

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeronáutica

Determinación de la influencia de temperatura y tiempo de curado en el material compuesto mediante el uso de ensayos no destructivos (END)

Autor: María Teresa Alcalde Cano

Tutores: Elena Correa Montoto

Jesús Justo Estebaranz

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Aeronáutica

**Determinación de la influencia de temperatura
y tiempo de curado en el material compuesto
mediante el uso de ensayos no destructivos
(END)**

Autor:

María Teresa Alcalde Cano

Tutores:

Elena Correa Montoto (Profesora Contratada Doctora)

Jesús Justo Estebaranz (Profesor Ayudante Doctor)

Dep. de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Agradecimientos

Al departamento, el que con su docencia en diferentes materias, ha motivado la curiosidad y el interés acerca de este fascinante mundo que es el del material compuesto. Por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto en colaboración con una empresa externa y así introducir el valor añadido que suponen los ensayos no destructivos.

Al grupo de investigación y todo el personal del laboratorio que con su experiencia nos han ayudado a la fabricación de los laminados, facilitando en todo lo posible las tareas que había que realizar hasta conseguir el material resultante.

A Jesús y Elena, por su colaboración y por haber hecho posible la realización y finalización de este proyecto a distancia, respondiendo siempre a las dudas y ayudando a lograr el resultado final que se plasma en este documento.

A Tecnatom, por haberme dado la oportunidad más allá de las prácticas, de aprender y ganar experiencia y así también poder realizar los ensayos con sus equipos e instalaciones. En especial a Esmeralda y Cova, que con su ayuda, apoyo y motivación han sido un pilar fundamental para alcanzar este resultado.

A Álvaro, por aguantar conmigo días buenos y malos, cuando no había avances y no se veía el final, y haber intentado siempre sacar lo mejor de mí con una sonrisa.

A mi familia, en especial mis padres y mi hermano, sin los que no hubiera sido posible ni siquiera pensar en empezar este camino, y gracias a ellos puedo soñar ahora con llegar al final.

A mi gente de la ESI sin los que estos 5 años no hubieran valido de nada, estando siempre ahí para un rato de estudio o para un rato de cervezas, convirtiéndose al final en una segunda familia con la que siempre se puede contar.

Gracias a todos.

Contenido

1. Introducción	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Objetivo.....	2
1.3. Alcance del proyecto.....	3
1.4. Acerca de TECNATOM.....	3
2. Materiales compuestos	6
2.1. Introducción	6
2.2. Fibras.....	9
2.2.1. Propiedades	9
2.2.2. Clasificación.....	9
2.3. Matrices.....	12
2.3.1. Propiedades	12
2.3.2. Clasificación.....	12
2.4. Material utilizado y propiedades	15
3. Fabricación de los laminados	19
3.1. Etapas del proceso de fabricación	20
3.1.1. Corte	20
3.1.2. Apilado y compactación.....	22
3.1.3. Curado	23
3.2. Ciclos de curado	26
4. Ensayos y técnicas de inspección empleadas	30
4.1. Descripción de las técnicas ultrasónicas empleadas.....	30
4.1.1. Ultrasonidos Convencionales	30
4.1.2. Ultrasonidos Phased Array.....	35
4.1.3. Ultrasonidos láser	41
4.2. Descripción de la técnica de termografía	45
5. Resultados y análisis	49
5.1. Ultrasonidos Convencionales	49
5.1.1. Calibración	49
5.1.2. Atenuación.....	53
5.2. Ultrasonidos Phased Array.....	55
5.2.1. Desarrollo del ensayo	55
5.2.2. Resultados en amplitud	56
5.2.3. Resultados en recorrido del sonido.....	58

5.2.4.	Análisis estadístico de los resultados en amplitud.....	63
5.3.	Ultrasonidos láser.....	65
5.3.1.	Desarrollo del ensayo	65
5.3.2.	Evaluación de los C-Scan.....	66
5.3.3.	Análisis estadístico	70
5.4.	Termografía.....	72
5.4.1.	Desarrollo del ensayo	72
5.4.2.	Evaluación	73
5.5.	Comparación con el grado de curado	79
6.	Conclusiones y trabajos futuros	84
7.	Bibliografía y referencias	87

Lista de imágenes

Imagen 1: Sistema robotizado de inspección (TECNATOM) [3].....	4
Imagen 2: Diagrama de la formación de materiales compuestos [5].....	6
Imagen 3: Gráfica tensión-deformación Comportamiento de fibra, compuesto y matriz [8].....	8
Imagen 4: Diagrama propiedades específicas de las fibras [6]	9
Imagen 5: Formatos comerciales de las fibras	10
Imagen 6: Monómero acrilonitrilo y polímero (poliacrilonitrilo) [10].....	10
Imagen 7: Proceso de obtención de la fibra de carbono [10]	11
Imagen 8: Diagrama TTT (Transformación Tiempo Temperatura) de un material termoestable [11].....	13
Imagen 9: Material empleado en el proyecto	15
Imagen 10: Gelificación resina epoxi M21	16
Imagen 11: Material disponible en el laboratorio.....	16
Imagen 12: Esquema de distribución de los defectos artificiales (cotas en mm)	19
Imagen 13: Defectos artificiales de Nylon	20
Imagen 14: Material disponible.....	21
Imagen 15: Proceso de corte del rollo de material	21
Imagen 16: Láminas cuadradas ya cortadas	22
Imagen 17: Apilado de dos láminas	22
Imagen 18: Precompactación en bolsa de vacío.....	23
Imagen 19: Esquema de preparación de una bolsa de vacío genérica [13]	23
Imagen 20: Preparación del laminado. Láminas de nylon (anti-adherencia)	24
Imagen 21: Tejido aireador, tomas de vacío y sellante	25
Imagen 22: Bolsa de vacío preparada para entrar en el autoclave.....	26
Imagen 23: Evolución de la temperatura en cada uno de los ciclos	27
Imagen 24: a) superficie cara herramienta b) superficie cara bolsa	28
Imagen 25: Efecto piezoeléctrico	31
Imagen 26: Ondas longitudinales y transversales	31
Imagen 27: Ley de Snell.....	32
Imagen 28: Campo acústico: cercano y lejano [14]	33
Imagen 29: A-Scan típicos de una pieza con defecto.....	34
Imagen 30: Configuraciones de inspección.....	34
Imagen 31: Equipo de inspección manual y palpador utilizados	35
Imagen 32: Apertura efectiva del haz ultrasónico [14]	36
Imagen 33: Aplicación phased array: barridos electrónicos [14]	36
Imagen 35: Secuencia de leyes focales para barrido lineal [14].....	37
Imagen 34: Método de focalización mediante leyes focales [15].....	37
Imagen 36: Configuraciones phased array [14].....	38
Imagen 37: Configuración array utilizado.....	38
Imagen 38: Insertos artificiales detectados.....	39
Imagen 39: Mesa de inspección automática	40
Imagen 40: Módulos de electrónica	40
Imagen 41: Penetración del láser en función de la longitud de onda	42
Imagen 42: Efecto Doppler en la superficie de la pieza	42
Imagen 43: Esquema del sistema láser utilizado.....	43

Imagen 44: Excitación óptica del material	46
Imagen 45: Posición relativa de los elementos de inspección.....	46
Imagen 46: Cámara de termografía	47
Imagen 47: Lámparas halógenas utilizadas	47
Imagen 48: Acabado superficial aumentado (corte transversal)	49
Imagen 49: Señal ultrasónica recibida del material.....	50
Imagen 50: Comparación de velocidades de propagación	51
Imagen 51: Comparación de las velocidades de propagación en detalle.....	51
Imagen 52: Coeficientes de variación de las velocidades medidas	52
Imagen 53: Señal de emisión sin contacto	53
Imagen 54: Probeta en la cuba de inspección automática	55
Imagen 55: Escala de colores empleada en recorrido del sonido	58
Imagen 56: B-Scan de cada uno de los defectos	61
Imagen 57: A-Scan señal en zona sana y en defectos	62
Imagen 58: Amplitud de la señal ultrasónica en diferentes zonas de las probetas	63
Imagen 59: Coef. de variación de la señal ultrasónica en diferentes zonas de las probetas	64
Imagen 60: Configuración ensayo láser UT	65
Imagen 61: C-Scan en amplitud desde cara rugosa.....	66
Imagen 62: Detección de defectos por caída de eco de fondo en amplitud y recorrido del sonido.....	67
Imagen 63: Configuración de puertas en el interior del material	68
Imagen 64: C-Scan de amplitud desde cara lisa.....	68
Imagen 65: C-Scan de amplitud después de aplicar la corrección	69
Imagen 66: Detección de defectos por caída de eco de fondo.....	69
Imagen 68: Amplitud de la señal ultrasónica láser.....	70
Imagen 67: Configuración de puertas en el interior del material	70
Imagen 69: Coef. de variación de la señal ultrasónica láser.....	71
Imagen 70: Ciclo de excitación térmica	72
Imagen 71: Curva de calentamiento (zona sana).....	76
Imagen 72: Curva de calentamiento (zona sana y defecto)	76
Imagen 73: Detalles de las zonas de cambio de tendencia	78

Lista de tablas

Tabla 1: Principales material primas utilizadas actualmente [6]	8
Tabla 2: Propiedades mecánicas de las fibras más utilizadas [9]	9
Tabla 3: Propiedades de diferentes tipos de fibra de carbono	11
Tabla 4: Clasificación del material compuesto según el origen de la matriz [8].....	12
Tabla 5: Principales propiedades del material empleado [12].....	17
Tabla 6: Configuración de los diferentes ciclos de curado aplicados.....	26
Tabla 7: Velocidades de propagación medidas	50
Tabla 8: Resultados análisis estadístico	50
Tabla 9: Atenuación en los diferentes laminados.....	54
Tabla 10: C-Scan de amplitud obtenido de las superficies lisas.....	56
Tabla 11: C-Scan de amplitud obtenido de las superficies rugosas.....	57
Tabla 12: C-Scan en recorrido del sonido obtenido de las superficies lisas.....	59
Tabla 13: C-Scan en recorrido del sonido obtenido de las superficies rugosas.....	60
Tabla 14: Medida y posicionamiento de los defectos mediante señal ultrasónica	61
Tabla 15: Mapa de temperaturas (inspección por cara lisa)	73
Tabla 16: Mapa de temperaturas (inspección por cara rugosa)	74
Tabla 17: Perfiles de temperatura en zona sana y defecto.....	75
Tabla 18: Valores del grado de curado de los materiales	79

1

Introducción

1. Introducción

En este proyecto se ha trabajado en colaboración tanto con la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla (Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales) como con la empresa Tecnatom. Ambas instituciones han aportado materiales, instalaciones y conocimientos para poder desarrollar los trabajos de investigación sobre los diferentes ciclos de curado del material compuesto.

1.1. Antecedentes

La idea de la realización de este proyecto cuyo objetivo es la “determinación de la influencia de temperatura y tiempo de curado en el material compuesto mediante el uso de ensayos no destructivos (END)” surge con la intención de continuar la línea investigación de otros trabajos basados en el estudio del efecto de las tensiones residuales de curado sobre el comportamiento mecánico del material compuesto.

En los estudios previos se ha analizado como las diferencias de coeficiente de dilatación entre fibra y matriz provocan ciertas tensiones residuales tras el enfriamiento del material después del proceso de curado [1]. Algunos autores han estudiado la influencia del tiempo de curado, comparado la resistencia a tracción y a cortadura entre diferentes ciclos o analizado el crecimiento de grietas desde la interfaz fibra-matriz hasta el interior de la matriz. Las conclusiones de estos trabajos, tanto numéricos como experimentales ponen de manifiesto que estas tensiones residuales tienen un efecto protector en la interfaz fibra-matriz, aumentando la resistencia de ésta. Este efecto beneficioso es causado por un mayor coeficiente de dilatación de la resina en comparación con el valor de la fibra que al contraerse durante el enfriamiento induce tensiones de compresión transversales en la fibra.

Para alcanzar dichas conclusiones, en los casos experimentales se emplearon diferentes ciclos de curado de material, pero garantizando el mismo grado de curado, para poder observar el efecto de diferentes niveles de tensión residual. Estudiando la tasa de liberación de energía en la propagación de grietas sobre la interfaz fibra-matriz de los diferentes materiales, se obtuvo que cuanto mayor es el gradiente térmico tras el curado, mayores son estas tensiones, y menor es la tasa de liberación de energía de crecimiento de grietas, lo que tienen asociado un aumento de la resistencia mecánica del material.

Conociendo este efecto positivo en el material, con este proyecto se pretenden identificar variaciones en el material que puedan estar causadas por este nivel de tensiones de curado a través de ensayos no destructivos.

1.2. Objetivo

El objetivo principal de este proyecto consiste en estudiar el efecto del ciclo de curado, variando ciertos parámetros como temperatura y duración del mismo, en las propiedades físicas del material compuesto. Se busca identificar las variaciones en el material observadas a través de técnicas no destructivas con las variaciones en las propiedades mecánicas, estudiadas en un proyecto paralelo a éste [2].

La ventaja de las técnicas no destructivas frente a las destructivas a nivel de producción industrial es eliminar el gasto excesivo de material y la necesidad de tener que generar probetas de ensayos destructivos a la vez que se fabrican los componentes, pudiendo inspeccionar éstos directamente realizando ensayos no destructivos. A nivel de laboratorio también presentan la ventaja de que el material no necesita volver a ser procesado para cortar probetas de las medidas necesarias o añadir tacones de fibra de vidrio en los extremos (necesario por ejemplo para los ensayos de tracción).

