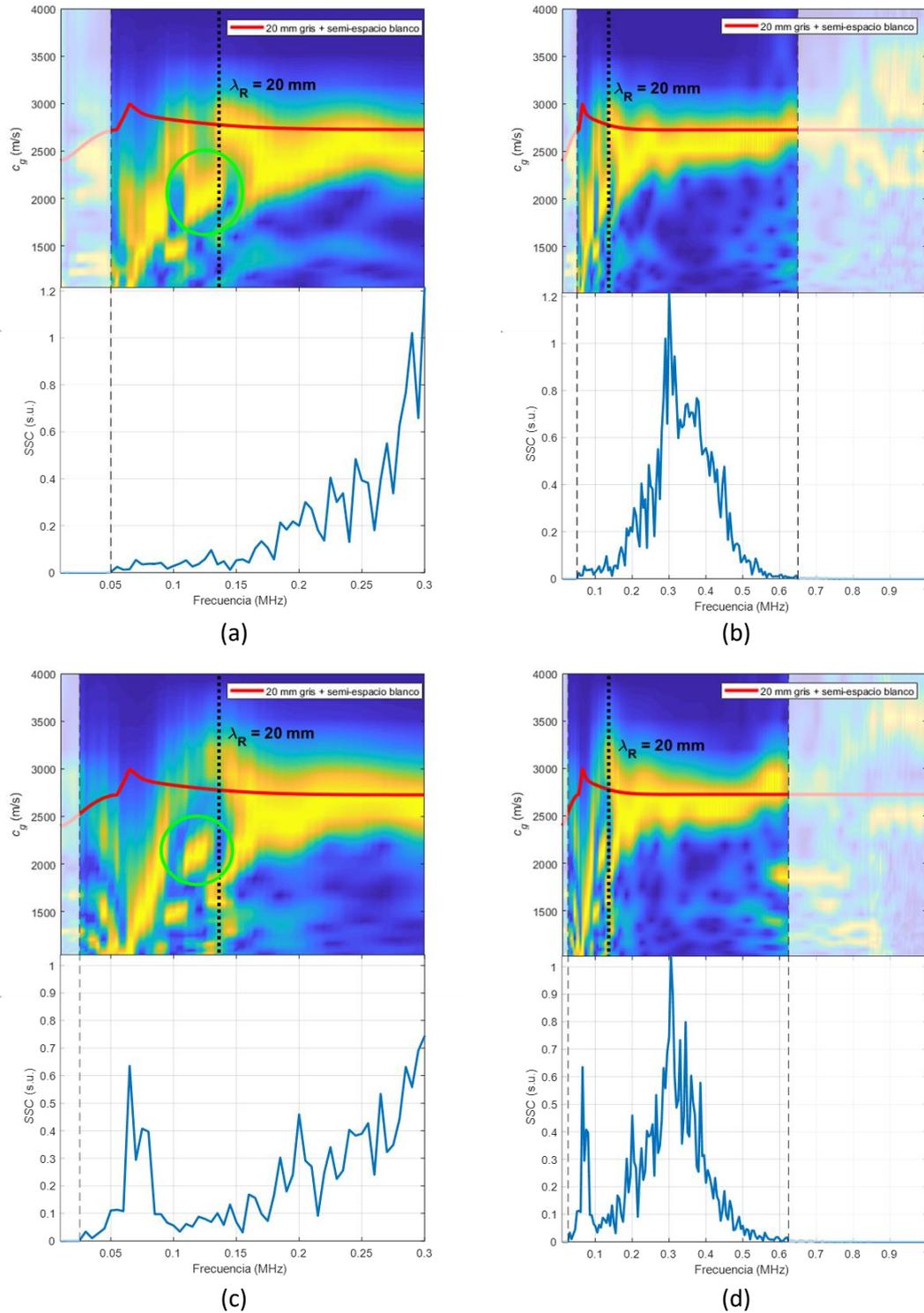


Figura 148. Espectrogramas combinados, curvas teóricas y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en probetas bicapa de 20 mm de mortero gris.

En ambas probetas, existe una buena correspondencia entre el espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica de capa de 20 mm de mortero gris y semi-espacio de mortero blanco (curva roja) entre 0.14 y 0.65 MHz. En este caso, sí que se observa una discontinuidad en el espectrograma combinado alrededor de 0.14 MHz (círculos verdes en Figura 148 (a) y Figura 148 (c)) que es la asociada a $\lambda_R = 2h = 20$ mm.

En la Tabla 23 se encuentra un resumen de los parámetros de interés del montaje experimental de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en las probetas de 20 mm de mortero gris.

Tabla 23. Resumen de parámetros del montaje de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en las probetas de 20 mm de mortero gris.

Parámetros de la probeta	
Material de la capa superior	Mortero gris
Espesor de la capa superior	20 mm
Material del semi-espacio inferior	Mortero blanco
Espesor del semi-espacio inferior	40 mm
Parámetros geométricos	
Ángulo en transmisión, θ	40°
Ángulo en recepción, θ	40°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	17.7 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	17.7 mm
Distancia de propagación por la placa, d	174.5 mm
Parámetros del equipamiento	
Frecuencia inicial	10 kHz
Frecuencia final	1 MHz
Incremento frecuencial	5 kHz
Número de frecuencias	199
Frecuencia de muestreo, f_s	50 MHz
Número de muestras	20000
Intervalo temporal	400 μs
Número de ciclos, N_c	5
Amplitud, V_p	5 V
Promediado	8
Amplificación en transmisión (equipamiento)	-
Amplificación en recepción (equipamiento)	40 dB (Panametrics)
Generador de funciones	Handyscope HS3
Osciloscopio	Handyscope HS3
Transductores (frecuencia central, f_c)	K0,5SC (0,5 MHz)
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)
Parámetros del postprocesado	
Ventana de espectrograma	20 μs
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %
Número de puntos de las FT de cada ventana	2^{14}
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	2000
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0
Rango frecuencial que marca la SSC	0.05-0.65 MHz

5.1.5. Probetas bicapa- Acoplamiento por aire

En esta sección se presentan las curvas de dispersión de las ondas de Rayleigh empleando en este caso transductores piezoeléctricos acoplados por aire. Debido a factores externos, únicamente se pudieron medir las probetas de la amasada 1. El hecho que el medio acoplante sea aire, implica un cambio drástico en los ángulos de incidencia.

5.1.5.1. Descripción del experimental

Para medir las probetas bicapa de la amasada 1 se han utilizado los mismos transductores piezoeléctricos acoplados por aire de frecuencia central 0.25 MHz (Gómez, 2004) que se emplearon en el capítulo 4. Pese a que no se produce intersección entre el ángulo de 10° (el mismo ángulo que se ha utilizado en las medidas de acoplamiento por aire en el capítulo 4) y las curvas de ángulos de incidencia de las distintas probetas bicapa (Figura 149), se asume que el ancho de haz es capaz de generar el modo de onda de Rayleigh dispersiva deseado.

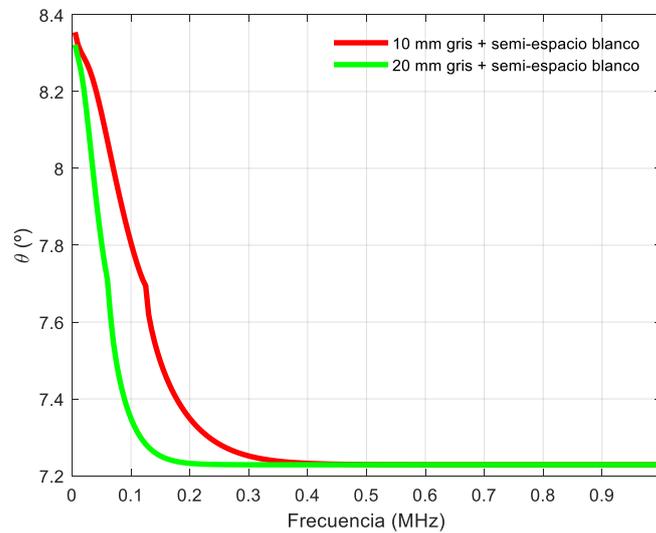


Figura 149. Curvas de dispersión de ondas de Rayleigh dispersivas de ángulos de inclinación θ (siendo el medio acoplante aire, de $c_1=343$ m/s) de dos probetas bicapa de diferentes espesores de capa superior de mortero gris (10 mm y 20 mm).

De nuevo, las probetas reposan en planchas de EPS y se coloca una plancha de dicho material en vertical para bloquear la onda directa que se propaga por el aire (Gosálbez et al., 2018). El esquema del montaje experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos se encuentra en la Figura 150.

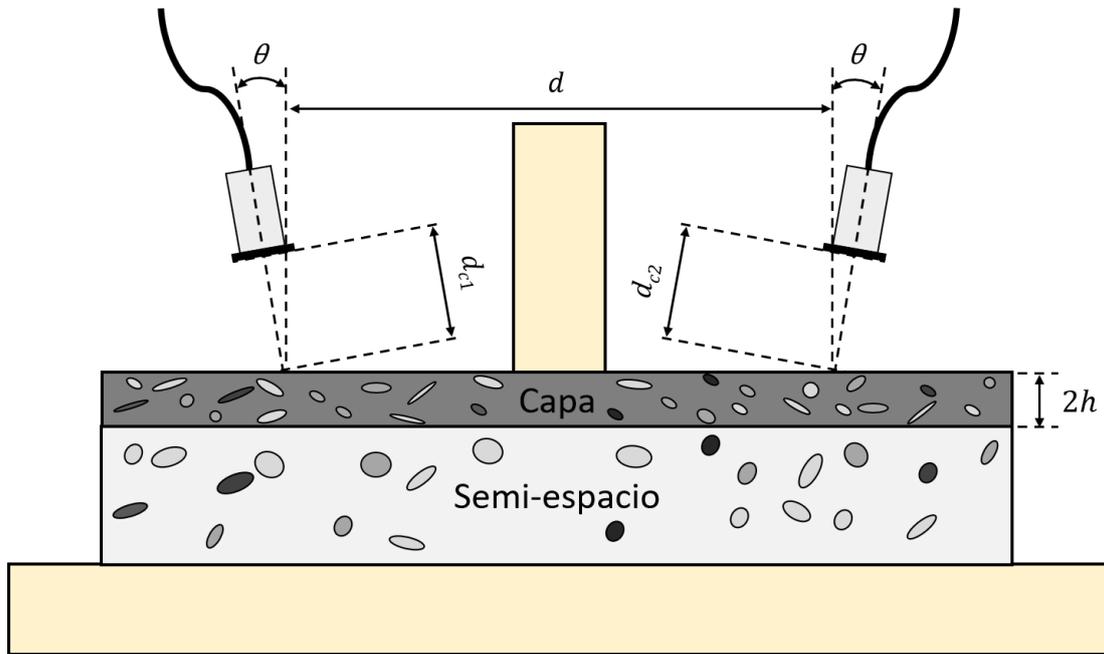


Figura 150. Esquema de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en probeta bicapa.

El transmisor se ha excitado con señales sinusoidales *burst* de 5 ciclos y posteriormente se han amplificado por un factor de 50. El rango frecuencias de las señales transmitidas es de 10 kHz a 1 MHz, en incrementos de 5 kHz. Las señales recibidas se han amplificado 60 dB y se han adquirido a una frecuencia de muestreo f_s de 50 MHz, 20000 muestras (lo que implica un intervalo temporal de $400 \mu s$) y promediado de 8 trazas.

5.1.5.2. Probeta bicapa de 10mm

En la Figura 151 se encuentra una fotografía del montaje experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la probeta bicapa de 10 mm de capa de mortero gris y 50 mm de mortero blanco.



Figura 151. Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la probeta de 10 mm de mortero gris y 50 mm de mortero blanco de la amasada 1.

En la Figura 152, se ha representado el espectrograma combinado de velocidad de grupo junto con la curva teórica de velocidad de grupo, la SSC y la vertical discontinua negra (marcada con $\lambda_R=10$ mm) que se sitúa en 0.27 MHz, la frecuencia que se obtiene al resolver la ecuación (62), donde $c_{1R} = 2726$ m/s y $2h = 10$ mm.

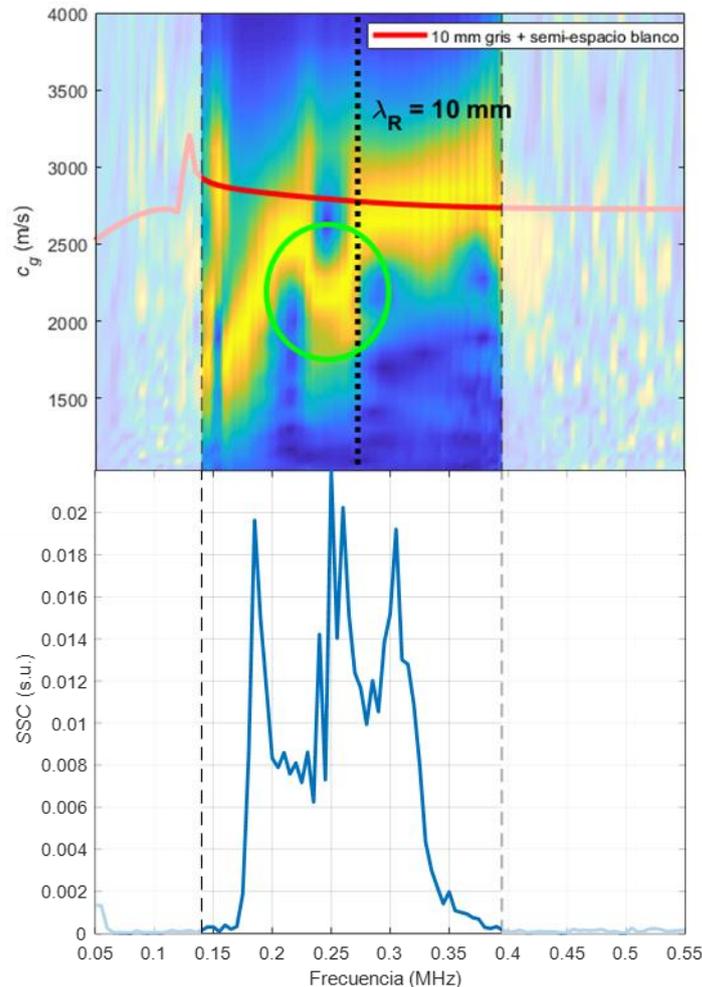


Figura 152. Espectrograma combinado, curva teórica y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en probeta bicapa de 10 mm de mortero gris.

Existe una buena correspondencia entre el nivel de señal del espectrograma combinado (en amarillo) y la curva teórica de capa de 10 mm de mortero gris y semi-espacio de mortero blanco (curva teórica roja) entre 0.27 y 0.4 MHz. Se observa una discontinuidad muy marcada en el espectrograma (círculo verde en Figura 152) alrededor de 0.27 MHz que corresponde a la frecuencia donde $\lambda_R = 2h = 10$ mm. Esta discontinuidad no aparecía tan marcada en el caso de acoplamiento por agua con cuñas (ver “Probetas bicapa de 10mm”).

En la Tabla 24 se encuentra un resumen de los parámetros de interés del montaje experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la probeta de 10 mm de mortero gris.

Tabla 24. Resumen de parámetros del montaje de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la probeta de 10 mm de mortero gris.

Parámetros de la probeta	
Material de la capa superior	Mortero gris
Espesor de la capa superior	10 mm
Material del semi-espacio inferior	Mortero blanco
Espesor del semi-espacio inferior	50 mm
Parámetros geométricos	
Ángulo en transmisión, θ	10°
Ángulo en recepción, θ	10°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	30 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	30 mm
Distancia de propagación por la placa, d	168 mm
Parámetros del equipamiento	
Frecuencia inicial	10 kHz
Frecuencia final	0.55 MHz
Incremento frecuencial	5 kHz
Número de frecuencias	101
Frecuencia de muestreo, f_s	50 MHz
Número de muestras	20000
Intervalo temporal	400 μ s
Número de ciclos, N_c	5
Amplitud, V_p	6 V
Promediado	8
Amplificación en transmisión (equipamiento)	x50 (WMA-300)
Amplificación en recepción (equipamiento)	60 dB (5660C)
Generador de funciones	Handyscope HS3
Osciloscopio	Handyscope HS3
Transductores (frecuencia central, f_c)	$f_c = 0.25$ MHz
Acoplante (velocidad si procede)	Aire (343 m/s)
Parámetros del postprocesado	
Ventana de espectrograma	20 μ s
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %
Número de puntos de las FT de cada ventana	2 ¹⁴
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	6000
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0
Rango frecuencial que marca la SSC	0.14-0.40 MHz

5.1.5.3. Probeta bicapa de 20mm

En la Figura 153 se encuentra una fotografía del montaje experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la probeta bicapa de 20 mm de capa de mortero gris y



Figura 153. Acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la probeta de 20 mm de mortero gris y 40 mm de mortero blanco de la amasada 1.

En la Figura 154, se ha representado el espectrograma combinado de velocidad de grupo junto con la curva teórica de velocidad de grupo, la SSC y la vertical discontinua negra (marcada con $\lambda_R=20$ mm) que se sitúa en 0.14 MHz, la frecuencia que se obtiene al resolver la ecuación (62), donde $c_{1R} = 2726$ m/s y $2h = 20$ mm.

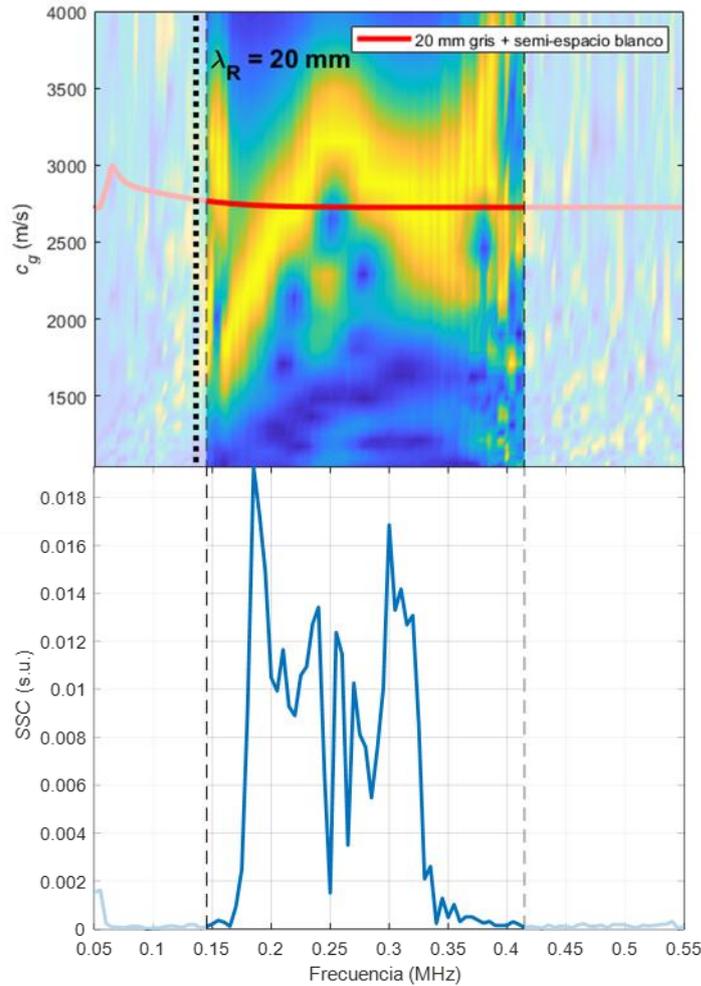


Figura 154. Espectrograma combinado, curva teórica y SSC de la técnica de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en probeta bicapa de 20 mm de mortero gris y 40 mm de mortero blanco de la amasada 1.

En este caso, la correspondencia entre el espectrograma combinado y la curva teórica de capa de 20 mm no es tan buena como en los otros casos. No se observa ningún cambio o discontinuidad alrededor de 0.14 MHz (la frecuencia donde $\lambda_R = 2h = 20$ mm) debido a que dicha frecuencia se encuentra fuera de la banda de trabajo de los transductores (área difuminada izquierda en la Figura 154).

En la Tabla 25 se encuentra un resumen de los parámetros de interés del montaje experimental de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la probeta de 20 mm de mortero gris y 40 mm de mortero blanco.

Tabla 25. Resumen de parámetros del montaje de acoplamiento por aire mediante transductores piezoeléctricos en la probeta de 20 mm de mortero gris de la amasada 1.