Para alcanzar este objetivo se fabricarán diferentes laminados con distintos ciclos de curado, que se configurarán a diferentes temperaturas y duración, para dar lugar a materiales con propiedades físicas diferenciables. Posteriormente, estos laminados serán ensayados utilizando técnicas no destructivas, como ultrasonidos y termografía, y se obtendrá una correlación y comparación de los resultados con el material curado bajo el ciclo de referencia. Las técnicas aplicadas se basan en la propagación de ondas en el material: ondas sónicas de presión de alta frecuencia en el caso de los ultrasonidos y ondas de energía térmica en el caso de la termografía. Más tarde estos datos podrán ser comparados con los resultados de ensayos mecánicos que determinen la resistencia y rigidez de los laminados y principalmente con el grado de curado del material.

1.3. Alcance del proyecto

El contenido del documento está estructurado en cuatro bloques principales (capítulos 2, 3, 4 y 5).

En el primero de estos bloques se ofrece información acerca del material objeto de este proyecto. Principales aspectos de los materiales compuestos en general y características propias del material concreto empleado en estos trabajos son descritos en los diferentes subapartados.

Más adelante será descrito el proceso de fabricación de los laminados, desde el corte del material, hasta el curado en el autoclave.

A lo largo del tercer bloque de contenido son descritos los ensayos no destructivos empleados para la caracterización y comparación de los diferentes laminados con aquel que ha sido fabricado con el ciclo de referencia. Estos ensayos comprenden diferentes aplicaciones de ultrasonidos, como es el uso de palpadores convencionales, palpadores phased array y la novedosa técnica de ultrasonidos generados por láser. También ha sido empleada la termografía infrarroja para observar el comportamiento del material.

Finalmente serán presentados y analizados los resultados de la aplicación de las diferentes técnicas con el objetivo de sacar conclusiones que puedan relacionar estos datos con las distintas temperaturas de ciclo de curado aplicadas a los laminados.

1.4. Acerca de TECNATOM

Este proyecto se ha desarrollado durante la estancia de prácticas en Tecnatom, gracias a la disponibilidad de sus equipos, instalaciones y experiencia de las personas que han colaborado, tanto técnica como intelectualmente.

Tecnatom es un grupo empresarial de ingeniería de origen español, especializado en garantizar la operación y los altos niveles de seguridad en la industria, especialmente en

las centrales nucleares. Las actividades principales de Tecnatom se centran en la inspección de componentes mediante ensayos no destructivos, la fabricación de equipos de inspección, el entrenamiento del personal de operación de las plantas y el suministro de servicios de apoyo a operación de las plantas.

Desde hace ya unos años Tecnatom es un referente nacional e internacional en la aplicación de END a cualquier proceso industrial en el que se requieran altos niveles de particularización, automatización o la aplicación de las tecnologías de inspección avanzadas y en particular a aquellos sectores industriales donde la seguridad y el control de la calidad intensivo suponen un requisito y un valor añadido inexcusable.

La participación en actividades del sector aeroespacial ha posibilitado la incorporación de experiencias en el ensayo de materiales con fibra de carbono, en muy diversas configuraciones, y componentes fabricados con titanio mediante conformado superplástico.

En este sentido, Tecnatom realiza en el sector aeronáutico todas las actividades que corresponden a la ingeniería de inspección, cuyos resultados finales son los sistemas automáticos de inspección, como el de la imagen 1, y los correspondientes procedimientos de inspección, diseñados para cumplir con las especificaciones requeridas por el cliente.



Imagen 1: Sistema robotizado de inspección (TECNATOM) [3]

Es importante señalar que los componentes aeronáuticos se caracterizan por sus geometrías alabeadas y complejas, en contraste con otros componentes de la industria que, en general, responden a cuerpos de revolución. En consecuencia, el desarrollo de programas informáticos que permitan ejecutar trayectorias complejas de los ejes de inspección, así como el desarrollo de los controladores electrónicos que respondan a las mismas, es un aspecto fundamental en el desarrollo tecnológico asociado a estos componentes aeronáuticos. [3]

2

Materiales Compuestos

2. Materiales compuestos

2.1. Introducción

Por definición [4], un material compuesto es una combinación a escala macroscópica de dos o más materiales, con interfaces de separación entre ellos, que se unen para formar un nuevo material. El objetivo de crear estos materiales es obtener ciertas propiedades que no pueden ser alcanzadas aisladamente por los constituyentes. En la imagen 2 se representa esquemáticamente el proceso de definición de los materiales compuestos.

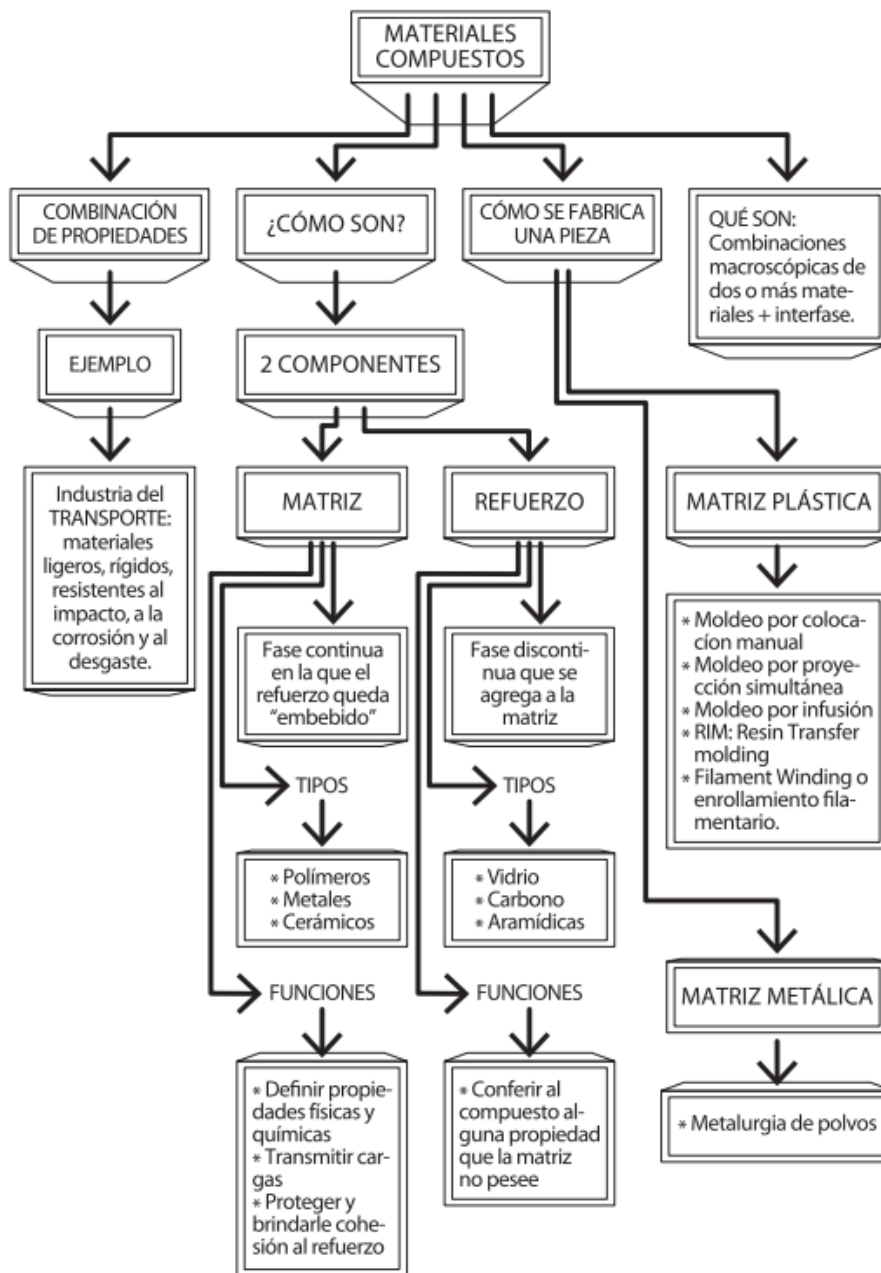


Imagen 2: Diagrama de la formación de materiales compuestos [5]

En la naturaleza existen ejemplos de asociaciones de materiales que trabajan en conjunto para mejorar sus propiedades: músculos, madera, bambú... En este documento al hablar de material compuesto se está hablando de un producto fabricado por la mano del hombre.

Aunque la fibra de vidrio ya era conocida por los egipcios, hasta el siglo XX no comienza la historia de los materiales compuestos. Fue el químico belga Leo Baekeland, en 1907, quien obtuvo por primera vez una resina termoestable a la que dio su nombre (bakelita). Durante las 3 primeras décadas del siglo, se incorporaron a la producción industrial el resto de matrices: fenólicas, poliéster, viniléster y epoxis.

Los compuestos se desarrollan en paralelo a las matrices, ya que las fibras ya se conocían. Las primeras combinaciones fueron fibras de vidrio con matrices fenólicas, empleadas en aplicaciones eléctricas y embarcaciones. Este fue el comienzo de la industria FRP (Fiber Reinforced Polymers) como se conoce hoy en día.

Como es lógico, el primer proceso de fabricación era el moldeo manual. En 1930 se fabricaban gran número de estructuras que no podían soportar elevadas sollicitaciones mecánicas pero en cambio aportaban soluciones a geometrías complejas, problemas de peso estructural o aislamiento eléctrico.

Los mayores avances tecnológicos y en el campo de los materiales se produjeron durante la 2ª Guerra Mundial. Siempre se utilizaban buscando un aligeramiento del peso, pero también se descubrieron otras propiedades de la fibra de vidrio como por ejemplo la transparencia a las radiofrecuencias empleadas en los radares electrónicos.

Una vez finalizada la guerra, se quisieron llevar estos avances en el campo militar a otros mercados como el naval. En esta época se desarrollan procesos industriales, muchas variaciones de los utilizados con termoplásticos, y aparecen las primeras patentes de métodos automatizados, como la pultrusión.

En los años 60-70 comienzan a desarrollarse fibras avanzadas (carbono, boro y aramida) y a mejorarse las resinas. En aviación, campo en el que se requieren elevadas prestaciones, se trabajaba a partir de este momento principalmente con compuestos carbono/epoxi y aramida/epoxi, fabricando con preimpregnados y curado en autoclave.

La diferencia de los materiales compuestos empleados en aeronáutica y los utilizados en otros ámbitos como por ejemplo naval o civil, es principalmente la normativa a seguir en fabricación y controles de calidad. [6]

La fibra de carbono de bajo coste y la aparición de nuevos procesos de fácil automatización como RTM y que no necesitan autoclave ha propiciado que el consumo de estos materiales se haya extendido a todos los sectores industriales. El sector de las energías renovables también ha saltado a la industria de los compuestos, con el objetivo de poder desarrollar palas de aerogenerador eficientes.

El futuro de los materiales compuestos está dirigido por la investigación en nano partículas y en la utilización de plásticos reciclados como matrices. Todos los trabajos están enfocados a conseguir materiales más ligeros, fuertes y también con un menor impacto en el entorno. [7]

Existen diferentes tipologías de refuerzos (whiskers, partículas, etc.) pero el uso de las fibras continuas está mucho más extendido. Gran variedad de materias primas (refuerzos y matrices) pueden dar lugar a estos materiales compuestos. Las más utilizadas son las que se muestran en la tabla 1:

FIBRAS	Fibras Cerámicas (Carburo de Silicio, Alúmina)
	Fibras Metálicas
	Fibras Inorgánicas (Carbono, Vidrio, Boro)
	Fibras Orgánicas (Aramida, Polietileno)
MATRICES	Matrices Inorgánicas (Cemento, Geopolímeros, Yeso)
	Matrices Termoeestables (Epoxi, Viniléster, Poliéster, Fenólica, Esteres cianato, Bismaleimidas, Poliimidias, Polieteramida)
	Matrices Termoplásticas (ABS, Polipropileno, Policarbonato, Acetato, PBT, Polietierimida, PET, Nilon, Poliamida, PEEK, PEKK, PAI, PAS)
NÚCLEOS	Nidos de Abeja (Aluminio, Nomex, Polipropileno)
	Espumas (Poliuretano, Poliestireno, PVC)
	Sandwich Tejido 3D, Madera de Balsa
ADHESIVOS	Epoxi, Poliuretano, Acrílicos
RECUBRIMIENTOS	Cerámicos, Fenólicos, Epoxi + Arena, Intumescentes, Mats

Tabla 1: Principales material primas utilizadas actualmente [6]

El comportamiento mecánico del material será una combinación de las propiedades de fibra y matriz. Algunas de estas cualidades, como por ejemplo el módulo de Young, pueden ser calculadas mediante la ley de mezclas. En la imagen 3 se representa la ley de comportamiento de los componentes por separado y del material compuesto conseguido con su combinación.

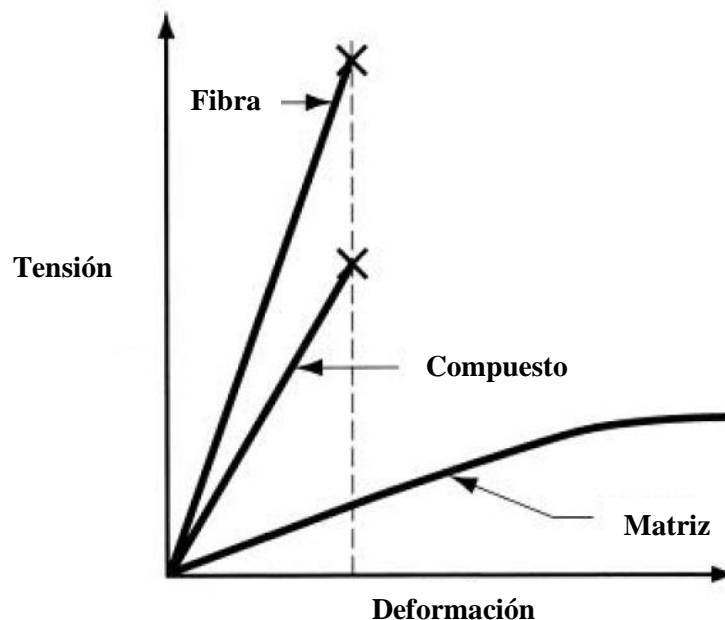


Imagen 3: Gráfica tensión-deformación Comportamiento de fibra, compuesto y matriz [8]

2.2. Fibras

2.2.1. Propiedades

La fibra es el componente de refuerzo del material compuesto. Aporta resistencia mecánica, rigidez y dureza y es determinante para obtener las principales propiedades mecánicas en la dirección de su eje. Las principales propiedades son elevadas resistencia a la tracción y módulo específicos, es decir, en relación a su peso y éstas se representan en la imagen 4. Estas propiedades pueden ser “orientadas” cambiando la dirección de la fibra, por lo que se podrán diseñar materiales específicos para la sollicitación de carga concreta a la que vaya a ser sometido un componente.

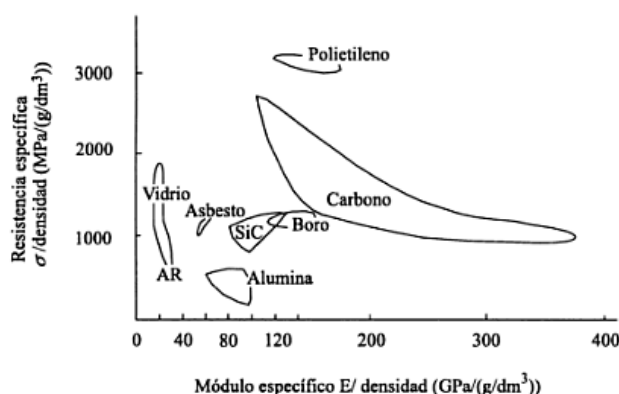


Imagen 4: Diagrama propiedades específicas de las fibras [6]

Diferentes materiales tendrán diferentes propiedades. Por ejemplo, el carbono tiene alto módulo y alta resistencia a la tracción, pero sin embargo dispone de poca deformación en la rotura (rotura frágil). En cambio el vidrio, aunque con menor módulo y resistencia, ofrece algo más de flexibilidad.

2.2.2. Clasificación

Las fibras según su origen se clasifican principalmente en tres grupos: fibras de carbono, inorgánicas (p.e. vidrio) y poliméricas (p.e. aramida o kevlar). Sus principales propiedades mecánicas y valores correspondientes son los que se muestran en la tabla 2:

Tipo de fibra	Densidad (kg/m ³)	Módulo (GPa)	Resistencia a tracción (GPa)	Def. (%)
E-Glass	2.54	72.5	1.72-3.45	2.5
S-Glass	2.49	87	2.53-4.48	2.9
Kevlar 29	1.45	85	2.27-3.80	2.8
Kevlar 49	1.45	117	2.27-3.80	1.8
Carbon (HS)	1.80	227	2.80-5.10	1.1
Carbon (HM)	1.80-1.86	370	1.80	0.5
Carbon (UHM)	1.86-2.10	350-520	1.00-1.75	0.2

Tabla 2: Propiedades mecánicas de las fibras más utilizadas [9]

Se pueden presentar en diferentes formatos en función del proceso de fabricación en el que se vayan a emplear: preregs (con la resina añadida), tejidos, bobinas, etc. Algunos de estos se muestran en la imagen 5:

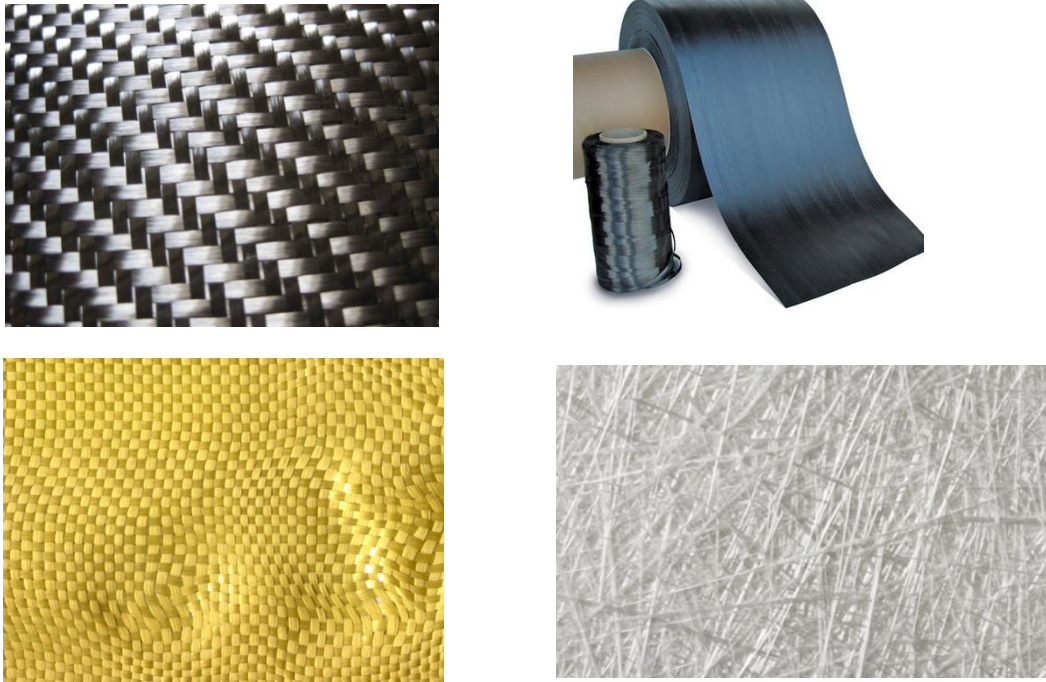


Imagen 5: Formatos comerciales de las fibras

Fibra de carbono

Este material es el que incumbe al actual documento. Actualmente, el precursor más utilizado para obtener las fibras es el poliacrilonitrilo (PAN). Este es un polímero vinílico, formado a partir del monómero acrilonitrilo, representado en la imagen 6.

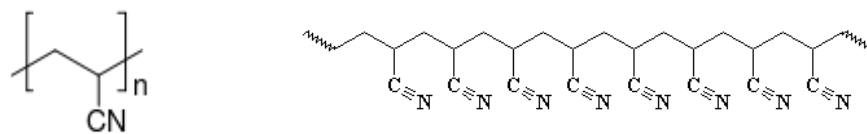


Imagen 6: Monómero acrilonitrilo y polímero (poliacrilonitrilo) [10]

Tras diferentes procesos, mostrados en la imagen 7, de estabilización (para crear más enlaces entre los átomos de carbono), carbonización (para eliminar el nitrógeno e hidrógeno de las moléculas) y grafitización (para obtener la forma cristalina del grafito a partir del carbono) a diferentes temperaturas, se obtienen fibras con las que posteriormente se generará el material compuesto. Los diámetros de estas fibras oscilan entre 5 y 8 μm y sus propiedades dependen de la orientación de los planos de grafito (deben estar paralelos al eje de la fibra). [10]

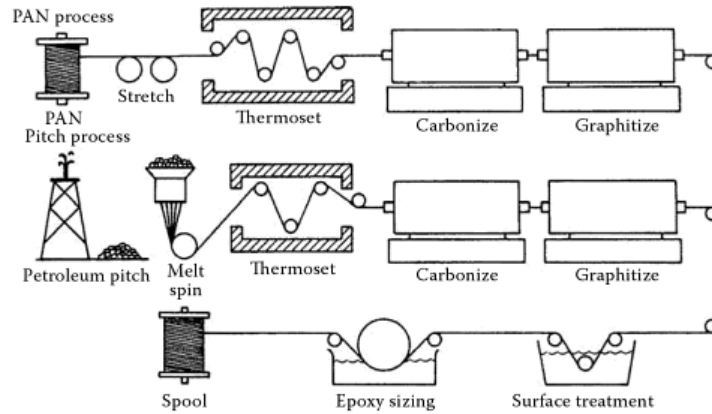


Imagen 7: Proceso de obtención de la fibra de carbono [10]

Las fibras son muy frágiles y sus propiedades están condicionadas por su longitud: cuanto mayor sea esta, mayor probabilidad hay de encontrar un defecto. En la tabla 3 se muestran diferentes valores de las propiedades de las fibras. Las tres últimas columnas son materiales típicos utilizados en aplicaciones aeroespaciales: SM (Standard Modulus), IM (Intermediate Modulus) y HM (High Modulus).

Propiedad	Fibras SM^a	Fibras SM^b	Fibras IM^b	Fibras HM^b
Contenido en carbono (%)	95	95	95	>99
Diámetro de la fibra (μm)	6-8	6-8	5-6	5-8
Densidad (gtm)	1,8	1,8	1,8	1,9
Módulo de Young (GPa)	228	220-241	290-297	345-448
Resistencia a la tracción (MPa)	3800	3450-4830	3450-6200	3450-5520
Alargamiento a la rotura (%)	1,6	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1,0
Resistividad eléctrica ($\mu\text{-cm}$)	1650	1650	1450	900
Conductividad térmica (W/m.K)	20	20	20	50-80

Tabla 3: Propiedades de diferentes tipos de fibra de carbono

2.3. Matrices

2.3.1. Propiedades

Las matrices son el material base a partir del cual, añadiéndole refuerzos de diferentes tipos, se forma el material compuesto. Sus principales funciones son:

- Mantener el refuerzo (fibras generalmente) en la correcta orientación envolviéndolas.
- Proteger a las fibras de daños y de ataques de agentes externos como pudiera ser algún tipo de corrosión.
- Transmitir la carga entre las fibras. Su misión es deformarse y transmitir la carga a las fibras para que éstas sean las que soporten la tensión.
- Controlar las propiedades eléctricas, químicas y comportamiento a alta temperatura del material.

De la matriz también dependerán algunas características como la conformabilidad y el acabado superficial. Bajo cargas de tracción es la fibra la que trabaja, pero bajo compresión, la matriz es la que soporta el esfuerzo al ser la fase continua. También determina la resistencia al impacto y la velocidad de propagación de grietas, tanto en el interior de la matriz como en la interfase de ésta con el refuerzo.

2.3.2. Clasificación

Según el origen de la matriz, los materiales compuestos pueden ser clasificados en tres grandes grupos, como se indica en la tabla 4: MMC (matriz metálica), CMC (matriz cerámica) y PMC (matriz polimérica). Este último grupo es el más utilizado industrialmente.

Matrix phase/Reinforcement Phase	Metal	Ceramic	Polymer
Metal	Powder metallurgy parts – combining immiscible metals	Cermets (ceramic-metal composite)	Brake pads
Ceramic	Cermet, TiC, TiCN Cemented carbides – used in tools Fiber-reinforced metals	SiC reinforced Al2O3 Tool materials	Fiberglass
Polymer			Kevlar fibers in an epoxy matrix
Elemental (Carbon, Boron, etc.)	Fiber reinforced metals Auto parts aerospace		Rubber with carbon (tires) Boron, Carbon reinforced plastics

MMC's
Metal Matrix Composites

CMC's
Ceramic Matrix Comp's.

PMC's
Polymer Matrix Comp's

Tabla 4: Clasificación del material compuesto según el origen de la matriz [8]

La matriz polimérica también puede ser clasificada en diferentes tipos según el tipo de polímero: termoplásticos, elastómeros y termoestables. Estos últimos son los más utilizados en la actualidad pero la investigación se dirige hacia el campo de los termoplásticos ya que este tipo de polímero se puede reciclar.

Epoxi

Este es el material que se suele utilizar en combinación con la fibra de carbono para obtener un material compuesto de altas prestaciones. Esta matriz está incluida en el grupo de termoestables, por lo que una vez terminado el proceso de curado y consecuente polimerización, se genera en el material una red entrecruzada tridimensional que aporta resistencia al material.

Las resinas epoxi se obtienen a partir de otros polímeros como fenol, acetona y propileno combinados y sometidos a ciertas reacciones. El posterior proceso de curado de la resina resultante dependerá principalmente de dos parámetros: tiempo y temperatura.

Estos dos valores son los que se han variado en este proyecto para aplicar diferentes ciclos de curado al material. En función de estos, el curado del material llegará a realizarse por completo o, si son demasiado pequeños, puede que no llegue a crearse la red tridimensional completa y que el material solo esté en estado “gel”. La imagen 8 muestra las transformaciones de un polímero termoestable en función de la temperatura y tiempo con los que se realice el curado.