Parámetros de la probeta	
Material de la capa superior	Mortero gris
Espesor de la capa superior	20 mm
Material del semi-espacio inferior	Mortero blanco
Espesor del semi-espacio inferior	40 mm
Parámetros geométricos	
Ángulo en transmisión, θ	10°
Ángulo en recepción, θ	10°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	30 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	30 mm
Distancia de propagación por la placa, d	168 mm
Parámetros del equipamiento	
Frecuencia inicial	10 kHz
Frecuencia final	0.55 MHz
Incremento frecuencial	5 kHz
Número de frecuencias	101
Frecuencia de muestreo, f_s	50 MHz
Número de muestras	20000
Intervalo temporal	400 μ s
Número de ciclos, N_c	5
Amplitud, V_p	6 V
Promediado	8
Amplificación en transmisión (equipamiento)	x50 (WMA-300)
Amplificación en recepción (equipamiento)	60 dB (5660C)
Generador de funciones	Handyscope HS3
Osciloscopio	Handyscope HS3
Transductores (frecuencia central, f_c)	$f_c = 0.25$ MHz
Acoplante (velocidad si procede)	Aire (343 m/s)
Parámetros del postprocesado	
Ventana de espectrograma	20 μ s
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %
Número de puntos de las FT de cada ventana	2 ¹⁴
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	6000
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0
Rango frecuencial que marca la SSC	0.15-0.42 MHz

5.1.6. Estudio de daño por carbonatación sobre probetas reales

Una vez se ha simulado el daño por carbonatación con probetas bicapa, se ha realizado un estudio del daño de carbonatación en una probeta prismática de mortero normalizado de relación agua/cemento (w/c) 0.5 y relación árido/cemento (a/c) 3:1 (Gosálbez et al., 2018) de dimensiones 240 x 60 x 60 mm³ (longitud x ancho x espesor). Esta probeta se ha inspeccionado mediante la técnica de acoplamiento localizado por agua con cuñas para la generación de ondas de Rayleigh. A esta probeta se le realizaron dos procesos acelerados de carbonatación, el primero durante 3 días y el segundo durante 7 días. La información del proceso de carbonatación acelerado se encuentra en (Eiras et al., 2016). Para averiguar el espesor de la capa carbonatada, se fue cortando dicha probeta y se aplicó fenolftaleína. Por tanto, se dispone de tres tiempos de carbonatación: 0 días, 3 días y 10 días. El espesor de la probeta en el caso de 10 días de carbonatación acelerada se reveló 2 años más tarde, por lo que sería más preciso indicar que son 10 días de carbonatación acelerada más 2 años de carbonatación lenta. Pese a haber estado la probeta envuelta en *film* y guardada no se puede descartar que se haya carbonatado más. Los espesores de carbonatación aproximados y nada homogéneos que se han medido en cada uno de los tres tiempos de carbonatación han sido 2, 10 y 20 mm respectivamente (Figura 155).

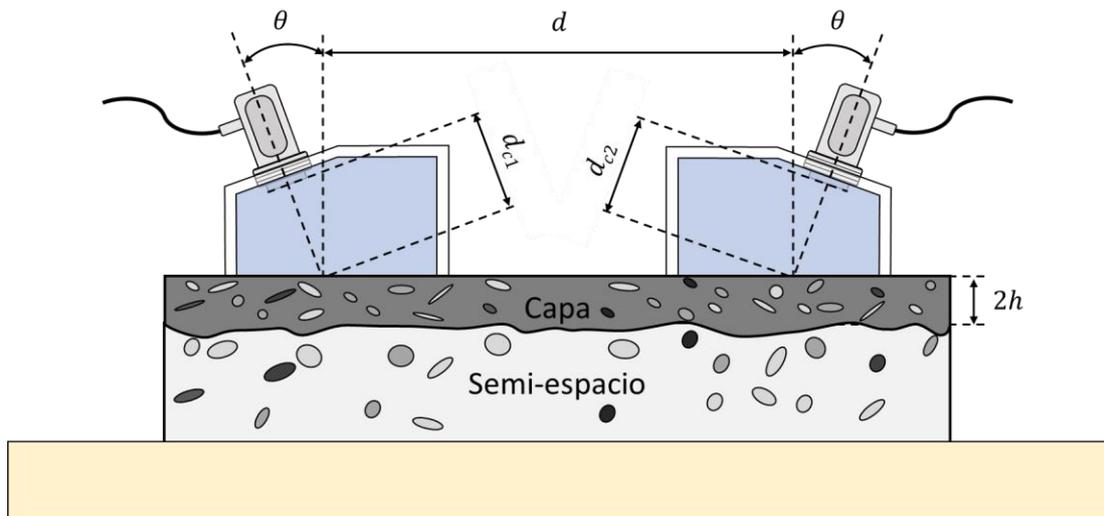


Figura 155. Espesores de la capa carbonatada después de sufrir procesos de carbonatación.

Las medidas experimentales de cuñas se realizaron únicamente en el tercer estado, carbonatada 10 días, ya que esta técnica se diseñó posteriormente. Sin embargo, se han realizado comparaciones entre los resultados de las medidas experimentales de cuñas de agua de la probeta carbonatada y de otra probeta del mismo tipo sin carbonatar. Se han obtenido siguiendo el mismo procedimiento que en “Fabricación y caracterización de materiales para la simulación del proceso de carbonatación” y en el capítulo 4.

5.1.7. Resultados de la carbonatación con acoplamiento por agua mediante cuñas

El esquema y la fotografía del montaje experimental de acoplamiento por agua mediante cuñas se encuentra en la Figura 156.



(a)



(b)

Figura 156. Acoplamiento por agua mediante cuñas en probeta de mortero normalizado: (a) Esquema; (b) Fotografía.

Se ha utilizado una pareja de transductores de banda ancha de onda P (K0,5SC) con una frecuencia central f_c de 0.5 MHz para las probetas de mortero (carbonatada y sin carbonatar). El transmisor se ha excitado con señales sinusoidales *burst* de 5 ciclos mediante un generador de señal programable (33120A, Agilent Technologies). Su rango frecuencial es de 10 kHz a 0.7 MHz, en incrementos de 5 kHz. Las señales recibidas se han adquirido mediante un osciloscopio digital (DPO3014, Tektronix) con una frecuencia de muestreo f_s de 50 MHz, 10000 muestras (lo que implica un intervalo temporal de 200 μ s) y promediado de 16.

En esta ocasión, no se han generado las curvas de dispersión teóricas de capa y semi-espacio con el software *Geopsy*. Para la probeta sin carbonatar no tiene sentido, ya que suponemos que no existe capa de carbonatación y por tanto no se puede asumir modelo bicapa. En el caso de la probeta carbonatada, no se pueden disponer de las velocidades de onda P y onda S de la capa carbonatada ya que la probeta no se ha carbonatado completamente

En la Figura 157, se ha representado el espectrograma combinado de velocidad de grupo junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo, las SSC y dos verticales discontinua negras en el

caso de la probeta carbonatada (marcadas con $\lambda_R=10$ mm y $\lambda_R=20$ mm), que se sitúan en 0.22 MHz y 0.11 MHz respectivamente. Las frecuencias que se obtienen al resolver la ecuación (62), donde la velocidad de la onda de Rayleigh de la probeta carbonatada es $c_{R\ carb} = 2228$ m/s y el espesor de la capa carbonatada es $2h = 10$ mm (3 días de carbonatación acelerada) y $2h = 20$ mm (10 días de carbonatación acelerada más 2 años de carbonatación lenta), respectivamente. Se han establecido dos verticales en esta ocasión porque se supone que el espesor de carbonatación se encuentra entre ambos valores.

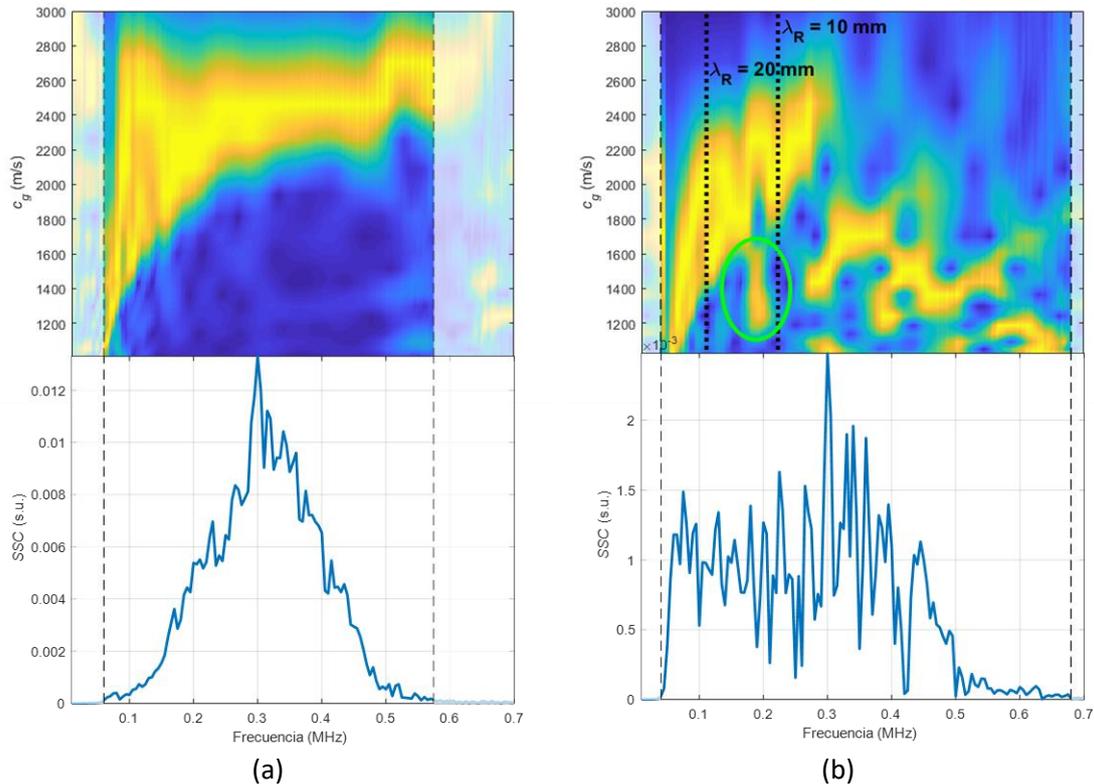


Figura 157. Espectrograma combinado, curva teórica y SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en probeta de mortero normalizado (a) sin carbonatar y (b) carbonatada.

Del estudio de los espectrogramas combinados podemos deducir los siguientes resultados:

- Para el caso de la probeta sin carbonatar (Figura 157 (a)), no se observa ningún cambio o discontinuidad en el nivel de señal del espectrograma combinado.
- Para el caso de la probeta carbonatada (Figura 157 (b)), se observa una discontinuidad en el nivel de señal del espectrograma combinado (círculo verde en Figura 157 (b)) entre 0.11 MHz (la frecuencia donde $\lambda_R = 2h = 20$ mm) y 0.22 MHz (la frecuencia donde $\lambda_R = 2h = 10$ mm).
- Esta discontinuidad también se ha presentado en las probetas bicapa de 10 mm y de 20 mm, por lo que se demuestra la repetibilidad del procedimiento.

En la Tabla 26 se encuentra un resumen de los parámetros de interés del montaje experimental de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 40° en la probeta de mortero normalizado sin carbonatar y en la probeta de mortero normalizado carbonatada 10 días.

Tabla 26. Resumen de parámetros de interés de las medidas de acoplamiento por agua mediante cuñas en las probetas de mortero normalizado sin carbonatar y carbonatada.

Parámetros de la probeta		
Material	Mortero normalizado	
Espesor de la capa carbonatada	0 mm	10-20 mm
Parámetros geométricos		
Ángulo en transmisión, θ	40°	
Ángulo en recepción, θ	40°	
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	16.7 mm	
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	16.7 mm	
Distancia de propagación por la placa, d	137.5 mm	
Parámetros del equipamiento		
Frecuencia inicial	10 kHz	
Frecuencia final	0.7 MHz	
Incremento frecuencial	5 kHz	
Número de frecuencias	139	
Frecuencia de muestreo, f_s	50 MHz	
Número de muestras	10000	
Intervalo temporal	200 μs	
Número de ciclos, N_c	5	
Amplitud, V_p	10 V	
Promediado	16	
Amplificación en transmisión (equipamiento)	-	
Amplificación en recepción (equipamiento)	-	
Generador de funciones	33120A	
Osciloscopio	DPO3014	
Transductores (frecuencia central, f_c)	K0,5SC (0.5 MHz)	
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)	
Parámetros del postprocesado		
Ventana de espectrograma	20 μs	
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %	
Número de puntos de las FT de cada ventana	2 ¹⁴	
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	0	
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0	
Rango frecuencial que marca la SSC	0.06.-0.58 MHz	0.04- 0.68 MHz

5.2. Envejecimiento de fibras

El mortero de cemento reforzado con fibra de vidrio (*GRC*) que se ha utilizado en numerosas aplicaciones en los últimos 40 años, como por ejemplo, en suelos industriales, cubiertas prefabricadas, torres de comunicación, barreras acústicas o revestimiento de túneles (Eiras et al., 2013b; Enfedaque et al., 2010; Hernández et al., 2007). Está formado principalmente por cemento Portland y fibras de vidrio.

El mortero se caracteriza por presentar una resistencia a compresión considerable. Sin embargo, sus resistencias a tracción y a flexión son muy bajas, por lo que es necesario reforzarlo con armaduras o fibras de vidrio. El resultado de añadir fibras de vidrio al mortero es un material compuesto de mayor ductilidad, tenacidad y resistencia a tracción y flexión, además de ofrecer mayor resistencia al fuego y a la corrosión (Eiras et al., 2013b; Enfedaque et al., 2010; Sánchez et al., 1992). El hecho de reforzar con fibras en vez de armaduras metálicas (hormigón armado) permite la fabricación de elementos más delgados, es decir, estructuras tipo placa (Hernández et al., 2007).

Sin embargo, el *GRC* no está exento de sufrir daños debido a las condiciones medioambientales, compuestos químicos agresivos u otros factores, en especial las fibras presentes en él, como ya se explicó en el capítulo 2 (ver “Daños en materiales cementicios”).

Los procesos de envejecimiento acelerado se han utilizado en varios estudios para caracterizar los procesos de degradación a los que se ven sometidos los materiales cementicios, para así poder predecir la pérdida de propiedades cuando el material sufra la acción de las citadas condiciones adversas (Sánchez et al., 1992; Segura et al., 2007). Uno de los procesos de envejecimiento acelerados que se han empleado para envejecer las fibras presentes en las estructuras de *GRC* es la inmersión en un baño de agua a altas temperaturas (Eiras et al., 2013b; Purnell et al., 2003; Sánchez et al., 1992). Según (Eiras et al., 2013b; Enfedaque et al., 2010; Sánchez et al., 1992), someter al *GRC* a 24 horas de envejecimiento mediante inmersión en agua caliente a 50°C es equivalente a 101 días de exposición al clima del Reino Unido. Dicho envejecimiento en las fibras se traduce en una reducción de la ductilidad, tenacidad y resistencia a tracción y flexión, en especial ésta última. Es decir, el *GRC* se convierte en un material frágil que se agrieta bajo pequeñas deformaciones (Eiras et al., 2013b; Enfedaque et al., 2010; Hernández et al., 2007; Sánchez et al., 1992).

Para impedir el envejecimiento de las fibras, se han añadido distintos productos químicos: metacaolín, humo de sílice, cenizas volantes, puzolanas (Enfedaque et al., 2010; Sánchez et al., 1992). Mediante el ensayo de resistencia a flexión (ensayo destructivo) o el uso de microscopía electrónica de barrido (*SEM*) se puede obtener información del estado de las fibras de *GRC* (Eiras et al., 2013b; Genovés et al., 2015d).

Al igual que sucedía en el daño por carbonatación, para evitar dañar la estructura cementicia se han investigado diversos END. Algunos de los END utilizados en probetas de *GRC* son ensayos de impacto (Eiras et al., 2013b; Genovés et al., 2015c) o de ultrasonidos (Genovés et al., 2017a; Genovés et al., 2015a; Hernández et al., 2007). Sin embargo, dentro de los END por ultrasonidos, no se ha encontrado mucha bibliografía donde se apliquen ondas guiadas a placas de *GRC*. En (Eiras et al., 2013a; Eiras et al., 2013b) se midieron placas de *GRC* antes y después de envejecer mediante acoplamiento por contacto directo en incidencia normal. En dichos estudios, se afirma que se reduce el comportamiento no lineal del material al haber envejecido las fibras. Es interesante comprobar la sensibilidad de diferentes modos de ondas de Lamb, excitados selectivamente mediante incidencia oblicua, al proceso de envejecimiento de las fibras en

estructuras tipo-placa (la guía de onda por definición donde existen las ondas de Lamb) de GRC y el efecto global (Keller et al., 2001) que produce en la totalidad de dichas estructuras.

5.2.1. Descripción del experimental

Para estudiar el envejecimiento en placas de GRC mediante END por ondas de Lamb, se ha seguido el siguiente procedimiento. En primer lugar, el GIQUIMA ha proporcionado tres placas de GRC (M1, M2 y M3) (Figura 158 (a)), las cuales se cortaron de una tabla de GRC (Enfedaque et al., 2010) que llevaba 5 años almacenada en cámara húmeda. La composición de dichas placas de GRC se pueden encontrar en (Genovés et al., 2017a).



Figura 158. (a) Fotografía de las tres placas de GRC utilizadas en este estudio; (b) Placas en saturación.

Para comprobar que las placas no estaban envejecidas, se realizó un ensayo a flexión sobre una muestra adicional extraída de la misma tabla de GRC, corroborando su buen estado. Posteriormente las tres placas destinadas de GRC destinadas a END, se saturaron durante 72 horas (Figura 158 (b)). Pasadas las 72 horas, se realizaron medidas experimentales a las tres placas de GRC, concretamente se midieron onda P y onda S mediante el procedimiento habitual y ondas de Lamb mediante la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 20° y 40°. De las tres placas medidas por ultrasonidos, la placa M2 se quedó sumergida en agua y en reserva a modo de control mientras que las placas M1 y M3 se introdujeron en un baño de agua caliente (Precistern 20L 6000141, J.P. Selecta) a 80 °C durante 28 días (Figura 159).

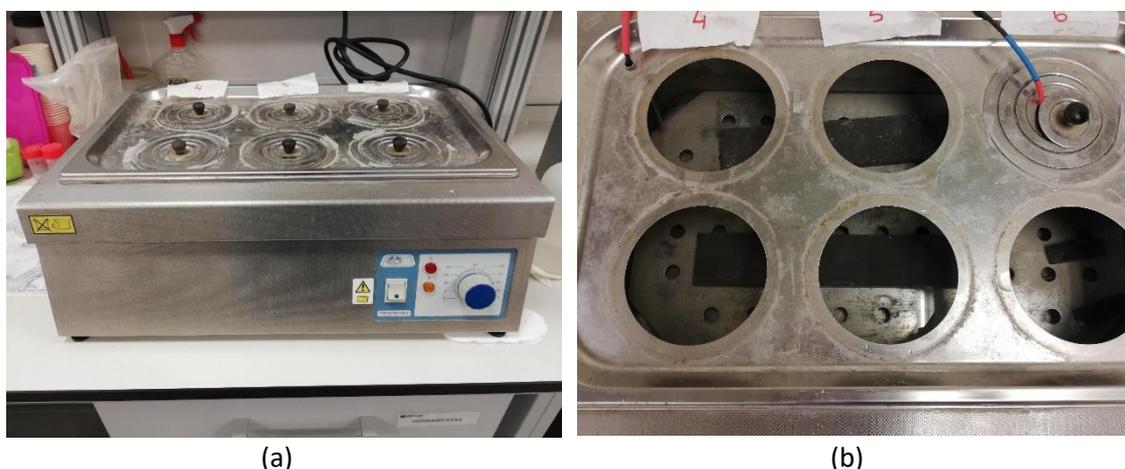


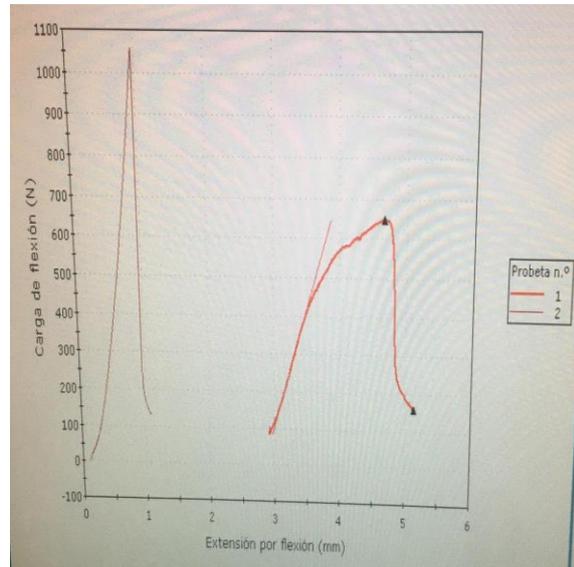
Figura 159. (a) Baño de agua caliente; (b) Placas sumergidas en baño de agua caliente.