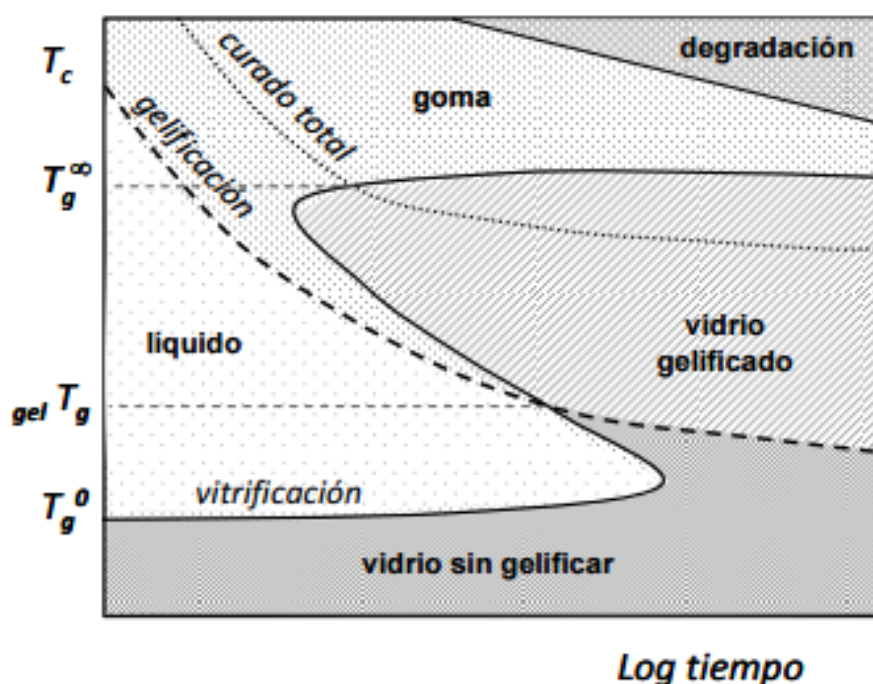


Imagen 8: Diagrama TTT (Transformación Tiempo Temperatura) de un material termoestable [11]

Las principales regiones de este diagrama (y transformaciones del material) están marcadas por rangos de temperatura:

- Por debajo de T_{g0} : la resina se encuentra en estado sólido. Estado en el que se encuentran los pre polímeros comercializados o la resina de los prepregs por ejemplo. Temperatura límite de almacenaje.
- Entre T_g^0 y $T_{g^{gel}}$: El polímero se encuentra en estado líquido. Esta zona se utiliza para dar forma al material.

- Entre T_{ggel} y T_g : se produce la polimerización de la resina. La reacción principal de esta región es la gelificación. En este proceso irreversible las cadenas poliméricas empiezan a unirse y a formar retículos. El material alcanza un estado gomoso en el que la viscosidad aumentará con la concentración de retículos.
Para poder alcanzar el material sólido válido, tiene que ocurrir después la vitrificación. Esta transformación es reversible. El gel elástico gomoso alcanzado con el proceso anterior alcanza un estado vítreo cuando la temperatura coincide con la de curado. Esta última parte del proceso es muy lenta (nótese la escala logarítmica en el eje de tiempo).
- Por encima de T_g : se tiene un material gomoso que no llega nunca a vitrificar.

2.4. Material utilizado y propiedades

Como se puede apreciar en la imagen 9, el fabricante del material empleado en la fabricación de los laminados de este proyecto es HEXCEL [12], [13].

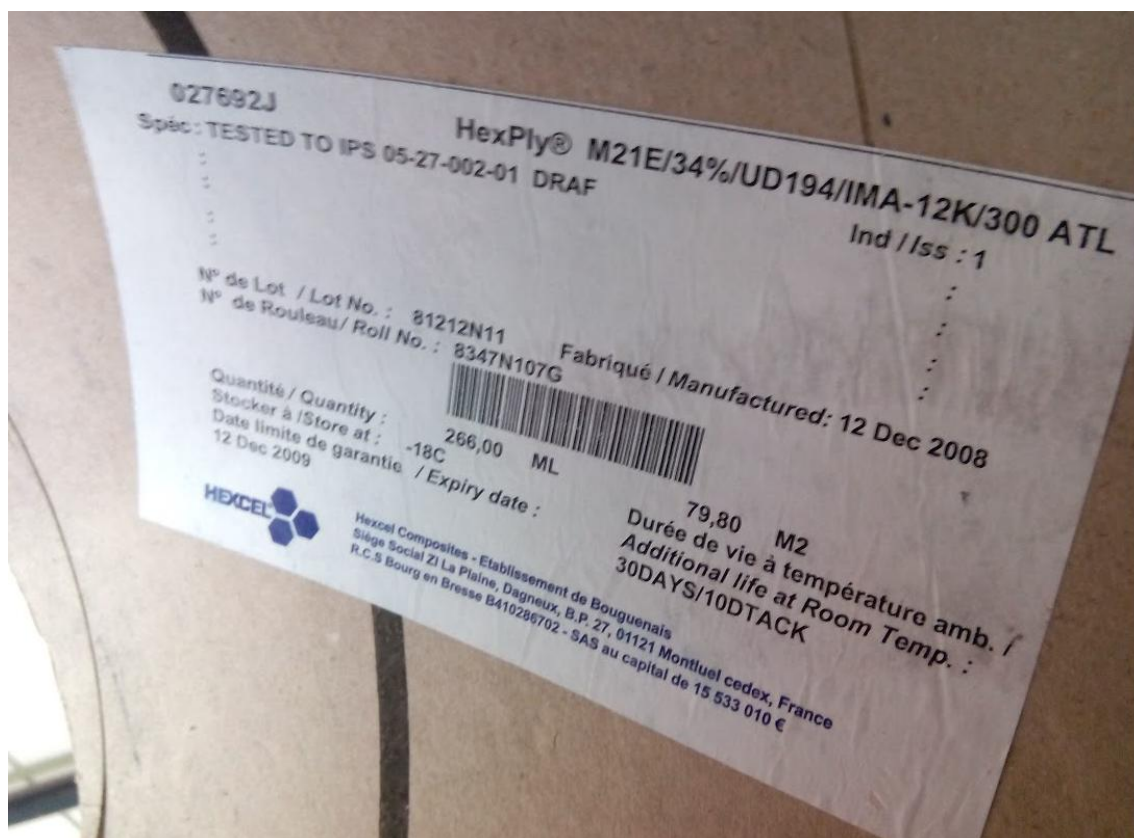


Imagen 9: Material empleado en el proyecto

Este mismo material en concreto es empleado en la fabricación de estructuras primarias del A350-xB como largueros y pieles del ala, secciones del fuselaje y el cajón central en el que se encastran las alas al fuselaje.

La nomenclatura de este material es la siguiente:

HexPly® M21E/34%/UD194/IMA-12K/300 ATL

A continuación se describe el significado de cada una de las partes de la nomenclatura:

- **M21**: es el tipo de resina impregnada en la fibra de carbono. Es una resina epoxi de altas prestaciones utilizada en estructuras aeroespaciales primarias. Se proporciona impregnada en tejidos o con fibra unidireccional, de vidrio o carbono. Sus principales propiedades son:
 - La temperatura de curado definida por el fabricante son 180°C y está diseñada para poder operar en un entorno de hasta 121°C. Puede llegar a mantener sus características hasta los 150°C.
 - Alta tenacidad y tolerancia al daño producido por impactos de alta energía.
 - Alta tensión de compresión residual tras impacto (impide la propagación de grietas).

- Buena transmisión de las propiedades de las fibras. Trabaja especialmente bien con fibra de carbono de módulo intermedio.
- Poco deterioro en el almacenaje.

Utilizando procesos de curado en autoclave o en prensa se obtienen las mejores características mecánicas de esta resina. El proceso de gelificación sigue la siguiente ley mostrada en la imagen 10:

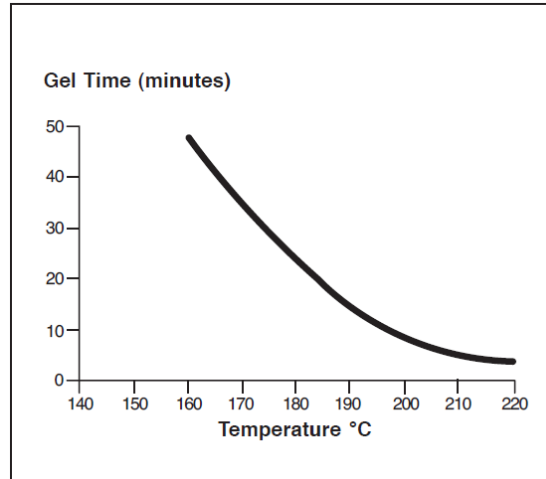


Imagen 10: Gelificación resina epoxi M21

- **34%**: contenido en peso de resina
- **UD**: la fibra se presenta de manera unidireccional
- **194**: peso de la fibra (en gramos por metro cuadrado)
- **IMA**: tipo de fibra (Intermediate Modulus)
- **12K**: TOW (Thousands of filaments). Relacionado con el diámetro de la fibra.
- **300 ATL**: 300 mm de anchura de la cinta, proporcionada principalmente para utilizar en procesos de fabricación ATL (Automated Tape Laying)

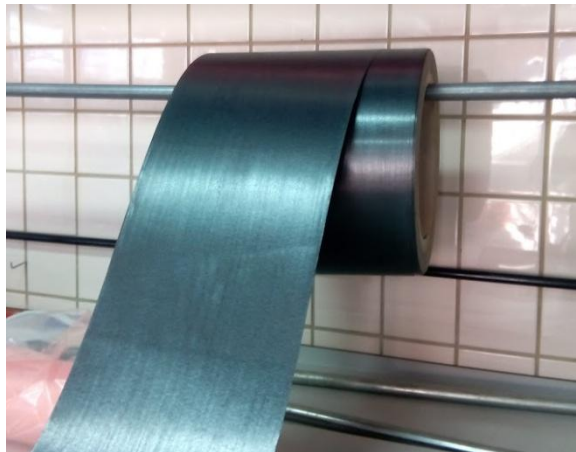


Imagen 11: Material disponible en el laboratorio

En la tabla 5 se muestran las principales propiedades mecánicas del material empleado (marcado en amarillo) según los ensayos realizados por el fabricante. Estos valores son comparados también en la tabla con los de otros materiales de la misma serie.

Physical Properties	Units	M21/34%/UD194/ IM7-12K	M21/34%/ UD194/ AS7-12K	M21/34%/ UD194/ IMA-12K
Fiber Weave/UD Fiber Mass	g/m ²	IM7 UD 194	AS7 UD 194	IMA UD 194
Nominal Prepreg Mass	g/m ²	294	294	294
Theoretical Calculated Cured Ply Thickness	mm (inch)	0.184 (0.0072)	0.184 (0.0072)	0.184 (0.0072)
Theoretical Calculated Fiber Volume	%	59.2	58.9	59.2
Resin Density	g/cm ³ (lbs/ft ³)	1.28 (79.9)	1.28 (79.9)	
Fiber Density	g/cm ³ (lbs/ft ³)	1.78 (111.1)	1.79 (111.7)	1.78 (111.1)
Theoretical Calculated Laminate Density	g/cm ³ (lbs/ft ³)	1.58 (98.6)	1.58 (98.6)	1.58 (98.6)

Mechanical Properties	Units	Temp °C (°F) dry	M21/34%/ UD194/ IM7-12K	M21/34%/ UD194/ AS7-12K	M21/34%/ UD194/ IMA-12K
Test Standards			U.S. Standards	European standards	
Glass Transition Temperature	°C (°F)	-	195 (383)	195 (383)	
Method			ASTM E1640	EN 6032 – DMA extrapolated onset E'	
Tension Strength	MPa (ksi)	23 (73)	2860 (415)	2350 (341)	3050 (442)
Tension Modulus	GPa (msi)	23 (73)	160 (23.2)	148 (21.5)	178 (25.8)
Method			ASTM D3039 (1)	EN 2561 B	
Compression Strength	MPa (ksi)	23 (73)	1790 (260)	1560 (226)	1500 (218)
Compression Modulus	GPa (msi)	23 (73)	148 (21.4)	123 (17.8)	146 (21.2)
Method			ASTM D695 (2)	EN 2850 B	
ILSS	MPa (ksi)	23 (73)	110 (15.9)	114 (16.5)	97 (14.1)
Method			ASTM 2344	EN 2563	
In-plane Shear Strength	MPa (ksi)	23 (73)	-	109 (15.8)	94 (13.6)
In-plane Shear Modulus	GPa (msi)	23 (73)	4.6 (0.67)	5.2 (0.75)	5.2 (0.75)
Method			ASTM D3039 (3)	EN 6031	
Open Hole Tension	MPa (ksi)	23 (73)	495 (72)	365 (53)	510 (74)
Method – (25/50/25) (gross section)			ASTM 5766 (5)	EN 6035 (4)	
Open Hole Compression	MPa (ksi)	23 (73)	303 (44)	315 (46)	305 (44)
Method – (25/50/25) (gross section)			ASTM D6484	EN 6036 (6)	
CAI @ 30.5J	MPa (ksi)	23 (73)	298 (43)	-	-
CAI @ 30.0J	MPa (ksi)	23 (73)	-	238 (34.5)	219 (31.8)
Method – (25/50/25)			ASTM D7136-D7137	EN 6038	

- (1) Specimen dimensions: 12.7mm wide and 127mm free length (0.5" wide and 5" free length)
(2) Specimen dimensions: 80x12.7mm (3.1"x0.5")
(3) Specimen dimensions: 12.7mm wide and 127mm free length (+45/-45)s (0.5" wide and 5" free length)
(4) Specimen dimensions: 280x32 mm (11"x1.3")
(5) Specimen dimensions: 305x38mm and 6.35mm hole diameter (12"x1.5" and 0.25" hole diameter)
(6) Specimen dimensions: 132x32mm and 32 mm free length (5.2"x1.3" and 1.3" free length)

Tabla 5: Principales propiedades del material empleado [12]

3

Proceso de fabricación

3. Fabricación de los laminados

El proceso de fabricación de los diferentes laminados ha sido el mismo: Apilado manual de las diferentes capas y posterior curado en autoclave con bolsa de vacío, en el que se introducirán por separado los laminados para poder aplicar los diferentes ciclos.

Entre las láminas, a diferentes profundidades, se introducirán defectos artificiales, cuadrados de nylon de 10x10 mm que serán útiles para probar la viabilidad de la técnica de inspección ultrasónica que se realizará posteriormente. En la imagen 12 se muestra un esquema de la distribución de dichos defectos sobre el laminado.

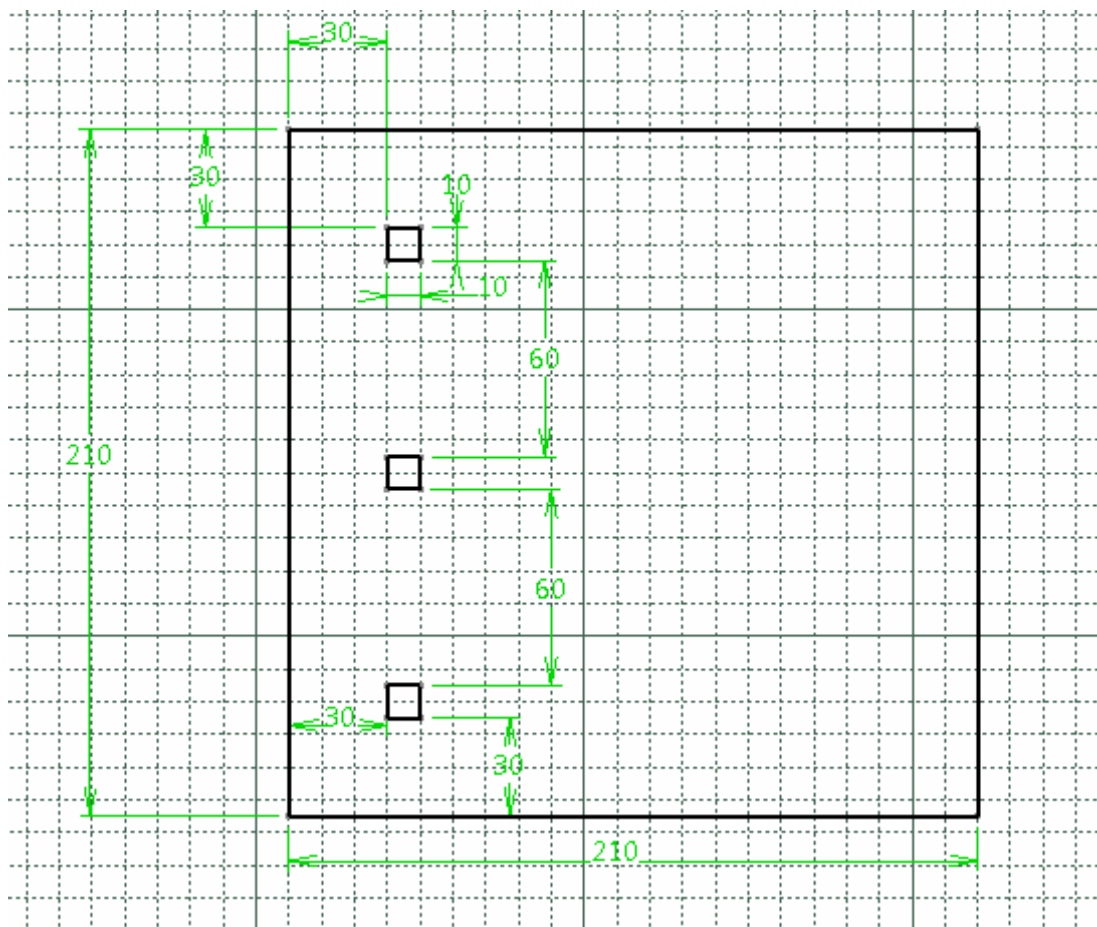


Imagen 12: Esquema de distribución de los defectos artificiales (cotas en mm)

El laminado en total tendrá un espesor de 10 láminas, de 0.2 mm de espesor aproximado cada uno, quedando al final del proceso laminados de 2 mm de grosor.

Los defectos artificiales introducidos en el material, como los de la imagen 13, siguen la siguiente configuración: el defecto que aparece más abajo en la imagen está situado entre las capas 1 y 2 (siendo 1 la que está más alejada de la superficie desde la que se observa, es decir, la lámina que está más abajo). El defecto central se encuentra entre las capas 5 y 6, es decir, en el centro del espesor del laminado. Por último el defecto de arriba se encuentra entre las capas 9 y 10, más cercano a la superficie de arriba.

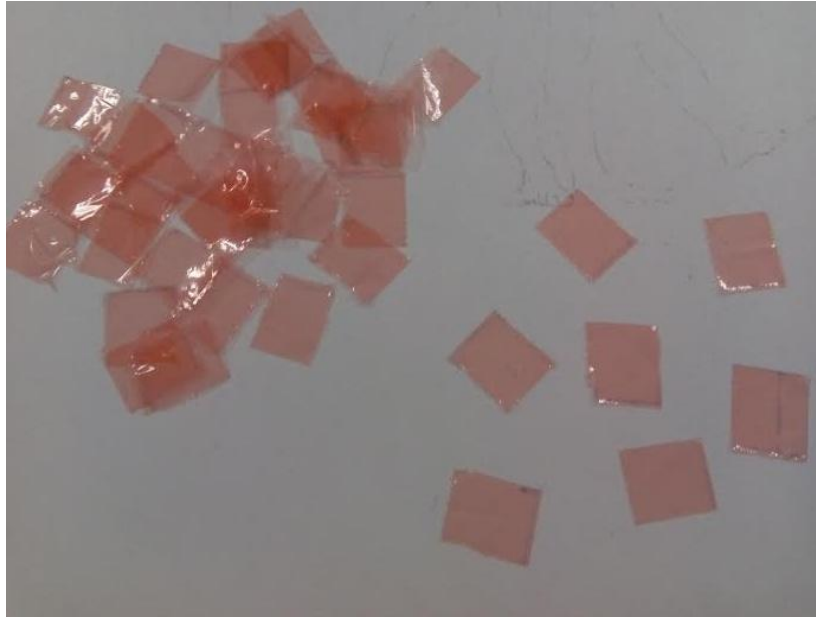


Imagen 13: Defectos artificiales de Nylon

3.1. Etapas del proceso de fabricación

Se fabricarán a la vez los laminados necesarios para este proyecto de caracterización con técnicas no destructivas y también los que se ensayarán con técnicas destructivas para caracterizar mecánicamente cada material. Los laminados sometidos a ensayos destructivos serán iguales en dimensiones pero no llevarán los defectos artificiales, ya que estos podrían actuar como concentradores de tensión o debilitar el material en esa área. Se fabrican por duplicado para poder ensayar el mismo ciclo de curado tanto por ambas técnicas.

El proceso de apilado manual de las láminas de material consta de diferentes fases que serán descritas a continuación con más detalle.

3.1.1. Corte

La primera operación que hay que realizar es el corte del material para obtener láminas de las dimensiones requeridas. El material disponible ha sido proporcionado en forma de rollo de fibra continua unidireccional (imagen 14).

La herramienta utilizada para el corte ha sido un cúter, elegido por la facilidad de sustituir la cuchilla, ya que esta se deteriora con los sucesivos cortes en el material. Este deterioro se origina porque los cortes que hay que realizar son perpendiculares a la dirección de las fibras, y debido a la resistencia y dureza de éstas, se desgasta la hoja de corte.

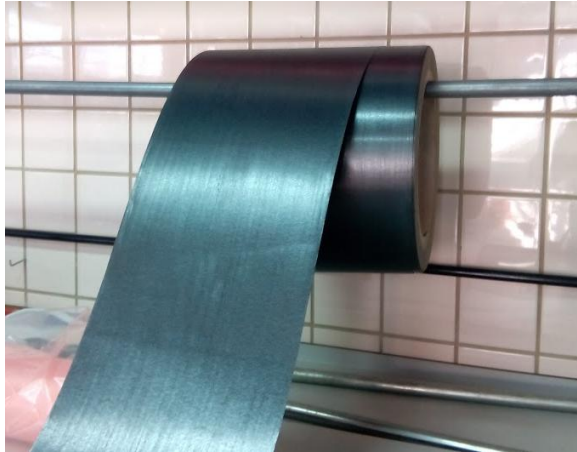


Imagen 14: Material disponible

Primero se realizarán cortes transversales a la dirección de la fibra cada 210 mm, tamaño elegido para el laminado. Con esta operación se obtienen rectángulos de 210x300 mm (imagen 15), siendo esta última dimensión la anchura del rollo. La siguiente operación es eliminar los 90 mm que sobran para obtener el cuadrado final necesario. Este corte es sencillo ya que al ser en la misma dirección de la fibra lo que se corta es la resina, sin curar todavía, que no opone apenas resistencia al corte. Las marcas necesarias para realizar los cortes se harán con lápiz acuarelable. Se utiliza este material porque el posterior proceso de curado en autoclave eliminará los posibles residuos que queden.



Imagen 15: Proceso de corte del rollo de material

Se tendrán que realizar suficientes cortes para poder completar los diferentes laminados: 7 ciclos de curado diferentes más un laminado sin curar son los que se van a emplear en este proyecto. Con 10 láminas por panel, en total hará falta cortar 80 cuadrados de 210x210 mm (imagen 16).

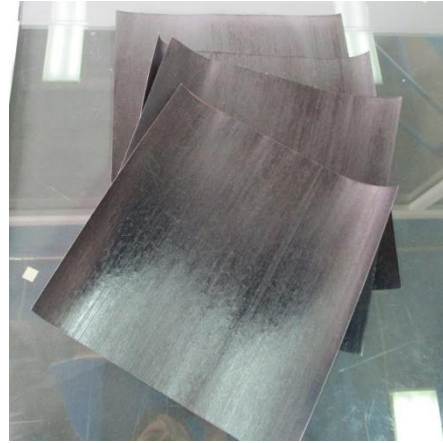
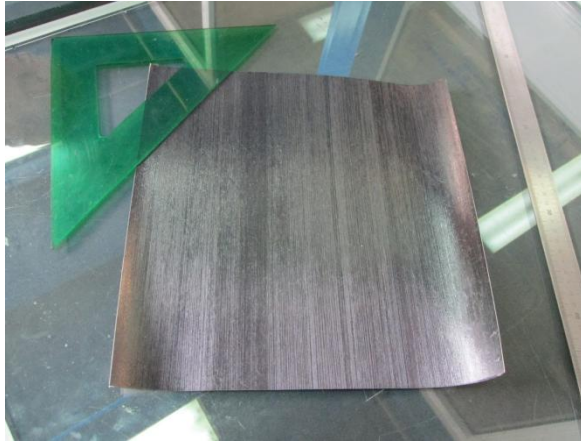


Imagen 16: Láminas cuadradas ya cortadas

3.1.2. Apilado y compactación

La siguiente etapa del proceso de fabricación es el apilado de las láminas. Esta operación consiste en unir las láminas que se han cortado con anterioridad para formar el laminado final. Como se ha comentado previamente, cada laminado tiene 10 láminas. Éstas se irán pegando de dos en dos con la ayuda de una espátula de teflón (para no dañar el material) y con un secador de aire caliente (para activar ligeramente la resina y que haga de adhesivo). Este proceso descrito se muestra en la imagen 17.

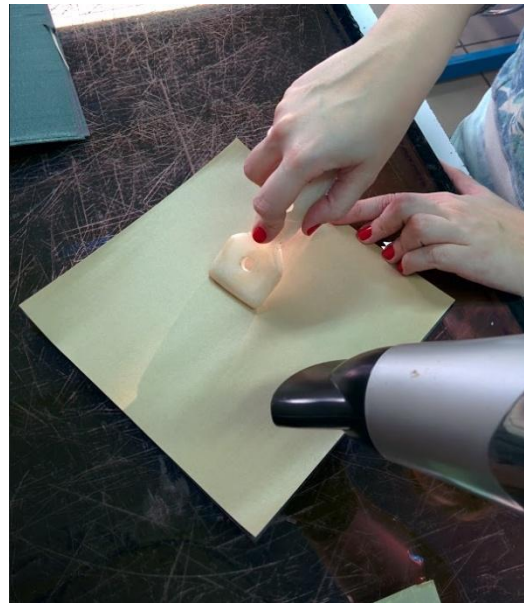


Imagen 17: Apilado de dos láminas

La espátula siempre se moverá en dirección de las fibras, para no deformarlas ni flexionarlas, sobre el papel plastificado que recubre el material. Es importante que las fibras estén bien alineadas por lo que las láminas empezarán a pegarse por un extremo, como si se cerrara un libro.

Después de apilar dos láminas se procede a la precompactación del material. Para ello se prepara una bolsa de vacío sobre la mesa del laboratorio (imagen 18). El objetivo de esta tarea es eliminar cualquier burbuja de aire o porosidad que pueda quedar tras la compactación manual y tener el material suficientemente compactado antes del curado. Cuando estén unidas las diez láminas, precompactadas de dos en dos, se volverán a meter en la bolsa y a compactar.