Posteriormente, se sacaron las dos placas M1 y M3 del baño de agua caliente y se volvieron a realizar las mismas medidas experimentales de ondas P y S y ondas de Lamb con el mismo equipamiento y los mismos parámetros que antes del proceso acelerado de envejecimiento.

Una vez medidas, la placa M1 fue ensayada a flexión (Figura 160 (a)) para comprobar el nivel de daño alcanzado. En la Figura 160 (c), se observa la placa M1 envejecida después de ensayar a flexión, donde no hay mucha fibra visible tras la rotura, lo cual es sinónimo de envejecimiento en las fibras de la placa M1. La curva resultante de dicho ensayo a flexión se encuentra en la Figura 160 (b), a la izquierda. Se asume, por tanto, que las fibras de la placa M3 también han sufrido envejecimiento, aunque dicha placa no se haya ensayado. En la Figura 160 (d), se encuentra un ejemplo de fibras en buen estado en dos placas de GRC fabricadas con ceniza volante, producto que se ha mencionado anteriormente que protege a la fibra del proceso de envejecimiento.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 160. (a) Ensayo a flexión; (b) Gráficas de ensayos a flexión, a la izquierda la curva referente a la placa de GRC envejecida (M1); (c) Placa de GRC envejecida (M1) después de ensayo a flexión; (d) Placas de GRC sin envejecer después de ensayo a flexión.

5.2.2. Estudio de velocidades de onda P y S

En este apartado vamos a caracterizar ultrasónicamente las muestras de GRC. La metodología para medir la velocidad de onda P y S es la misma que se ha seguido en “Fabricación y caracterización de materiales para la simulación del proceso de carbonatación” y en “Medidas de velocidad de onda P y onda S”. Destacar que para la onda P se han empleado de frecuencia central 500 kHz (K0,5SC) con una amplificación de 40dB en recepción y unos sargentos para garantizar una presión uniforme (Figura 161)



Figura 161. Montaje utilizado para las medidas de velocidad de onda P en las placas de GRC.

Se ha realizado un barrido frecuencial de sinusoidal *burst* de 5 ciclos, desde 10 kHz a 1 MHz, con saltos de 5 kHz. En el algoritmo de detección automático por umbral para obtener el tiempo de llegada de cada una de las señales recibidas, se ha utilizado un umbral del 50 % (Genovés et al., 2015b).

En la Figura 162 se han representado las velocidades de onda P de las placas de M1, M2 y M3 para las diferentes frecuencias. En la Figura 162 (a) se ha representado la probeta M1 antes y después de envejecer, mientras que la Figura 162 (b) corresponde a la probeta M2, que es la que se ha mantenido como control sin someterla a daño. Por último, la Figura 162 (c) muestra la probeta M3 tanto antes como después del proceso de envejecimiento. En todas ellas, se aprecia una velocidad similar para todos los casos y frecuencias, aspecto que indica que el proceso de envejecimiento no ha afectado a la velocidad de la onda P.

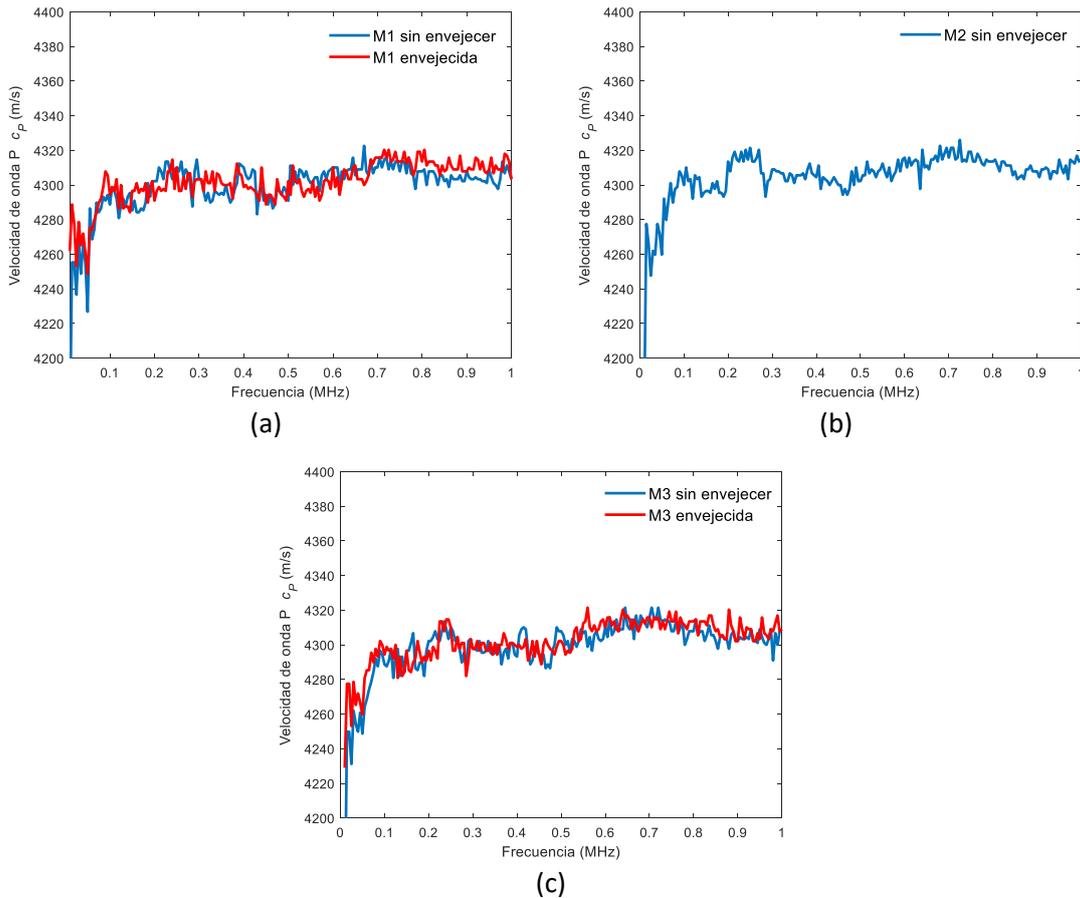


Figura 162. Velocidades de onda P de las placas M1 (a), M2 (b) y M3 (c). En (a) y (c) se encuentran las curvas de velocidad de onda P de antes y después del proceso de envejecimiento.

En el caso de la velocidad de la onda S, se ha trabajado con la pareja de transductores de onda S de frecuencia central 500 kHz (V151-RM, Panametrics) y con acoplante de onda S (SWC-2, Olympus). El esquema de medida es similar al de onda P.

Se ha aplicado presión entre ambos transductores mediante un sargento. Se ha amplificado 40 dB (5660C, Panametrics, Waltham, MA, USA) en recepción. Tanto la generación como la adquisición de señales se ha realizado con el mismo equipo (Handyscope HS5, TiePie engineering). Se ha realizado un barrido frecuencial de sinusoidal *burst* de 1 ciclo, desde 10 kHz a 1 MHz, con saltos de 5 kHz. Para detectar el tiempo de llegada de la onda S, se ha empleado el método pico-a-pico o *peak-to-peak method* explicado en “Parámetros ultrasónicos” y en “Medidas de velocidad de onda P y onda S”, seleccionando de forma empírica los picos de las señales recibidas (Chan, 2010).

En la Figura 163 se han representado las velocidades de onda S con respecto a la frecuencia (hasta 0.4 MHz) de las placas de GRC M1, M2 y M3 siguiendo el mismo formato que en la Figura 162.

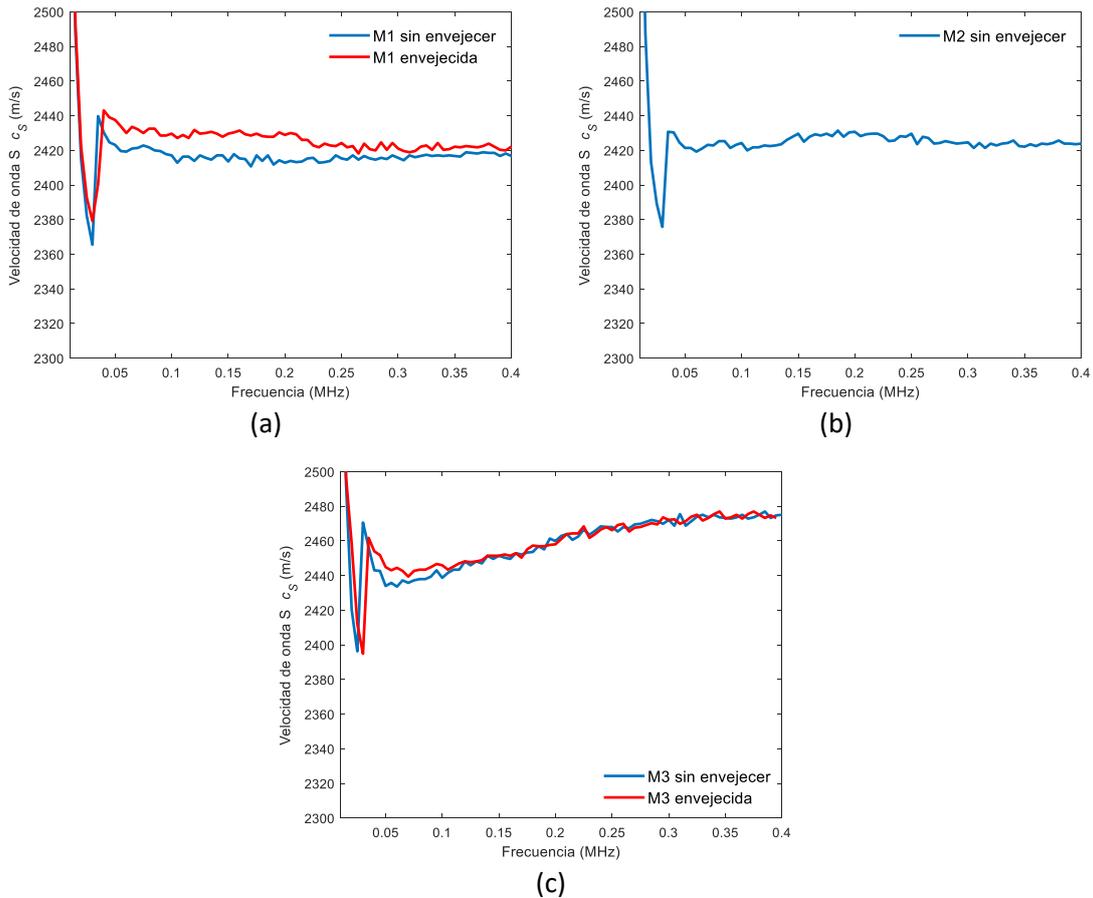


Figura 163. Velocidades de onda S de las placas M1 (a), M2 (b) y M3 (c). En (a) y (c) se encuentran las curvas de velocidad de onda S de antes y después del proceso de envejecimiento.

Al igual que en la velocidad de onda P (Figura 162) se observa que el proceso de envejecimiento no ha producido ningún cambio perceptible en las velocidades de la onda S de las placas de GRC M1 y M3. En la Tabla 27 se recogen los valores promedio de onda P y onda S de las placas de GRC M1, M2 y M3. De los valores de velocidad de onda P y onda S de las tres placas sin envejecer, se ha obtenido unos valores promedio para poder generar las curvas de dispersión de ondas de Lamb.

Tabla 27. Datos de las tres placas de GRC M1, M2 y M3.

	GRC M1		GRC M2	GRC M3		GRC promedio
Dimensiones:	328 x 50 x 20 longitud x ancho x espesor (mm ³)					
Parámetros	Sin envejecer	Envejecida	Sin envejecer	Sin envejecer	Envejecida	
c_P (m/s)	4304	4305	4310	4304	4306	4306
c_S (m/s)	2417	2422	2425	2473	2470	2438

5.2.3. Estudio con acoplamiento por agua mediante cuñas

Para medir las placas de *GRC* se han utilizado dos parejas de cuñas de agua de 20° y 40° . Se ha seguido el mismo procedimiento explicado en el apartado “Probetas bicapa - Acoplamiento por agua mediante cuñas” y en “Acoplamiento por agua mediante cuñas”. El esquema del montaje experimental de acoplamiento por agua mediante cuñas de 20° y 40° se encuentra en la Figura 164.

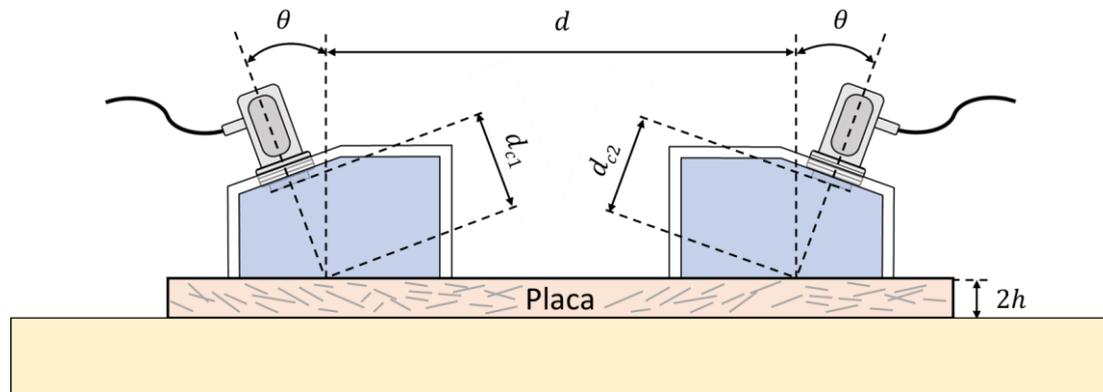


Figura 164. Esquema de acoplamiento por agua mediante cuñas en placas de *GRC*.

Se han empleado transductores de banda ancha de onda P (K0,5SC) con una frecuencia central f_c de 0.5 MHz. El transmisor se ha excitado con señales sinusoidales *burst* de 5 ciclos y se han amplificado en recepción 40 dB. La digitalización se ha realizado a una frecuencia de muestreo f_s de 10 MHz, 20000 muestras (lo que implica un intervalo temporal de 2 ms) y promediado de 16 trazas.

En cuanto al procesado de señal, se va a seguir el mismo procedimiento descrito en el capítulo 4 para las placas de *GRC*: comparación entre curvas de dispersión teóricas de ondas de Lamb y experimentales (espectrograma combinado normalizado y sin normalizar) de velocidad de grupo, además de la obtención de las curvas de sensibilidad del sistema (SSC). Tanto el espectrograma combinado (normalizado y sin normalizar) y las SSC se van a utilizar para para comprobar la existencia de cambios entre las placas M1 y M3 antes y después del envejecimiento. Al igual que en el capítulo 4, debido a las numerosas intersecciones entre las curvas de ángulos de inclinación de los modos de Lamb y los ángulos elegidos (20° y 40°), se va a establecer una máscara (ver “Preprocesado”) que sólo deje pasar el nivel de señal normalizado del espectrograma combinado en las frecuencias donde se produzcan dichas intersecciones con un ancho aproximado de 30 kHz. Además, para reducir el ruido visual, se han eliminado las curvas de velocidad de grupo de los modos de Lamb que no sufren intersecciones con la vertical del ángulo utilizado.

Las curvas de dispersión teóricas de ángulo de inclinación con respecto a la frecuencia para acoplamiento por agua en las placas de *GRC* se representan en la Figura 165.

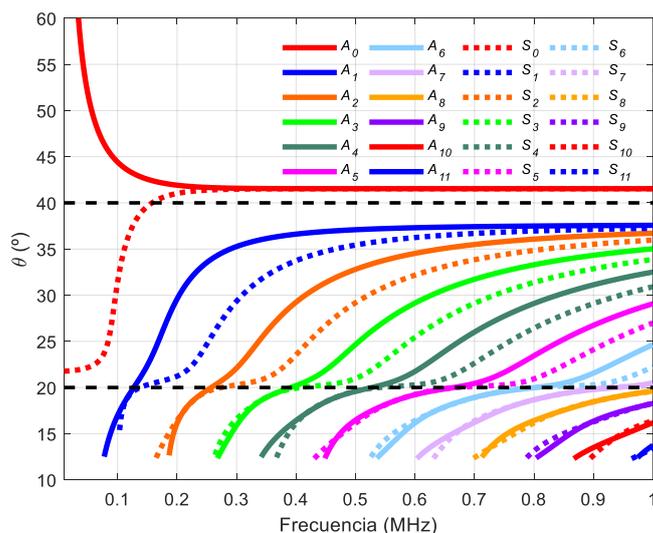


Figura 165. Curvas de ángulo de inclinación para acoplamiento por agua en placas de GRC.

Los ángulos medidos son: 20° y 40°. Las intersecciones que se producen entre las curvas de ángulos y el ángulo elegido son:

- En 20° se produce una intersección con los modos A_1 (curva continua azul) y S_1 (curva discontinua azul) en 0.13 MHz, con los modos A_2 (curva continua naranja) y S_2 (curva discontinua naranja) en 0.26 MHz, con los modos A_3 (curva continua verde claro) y S_3 (curva discontinua verde claro) en 0.39 MHz, con los modos A_4 (curva continua verde oscuro) y S_4 (curva discontinua verde oscuro) en 0.53 MHz, con los modos A_5 (curva continua rosa) y S_5 (curva discontinua rosa) en 0.66 MHz, con los modos A_6 (curva continua azul claro) y S_6 (curva discontinua azul claro) en 0.8 MHz, y con los modos A_7 (curva continua lila) y S_7 (curva discontinua lila) en 0.94 MHz.
- En 40° se produce una intersección con el modo S_0 (curva discontinua roja) en 0.16 MHz.

Debido a la cantidad de modos excitados en el caso de cuña de 20°, se ha decidido representar los espectrogramas en dos partes: en primer lugar, entre 0.01 MHz y 0.5 MHz, y, en segundo lugar, entre 0.5 y 1 MHz. Además, no ha sido necesario incluir las SSC debido a que prácticamente todo el ancho de banda analizado cumple el criterio del 99% del valor máximo de la SSC.

5.2.3.1. Resultados con cuñas de 20°

En la Figura 166, se han representado los espectrogramas combinados (normalizados) de velocidad de grupo obtenidos de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 20° en las placas M1 y M3 antes y después de envejecer, junto con las curvas teóricas de velocidad de grupo entre 0.01 y 0.5 MHz.