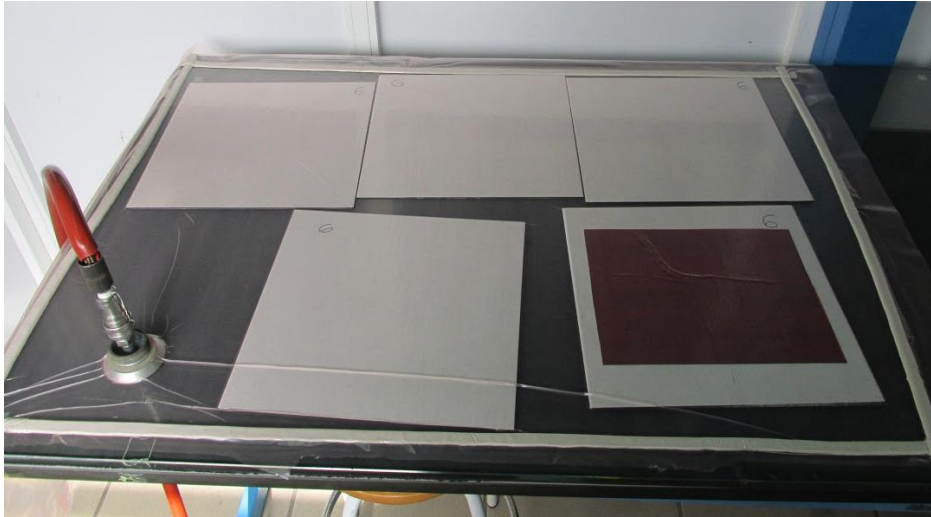


Imagen 18: Precompactación en bolsa de vacío

3.1.3. Curado

Como cualquier otro proceso de curado en autoclave, habrá que seguir determinados pasos y utilizar ciertos materiales para preparar la bolsa de vacío. En la imagen 19 se observan las diferentes “capas” necesarias para preparar la bolsa.

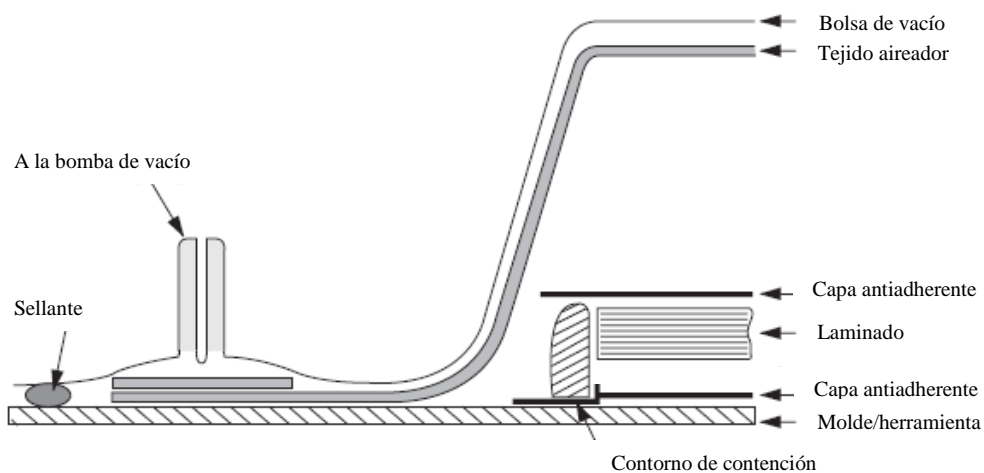


Imagen 19: Esquema de preparación de una bolsa de vacío genérica [13]

De abajo a arriba se van a comentar las capas utilizadas en la preparación de las bolsas de vacío de los laminados de este proyecto. Todas las bolsas serán iguales.

- Molde (mould/tool): Se ha utilizado una placa plana de aluminio, de dimensiones suficientes para poder distribuir en ella los dos laminados (uno para ensayos mecánicos y otro para ensayos no destructivos), las tomas de vacío y que quede espacio para la línea de sellante que tiene que haber bordeando la bolsa completa.
- Agente liberador (release agent): en este caso se ha utilizado una lámina de nylon, mismo material utilizado para crear los defectos artificiales. Su función es que la resina al curar no se adhiera al molde. Al estar en contacto directo con el laminado, cualquier arruga que esta capa pueda tener afectará al acabado superficial de éste (imagen 20).
- Contorno de contención (edge dam): Se utilizarán tiras de corcho para que la resina cuando alcance el estado líquido no fluya demasiado y abandone por completo el material.

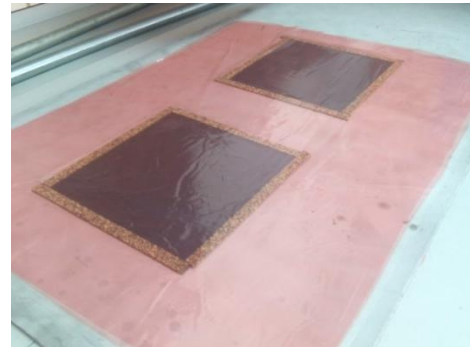
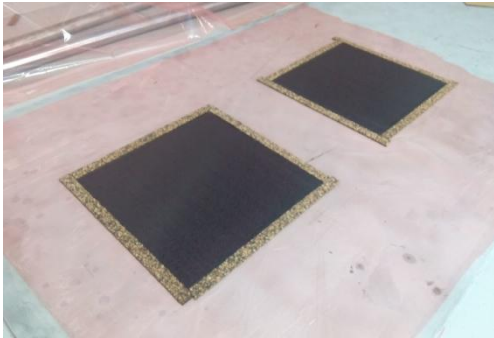


Imagen 20: Preparación del laminado. Láminas de nylon (anti-adherencia)

- Peel ply: en este caso el nylon hace el trabajo tanto de esta capa como de la comentada anteriormente (release agent). Capa antiadherente para desmoldeo y aportar el acabado superficial al laminado.
- Aireador (breather fabric): capa de fibra de poliéster resistente a alta temperatura que se encarga de distribuir el vacío por toda la bolsa de manera uniforme. En la zona de las tomas de vacío se pone más cantidad de este tejido, para mayor uniformidad del flujo de aire (imagen 21).
- Bolsa de vacío (vacuum bag): capa de nylon resistente a la temperatura que engloba al resto de elementos. Es muy importante que este recubrimiento no tenga ningún defecto ya que es la capa encargada de mantener el vacío

- Sellante (seal): Cinta cromato de textura gomosa (masilla) que se encarga de sellar la bolsa de vacío y unirla a la placa de aluminio. Es moldeable para que sea posible sellar las fugas que puedan aparecer por arrugas en la bolsa.



Imagen 21: Tejido aireador, tomas de vacío y sellante

Tras preparar la bolsa de vacío se hace una primera prueba de fugas en el laboratorio para posteriormente trasladarla ya al autoclave.

3.2. Ciclos de curado

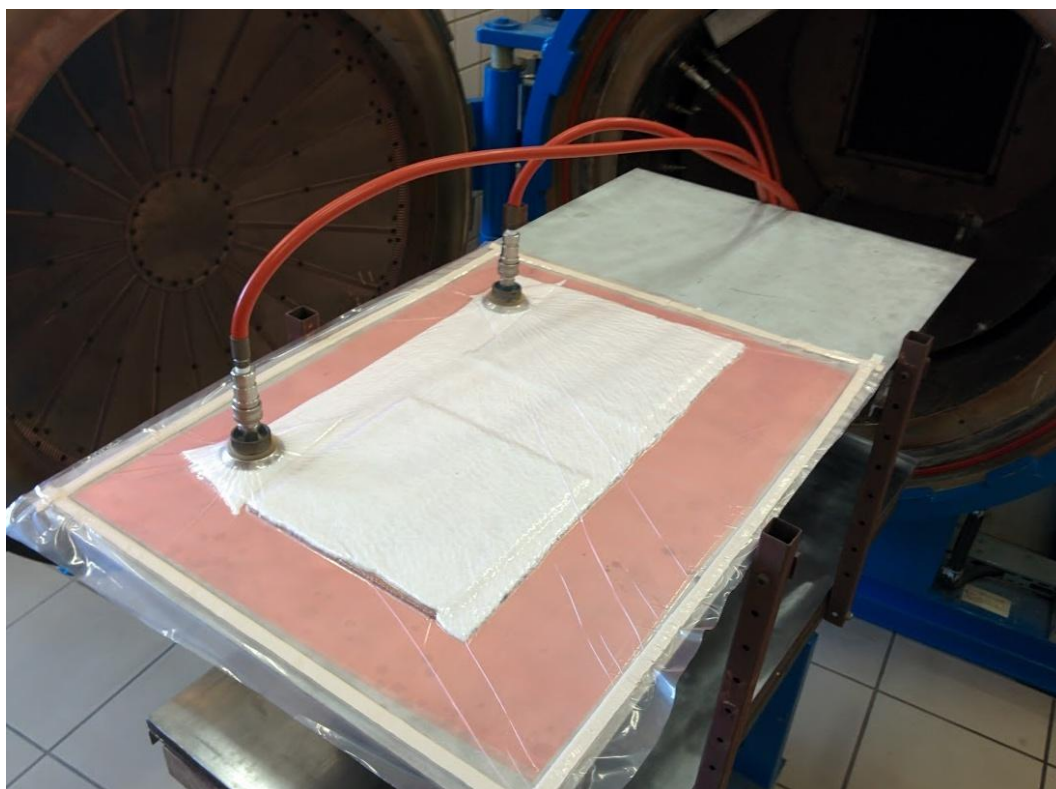


Imagen 22: Bolsa de vacío preparada para entrar en el autoclave

Una vez lista para entrar en el autoclave, a la bolsa de vacío se le conectan dos tomas de vacío (imagen 22). Sólo una funciona realmente, pero la otra se utiliza para controlar y medir la presión del sistema.

Tras esta operación se procede a configurar el ciclo al que se va a someter el laminado. Se han elegido tres temperaturas de ciclo diferentes, y además, distintas duraciones de ciclo para cada una de ellas. Todos estos datos se reflejan en la tabla 6:

	Ciclos						
Temperatura	177 °C		121°C			149°C	
Duración	2 h	1h	54 h	27 h	40 h	28 h	14 h
Nomenclatura	1a	1b	2a	2b	2c	3a	3b

Tabla 6: Configuración de los diferentes ciclos de curado aplicados

El ciclo 1a es el recomendado por el fabricante para alcanzar las propiedades mecánicas óptimas para las que se ha diseñado el material. Éste será el ciclo de referencia con el que poder comparar las propiedades que se analicen en los ensayos no destructivos a los que se someta el material.

Las variaciones en tiempo y temperatura de estos ciclos han sido escogidas para lograr grados de curado diferentes y poder estudiar la influencia de estos parámetros en el material. En la imagen 23 se muestran las variaciones en la duración de los ciclos para cada una de las temperaturas de curado. Lógicamente, aparte de compararse con el ciclo de referencia, solo podrán compararse entre sí los ciclos con la misma temperatura, para entre ellos, estudiar la influencia del tiempo de curado en autoclave.

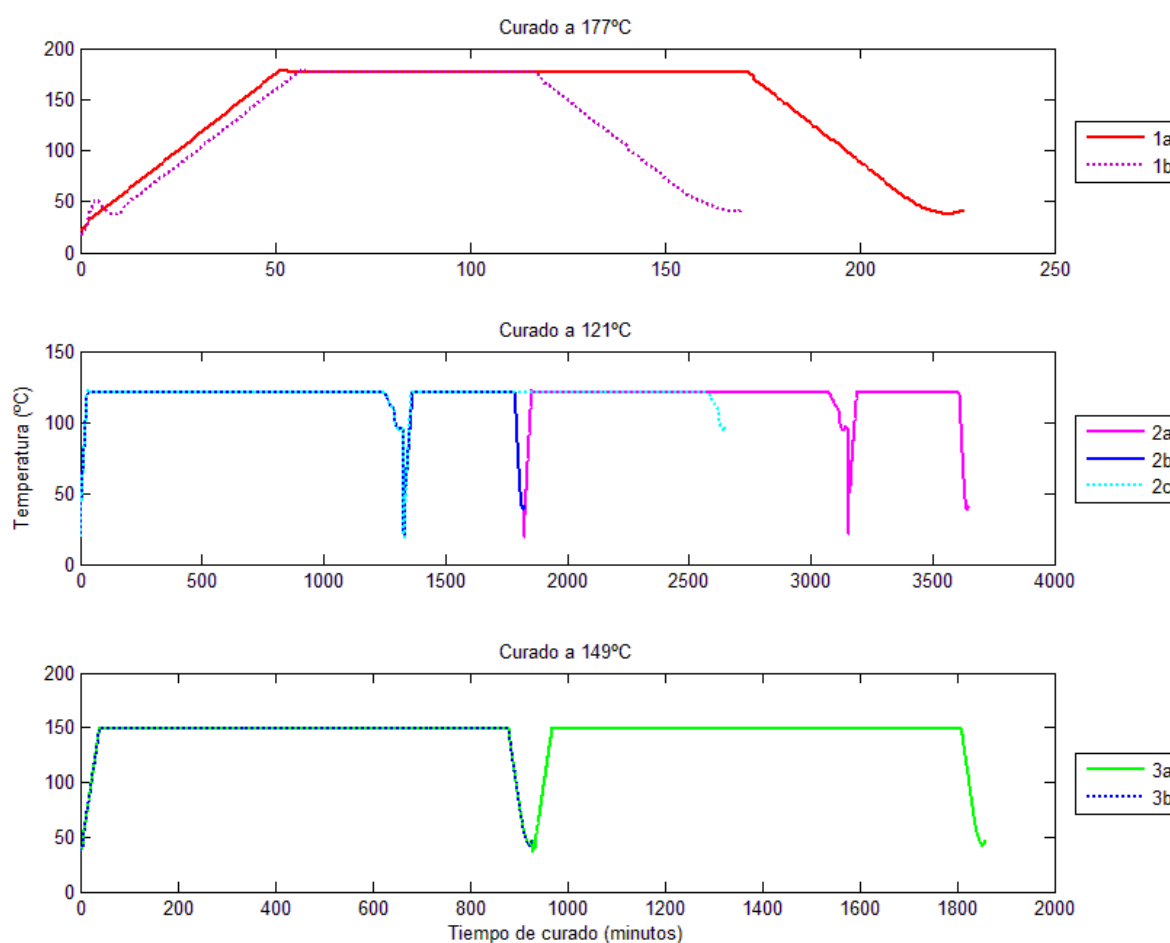


Imagen 23: Evolución de la temperatura en cada uno de los ciclos

El tiempo de calentamiento hasta llegar a la temperatura de curado en cada uno de los grupos de ciclos será respectivamente 50, 30 y 40 minutos. Como se aprecia en las distintas gráficas, sólo los ciclos tipo 1 se han curado de manera continua. Los otros 2 grupos de ciclos, cuya duración mínima ha sido 14 horas se han tenido que dividir en diferentes tramos de curado por disponibilidad del autoclave. El ciclo 2a, con 54 horas, se ha tenido que dividir hasta en 4 tramos diferentes. Estas interrupciones de la reacción de polimerización de la resina pueden dar

lugar a resultados diferentes al esperado o sin ninguna tendencia o correlación. Más adelante en el análisis de datos y conclusiones, se comentará esta hipótesis.

Tras este proceso se han obtenido 7 laminados diferentes además de un laminado sin curar que también será ensayado con las diferentes técnicas. En el caso de las piezas curadas, se tiene en ambas caras un acabado superficial diferente: en la cara en contacto con la placa/herramienta de aluminio la superficie es completamente lisa, incluso podría decirse que especular. En cambio en la otra cara el acabado es de una alta rugosidad, debido al tejido aireador colocado sobre la pieza para distribuir el vacío. Estos acabados superficiales (imagen 24) tendrán gran influencia en algunas de las técnicas de inspección utilizadas como se reflejará en los resultados y conclusiones.

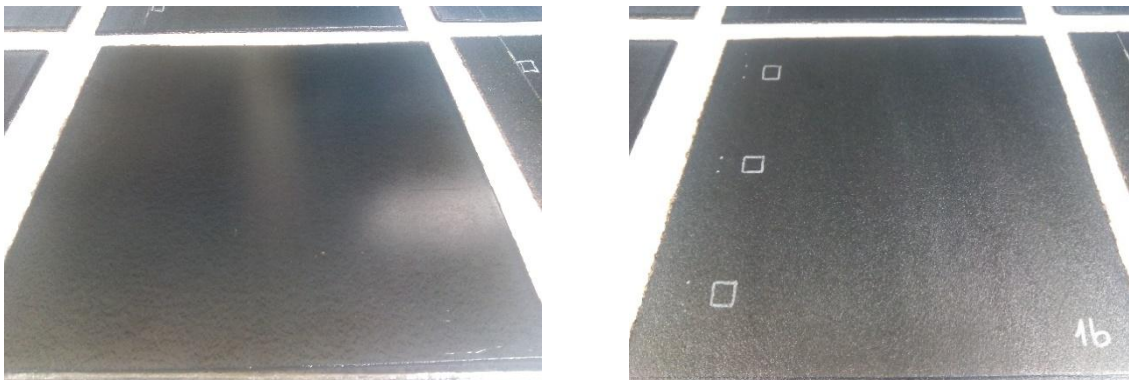


Imagen 24: a) superficie cara herramienta b) superficie cara bolsa

4

Ensayos y técnicas de inspección empleadas

4. Ensayos y técnicas de inspección empleadas

Diferentes técnicas de ensayos no destructivos (en adelante, END) han sido aplicadas para la inspección de los materiales con el objetivo de identificar variable que se puedan relacionar con el grado de curado y/o con el nivel de tensiones térmicas residuales existentes en el material.

4.1. Descripción de las técnicas ultrasónicas empleadas

Desde la década de 1940, las leyes físicas que rigen la propagación de las ondas sonoras de alta frecuencia a través del material se han utilizado para detectar grietas, huecos ocultos, porosidad y otras discontinuidades internas en metales, materiales compuestos, plásticos y cerámica, así como a medir el espesor y analizar las propiedades del material. El ensayo ultrasónico es completamente no destructivo y seguro y es un método de prueba asentado en muchas industrias de fabricación, procesos y servicios.

El desarrollo de los ultrasonidos es paralelo a la evolución de la electrónica. Los primeros trabajos en Europa y Estados Unidos en la década de 1930 demostraron que las ondas reflejarían defectos de forma predecible, produciendo patrones de eco distintivos que pudieran ser mostrados en las pantallas de un osciloscopio. El desarrollo del sónar durante la Segunda Guerra Mundial proporcionó un nuevo impulso a la investigación en los ultrasonidos.

Los últimos avances en los instrumentos ultrasónicos se han basado en las técnicas de procesamiento digital de señales y los microprocesadores de bajo coste producidos en la década de 1980 en adelante.

Las frecuencias de trabajo empleadas con esta técnica están comprendidas entre 1 y 10 MHz, dependiendo el valor empleado del material y de la resolución y cantidad de información que se quiera obtener. Para material compuesto, las más empleadas están alrededor de 5 MHz. Frecuencias mayores son filtradas por el material y no dan lugar a resultado útil alguno; con frecuencias menores se tiene menor resolución de la señal en profundidad y en el análisis se pueden escapar defectos de cierto tamaño.

4.1.1. Ultrasonidos Convencionales

4.1.1.1. Técnica

La aplicación convencional de esta técnica se basa tanto en las leyes de propagación de ondas sonoras en el material como en el efecto piezoeléctrico. La utilidad de este efecto viene de una propiedad que poseen ciertos materiales por la cual son capaces de deformarse mecánicamente cuando a través de ellos se hace circular una carga eléctrica. El sentido de la deformación (contracción o expansión) dependerá del signo de la carga, ya que esta hará que los átomos del material se alineen en determinada dirección. Este efecto aparece representado en la imagen 25. También existe el efecto inverso mediante el cual al aplicar una carga mecánica al material, éste se carga eléctricamente.

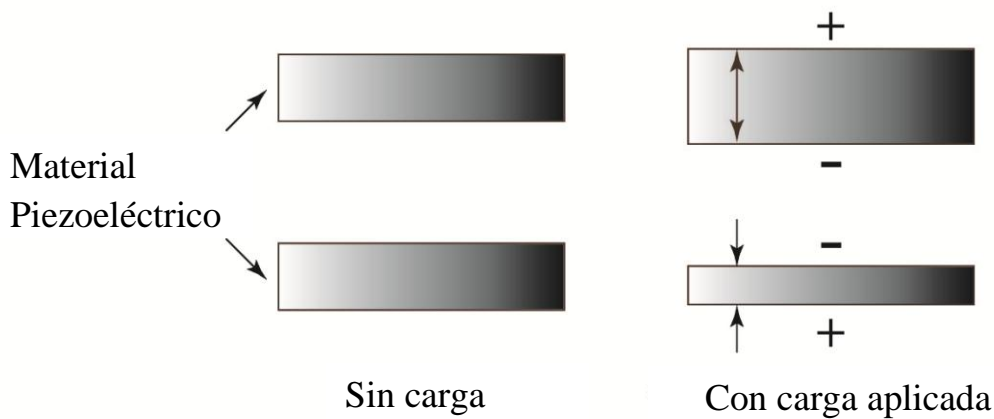


Imagen 25: Efecto piezoeléctrico

Dichos efectos son los aplicados para conseguir la generación y detección de ondas ultrasónicas. Una señal eléctrica excita el elemento piezoeléctrico e induce en este una vibración que será transmitida al material a través de un medio acoplante. Cuando esta vibración, ahora respuesta del material, viene de vuelta, excita mecánicamente los cristales y estos son capaces de generar una señal eléctrica que será transformada por el equipo en la señal ultrasónica que se analizará.

Estos materiales piezoeléctricos eran principalmente de cuarzo, pero con los avances en la tecnología de materiales, se han conseguido compuestos cerámicos con muy buenas propiedades tanto en generación como en detección.

La vibración dentro del material se propagará como una onda de determinadas propiedades: longitud de onda, frecuencia y velocidad, todas ellas relacionadas entre sí. Esta onda transmitida puede tener dos modos de propagación, longitudinal y transversal, representados los dos en la imagen 26. El caso del material compuesto es una excepción: la única onda que se propaga es la longitudinal y cuando ésta viaja perpendicular a la superficie del material.

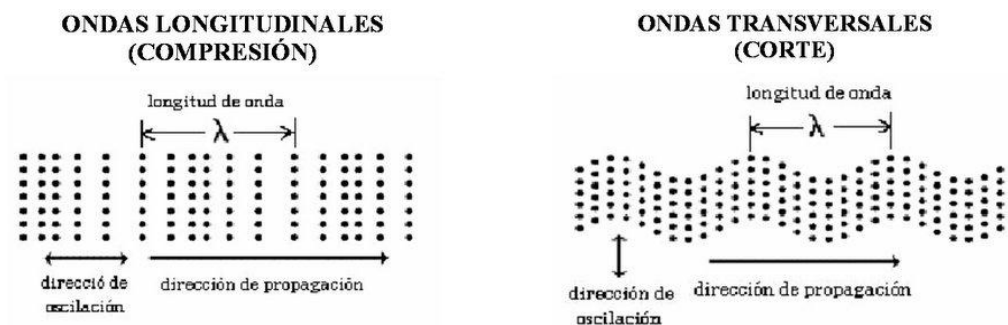


Imagen 26: Ondas longitudinales y transversales

Si la onda no entra en el material normal a la superficie, como es necesario en el material compuesto, sino que lleva cierta inclinación, los ángulos de ondas refractadas y reflejadas cumplirían las leyes de Snell, representada en la imagen 27 y en la fórmula siguiente.

$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2$$

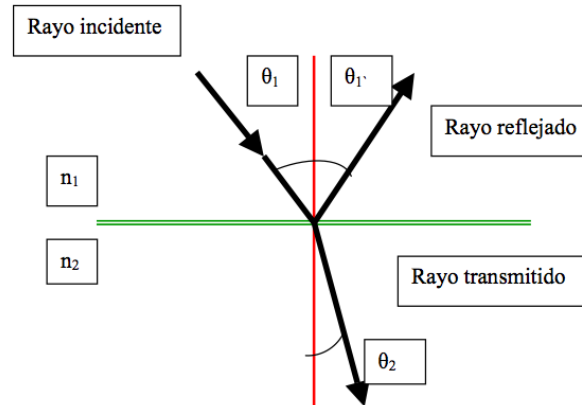


Imagen 27: Ley de Snell

Este fenómeno es aprovechado en la inspección de materiales metálicos para, además, poder propagar a la vez ondas longitudinales y transversales en el material.

La relación básica entre los parámetros característicos de las ondas es la siguiente:

$$v = \lambda \cdot f$$

Donde v es la velocidad de propagación, λ es la longitud de onda característica, y f es la frecuencia. Por lo general, este último es un parámetro que se fija en cada ensayo, según el material a inspeccionar y la velocidad característica de éste, que solo dependerá de sus propiedades mecánicas.

Otro parámetro importante del material es la impedancia acústica. Si la onda sónica se propaga a través de presión acústica, se puede definir la impedancia como la oposición a la propagación de esta onda en el material. La proporción de onda que pase a propagarse por el material dependerá de la diferencia de impedancias entre dos medios: el acoplante y el material en sí. Cuanto mayor sea esta diferencia, mayor parte de la onda “rebotará” y más energía habrá que proporcionar en generación para poder obtener una buena señal de ultrasonido en el material.

El material elegido como acoplante es el que actuará como primer medio y se situará entre el elemento piezoeléctrico y el material. Se utiliza este elemento porque es imposible garantizar el contacto perfecto entre los cristales piezoeléctricos y la pieza.

El haz ultrasónico emitido por el cristal piezoeléctrico tendrá normalmente dos zonas diferenciadas, campo cercano (dominado por el efecto Fresnel) y campo lejano (regido por el efecto Fraunhofer). Estas zonas están representadas en la imagen 28. En la primera zona de longitud N , dependiente de la geometría del cristal y de la longitud de onda, existe una distribución irregular de la presión acústica y no está aún definido el frente de onda, por lo que será difícil detectar defectos en esta zona. Esta zona muerta se evita utilizando zapatas o estableciendo una columna de líquido acoplante entre el palpador y la pieza, de tamaño N .

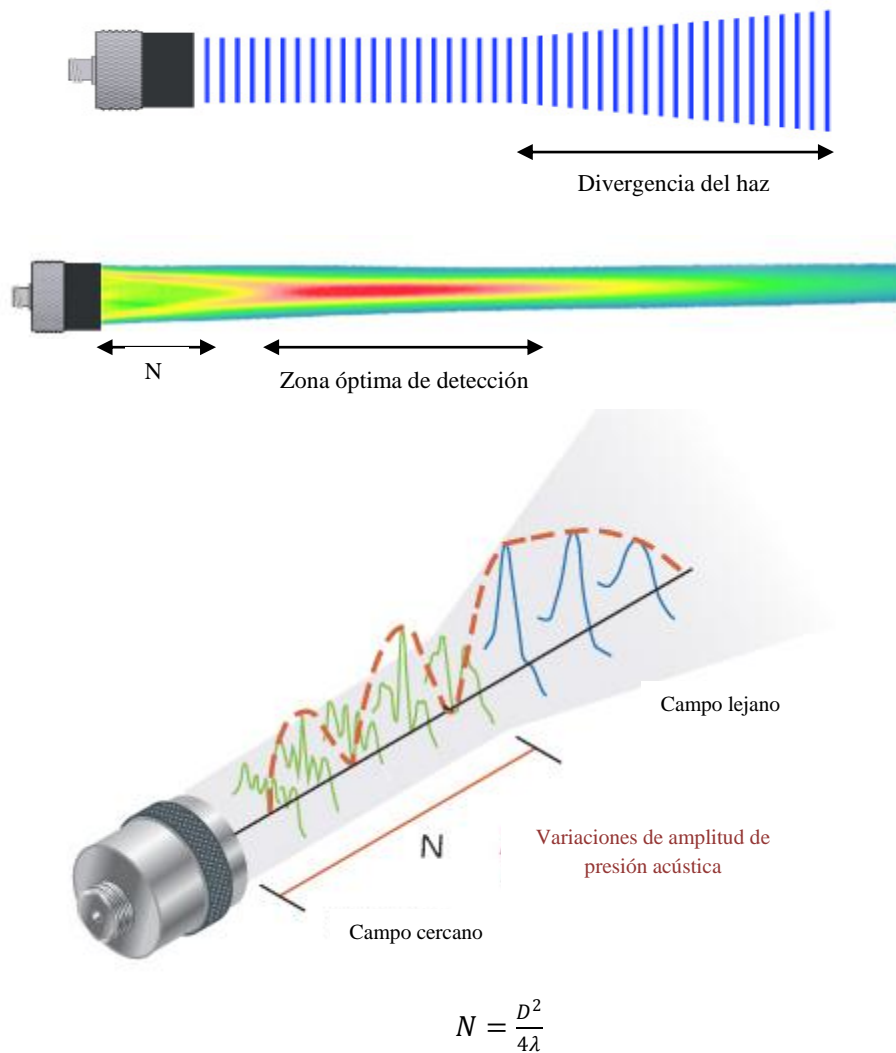


Imagen 28: Campo acústico: cercano y lejano [14]

La zona focal es el tramo del campo acústico donde hay un frente de onda uniforme y la presión acústica es más alta. A partir de ahí, la intensidad del sonido decae y además se produce una divergencia del haz, perdiéndose precisión de la respuesta ultrasónica. Estos efectos también están representados en la imagen 28.