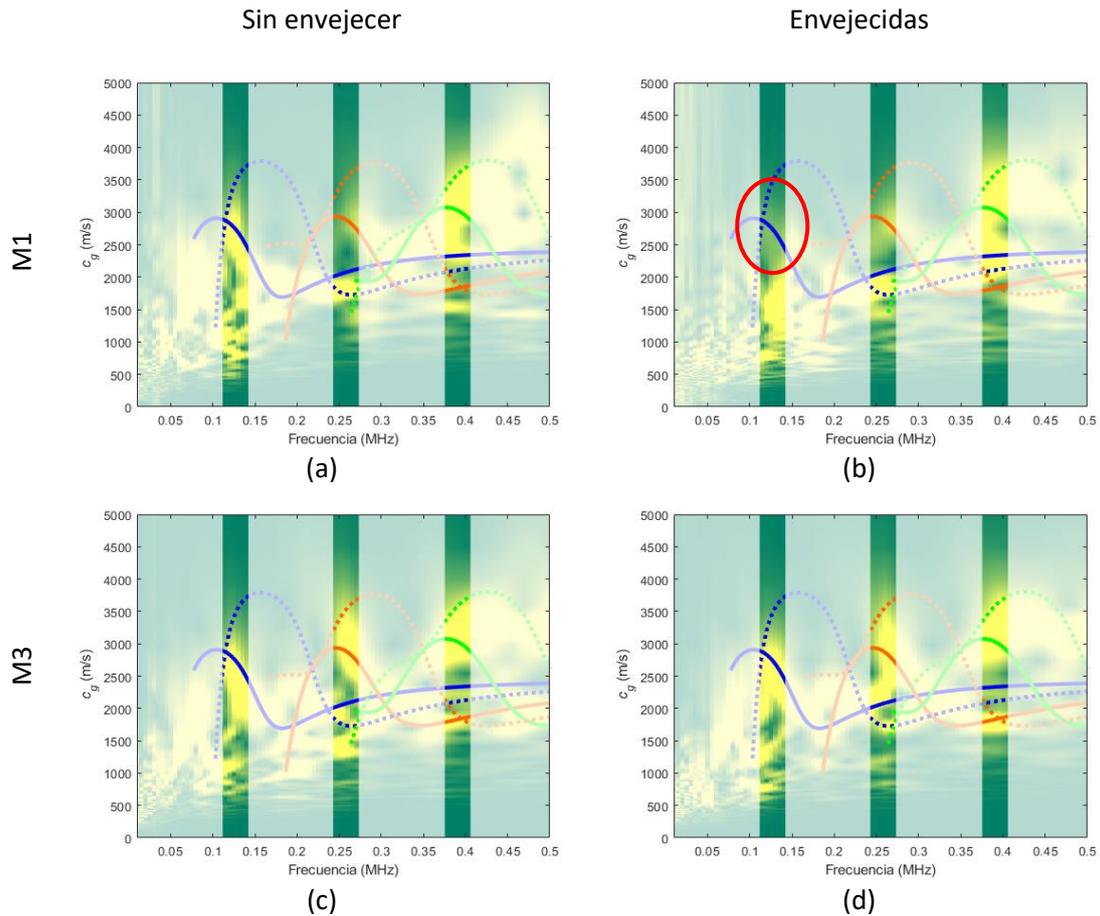


Figura 166. Espectrogramas combinados (normalizados) representados entre 0.01 y 0.5 MHz, con mascara de ancho 30 kHz, de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 20° en (a) placa de GRC M1 sin envejecer; (b) placa de GRC M1 envejecida; (c) placa de GRC M3 sin envejecer; (d) placa de GRC M3 envejecida.

- No se observan grandes diferencias entre los espectrogramas combinados (normalizados) de las cuñas de 20° en placas de GRC antes de envejecer y después de envejecer entre 0.01 y 0.5 MHz.
- Destacar la pérdida de nivel de señal del modo A_1 (marcada con un círculo rojo) en la Figura 166 (b) respecto a la Figura 166 (a).

En la Figura 167, se han representado los mismos espectrogramas normalizados entre 0.5 y 1 MHz.

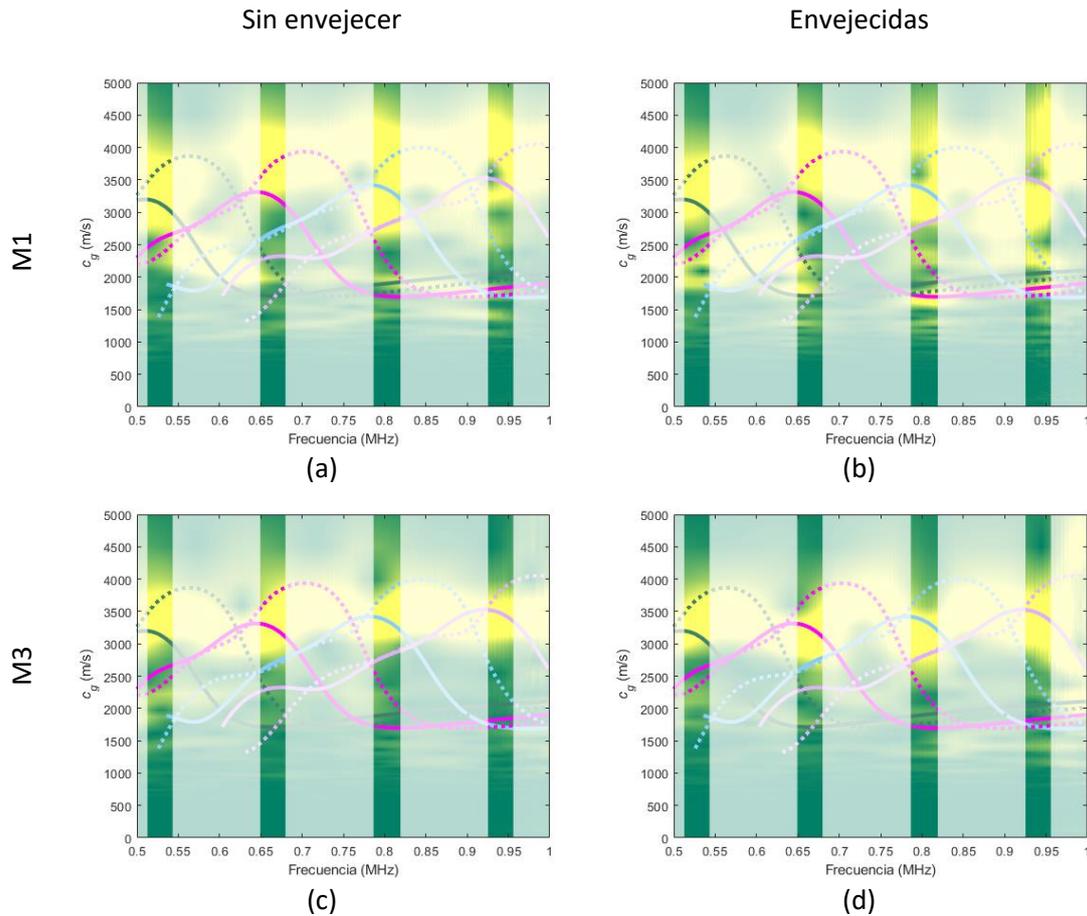


Figura 167. Espectrogramas combinados (normalizados) representados entre 0.5 y 1 MHz, con máscara de ancho 30 kHz, de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 20° en (a) placa de GRC M1 sin envejecer; (b) placa de GRC M1 envejecida; (c) placa de GRC M3 sin envejecer; (d) placa de GRC M3 envejecida.

Nuevamente, no se observan grandes diferencias entre los espectrogramas antes de envejecer y después de envejecer entre 0.5 y 1 MHz.

Con el fin de valorar correctamente la posible pérdida de señal, en la Figura 168, se han representado los espectrogramas combinados, pero en este caso sin normalizar. En esta ocasión, no se aplicó la máscara de los modos. Entre el estado sin envejecer y envejecido se mantiene el mismo rango dinámico para apreciar las diferencias.

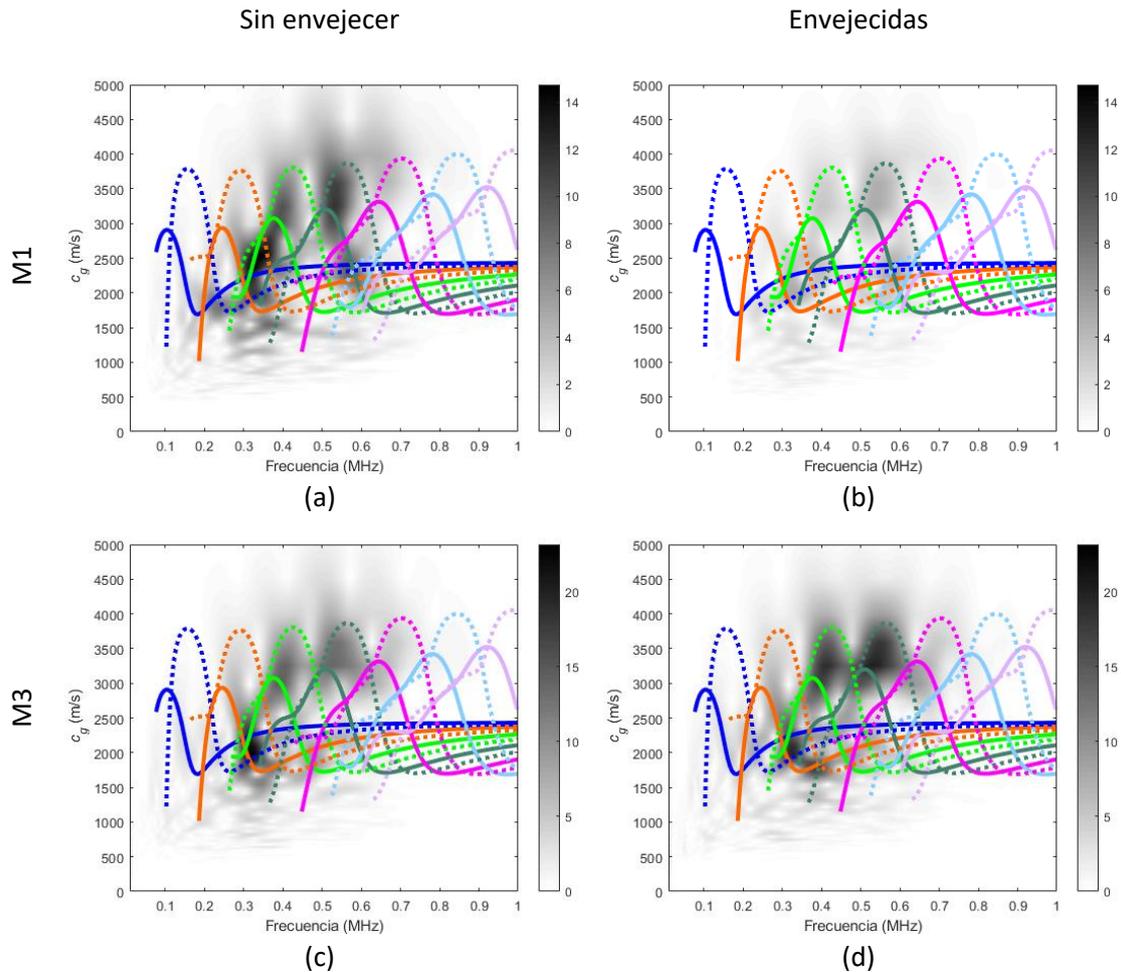


Figura 168. Espectrogramas combinados no normalizados de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 20° en (a) placa de GRC M1 sin envejecer; (b) placa de GRC M1 envejecida; (c) placa de GRC M3 sin envejecer; (d) placa de GRC M3 envejecida.

- Se aprecia una reducción del nivel de señal entre los espectrogramas combinados no normalizados de las placas sin envejecer frente a las envejecidas. Esta reducción de señal producto del envejecimiento es más notable en la placa M1.
- Destacar el caso de la placa M3, donde antes del envejecimiento (Figura 168 (c)) el máximo del nivel de señal se localiza alrededor de 0.3 MHz, mientras que después del envejecimiento (Figura 168 (d)) dicho máximo se encuentra en 0.4 y 0.55 MHz, mostrando unas buenas correspondencias con los modos simétricos S_3 y S_4 .

Este aspecto de pérdida de señal también coincide al comparar las SSC *sin* normalizar antes y después del envejecimiento (Figura 169) donde, al igual que ocurría con los espectrogramas, la placa M1 aparece con un nivel de señal menor que la placa M3, aspecto que debe corroborarse con el nivel de envejecimiento alcanzado.

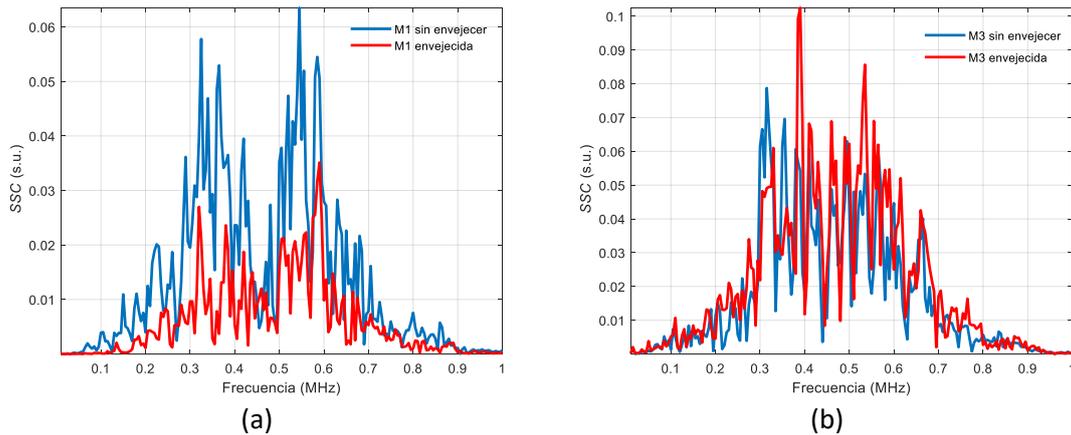


Figura 169. SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 20° en (a) Placa de GRC M1 sin envejecer y envejecida; (b) Placa de GRC M3 sin envejecer y envejecida.

- La SSC roja de la placa M1 (M1 envejecida) ha sufrido una atenuación notable respecto a la SSC azul (M1 sin envejecer) en todo el rango frecuencial.
- La SSC roja (M3 envejecida) y la SSC azul (M3 sin envejecer) de la placa M3 son muy similares, incluso la SSC roja presenta mayor señal en algunas frecuencias, como en 0.39 MHz y 0.54 MHz.

5.2.3.2. Resultados con cuñas de 40°

En el caso de cuña de 40° , no es necesario representar los espectrogramas en dos partes, ya que únicamente se espera excitar como máximo los dos modos fundamentales A_0 y S_0 , por lo que se van a representar de 0.01 a 0.3 MHz. De nuevo, no se han incluido las SSC debido a que no son necesarias al utilizar la máscara de ancho 30 kHz y al haber una única intersección entre el ángulo excitado y las curvas de ángulos.

En la Figura 170, se han representado los espectrogramas combinados con la cuña de 40° para las placas M1 y M3 antes y después de envejecer.

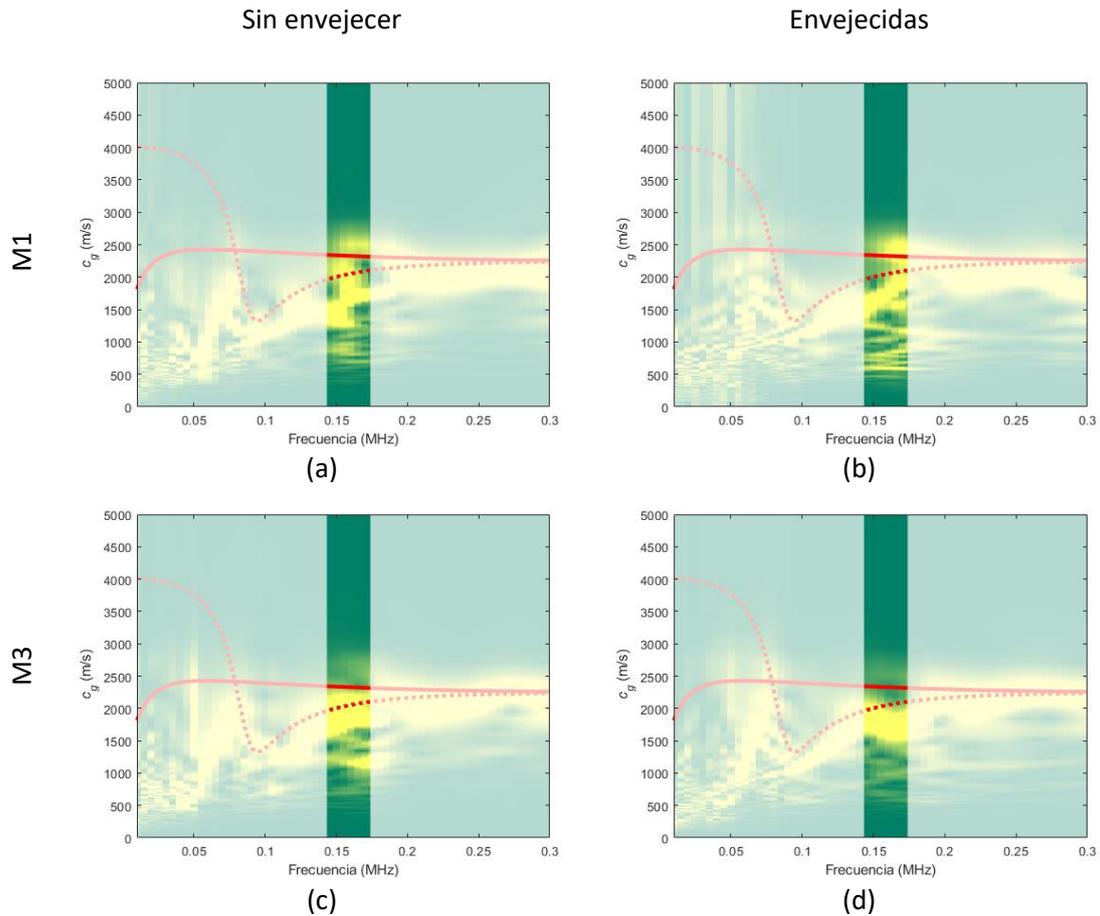


Figura 170. Espectrogramas combinados (normalizados) representados entre 0.01 y 0.3 MHz, con máscara de ancho 30 kHz, de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en (a) placa de GRC M1 sin envejecer; (b) placa de GRC M1 envejecida; (c) placa de GRC M3 sin envejecer; (d) placa de GRC M3 envejecida.

Nuevamente, no se observan grandes diferencias entre los espectrogramas combinados (normalizados) de las cuñas de 40° en placas de GRC antes de envejecer y después de envejecer entre 0.01 y 0.3 MHz, aspecto que es coherente con las cuñas de 20° y con las velocidades P y S medidas.

Al igual que se ha hecho en el caso anterior, en la Figura 171, se han representado los espectrogramas combinados sin normalizar de velocidad de grupo y tampoco se ha considerado necesarias ni la máscara ni las SSC.

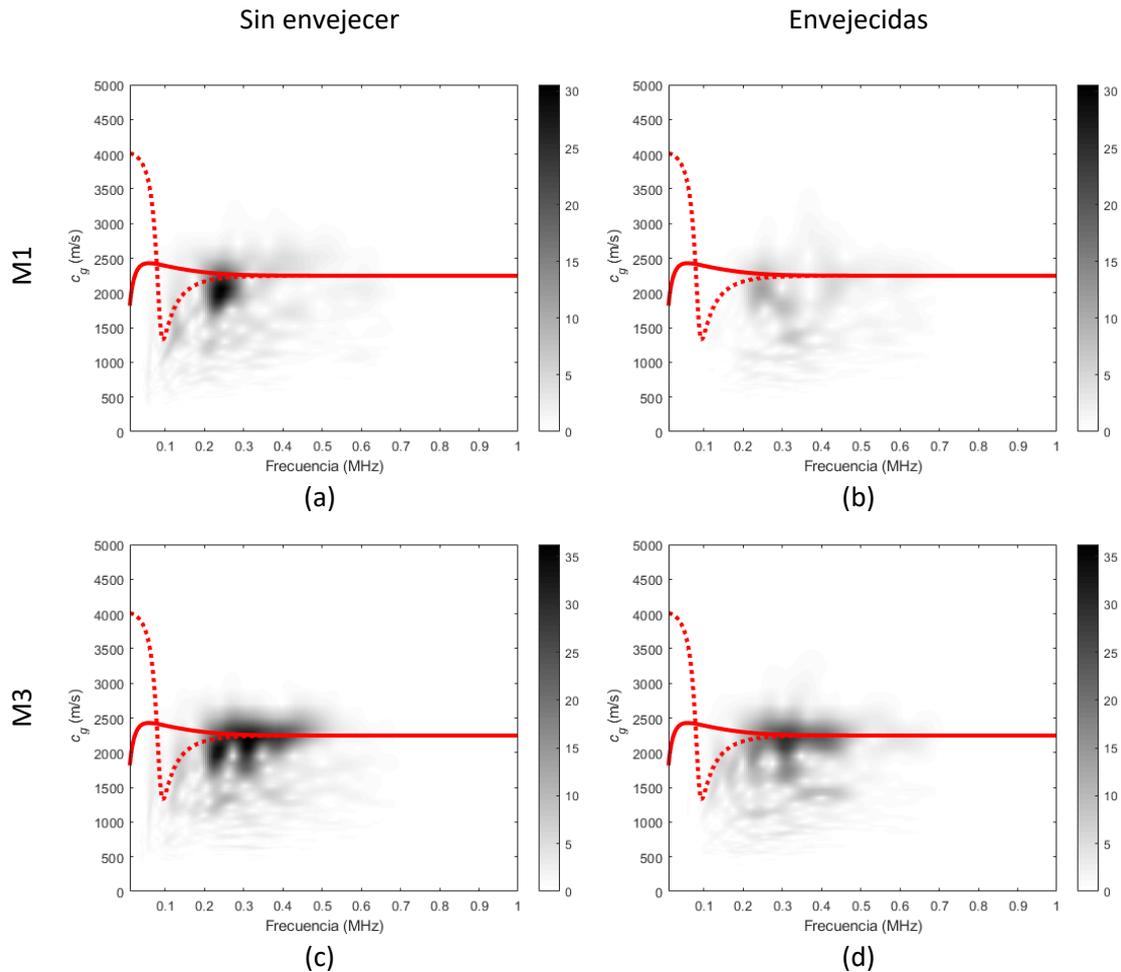


Figura 171. Espectrogramas combinados no normalizados de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en (a) placa de GRC M1 sin envejecer; (b) placa de GRC M1 envejecida; (c) placa de GRC M3 sin envejecer; (d) placa de GRC M3 envejecida.

Al igual que en la Figura 168, se aprecia una reducción de las amplitudes registradas algo más acusado para la probeta M1 y no tan acusado para la probeta M3. Se mantiene la tendencia con respecto a los resultados de las cuñas de 20°.

Comparando las SSC sin normalizar esta tendencia de pérdida de señal también se manifiesta de forma más acusada para M1 y menos para M3 (Figura 172).

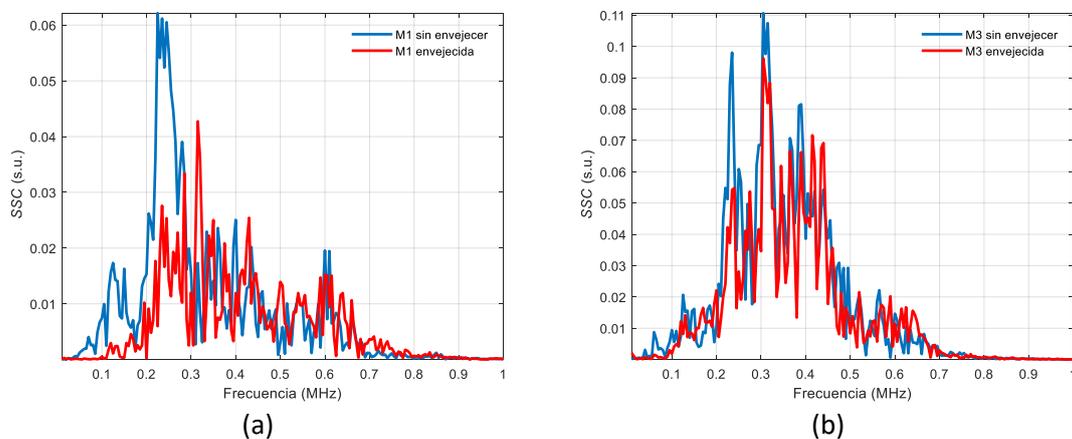


Figura 172. SSC de la técnica de acoplamiento por agua mediante cuñas de 40° en (a) Placa de GRC M1 sin envejecer y envejecida; (b) Placa de GRC M3 sin envejecer y envejecida.

- En la placa de GRC M1, la SSC roja (M1 envejecida) presenta mayor atenuación (en comparación a la SSC azul (M1 sin envejecer) alrededor de las bandas frecuenciales de 0.15 y 0.25 MHz.
- La SSC roja de la placa M3 se ha atenuado notablemente en la frecuencia de 0.24 MHz.

Finalmente, en la Tabla 28 se encuentra un resumen de los parámetros de interés del montaje experimental de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 20° y 40° en las placas de GRC.

Tabla 28. Resumen de parámetros del montaje de acoplamiento localizado por agua mediante cuñas de 20° y 40° en las placas de GRC.

Parámetros de la placa	
Material	GRC
Espesor	20 mm
Parámetros geométricos	
Ángulo en transmisión, θ	40°
Ángulo en recepción, θ	40°
Distancia TXOR-placa, d_{c1}	17.7 mm
Distancia RXOR-placa, d_{c2}	17.7 mm
Distancia de propagación por la placa, d	174.5 mm
Parámetros del equipamiento	
Frecuencia inicial	10 kHz
Frecuencia final	1 MHz
Incremento frecuencial	5 kHz
Número de frecuencias	199
Frecuencia de muestreo, f_s	10 MHz
Número de muestras	20000
Intervalo temporal	2 ms
Número de ciclos, N_c	5
Amplitud, V_p	12 V
Promediado	16
Amplificación en transmisión (equipamiento)	-
Amplificación en recepción (equipamiento)	40 dB (5660C)
Generador de funciones	Handyscope HS5
Osciloscopio	Handyscope HS5
Transductores (frecuencia central, f_c)	K0,5SC (0,5 MHz)
Acoplante (velocidad si procede)	Agua (1490 m/s)
Parámetros del postprocesado	
Ventana de espectrograma	20 μ s
Porcentaje de solape entre ventanas	75 %
Número de puntos de las FT de cada ventana	2 ¹⁴
Muestras eliminadas por acoplamiento eléctrico (principio)	0
Muestras eliminadas por otras causas (final)	0
Rango frecuencial que marca la SSC	0.07-0.67 MHz

5.3. Conclusiones

En este capítulo se han realizado medidas sobre probetas más cercanas a la aplicación real y se ha demostrado el potencial de las ondas guiadas para tratar de evaluar materiales cementicios. Concretamente se ha realizado una campaña de medidas muy exhaustiva con el fin de validar este tipo de ondas en dos casos concretos.

Como primer caso, se ha tratado de estimar la profundidad del proceso de carbonatación. Para esto, se han empleado diferentes técnicas de acoplamiento (cuñas de agua y acoplamiento por aire) junto con probetas controladas que simulan dicho proceso (probetas bicapa) y probetas carbonatadas reales. Destacar que, para este caso, se ha trabajado en el rango de las ondas de Rayleigh considerando un modelo de una capa sobre un semi-espacio infinito, donde las ondas de Rayleigh presentan un comportamiento dispersivo y sus velocidades se pueden representar como curvas de dispersión.

- En el nivel de señal de los espectrogramas combinados han aparecido discontinuidades que se correlacionan con el espesor de la capa asociada al proceso de carbonatación (mortero gris de la capa superior).
- También se ha observado una discontinuidad en el espectrograma combinado de una probeta carbonatada que se ha inspeccionado, la cual está localizada en los rangos de espesor calculados.

Como segundo caso aplicado, se ha trabajado en la pérdida de resistencia a flexión que sufren los materiales *GRC* con el paso del tiempo (envejecimiento). Los materiales *GRC* sí que presentan una estructura más laminar lo que ha permitido trabajar en el rango de las ondas de Lamb. Para este caso, se ha generado un proceso de envejecimiento acelerado mediante baño caliente.

- Las ondas de Lamb no se han mostrado especialmente sensibles a dicho proceso en cuanto al cambio de los modos de propagación.
- Se han observado algunas diferencias entre las placas antes y después del proceso de envejecimiento, como la reducción del nivel de señal de los espectrogramas combinados sin normalizar y cambios en las *SSC*.

A modo de resumen, en la Tabla 29 se incluyen los cambios observados en los procesados de las señales obtenidas en las medidas experimentales de las dos aplicaciones prácticas.

Tabla 29. Cambios observados en los procesados de las aplicaciones prácticas.

	Carbonatación					Envejecimiento fibras GRC	
	Bicapa			Sin carbonatar	Carbonatada	Envejecidas	
	5 mm mortero gris	10 mm mortero gris	20 mm mortero gris			M1	M3
Cuñas de agua de 20°						Atenuación notable	Ligera atenuación
Cuñas de agua de 40°	Discontinuidad (Disc.) en 0.55 MHz	-	Disc. en 0.14 MHz	-	Disc. entre 0.11 y 0.22 MHz	Atenuación notable	Ligera atenuación
Transductores acoplados por aire		Disc. en 0.27 MHz	-				

6. Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas después de la investigación realizada en la tesis y las posibles líneas de investigación futuras que pueden surgir a raíz de los resultados obtenidos.

6.1. Conclusiones

De los resultados obtenidos en la tesis doctoral, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Este trabajo se ha centrado en la utilización de las ondas guiadas para la caracterización de materiales. Uno de los aspectos a destacar de este tipo de ondas es su naturaleza dispersiva y multimodal que las diferencian de las ondas P y S. A este respecto, se puede indicar que la generación y detección es más compleja que una simple incidencia normal, pues es necesario tener control tanto de la frecuencia como del ángulo con el que se excitan, los cuales están interrelacionados y dependen también del material, sus dimensiones y sus parámetros ultrasónicos. Concretamente, la excitación y detección de ondas de Lamb resulta más sencilla en materiales homogéneos de un espesor reducido que en materiales heterogéneos de un gran espesor.

Por ello y para tener éxito en la generación y detección de las ondas de Lamb es fundamental tener control sobre el ángulo de incidencia, el cual se obtiene a partir de las curvas de dispersión teóricas y del medio acoplante. Es importante tener presente la apertura angular de los transductores, ya que este hecho implica que no se excita un único ángulo, sino un rango. La apertura angular junto con el barrido frecuencial del transductor, es lo que ha permitido la composición y seguimiento de los diferentes modos que se pretenden generar. Otros aspectos primordiales a tener en cuenta son las distancias involucradas en los montajes y la combinación de los espectrogramas para obtener las curvas de dispersión experimentales, las cuales se ha comprobado que se superponen de forma correcta a las curvas de dispersión teóricas de velocidad de grupo. Esto ha permitido verificar la correcta excitación de los modos buscados de las ondas de Lamb.

Destacar que, debido a que las ondas guiadas son multimodales, ha resultado interesante tratar de generar y recibir los dos modos fundamentales de Lamb, A_0 y S_0 , debido a que en bajas frecuencias son los únicos que existen, permitiendo una mejor interpretación de las señales recibidas. El hecho de aumentar en frecuencia implica la generación de un mayor número de modos y por tanto ha supuesto el desarrollo de técnicas que permitan identificarlos y seguirlos. Para ello, es de especial utilidad las curvas de sensibilidad del sistema (SSC), las cuales permiten identificar las frecuencias con una correcta relación señal-a-ruido y resaltar dichas zonas de los espectrogramas combinados. La combinación de las dos técnicas de procesado de señal aplicadas en esta tesis, el espectrograma combinado y las SSC, han demostrado su utilidad en los END mediante ondas guiadas ultrasónicas.

Dentro de las diferentes técnicas para incidir de forma oblicua, remarcar que, en función del material y el modo buscado, hay algunas más adecuadas que otras. Centrándonos en los modos A_0 y S_0 se puede decir lo siguiente:

- El acoplamiento por aire es idóneo pues permite emitir y detectar sin contacto físico con la pieza, facilitando el ajuste del ángulo de incidencia. Se ha demostrado que el

acoplamiento por aire es el indicado para excitar y detectar el modo A_0 y no así el modo S_0 , debido a que éste presenta una baja emisividad hacia el aire.

- El acoplamiento por agua es uno de los métodos que más sensibilidad ofrecen y, a diferencia de lo que ocurre con el acoplamiento por aire, se recomienda como primera opción para excitar y detectar el modo S_0 . Respecto al modo A_0 , también se ha demostrado que es viable excitarlo y detectarlo.
Dentro del acoplamiento con agua, se ha comprobado que la inmersión completa del elemento a ensayar no es apropiada debido a las grandes pérdidas por las *leaky* Lamb waves (*LLW*) y a las múltiples reflexiones que se producen en las fronteras del agua. El acoplamiento mediante cuñas de agua fija se ha mostrado como el método más estable y repetible, aunque presenta la limitación de excitar a un ángulo fijo junto con la complejidad de garantizar la estanqueidad de las cuñas.
- Por último, el acoplamiento directo por cuñas sólidas de plexiglás también ha demostrado ser un método estable y viable para excitar el modo S_0 siempre y cuando la velocidad de onda P del medio acoplante sea mucho menor que las velocidades de onda P y S de la placa a inspeccionar (o que las velocidades de onda P y S de la placa a inspeccionar sean mucho más grandes que la velocidad de onda P del medio acoplante). Este aspecto junto a otros relacionados con el ancho de banda ha limitado la utilización de este método para los materiales cementicios. No se recomienda dicho acoplamiento para el modo A_0 al requerir unos ángulos de incidencia muy altos.

Dentro de la gran cantidad de medidas que se han realizado, se puede concluir que la técnica de acoplamiento por cuñas de agua ha sido la técnica más versátil para la inspección de los diferentes materiales cementicios, junto con una repetibilidad y estabilidad de las medidas muy elevadas.

Centrándonos en la parte de materiales y aplicación, se ha demostrado que las ondas guiadas son sensibles a dos procesos de degradación en los materiales cementicios estudiados: la carbonatación mediante ondas de Rayleigh dispersivas y el envejecimiento de fibras en placas de GRC mediante ondas de Lamb.

- El proceso de carbonatación es un proceso químico que se produce desde el exterior del material hacia el interior, es decir, es un daño por gradiente que provoca que la frontera entre la zona carbonatada y no carbonatada no siempre esté bien definida. Es por ello que en esta tesis se ha trabajado con probetas bicapas que simulan de forma controlada dicho fenómeno. Las curvas dispersivas teóricas de ondas de Rayleigh (modelo capa-semi-espacio) sobre las diferentes probetas bicapa han ofrecido buenas correspondencias con los espectrogramas combinados, pero no se ha conseguido una medida cuantitativa del espesor asociado a la capa de carbonatación.
Este comportamiento de las ondas guiadas también ha quedado patente en el caso de las probetas sometidas a carbonatación real y acelerada, pero tampoco se ha podido establecer una medida cualitativa que relacione directamente las alteraciones de las ondas de Rayleigh y el espesor de la carbonatación.
El hecho de que las ondas de Rayleigh alteren su comportamiento ante diferentes espesores de carbonatación, es un indicativo de la viabilidad de este tipo de ondas para, al menos, detectar este tipo de daño.

- En cuanto al envejecimiento de fibras y a diferencia de la aplicación de carbonatación, los espectrogramas no han mostrados cambios en cuanto a los modos detectados, pero sí a los rangos dinámicos. En términos generales, los espectrogramas combinados no normalizados han mostrado una clara reducción del nivel de señal después del proceso de envejecimiento acelerado. Este aspecto también se ha corroborado con las SSC. Hay que tener en cuenta que el proceso de deterioro aplicado (baño caliente) ha afectado básicamente a la tenacidad de las fibras con el cemento, pero no a la matriz. Es por ello, que las medidas obtenidas reflejan una atenuación asociada al cambio de impedancias de la interfaz matriz-fibra, pero no se traduce en un cambio de velocidades, las cuales están asociadas fundamentalmente a la matriz cementicia.

Con todo esto, podemos concluir que las ondas guiadas requieren de un conocimiento de la teoría subyacente y del material a inspeccionar, así como de las diferentes tecnologías para ser capaces de generar y detectar los diferentes modos mediante incidencia oblicua. A pesar de que trabajar con este tipo de ondas no es algo trivial, en este trabajo ha quedado demostrado su aplicabilidad en un material tan complejo como es el cemento, donde se ha visto su sensibilidad ante diferentes tipos de daño.

6.2. Líneas futuras

Las posibles líneas futuras en las que debe derivar la investigación realizada en la presente tesis doctoral son:

- A pesar de que las ondas de Rayleigh han mostrado su sensibilidad ante los diferentes niveles de carbonatación, ha quedado pendiente obtener una medida cuantitativa que relacione el espesor de la carbonatación con la alteración de las curvas de dispersión. Es por ello, que una de las opciones a explorar es la investigación de alternativas de acoplamiento que permitan, además de un barrido frecuencial, un barrido angular con el fin de poder ampliar la zona de los modos dispersivos y que permitan una correlación con el espesor de la capa. A este respecto, y obteniendo unas curvas de dispersión más amplias, también se plantea el desarrollo de un procesado para adaptar automáticamente y mediante correlación las curvas de dispersión experimentales y teóricas.
- Por otro lado, y en cuanto al nivel de daño del GRC, las señales inyectadas no son capaces de hacer trabajar la probeta fuera del régimen lineal, es por ello que, como posible línea de investigación, se plantea la técnica de impacto-eco junto con una captación multisensor. La técnica de impacto-eco sí que hace oscilar la probeta en su totalidad y se espera que aparezca una desviación en los modos detectados al salirse de su régimen lineal de oscilación
- En cuanto a la parte experimental, existen varias líneas a explorar, como puede ser mejorar la técnica de cuñas de agua, adaptar las técnicas para poder generar y recibir ondas de Lamb verticalmente, investigar otras alternativas de acoplamiento, y equipamiento de transmisión/recepción o configuraciones híbridas (diferente equipamiento/técnica de acoplamiento en transmisión y recepción) para la generación y recepción. En recepción, el uso de un interferómetro láser o un transductor acoplado por aire permitiría realizar un escaneado espacial automático y ágil en la estructura sin necesidad de un contacto directo.

- Evidentemente, la realización de más medidas experimentales en un mayor número de probetas cementicias de igual o distinta composición, de una y dos capas siempre resultará interesante.
- Investigar otras técnicas de procesamiento de señal sobre ondas guiadas, como la transformada *wavelet* o la transformada *chirplet* o realizar procedimientos que mejoren la generación o detección de ondas guiadas, como el uso de diferentes tipos de eventanamiento de señales transmitidas o recibidas.
- Estudiar otros parámetros y métodos no lineales a partir de ondas guiadas, como la generación de armónicos de orden superior o subarmónicos que permitan aumentar la sensibilidad a los cambios o daños producidos en la microestructura de materiales cementicios, como micro-fisuras, carbonatación o daño térmico.

6.3. Agradecimientos institucionales

La investigación realizada en esta tesis se ha financiado con las siguientes ayudas y proyectos concedidos por el gobierno español:

- Ayudas para contratos predoctorales para la formación de doctores 2015 (BES-2015-071958).
- Nuevas aplicaciones de ensayos no destructivos basados en ondas mecánicas para la evaluación de la degradación en materiales cementantes (BIA2014-55311-C2-2-P).
- Desarrollo y aplicación de ensayos no destructivos basados en ondas mecánicas para la evaluación y monitorización de reología y autosanación en materiales cementantes (BIA2017-87573-C2).

Bibliografía

- ¿Qué son los END? (n.d.). Retrieved January 2, 2020, from <https://www.aend.org/ensayos.php>
- Abraham, O., Piwakowski, B., Villain, G., & Durand, O. (2012). Non-contact, automated surface wave measurements for the mechanical characterisation of concrete. *Construction and Building Materials*, 37, 904–915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.03.015>
- Aggelis, D. G., Kordatos, E. Z., Soulioti, D. V., & Matikas, T. E. (2010). Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. *Construction and Building Materials*, 24(10), 1888–1897. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.014>
- Aggelis, Dimitrios G., Momoki, S., & Chai, H. (2009). Surface wave dispersion in large concrete structures. *NDT & E International*, 42(4), 304–307. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.12.004>
- Ahmad, A., & Bond, L. (Eds.). (2018). *ASM Handbook: Nondestructive Evaluation of Materials* (Vol. 17). ASM International.
- Aldaood, A., Bouasker, M., & Al-Mukhtar, M. (2014). Impact of wetting-drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils. *Engineering Geology*, 174, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.002>
- Alleyne, D., & Cawley, P. (1992a). The Interaction of Lamb Waves with Defects. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 39(3), 381–397. <https://doi.org/10.1109/58.143172>
- Alleyne, D N, & Cawley, P. (1996). The Excitation of Lamb Waves in Pipes Using Dry-Coupled Piezoelectric Transducers. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 15(1), 11–20. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBF00733822.pdf>
- Alleyne, David, & Cawley, P. (1992b). Optimization of Lamb wave inspection techniques. *NDT & E International*, 25(1), 11–22. [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(92\)90003-Y](https://doi.org/10.1016/0963-8695(92)90003-Y)
- Alleyne, David N. (1991). *The nondestructive testing of plates using ultrasonic Lamb waves* [Imperial College London]. <https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/7312/1/Alleyne-DN-1992-PhD-Thesis.pdf>
- Alleyne, David N., & Cawley, P. (1991). A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89(3), 1159–1168. <https://doi.org/10.1121/1.400530>
- Ambrozinski, L., Piwakowski, B., Stepinski, T., & Pieczonka, L. (2014). Pitch-Catch Air-Coupled Ultrasonic Technique for Detection of Barely Visible Impact Damages in Composite Laminates. 7th European Workshop on Structural Health Monitoring.
- Antón, R. (2016). Estudio microestructural de pasta de cemento expuestas a medios simulados de agresividad moderada frecuentes en ambientes rurales. Universidad Politécnica de Madrid.

- Aranguren, G., Etxaniz, J., Cantero-Chinchilla, S., Gil-Garcia, J. M., & Malik, M. K. (2020). Ultrasonic guided wave testing on cross-ply composite laminate: An empirical study. *Sensors (Switzerland)*, 20(18), 1–18. <https://doi.org/10.3390/s20185291>
- Arizzi, A., Martínez-Martínez, J., & Cultrone, G. (2013). Ultrasonic wave propagation through lime mortars: An alternative and non-destructive tool for textural characterization. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 46(8), 1321–1335. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9976-1>
- Baid, H., Schaal, C., Samajder, H., & Mal, A. (2015). Dispersion of Lamb waves in a honeycomb composite sandwich panel. *Ultrasonics*, 56, 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.09.007>
- Balasubramaniam, K., & Rose, J. L. (1991). Physically Based Dispersion Curve Feature Analysis in the NDE of Composites. *Research in Nondestructive Evaluation*, 3, 41–67. <https://doi.org/10.1080/09349849109409501>
- Bar-Cohen, Y., & Lih, S.-S. (2001). NDE of Composites Using Leaky Lamb Waves (LLW). *NDT.Net*, 6(2).
- Beddoe, R. E., & Dorner, H. W. (2005). Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 35(12), 2333–2339. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.04.002>
- Benz, R., Niethammer, M., Hurlebaus, S., & Jacobs, L. J. (2003). Localization of notches with Lamb waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(2), 677–685. <https://doi.org/10.1121/1.1593058>
- Bezdek, M, Joseph, K., & Tittmann, B. R. (2012). Low Attenuation Waveguide for Structural Health Monitoring with Leaky Surface Waves. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 32(3), 241–262.
- Bezdek, Michal, Tittmann, B. R., & Joseph, K. L. (2006). Fluid-Coupled Waveguide for Leaky Guided Waves. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1169–1172. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2006.300>
- Birgani, P. T., Tahan, K. N., Sodagar, S., & Shishesaz, M. (2015). Theoretical modeling of low-attenuation lamb wave modes generation in three-layer adhesive joints using angle beam transducer. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12(3), 461–476. <https://doi.org/10.1590/1679-78251143>
- Birgül, R. (2009). Hilbert transformation of waveforms to determine shear wave velocity in concrete. *Cement and Concrete Research*, 39(8), 696–700. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.003>
- Bouchaala, F., Payan, C., Garnier, V., & Balayssac, J. P. (2011). Carbonation assessment in concrete by nonlinear ultrasound. *Cement and Concrete Research*, 41(5), 557–559. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.02.006>
- Boyd, A. J., Birgisson, B., Ferraro, C., & Cumming, S. (2005). Nondestructive Testing for Advanced Monitoring and Evaluation of Damage in Concrete Materials. http://www.fdot.gov/research/completed_proj/summary_smo/fdot_bc354_57_rpt.pdf

- Briers, R., Leroy, O., & Shkerdin, G. (1997). A liquid wedge as generating technique for Lamb and Rayleigh waves. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4), 2117–2124. <https://doi.org/10.1002/jez.1401170105>
- Briers, R., Leroy, O., Shkerdin, G. N., & Gulyaev, Y. V. (1994). Mode theory as a framework for the investigation of the generation of a Stoneley wave at a liquid–solid interface. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 95(4), 1953–1966. <https://doi.org/10.1121/1.408709>
- C. Rubio, & O. Marrero. (2010). Fabricación de Transductores Ultrasónicos para Equipos automatizados de inspección de líneas de Tuberías. *E-Journal of Nondestructive Testing (NDT)*, 2010–09. http://www.ndt.net/article/ndtnet/2010/11_Marrero.pdf
- Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H). (n.d.). Retrieved November 1, 2020, from <https://cshub.mit.edu/concrete-science/CSH>
- Cánoves, J. (2012). Evolución De La Resistencia Del Hormigón De Obra. Métodos De Predicción a Partir De Los Ensayos De Control De La Conformidad Del Hormigón [Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30171/tesisUPV4023.pdf?sequence=1>
- Carrión, A., Genovés, V., Gosálbez, J., Miralles, R., & Payá, J. (2017). Ultrasonic signal modality: A novel approach for concrete damage evaluation. *Cement and Concrete Research*, 101, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.011>
- Carrión, A., Genovés, V., Pérez, G., Payá, J., & Gosálbez, J. (2018). Flipped Accumulative Non-Linear Single Impact Resonance Acoustic Spectroscopy (FANSIRAS): A novel feature extraction algorithm for global damage assessment. *Journal of Sound and Vibration*, 432, 454–469. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.06.031>
- Castaigns, M., & Cawley, P. (1996). The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(5), 3070–3077. <https://doi.org/10.1121/1.417193>
- Castaigns, M., & Hosten, B. (2001). Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates. *NDT and E International*, 34(4), 249–258. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00065-7)
- Cawley, P., & Alleyne, D. (1996). The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures. *Ultrasonics*, 34(2–5), 287–290. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(96\)00024-8](https://doi.org/10.1016/0041-624X(96)00024-8)
- Cazalla, O., Sebastián, E., Cultrone, G., Nechar, M., & Bagur, M. G. (1999). Three-way ANOVA interaction analysis and ultrasonic testing to evaluate air lime mortars used in cultural heritage conservation projects. *Cement and Concrete Research*, 29(11), 1749–1752. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00158-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00158-1)
- Cement & Concrete Basics FAQs. (n.d.). Retrieved October 26, 2020, from <https://www.cement.org/cement-concrete-applications/cement-and-concrete-basics-faqs>
- Chan, C. M. (2010). Bender element test in soil specimens: Identifying the shear wave arrival time. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 1263–1276.

- Chaston, A. M., Edwards, C., Evans, S. L., & Holford, K. M. (2008). Shear wave ultrasonic coupling performance of different adhesives. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 50(11), 633–636. <https://doi.org/10.1784/insi.2008.50.11.633>
- Chen, J., Su, Z., & Cheng, L. (2010). Identification of corrosion damage in submerged structures using fundamental anti-symmetric Lamb waves. *Smart Materials and Structures*, 19(1). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/1/015004>
- Chen, M. C., Wang, K., & Xie, L. (2013). Deterioration mechanism of cementitious materials under acid rain attack. *Engineering Failure Analysis*, 27, 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.08.007>
- Cheng, C. C., Ke, Y. T., & Hsu, K. T. (2012). Using lamb waves to evaluate debonding of steel plate strengthened concrete. *Materials Transactions*, 53(2), 274–278. <https://doi.org/10.2320/matertrans.l-M2011841>
- Cho, Y. S., & Lin, F. B. (2001). Spectral analysis of surface wave response of multi-layer thin cement mortar slab structures with finite thickness. *NDT and E International*, 34(2), 115–122. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00036-0)
- Cicero, T. (2009). *Signal Processing for Guided Wave Structural Health Monitoring* [Imperial College London]. <https://spiral.imperial.ac.uk/handle/10044/1/5302>
- Clayton, D., Smith, C., Ferraro, C. C., Nelson, J., Khazanovich, L., Hoegh, K., Chintakunta, S., Popovics, J., Choi, H., & Ham, S. (2013). Evaluation of Ultrasonic Techniques on Concrete Structures. <https://www.osti.gov/scitech>
- Colombo, M., & Felicetti, R. (2007). New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures. *Fire Safety Journal*, 42(6–7), 461–472. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.09.002>
- Compressive Test. (n.d.). Retrieved November 6, 2020, from <https://www.instron.us/en-us/our-company/library/test-types/compression-test>
- Deán, J. L., Trillo, C., López-Vázquez, J. C., Doval, Á. F., & Fernández, J. L. (2009). Determination of the frequency spectrum of Lamb waves from a sequence of maps of the instantaneous acoustic displacement obtained with TV holography. 7389, 738910-738910 – 11. <https://doi.org/10.1117/12.827675>
- Declercq, N. F., Briers, R., Leroy, O., Degrieck, J., & Shkerdin, G. N. (2005). The Radiation Mode Theory in Ultrasonics. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 52(5), 802–808. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2005.1503965>
- Definición de pasta de cemento y conceptos relacionados. (n.d.). Retrieved February 2, 2020, from <https://www.parro.com.ar/definicion-de-pasta+de+cemento>
- Dehestani, A., Hosseini, M., & Taleb Beydokhti, A. (2020). Effect of wetting–drying cycles on mode I and mode II fracture toughness of cement mortar and concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 106(December 2019), 102448. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102448>
- Delrue, S., Van Den Abeele, K., Blomme, E., Deveugele, J., Lust, P., & Matar, O. B. (2010). Two-dimensional simulation of the single-sided air-coupled ultrasonic pitch-catch technique

- for non-destructive testing. *Ultrasonics*, 50(2), 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2009.08.005>
- Destructive Testing. (n.d.). Retrieved January 10, 2019, from <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/destructive-testing>
- Edalati, K., Kermani, A., Naderi, B., & Panahi, B. (2005). Defects Evaluation in Lamb Wave Testing of Thin Plates. 3rd MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.151.7276&rep=rep1&type=pdf>
- Eiras, J. N., Amjad, U., Mahmoudabadi, E., Payá, J., Bonilla, M., & Kundu, T. (2013a). Monitoring ageing of alkali resistant glass fiber reinforced cement (GRC) using guided ultrasonic waves. *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2013*, 8695, 1–7. <https://doi.org/10.1117/12.2008984>
- Eiras, J., Kundu, T., Bonilla, M., & Payá, J. (2013b). Nondestructive monitoring of ageing of alkali resistant glass fiber reinforced cement (GRC). *Journal of Nondestructive Evaluation*, 32(3), 300–314. <https://doi.org/10.1007/s10921-013-0183-y>
- Eiras, Jesus N, Kundu, T., Popovics, J. S., Monzó, J., Borrachero, M. V, & Payá, J. (2016). Effect of carbonation on the linear and nonlinear dynamic properties of cement-based materials. *Optical Engineering*, 55(1). <https://doi.org/10.1117/1.OE.55.1.011004>
- Enfedaque, A., Sánchez, L., & Sánchez-Gálvez, V. (2010). El efecto del humo de sílice y el metacaolín en el proceso de envejecimiento de los morteros de cemento reforzados con fibras de vidrio (GRC). *Materiales de Construcción*, 60(300), 67–82. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.52009>
- Ensayos del Hormigón. (n.d.). Retrieved November 7, 2020, from https://www.construmatica.com/construpedia/Ensayos_del_Hormigón
- Ervin, B. L., Kuchma, D. A., Bernhard, J. T., & Reis, H. (2009). Monitoring Corrosion of Rebar Embedded in Mortar Using High-Frequency Guided Ultrasonic Waves. *Engineering Mechanics*, 135(1), 9–19. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-9399200913519>
- Fan, Z., Jiang, W., Cai, M., & Wright, W. M. D. (2016). The effects of air gap reflections during air-coupled leaky Lamb wave inspection of thin plates. *Ultrasonics*, 65, 282–295. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.09.013>
- Fan, Z., Jiang, W., & Wright, W. M. D. (2018). Non-contact ultrasonic gas flow metering using air-coupled leaky Lamb waves. *Ultrasonics*, 89, 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.04.008>
- Galán, J. M., & Abascal, R. (2000). Ondas de Lamb en placas sandwich. Una formulación de elementos finitos. *Acústica*. http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones_4335cg002.pdf
- Gallardo, C., Gosálbez, J., Vázquez, S., & Carrión, A. (2019). Comparativa de algoritmos de reconstrucción tomográfica aplicados a ultrasonidos. Congreso Asociación Española de Ensayos No Destructivos.
- García, N. (2009). Correlaciones Entre Ensayos Destructivos Y No Destructivos Para Hormigones De Alta Resistencia Con Agregados Calcáreos. *Revista Tecnológica ESPOL*.

<https://docplayer.es/54829005-Correlaciones-entre-ensayos-destruictivos-y-no-destruictivos-para-hormigones-de-alta-resistencia-con-agregados-calcareos.html>

- Gardner, M. D., Rose, J. L., Koudela, K. L., & Moose, C. A. (2013). Inspectability of interfaces between composite and metallic layers using ultrasonic interface waves. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 19. <https://doi.org/10.1121/1.4799623>
- Gaspar-Tebar, D. (1980). Normalización del cemento. Tiempo de fraguado: algunos comentarios sobre el método de ensayo. *Materiales de La Construcción*, 30(178), 39–57. <https://doi.org/10.3989/mc.1980.v30.i178.1078>
- Genovés, V., Gosálbez, J., Carrión, A., Miralles, R., & Payá, J. (2016). Optimized ultrasonic attenuation measures for non-homogeneous materials. *Ultrasonics*, 65, 345–352. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.09.007>
- Genovés, V., Gosálbez, J., Carrión, A., Miralles, R., & Payá, J. (2017). Ultrasonic broadband signals monitoring of glass-fiber reinforced cement (GRC) bending tests. *Cement and Concrete Composites*, 80, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.009>
- Genovés, V., Gosálbez, J., Miralles, R., Bonilla, M., & Payá, J. (2015a). Ultrasonic characterization of GRC with high percentage of fly ash substitution. *Ultrasonics*, 60, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.02.016>
- Genovés, V., Gosálbez, J., Miralles, R., Soriano, L., & Payá, J. (2015b). Ultrasonic monitoring on glass fiber reinforced cement (GRC) bending test. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 90, 149–158. <https://doi.org/10.2495/MC150131>
- Genovés, V., Riestra, C., Borrachero, M. V., Eiras, J., Kundu, T., & Payá, J. (2015c). Multimodal analysis of GRC ageing process using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy. *Composites Part B: Engineering*, 76, 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.02.020>
- Genovés, V., Soriano, L., Borrachero, M. V., Eiras, J., & Payá, J. (2015d). Preliminary study on short-term sulphate attack evaluation by non-linear impact resonance acoustic spectroscopy technique. *Construction and Building Materials*, 78, 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.016>
- Genovés, Vicente, Carrión, A., Escobar, D., Gosálbez, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., & Payá, J. (2019). Nonlinear Acoustic Spectroscopy and Frequency Sweep Ultrasonics: Case on Thermal Damage Assessment in Mortar. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 38(3), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0599-0>
- Genovés, Vicente, Carrión, A., Gosálbez, J., Bosch, I., Borrachero, M. V., & Payá, J. J. (2017a). Optimized ultrasonic attenuation measures for internal sulphate attack monitoring in Portland cement mortars. *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2017.8091721>
- Genovés, V., Vargas, F., Gosálbez, J., Carrión, A., Borrachero, M. V., & Payá, J. (2017b). Ultrasonic and impact spectroscopy monitoring on internal sulphate attack of cement-based materials. *Materials and Design*, 125, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.068>

- Ghosh, D., Beniwal, S., & Ganguli, A. (2015). Detection of defect in concrete slab using Rayleigh waves. *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2015.0338>
- Ghosh, T, Kundu, T., & Karpur, P. (1998a). Efficient use of Lamb modes for detecting defects in large plates. *Ultrasonics*, 36(7), 791–801. [https://doi.org/10.1016/s0041-624x\(98\)00012-2](https://doi.org/10.1016/s0041-624x(98)00012-2)
- Ghosh, Triguna, & Kundu, T. (1998b). A new transducer holder mechanism for efficient generation and reception of Lamb modes in large plates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(3), 1498–1502. <https://doi.org/10.1121/1.424361>
- Gibson, A., & Popovics, J. S. (2005). Lamb Wave Basis for Impact-Echo Method Analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 131(4), 438–443. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2005\)131:4\(438\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:4(438))
- Giurgiutiu, V. (2002). Lamb wave generation with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring. *Proceedings of the SPIE's 10th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials and 8th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics*. <https://doi.org/10.1117/12.483492>
- Gómez-Ullate, Y., & Espinosa, F. (2006). Selective Excitation of Lamb Wave Modes in Thin Aluminium Plates using Bonded Piezoceramics: Fem Modelling and Measurements. *9th European Conference on NDT (ECNDT)*. <https://www.ndt.net/search/docs.php?id=4105>
- Gómez Álvarez-Arenas, T. E. (2004). Acoustic Impedance Matching of Piezoelectric Transducers to the Air. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 51(5), 624–633. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2004.1320834>
- Gómez-Ullate, Y. (2007). Estudio de Sistemas Ultrasónicos Basados en Multitransductores para la Detección de Defectos en Estructuras Tipo Placa [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=100979>
- González, E., & Alloza, A. M. (n.d.). Métodos de ensayo de cementos. Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen. Retrieved November 7, 2020, from <https://campusvirtual.ull.es/ocw/mod/page/view.php?id=1605>
- González, V. A. (2011). Análisis y aplicación de técnicas ultrasónicas para ensayos no destructivos en materiales no homogéneos [Universidad de Sevilla]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=71959>
- Gosálbez, J., Wright, W. M. D., Jiang, W., Carrión, A., Genovés, V., & Bosch, I. (2018). Airborne non-contact and contact broadband ultrasounds for frequency attenuation profile estimation of cementitious materials. *Ultrasonics*, 88, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.03.011>
- Goueygou, M., Naffa, S. O., Piwakowski, B., Fnine, A., & Buyle-Bodin, F. (2002). Measurement of Ultrasonic Attenuation and Rayleigh Wave Dispersion for Testing Concrete with Subsurface Damage. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 861–864. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2002.1193533>
- Goueygou, M., & Piwakowski, B. (2004a). Radiation of surface waves into concrete by means of a wedge transducer: design and optimization. *16th World Conference on NDT (WCNDT)*.

<https://www.semanticscholar.org/paper/RADIATION-OF-SURFACE-WAVES-INTO-CONCRETE-BY-MEANS-A-Goueygou-Piwakowski/f1c5afb01344a5c779f3b8c5de7be209b6628cd7>

- Goueygou, M., Piwakowski, B., Fnine, A., Kaczmarek, M., & Buyle-Bodin, F. (2004b). NDE of two-layered mortar samples using high-frequency Rayleigh waves. *Ultrasonics*, 42(1–9), 889–895. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.01.075>
- Goueygou, M, Abraham, O., & Lataste, J. F. (2008). A comparative study of two non-destructive testing methods to assess near-surface mechanical damage in concrete structures. *NDT E International*, 41(6), 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.03.001>
- Goueygou, Marc, Lafhaj, Z., & Soltani, F. (2009). Assessment of porosity of mortar using ultrasonic Rayleigh waves. *NDT and E International*, 42, 353–360. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.01.002>
- Greve, D. W., Neumann, J. J., Nieuwenhuis, J. H., Oppenheim, I. J., & Tyson, N. L. (2005). Use of Lamb Waves to Monitor Plates: Experiments and Simulations. *Proc. SPIE 5765, Smart Structures and Materials: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. <https://doi.org/10.1117/12.599038>
- Greve, D. W., Oppenheim, I. J., & Zheng, P. (2008). Lamb waves and nearly-longitudinal waves in thick plates. *Proc. SPIE 6932, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. <https://doi.org/10.1117/12.775919>
- Grondel, S., Assaad, J., Delebarre, C., Blanquet, P., & Moulin, E. (1999). The propagation of Lamb waves in multilayered plates: phase-velocity measurement. *Measurement Science and Technology*, 10(5), 348–353. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/5/002>
- Grosse, C. U., & Ohtsu, M. (Eds.). (2008). *Acoustic Emission Testing*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9>
- Guo, D., & Kundu, T. (2001). A new transducer holder mechanism for pipe inspection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(1), 303–309. <https://doi.org/10.1121/1.1377289>
- Guo, D. S., & Kundu, T. (2000). A new sensor for pipe inspection by lamb waves. *Materials Evaluation*, 58(8), 991–994. <https://arizona.pure.elsevier.com/en/publications/a-new-sensor-for-pipe-inspection-by-lamb-waves>
- Guo, N., & Cawley, P. (1993). The interaction of Lamb waves with delaminations in composite laminates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 94(4), 2240–2246. <https://doi.org/10.1121/1.407495>
- Gupta, Sakshi. (2018). Comparison of Non-Destructive and Destructive Testing on Concrete: A Review. *Trends in Civil Engineering and Its Architecture*, 3(1), 351–357. <https://doi.org/10.32474/tceia.2018.03.000154>
- Gupta, Shishir, & Ahmed, M. (2017). On Rayleigh Waves in Self-reinforced Layer Embedded over an Incompressible Half-space with Varying Rigidity and Density. *Procedia Engineering*, 173, 1021–1028. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.178>

- Halimi, R., Bezzazi, B., Badidibouda, A., Satour, A., & Aribi, C. (2013). Inspection of laminated composite materials by two ultrasonic techniques. *Journal of Materials, Processes and Environment*, 1(1), 5–8.
- Ham, S., & Popovics, J. S. (2015). Fast Lamb wave energy shift approach using fully contactless ultrasonic system to characterize concrete structures. *AIP Conference Proceedings*, 1650(1), 122–127. <https://doi.org/10.1063/1.4914601>
- Harb, M. S., & Yuan, F. G. (2015). A rapid, fully non-contact, hybrid system for generating Lamb wave dispersion curves. *Ultrasonics*, 61, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.03.006>
- Hayashi, T., & Kawashima, K. (2003). Single Mode Extraction from Multiple Modes of Lamb Wave and Its Application to Defect Detection. *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, 46(4), 620–626.
- He, C., Liu, Y., Song, G., Liu, Z., & Wu, B. (2012). Development of the measurement system of leaky Lamb waves dispersion curves based on LabVIEW. *International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA)*, 1239–1242. <https://doi.org/10.1109/ISdea.2012.461>
- Hernández, L. D., Gómez, J., Contreras, A., & Padilla, L. S. (2018). Resistencia a la compresión del concreto. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16390.63044>
- Hernández, M., Enfedaque, A., Sánchez-Gálvez, V., & Molero, M. (2007). Evaluación del daño a impacto en fibras de GRC mediante ensayos no destructivos por ultrasonidos. VII Congreso Nacional de Materiales Compuestos (MATCOMP). <http://digital.csic.es/handle/10261/11621>
- Hillger, W., Ilse, D., & Bühling, L. (2012). Practical Applications of Air-Coupled Ultrasonic Technique. 4th International Symposium on NDT in Aerospace. <https://www.semanticscholar.org/paper/Practical-Applications-of-Air-Coupled-Ultrasonic-Hillger-Ilse/5450695735e7030a8d344733694ace657b5bba36>
- IAEA. (2002). Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. In *Training Course Series (Vol. 17)*. <https://www.iaea.org/publications/6347/guidebook-on-non-destructive-testing-of-concrete-structures>
- In, C.-W., Kim, J.-Y., Kurtis, K. E., & Jacobs, L. J. (2009). Characterization of ultrasonic Rayleigh surface waves in asphaltic concrete. *NDT and E International*, 42(7), 610–617. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.04.007>
- Infrared Thermography. (n.d.). Retrieved November 2, 2020, from <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/infrared-thermography>
- Inspecciones visuales. (n.d.). Retrieved November 6, 2020, from <https://www.applus.com/es/es/what-we-do/service-sheet/inspecciones-visuales>
- Jain, A., Greve, D. W., & Oppenheim, I. J. (2002). A MEMS ultrasonic transducer for monitoring of steel structures. *Proc. SPIE 4696, Smart Structures and Materials: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*. <https://doi.org/10.1117/12.472561>

- Jia, X. (1997). Modal analysis of Lamb wave generation in elastic plates by liquid wedge transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101(2), 834–842. <https://doi.org/10.1121/1.418041>
- Jiménez, N. (2009). Simulación de tejidos vegetales mediante diferencias finitas [Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/8888>
- Jung, Y.-C., Na, W.-B., Kundu, T., & Ehsani, M. (2000). Damage detection in concrete using Lamb waves. *Proc. SPIE 3995, Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities, and Pipelines IV*, 448–458. <https://doi.org/10.1117/12.387836>
- Jung, Y. C., Kundu, T., & Ehsani, M. (2001). Internal Discontinuity Detection in Concrete by Lamb Waves. *Materials Evaluation*, 59(3), 418–423. <https://arizona.pure.elsevier.com/en/publications/internal-discontinuity-detection-in-concrete-by-lamb-waves>
- Karaiskos, G., Deraemaeker, A., Aggelis, D. G., & Van Hemelrijck, D. (2015). Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method. *Smart Materials and Structures*, 24(11). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/11/113001>
- Kargari, A., Eskandari-Naddaf, H., & Kazemi, R. (2019). Effect of cement strength class on the generalization of Abrams' law. *Structural Concrete*, 20(1), 493–505. <https://doi.org/10.1002/suco.201700275>
- Karpenko, O. (2013). Signal Analysis in Guided Wave Structural Health Monitoring [Michigan State University]. <https://d.lib.msu.edu/etd/167>
- Kazemirad, S., & Mongeau, L. (2013). Rayleigh wave propagation method for the characterization of a thin layer of biomaterials. *J Acoust Soc Am*, 133(6), 4332–4342. <https://doi.org/10.1121/1.4804318>
- Kazys, R., Mazeika, L., Sliteris, R., & Raisutis, R. (2014). Measurement of viscosity of highly viscous non-Newtonian fluids by means of ultrasonic guided waves. *Ultrasonics*, 54(4), 1104–1112. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.01.007>
- Kee, S.-H., & Zhu, J. (2010). Using air-coupled sensors to determine the depth of a surface-breaking crack in concrete. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(3), 1279–1287. <https://doi.org/10.1121/1.3298431>
- Kee, S. H., Lee, J. W., & Candelaria, M. D. (2020). Evaluation of delamination in concrete by IE testing using multi-channel elastic wave data. *Sensors (Switzerland)*, 20(1), 201. <https://doi.org/10.3390/s20010201>
- Kee, S. H., & Nam, B. (2015). Automated Surface Wave Measurements for Evaluating the Depth of Surface-Breaking Cracks in Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(3), 307–321. <https://doi.org/10.1007/s40069-015-0110-y>
- Keller, M. S., Kundu, T., & Desai, C. S. (2001). Use of Lamb waves to predict current damaged state of mortar. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.
- Khalili, P., & Cawley, P. (2016). Excitation of Single-Mode Lamb Waves at High-Frequency-Thickness Products. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 63(2), 303–312. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2015.2507443>

- Kim, G., In, C. W., Kim, J. Y., Kurtis, K. E., & Jacobs, L. J. (2014). Air-coupled detection of nonlinear Rayleigh surface waves in concrete - Application to microcracking detection. *NDT and E International*, 67, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.07.004>
- Kim, G., Kim, J.-Y., Kurtis, K. E., Jacobs, L. J., Le Pape, Y., & Guimaraes, M. (2016). Quantitative evaluation of carbonation in concrete using nonlinear ultrasound. *Materials and Structures*, 49, 399–409. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0506-1>
- Kim, J. H., & Kwak, H. G. (2011). Rayleigh wave velocity computation using principal wavelet-component analysis. *NDT and E International*, 44(1), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.09.005>
- Kim, Y., Song, S.-J., & Kwon, S.-D. (2002). Measurement of phase velocity dispersion curves and group velocities in a plate using leaky Lamb waves. *National Seminar of ISNT*. <http://www.qnetworld.de/nde2002/papers/022P.pdf>
- Kim, Y., Song, S., & Kwon, S. (2006). Angle beam method to identify leaky Lamb wave modes in an elastic plate. *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics*, 27, 235–236.
- Krautkrämer, J., & Krautkrämer, H. (1990). *Ultrasonic Testing of Materials* (4th ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.7767/omz.1970.25.8.505>
- Krüger, M., Grosse, C., & Lehmann, F. (2013). Automated shear wave techniques to investigate the setting and hardening of concrete in through-transmission. In O. Güneş & Y. Akkaya (Eds.), *Nondestructive Testing of Materials and Structures*. RILEM Bookseries, vol 6. (pp. 431–436). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0723-8_61
- Kundu, T. (Ed.). (2012). *Ultrasonic and Electromagnetic NDE for Structure and Material Characterization - Engineering and Biomedical Applications* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b12268>
- Kundu, Tribikram (Ed.). (2004). *Ultrasonic Nondestructive Evaluation - Engineering and Biological Material Characterization*. CRC Press.
- Kurahashi, S., Shimada, Y., Kotyaev, O., Norimatsu, T., Kono, Y., Nakata, S., & Ishii, M. (2013). Measurement of depth of surface cracks in concrete by laser ultrasonic technique with multichannel detector. *AIP Conference Proceedings*, 1511, 317–323. <https://doi.org/10.1063/1.4789064>
- Kuttig, H., Niethammer, M., Hurlbauss, S., & Jacobs, L. J. (2006). Model-based analysis of dispersion curves using chirplets. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(4), 2122–2130. <https://doi.org/10.1121/1.2177587>
- Lai, W. L., Wang, Y. H., Kou, S. C., & Poon, C. S. (2013). Dispersion of ultrasonic guided surface wave by honeycomb in early-aged concrete. *NDT and E International*, 57, 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.03.001>
- Lakestani, F., Coste, J.-F., & Denis, R. (1995). Application of ultrasonic Rayleigh waves to thickness measurement of metallic coatings. *NDT&E International*, 28(3), 171–178. [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(95\)00010-U](https://doi.org/10.1016/0963-8695(95)00010-U)
- Lamb Waves. (n.d.). Retrieved November 9, 2020, from <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/lamb-waves>

- Laugier, P., & Haïat, G. (Eds.). (2011). *Bone Quantitative Ultrasound*. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0017-8>
- Lee, F. W., Lim, K. S., & Chai, H. K. (2016). Determination and extraction of Rayleigh-waves for concrete cracks characterization based on matched filtering of center of energy. *Journal of Sound and Vibration*, 363, 303–315. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.11.004>
- Lee, K. I., & Yoon, S. W. (2004). Feasibility of bone assessment with leaky Lamb waves in bone phantoms and a bovine tibia. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(6), 3210–3217. <https://doi.org/10.1121/1.1707086>
- Lee, Y. C., & Cheng, S. W. (2001). Measuring Lamb Wave Dispersion Curves of a Bi-Layered Plate and Its Application on Material Characterization of Coating. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 48(3), 830–837. <https://doi.org/10.1109/58.920717>
- Lee, Y. H., & Oh, T. (2016a). The Measurement of P-, S-, and R-Wave Velocities to Evaluate the Condition of Reinforced and Prestressed Concrete Slabs. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/1548215>
- Lee, Y. H., & Oh, T. (2016b). The simple Lamb wave analysis to characterize concrete wide beams by the practical MASW test. *Materials*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/ma9060437>
- Lester W. Schmerr, J. (1998). *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation: A Modeling Approach* (Vol. 11). [https://doi.org/S0014-4894\(05\)00107-4](https://doi.org/S0014-4894(05)00107-4) [pii]\r10.1016/j.exppara.2005.03.022
- Li, B., Duan, P., Qiang, L., & Zhuo, J. (2014). A Graphical Edge Method to Solve Dispersion Equation of Lamb Waves. *Proceedings of the First Symposium on Aviation Maintenance and Management-Volume I*, 471–479. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54236-7_52
- Li, F., Murayama, H., Kageyama, K., & Shirai, T. (2009). Guided Wave and Damage Detection in Composite Laminates Using Different Fiber Optic Sensors. *Sensors*, 9(5), 4005–4021. <https://doi.org/10.3390/s90504005>
- Lind, M. L. (2008). *Ultrasonic Investigation of the Elastic Properties and Liquid Fragility of Bulk Metallic Glasses in the Supercooled Liquid Region* [California Institute of Technology]. <https://thesis.library.caltech.edu/4269/>
- Liu, F., Xu, P., Zhang, H., Guan, C., Feng, D., & Wang, X. (2019). Use of time-of-flight ultrasound to measure wave speed in poplar seedlings. *Forests*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/f10080682>
- Lluveras, D. (2017). Evaluación de materiales cementicios utilizando tomografía ultrasónica en transmisión [Universidad Politécnica de Madrid]. <http://oa.upm.es/47671/>
- Loaiza, M. (2011). *Modelado y Simulación de la Propagación de Ondas Elásticas en Medios Heterogéneos con Métodos Espectrales de Chebyshev* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/4679>
- Lowe, M. J. S. (1995). Matrix Techniques for Modeling Ultrasonic-Waves in Multilayered Media. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 42(4), 525–542. <https://doi.org/10.1109/58.393096>

- Lu, Z., Yang, C., Qin, D., Luo, Y., & Momayez, M. (2016). Estimating ultrasonic time-of-flight through echo signal envelope and modified Gauss Newton method. *Measurement*, 94, 355–363. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.08.013>
- Luo, W., & Rose, J. L. (2004). Lamb wave thickness measurement potential with angle beam and normal beam excitation. *Materials Evaluation*, 62(8), 860–866. <https://pennstate.pure.elsevier.com/en/publications/lamb-wave-thickness-measurement-potential-with-angle-beam-and-nor>
- Luppé, F., & Doucet, J. (1988). Experimental study of the Stoneley wave at a plane liquid-solid interface. *Journal of the Acoustical Society of America*, 83(4), 1276–1279. <https://doi.org/10.1121/1.395983>
- Martínez, Á. A. (2017). Evaluación por medio de técnicas no destructivas del daño producido por ataque externo de sulfatos en mortero de cemento Portland [Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/79918>
- Masías-Mogollón, K. (2018). Resistencia a la flexión y tracción en el concreto usando ladrillo triturado como agregado grueso [Univesidad de Piura]. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3484>
- Masurkar, F. A., & Yelve, N. P. (2015). Locating a Damage in an Aluminium Plate using Lamb Waves. *Indian National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation (NDE)*. <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=21149>
- Mažeika, L., Raišutis, R., Maciulevičius, A., Žukauskas, E., Kazys, R., Seniūnas, G., & Vladišauskas, A. (2009). Comparison of several techniques of ultrasonic Lamb waves velocities measurements. *Ultragarsas*, 64(1), 11–17. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Comparison+of+several+techniques+of+ultrasonic+Lamb+waves+velocities+measurements#0>
- McGovern, M. E., Buttlar, W. G., & Reis, H. (2016). Field assessment of oxidative aging in asphalt concrete pavements with unknown acoustic properties. *Construction and Building Materials*, 116, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.117>
- Mei, H., James, R., Haider, M. F., & Giurgiutiu, V. (2020). Multimode Guided Wave Detection for Various Composite Damage Types. *Applied Sciences*, 10(2), 484. <https://doi.org/10.3390/app10020484>
- Mercedes, G. (2018). CALIBRACIÓN DE CALORIMETRO SEMIADIABATICO, MEDIANTE ENSAYOS DE CONTRASTACIÓN [Universidad Nacional de Córdoba]. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/6597?locale-attribute=en>
- Michaels, J. E., Lee, S. J., Croxford, A. J., & Wilcox, P. D. (2013). Chirp excitation of ultrasonic guided waves. *Ultrasonics*, 53(1), 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.06.010>
- Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo. (n.d.). Retrieved October 31, 2020, from <http://www.upv.es/entidades/SME/info/859071normalc.html>
- Moiseyenko, R., Liu, J., Benchabane, S., Declercq, N., Laude, V., & Scholte-Stoneley, V. L. (2012). Scholte-Stoneley waves on corrugated surfaces and on phononic crystal gratings. *Acoustics*, 3678–3681. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00759379>

- Molero, M. Á. (2009). CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CEMENTICIOS MEDIANTE LA DISPERSIÓN ULTRASÓNICA [Universidad Politécnica de Madrid]. <http://oa.upm.es/1932/>
- Molero, M., Aparicio, S., Al-Assadi, G., Casati, M. J., Hernández, M. G., & Anaya, J. J. (2012). Evaluation of freeze-thaw damage in concrete by ultrasonic imaging. *NDT and E International*, 52, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.05.004>
- Moll, J., & Fritzen, C.-P. (2010). *Advanced Aspects of Mode-Selective Excitation of Ultrasonic Guided Waves*. ISMA2010.
- Mutlib, N. K., Baharom, S. B., El-Shafie, A., & Nuawi, M. Z. (2016). Ultrasonic health monitoring in structural engineering: buildings and bridges. *Structural Control and Health Monitoring*, 23, 409–422. <https://doi.org/10.1002/stc>
- Na, W. B., Kundu, T., & Ehsani, M. R. (2003). A comparison of steel/concrete and glass fiber reinforced polymers/concrete interface testing by guided waves. *Materials Evaluation*, 61(2), 155–161. <https://arizona.pure.elsevier.com/en/publications/a-comparison-of-steelconcrete-and-glass-fiber-reinforced-polymers>
- Neuenschwander, J., Schmidt, T., Lüthi, T., & Romer, M. (2006). Leaky Rayleigh wave investigation on mortar samples. *Ultrasonics*, 45, 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.06.002>
- Niethammer, M., Jacobs, L. J., Qu, J., & Jarzynski, J. (2001). Time-frequency representations of Lamb waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(5), 1841–1847. <https://doi.org/10.1121/1.1357813>
- Nischer, P. (1972). Procedimientos sencillos para la determinación de la consistencia y de la relación agua/cemento del hormigón fresco así como del contenido de agua de los áridos. *Materiales de Construcción*, 22(145), 83–92. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2976982>
- Nor, N. M., Muhamad, N., Ibrahim, A., Mohd, H., Shahidan, S., & Mat Saliah, S. N. (2013). Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/54448>
- Ogino, T., Kawaguchi, T., Yamashita, S., & Kawajiri, S. (2015). Measurement deviations for shear wave velocity of bender element test using time domain, cross-correlation, and frequency domain approaches. *Soils and Foundations*, 55(2), 329–342. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.009>
- Ólafsdóttir, E. Á. (2014). *Multichannel Analysis of Surface Waves - Methods for dispersion analysis of surface wave data*. University of Iceland.
- Olympus Panametrics Ultrasonic Transducers. (2010). In Olympus NDT Inc. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(88\)90311-2](https://doi.org/10.1016/0308-9126(88)90311-2)
- Ono, K. (2017). Through-Transmission Characteristics of AE Sensor Couplants. *Journal of Acoustic Emission*, 34. <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=21550>
- Padiyar, J., Hariharan, N., Balasubramaniam, K., & Bose, A. C. (2011). Increase in efficiency of air-coupled L-scan (Lamb wave scan) and its application in inspection of composite structures. *Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*. <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=11954>

- Páez, A. (1986). Hormigón armado. Editorial Reverte.
- Panda, R. S., Rajagopal, P., & Balasubramaniam, K. (2017). Characterization of delamination-type damages in composite laminates using guided wave visualization and air-coupled ultrasound. *Structural Health Monitoring*, 16(2), 142–152. <https://doi.org/10.1177/1475921716666411>
- Park, S. J., Yim, H. J., & Kwak, H. G. (2014). Nonlinear resonance vibration method to estimate the damage level on heat-exposed concrete. *Fire Safety Journal*, 69, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.07.003>
- Pavlakovic, B., Lowe, M., Alleyne, D., & Cawley, P. (1997). Disperse: A General Purpose Program for Creating Dispersion Curves. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 185–192. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5947-4_24
- Pavlík, V. (2019). Acid attack on hardened cement paste by acids forming low soluble calcium salts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 549(012020). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/549/1/012020>
- Payá, J., Genovés, V., Monzó, J., Carrión, A., Gosálbez, J., & Borrachero, M. V. (2019). Fansiras: Un Nuevo Algoritmo, Basado En La Señal De Espectroscopía Acústica Por Impacto, Para La Caracterización De Morteros Y Su Estado De Deterioro. XV Congreso Latinoamericano de Patología de Construcción y XVII Congreso de Control de Calidad En La Construcción, 2. <https://doi.org/10.21041/conpat2019/v2pat82>
- Payan, C., Garnier, V., Moysan, J., & Johnson, P. A. (2007). Applying nonlinear resonant ultrasound spectroscopy to improving thermal damage assessment in concrete. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(4), EL125–EL130. <https://doi.org/10.1121/1.2710745>
- Peña, M. R. (2014). Diseño, construcción y caracterización de un transductor ultrasónico focalizado [Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/47271/Memoria%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pérez, M. I. (2015). Durabilidad de cementos activados alcalinamente: Resistencia al ataque ácido [Universitat Politècnica de València]. <https://www.masterenhormigon.com/images/TFM/MIPR.pdf>
- Philippidis, T. P., & Aggelis, D. G. (2004). Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. *Ultrasonics*, 43, 584–595. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.12.001>
- Piwakowski, B., Fnine, A., Goueygou, M., & Buyle-Bodin, F. (2004). Generation of Rayleigh waves into mortar and concrete samples. *Ultrasonics*, 42(1–9), 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.01.099>
- Poon, C. S., & Lam, C. S. (2008). The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks. *Cement and Concrete Composites*, 30(4), 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.10.005>
- Popovics, J. S., Song, W., Achenbach, J. D., Lee, J. H., & Andre, R. F. (1998). One-sided stress wave velocity measurement in concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(12), 1346–1353. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:12\(1346\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:12(1346))

- Popovics, J S, & Abraham, O. (2010). Surface wave techniques for evaluation of concrete structures. In *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures* (pp. 441–465). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845699604.2.441>
- Popovics, John S., Ryden, N., Gibson, A., & Haas, M. (2007). Guided wave approach for concrete pavement thickness estimation. *AIP Conference Proceedings*, 894, 1345–1352. <https://doi.org/10.1063/1.2718122>
- Portland cement. (n.d.). Retrieved November 1, 2020, from <https://www.britannica.com/technology/portland-cement>
- Portlandite. (n.d.). Retrieved November 1, 2020, from <https://virtual-museum.soils.wisc.edu/display/portlandite/>
- Porto, J. (2005). *Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado* [Universidade da Coruña]. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/13853>
- Prego, J. L. (2010). LAMB: a SIMULATION TOOL for AIR-COUPLED LAMB WAVE BASED ULTRASONIC NDE SYSTEMS [Polytechnic University of Catalonia]. <https://www.tdx.cat/handle/10803/6376;jsessionid=0182BD71BA207EB3730883E82878F69C>
- Proceq. (2013). *Operating Instructions Shear Wave Transducers 250 kHz*.
- Prosser, W. H., Seale, M. D., & Smith, B. T. (1999). Time-frequency analysis of the dispersion of Lamb modes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(5), 2669–2676. <https://doi.org/10.1121/1.426883>
- Punurai, W. (2006). *Cement-based Materials' Characterization using Ultrasonic Attenuation* [Georgia Institute of Technology]. <https://smartertech.gatech.edu/handle/1853/10493>
- Punurai, Wonsiri, Jarzynski, J., Qu, J., Kim, J. Y., Jacobs, L. J., & Kurtis, K. E. (2007). Characterization of multi-scale porosity in cement paste by advanced ultrasonic techniques. *Cement and Concrete Research*, 37(1), 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.016>
- Purnell, P., Seneviratne, A. M. G., Short, N. R., & Page, C. L. (2003). Super-critical carbonation of glass-fibre reinforced cement. Part 2: Microstructural observations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(11), 1105–1112. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00211-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00211-2)
- Qixian, L., & Bungey, J. H. (1996). Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete. *Construction and Building Materials*, 10(4), 237–242. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(96\)00003-7](https://doi.org/10.1016/0950-0618(96)00003-7)
- Rajana, K. M., Hongerholt, D., Rose, J. L., & Ditri, J. J. (1995). Analysis of the generation of guided waves using finite sources: an experimental approach. In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (pp. 171–178). https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1987-4_18
- Ramanathan, S. (2005). *An investigation on the deicing of helicopter blades using shear horizontal guided waves* [Pennsylvania State University]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005PhDT.....167R/abstract>

- Ray, P., Manogharan, P., Srinivasan, B., Balasubramaniam, K., & Rajagopal, P. (2015). Novel method of defect identification in bent structures through feature-guided wave detection using fiber Bragg grating sensors. *Proc. SPIE 9634, 24th International Conference on Optical Fibre Sensors, 96340S*. <https://doi.org/10.1117/12.2195065>
- Ren, B., Cho, H., & Lissenden, C. J. (2017). A Guided Wave Sensor Enabling Simultaneous Wavenumber-Frequency Analysis for Both Lamb and Shear-Horizontal Waves. *Sensors (Basel, Switzerland), 17(3)*. <https://doi.org/10.3390/s17030488>
- Rogers, W. P. (1995). Elastic property measurement using Rayleigh-Lamb waves. *Research in Nondestructive Evaluation, 6(4)*, 185–208. <https://doi.org/10.1007/BF01606381>
- Rose, J. L. (2014). *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media (1st ed.)*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107273610>
- Rossing, T. D., & Neville H. Fletcher. (2004). *Principles of Vibration and Sound (2nd ed.)*. Springer-Verlag New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3822-3>
- Ryden, N., Park, C. B., Ulriksen, P., & Miller, R. D. (2003). Lamb Wave Analysis for Non-Destructive Testing of Concrete Plate Structures. 9th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (EEGS-ES/EAGE Near Surface Geoscience Division Annual Meeting), 1945, 782–793. <https://doi.org/10.4133/1.2923224>
- Safaeinili, A., Lobkis, O. I., & Chimenti, D. E. (1996a). Quantitative materials characterization using air-coupled leaky Lamb waves. *Ultrasonics, 34(2–5)*, 393–396. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(96\)00056-X](https://doi.org/10.1016/0041-624X(96)00056-X)
- Safaeinili, A., Lobkis, O. I., & Chimenti, D. E. (1996b). Air-coupled ultrasound and leaky Lamb waves in composites. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 15*, 1059–1066. <https://doi.org/10.1186/s12917-018-1573-2>
- Sánchez, M., & Del Águila, A. (1992). El envejecimiento de las pastas de cemento reforzadas con fibras de vidrio. *Materiales de La Construcción, 42(226)*, 65–71. <https://doi.org/10.3989/mc.1992.v42.i226.712>
- Sánchez Paradela, M. L., & Sánchez Gálvez, V. (1991). Comportamiento a tracción de cementos reforzados con fibras de vidrio. *Informes de La Construcción, 43(413)*, 77–89. <https://doi.org/10.3989/ic.1991.v43.i413.1379>
- Sancho-Knapik, D., Calás, H., Peguero-Pina, J. J., Ramos Fernández, A., Gil-Pelegrín, E., & Gómez Álvarez-Arenas, T. E. (2012). Air-coupled ultrasonic resonant spectroscopy for the study of the relationship between plant leaves' elasticity and their water content. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 59(2)*, 319–325. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2012.2194>
- Sanderson, R. (2015). A closed form solution method for rapid calculation of guided wave dispersion curves for pipes. *Wave Motion, 53*, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2014.11.003>
- Santos, M., Ferreira, A. R., Fernandes, N., & Perdigão, J. (2000). Detection and Classification of Defects in Thin Structures Using Lamb Waves. *Acustica*. <https://1library.co/document/8ydmw9jy-detection-classification-defects-structures-using-lamb-waves.html>

- Santos, M., & Perdigão, J. (2005). Leaky Lamb waves for the detection and sizing of defects in bonded aluminium lap joints. *NDT & E International*, 38(7), 561–568. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.02.004>
- Sas, W., Gabryś, K., Soból, E., & Szymański, A. (2016). Dynamic characterization of cohesive material based on wave velocity measurements. *Applied Sciences (Switzerland)*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/app6020049>
- Schaal, C., Samajder, H., Baid, H., & Mal, A. (2015). Rayleigh to Lamb wave conversion at a delamination-like crack. *Journal of Sound and Vibration*, 353, 150–163. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.05.016>
- Schöpfer, F., Binder, F., Wöstehoff, A., Schuster, T., Ende, S. von, Föll, S., & Lammering, R. (2013). Accurate determination of dispersion curves of guided waves in plates by applying the matrix pencil method to laser vibrometer measurement data. *CEAS Aeronautical Journal*, 4, 61–68. <https://doi.org/10.1007/s13272-012-0055-7>
- Seale, M. D., Smith, B. T., & Prosser, W. H. (1998). Lamb wave assessment of fatigue and thermal damage in composites. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(5), 2416–2424. <https://doi.org/10.1121/1.422761>
- Segura, I., Anaya, J. J., Hernández, M. G., Macphee, D. E., Moragues, A., & Sánchez, T. (2007). Microstructural characterization of aged mortar by destructive and non-destructive testing. 12th International Congress on the Chemistry of Cement. <https://iccc-online.org/fileadmin/gruppen/iccc/proceedings/12/pdf/fin00245.pdf>
- Shang, H., Cao, W., & Wang, B. (2014). Effect of Fast Freeze-Thaw Cycles on Mechanical Properties of Ordinary-Air-Entrained Concrete. *The Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/923032>
- Shankar, S., & Joshi, H. R. (2014). Comparison of Concrete Properties determined by Destructive and Non-Destructive Tests. *Journal of the Institute of Engineering*, 10(1), 130–139. <https://doi.org/10.3126/jie.v10i1.10889>
- Sharma, S., & Mukherjee, A. (2014). Damage detection in submerged plates using ultrasonic guided waves. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 39(5), 1009–1034. <https://doi.org/10.1007/s12046-014-0255-4>
- Sharma, Sandeep, & Mukherjee, A. (2015). A Non-Contact Technique for Damage Monitoring in Submerged Plates Using Guided Waves. *Journal of Testing and Evaluation*, 43(4), 776–791. <https://doi.org/10.1520/JTE20120357>
- Shashank Pant. (2014). Lamb Wave Propagation and Material Characterization of Metallic and Composite Aerospace Structures for Improved Structural Health Monitoring (SHM) [Carleton University]. <https://curve.carleton.ca/737fe2c0-b8a5-423f-b9eb-ffccda63d38e>
- Shelke, A., Kundu, T., Amjad, U., Hahn, K., & Grill, W. (2011). Mode-selective excitation and detection of ultrasonic guided waves for delamination detection in laminated aluminum plates. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 58(3), 567–577. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2011.1839>
- Shiotani, T., & Aggelis, D. G. (2007). Determination of surface crack depth and repair effectiveness using Rayleigh waves. *Proceedings of the 6th International Conference on*

Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Determination-of-surface-crack-depth-and-repair-Shiotani-Aggelis/d790a45302c2a96d9b31058401f59d6e919e3f84>

- Singh, R., Sharma, S., & Sharma, S. (2014). Guided Waves for Damage Monitoring In Plates with Corrosion Defects. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(3), 10072–10083.
http://www.ijirset.com/upload/2014/march/28_Guided.pdf
- Song, L., Fan, Z., & Hou, J. (2019). Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13(24). <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0340-5>
- Spectrogram. (n.d.). Retrieved December 11, 2020, from <https://es.mathworks.com/help/signal/ref/spectrogram.html>
- Staroszczyk, R. (1992). Rayleigh-type waves in a water-saturated porous half-space with an elastic plate on its surface. *Transport in Porous Media*, 9, 143–154.
<https://doi.org/10.1007/BF01039633>
- Su, Z., & Ye, L. (2009). Identification of Damage Using Lamb Waves - From Fundamentals to Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33968-4>
- Syarif, M., Sampebulu, V., Wihardi Tjaronge, M., & Nasruddin. (2018). Characteristic of compressive and tensile strength using the organic cement compare with portland cement. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00172.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00172>
- Takiy, A. E., Granja, S. C. G., Higuti, R. T., Kitano, C., Elvira, L., & Martinez-Graullera, O. F. (2013). Low Attenuation Frequency Bands for Lamb Waves Immersed in Viscous Fluids: Theoretical Analysis and Experimental Validation. *International Congress on Ultrasonics (ICU)*. https://doi.org/10.3850/978-981-07-5938-4_P0305
- Termografía - Basics. (n.d.). Retrieved November 2, 2020, from [https://www.visiononline.es/news/termografia/termografia-basics/#:~:text=La división del espectro electromagnético,de la percepción del silicio\).&text=Infrarrojo lejano%3A de 15 a,el infrarrojo de onda larga.](https://www.visiononline.es/news/termografia/termografia-basics/#:~:text=La%20divisi3n%20del%20espectro%20electromagn3tico,de%20la%20percepci3n%20del%20silicio).&text=Infrarrojo%20lejano%3A%20de%2015%20a,el%20infrarrojo%20de%20onda%20larga.)
- Theobald, P., Zeqiri, B., & Avison, J. (2008). Couplants and their influence on AE sensor sensitivity. *J. Acoustic Emission*, 26, 91–97.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.468.4228>
- Thiele, S. (2013). Air-Coupled Detection of Rayleigh Surface Waves To Assess Material Nonlinearity Due To Precipitation in Alloy Steel [Georgia Institute of Technology]. <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/50276>
- Tian, W., & Han, N. (2017). Experiment Analysis of Concrete's Mechanical Property Deterioration Suffered Sulfate Attack and Drying-Wetting Cycles. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5673985>

- Tsuyuki, K., Katamura, R., Miura, S., & Asanuma, H. (2006). Non-Destructive Testing of Concrete Based on Analysis of Velocity Dispersion of Laser Ultrasonics. European Conference on NDT. http://niweb.kankyo.tohoku.ac.jp/PDF/ECNDT_P223.pdf
- UNE-EN 12390-6:2010. (n.d.). Retrieved November 7, 2020, from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0046187>
- UNE-EN 14630:2007. (n.d.). Retrieved November 7, 2020, from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0039887>
- Vaziri Astaneh, A., & Guddati, M. N. (2016). Efficient computation of dispersion curves for multilayered waveguides and half-spaces. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 300, 27–46. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2015.11.019>
- Vázquez, S., Gosálbez, J., Wright, W. M. D., Gallardo, C., Bosch, I., & Carrión, A. (2019a). Airborne ultrasonic technique to measure leaky Lamb waves with narrowband and low-frequency excitation. *International Congress on Ultrasonics (ICU)*. <https://kuleuvencongres.be/2019icu/media/icu-2019-abstract-book-final-oct.pdf>
- Vázquez, S., Gosálbez, J., Bosch, I., Carrión, A., Gallardo, C., & Payá, J. (2019b). Comparative Study of Coupling Techniques in Lamb wave Testing of Metallic and Cementitious Plates. *Sensors (Switzerland)*, 19(19), 4068. <https://doi.org/10.3390/s19194068>
- Vázquez, S., Gosálbez, J., Bosch, I., Gallardo, C., & Carrión, A. (2019c). Evaluación de técnicas de acoplamiento ultrasónicas para la generación de ondas de Lamb en placas metálicas. *Congreso Asociación Española de Ensayos No Destructivos*, 151–152. https://www.aend.org/documentos/congresos/Vitoria2019/LibroCongresoVitoria19.pdf?fbclid=IwAR0TbWbS7qwOgqS5fAidSedVRtpWjkZiWB0ECbp6gWP1aNQMbzrTLuUr_Dc
- Veneziani, G. R., Corrêa, E. L., Potiens, M. P. A., & Campos, L. L. (2016). Attenuation coefficient determination of printed ABS and PLA samples in diagnostic radiology standard beams. *Journal of Physics: Conference Series*, 733(012088). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/733/1/012088>
- Viktorov, I. A. (1967). *Rayleigh and Lamb Waves*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5681-1>
- Villain, G., Thiery, M., & Platret, G. (2007). Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. *Cement and Concrete Research*, 37(8), 1182–1192. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.015>
- Voigt, T., Ye, G., Sun, Z., Shah, S. P., & Van Breugel, K. (2005). Early age microstructure of Portland cement mortar investigated by ultrasonic shear waves and numerical simulation. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 858–866. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.004>
- Vu, Quang Ahn, Lott, M., Garnier, V., Chaix, J. F., Payan, C., Eiras, J. N., Kodjo, S. A., Rivard, P., & Balayssac, J. P. (2015). Nonlinear Acoustic Evaluation by Rayleigh Wave for Assessing Concrete Cover Layer Properties. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. <https://hal-univ-tlse3.archives-ouvertes.fr/hal-01295332>

- Vu, Quang Anh, Garnier, V., Chaix, J. F., Payan, C., Lott, M., & Eiras, J. N. (2016). Concrete cover characterisation using dynamic acousto-elastic testing and Rayleigh waves. *Construction and Building Materials*, 114, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.116>
- Waltisberg, D., & Raišutis, R. (2008). Group velocity estimation of Lamb waves based on the wavelet transform. *Ultragarsas (Ultrasound)*, 63(4), 35–40. <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=7816>
- Walz, K. (1971). Relacion entre el factor agua/cemento, la resistencia normalizada del cemento (DIN 1164, junio 1970) y la resistencia del hormigon a la compresión. *Materiales de Construcción*, 21(143), 45–55. <https://doi.org/10.3989/mc.1971.v21.i143.1502>
- Wardany, R. Al, Rhazi, J., Ballivy, G., Gallias, J. L., & Saleh, K. (2004). Use of Rayleigh wave methods to detect near surface concrete damage. 16th World Conference on NDT (WCNDT). <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.159.5740&rep=rep1&type=pdf>
- Wathelet, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: Parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35(9), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2008GL033256>
- WAVE2000. (n.d.). Retrieved June 27, 2017, from <http://www.cyberlogic.org>
- What is NDT? (n.d.). Retrieved November 1, 2020, from <http://www.icndt.org/What-is-NDT>
- Wilcox, P., Lowe, M., & Cawley, P. (2001). The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves. *NDT & E International*, 34(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00024-4](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00024-4)
- Worden, K. (2001). Rayleigh and Lamb Waves - Basic Principles. In *Strain* (Vol. 37, Issue 4). <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2001.tb01254.x>
- Xu, K., Ta, D., Moilanen, P., & Wang, W. (2012). Mode separation of Lamb waves based on dispersion compensation method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4), 2714–2722. <https://doi.org/10.1121/1.3685482>
- Xu, X., Goossens, J., Shkerdin, G., & Glorieux, C. (2008). Effect of loading a plate with different liquids on the propagation of lamb-like waves studied by laser ultrasonics. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 55(3), 675–685. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2008.692>
- Yan, S.-G., Xie, F.-L., Li, C.-Z., & Zhang, B.-X. (2016). Dispersion function of Rayleigh waves in porous layered half-space system. *Applied Geophysics*, 13(2), 333–342. <https://doi.org/10.1007/s11770-016-0536-2>
- Zanuy, C., Albajar, L., & de la Fuente, P. (2011). El proceso de fatiga del hormigón y su influencia estructural. *Materiales de Construcción*, 61(303), 385–399. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.54609>
- Zeroug, S., & Froelich, B. (2003). Ultrasonic leaky-Lamb wave imaging through a highly contrasting layer. *IEEE Symposium on Ultrasonics*, 1, 794–798. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2003.1293520>

- Zhang, J., Gao, Y., & Han, Y. (2012). Interior Humidity of Concrete under Dry-Wet Cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(3), 289–298. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000382](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000382)
- Zhang, R., Wan, M., & Cao, W. (2001). Parameter Measurement of Thin Elastic Layers Using Low-Frequency Multi-Mode Ultrasonic Lamb Waves. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 50(5), 1397–1403. <https://doi.org/10.1109/19.963216>
- Zhang, S., Li, X., & Jeong, H. (2017). Measurement of Rayleigh Wave Beams Using Angle Beam Wedge Transducers as the Transmitter and Receiver with Consideration of Beam Spreading. *Sensors*, 17(6), 1449. <https://doi.org/10.3390/s17061449>
- Zhang, Y. (2013). Measuring Acoustic Attenuation of Polymer Materials Using Drop Ball Test [Embry-Riddle Aeronautical University]. <https://commons.erau.edu/edt/151>
- Zhu, J., Kee, S. H., Han, D., & Tsai, Y. Te. (2011a). Effects of air voids on ultrasonic wave propagation in early age cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 41(8), 872–881. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.005>
- Zhu, J., & Popovics, J. (2002). Non-contact detection of surface waves in concrete using an air-coupled sensor. *AIP Conference Proceedings*, 615, 1261–1268. <https://doi.org/10.1063/1.1472940>
- Zhu, J., & Popovics, J. S. (2008). Non-contact NDT of Concrete Structures Using Air Coupled Sensors. <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/5320/NSEL.Report.010.pdf>
- Zhu, J., Popovics, J. S., & Asce, M. (2007). Imaging Concrete Structures Using Air-Coupled Impact-Echo. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(6), 628–640. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2007\)133:6\(628\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:6(628))
- Zhu, J., Popovics, J. S., & Schubert, F. (2004). Leaky Rayleigh and Scholte waves at the fluid–solid interface subjected to transient point loading. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(110), 2101–1299. <https://doi.org/10.1121/1.1791718>
- Zhu, J., Tsai, Y. Te, & Kee, S. H. (2011b). Monitoring early age property of cement and concrete using piezoceramic bender elements. *Smart Materials and Structures*, 20(11). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/11/115014>
- Zima, B., & Rucka, M. (2015). Application of wavelet transform in analysis of guided wave propagation signals for damage detection in a steel plate. *Diagnostyka*, 16(2), 43–48. diagnostyka.net.pl/Application-of-wavelet-transform-in-analysis-of-guided-wave-propagation-signals-for,81458,0,2.html