Centrando la pieza de interés en esta zona del haz, la respuesta típica que se obtiene muestra un primer eco equivalente al rebote en la primera superficie, es decir, en la superficie de entrada de la pieza. Si la pieza está sana, el siguiente eco que aparezca en el diagrama deberá corresponder al rebote en el fondo de la pieza. Cualquier eco intermedio que aparezca, representará un defecto interno del material y según las características de la señal se clasificará y definirá su naturaleza (delaminación, porosidad, inserto, etc.). Un ejemplo de la señal resultante en pieza sana y con algún defecto se visualiza en la imagen 29.

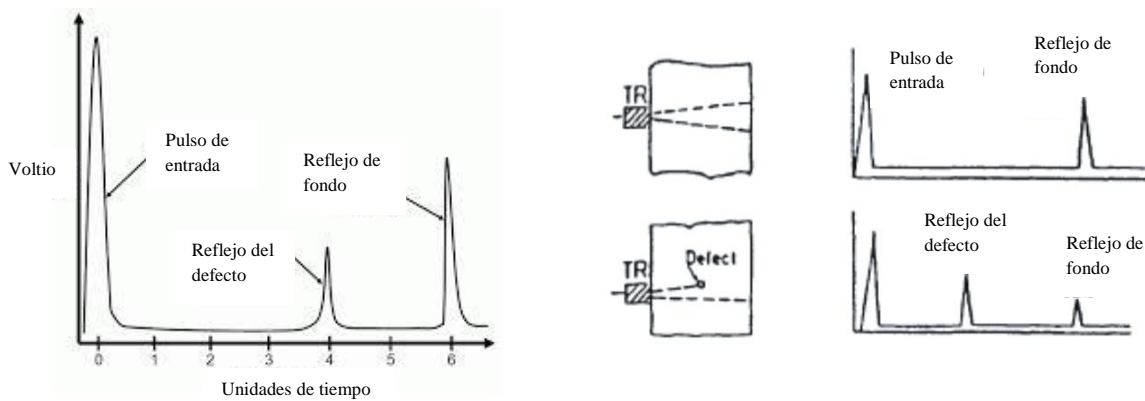


Imagen 29: A-Scan típicos de una pieza con defecto

Esta vista de la señal es la típica que se observa en un equipo de inspección usual, A-Scan, pero también es posible tener representada de manera similar a una vista en planta o de perfil de la pieza con la posición de los defectos definida. A estas vistas se les llama C-Scan y B o D-Scan, según la orientación, y en ellas se puede representar la amplitud de la señal ultrasónica o la distancia que el sonido recorre desde que entra en la pieza. Ajustando el contraste de estas cartografías se busca identificar defectos internos de la pieza con la mejor calidad posible.

En una inspección de ultrasonidos hay dos formas de aplicar la técnica, descritas a continuación y en la imagen 30:

- **Transmisión:** Dos elementos independientes se posicionan en lados opuestos de la pieza, uno enfrente de otro. Estos elementos tienen que estar alineados para que la señal ultrasónica emitida por el elemento emisor pueda ser bien recibida por el elemento detector. El problema de esta configuración es que no siempre se tiene acceso a los dos lados de la pieza.
- **Pulso-eco:** Un único elemento emite y recibe las señales tras la interacción de ésta con el material y sus superficies. Solo se necesita acceso desde un lado de la pieza pero el espesor de la pieza a inspeccionar está más limitado.

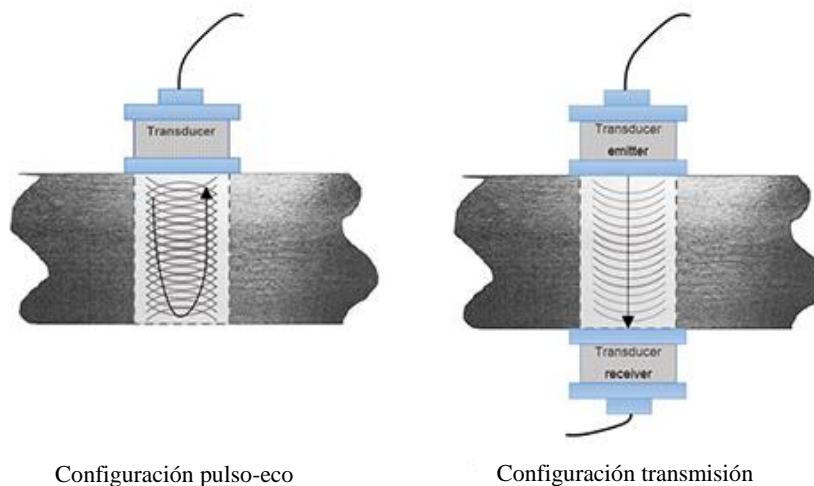


Imagen 30: Configuraciones de inspección

4.1.1.2. Sistema utilizado

Dentro del proyecto, esta técnica se ha empleado para calibrar los diferentes materiales fabricados. Esto significa que conociendo el espesor de cada uno de los laminados, se ha calculado la velocidad de propagación del sonido en su interior.

El equipo utilizado ha sido un **USM-35** proporcionado por General Electric al que se ha conectado un palpador convencional monocristal a 0° con una frecuencia de 5 MHz y 0.25 pulgadas de diámetro. También se ha utilizado una zapata de metacrilato con la que se evita que el campo cercano se propague dentro del material de interés, llegando a éste un frente de onda definido característico de la zona focal.



Imagen 31: Equipo de inspección manual y palpador utilizados

El equipo muestra un A-Scan, gráfico con la amplitud de la señal de respuesta del material frente al tiempo que tarda el sonido en propagarse a través de él. Aparecerá el eco de entrada y un eco de fondo y sus sucesivas repeticiones. Entre estos ecos, en una zona sana de la pieza en la que no haya defecto intermedio, siempre habrá el mismo espacio que recorrer, el espesor del laminado, con lo que con una simple relación entre el tiempo empleado y la distancia recorrida se puede obtener la velocidad del material.

4.1.2. Ultrasonidos Phased Array

4.1.2.1. Técnica

Los ultrasonidos por phased array se basan exactamente en los mismos principios físicos que los ultrasonidos convencionales. La mejora de la técnica consiste en la utilización de varios cristales piezoeléctricos en lugar de uno solo como en la técnica convencional, consiguiendo así una mayor área de generación de las ondas ultrasónicas. [14]

Otra de las ventajas de los phased array es que se puede controlar mediante software especializado el *delay* (retraso) con el que cada uno de los cristales “dispara” así como el número de ellos que se utilizan (apertura, en la imagen 32). Esto facilita la realización de inspecciones en las que es necesario angular el haz, ya que con un palpador convencional sería necesario ajustar una zapata adecuada a cada ángulo y con este sistema es posible variar el ángulo de inspección mediante el control software.

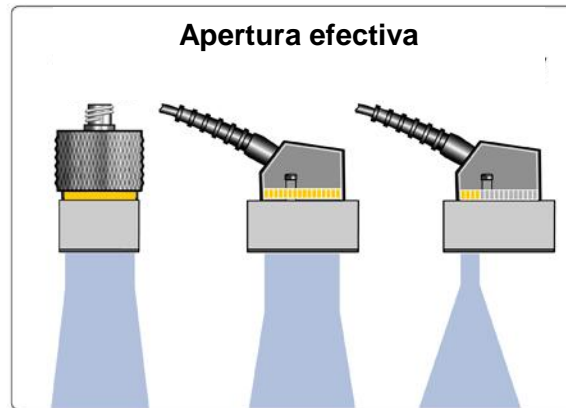


Imagen 32: Apertura efectiva del haz ultrasónico [14]

Muy útil también es la posibilidad de realizar barridos, es decir, obtener información de diferentes puntos sin tener que desplazar el palpador. Estos barridos pueden ser lineales, en profundidad o sectoriales en función de la aplicación. Algunos tipos de barridos se muestran en la imagen 33.



Imagen 33: Aplicación phased array: barridos electrónicos [14]

Estos barridos se realizan configurando las leyes focales, que rigen los retrasos y el orden en que los cristales tienen que transmitir. Con esto lo que se modifica es el punto de focalización y la dirección de propagación del haz, con la intención de que la generación y recepción de las señales sea más efectiva en las áreas de interés de la pieza. En la imagen 34 se muestran las leyes focales, retrasos aplicados a los elementos, con las que conseguir diferentes frentes de onda y puntos de focalización para la inspección de los materiales.

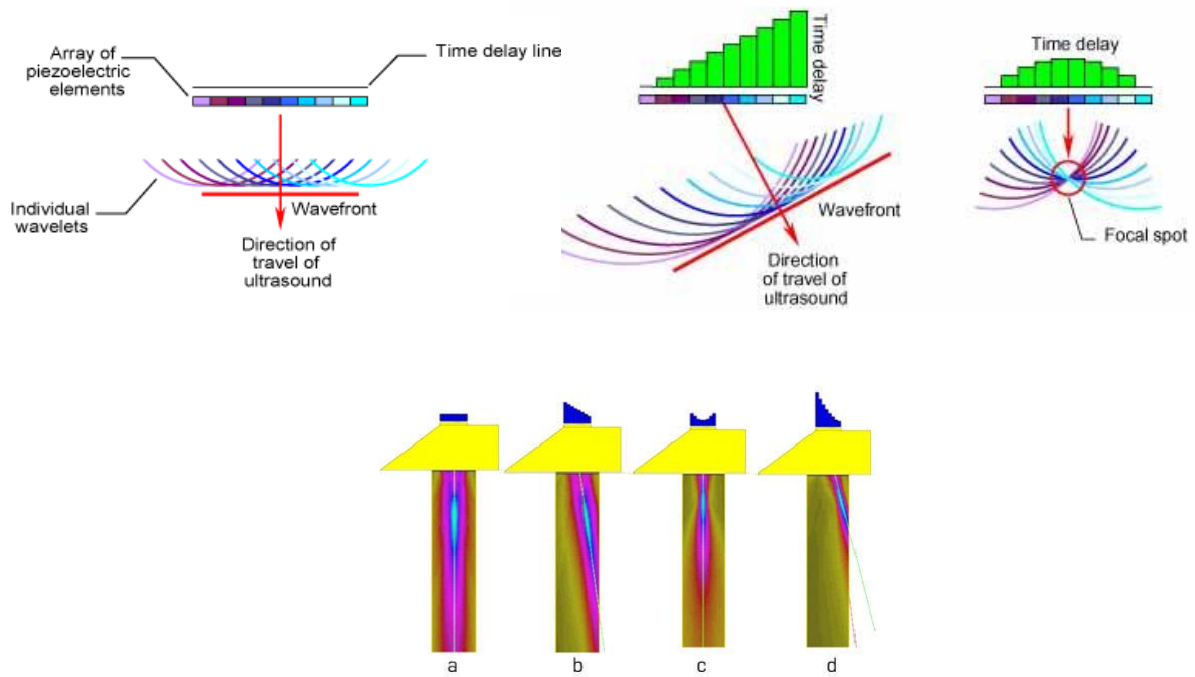


Imagen 34: Método de focalización mediante leyes focales [15]

En la inspección de materiales compuestos, al tener que entrar la onda normal a la superficie, no se pueden aprovechar estas opciones de variación angular. El barrido más utilizado es el lineal a 0° , seleccionando los elementos en pequeños grupos que van avanzando a lo largo de todo el array, habiendo tramos de superposición. Por ejemplo, en la imagen 35 aparece un array de 8 elementos, agrupados de 4 en 4 (apertura) con un “salto” o paso de 2. Esto es, en el primer disparo se utilizan los elementos del 1 al 4, en el segundo, del 3 al 6, en el tercero del 5 al 8. Sin necesidad de mover el palpador se ha obtenido la inspección de toda la zona bajo los 8 elementos, mientras que con uno convencional no se habría cubierto toda esa superficie.



Imagen 35: Secuencia de leyes focales para barrido lineal [14]

Existe gran variedad de geometrías de array disponibles, algunas creadas para servir a aplicaciones concretas como por ejemplo los palpadores curvos para la inspección de radios. Algunas de estas tipologías se muestran en la imagen 36.

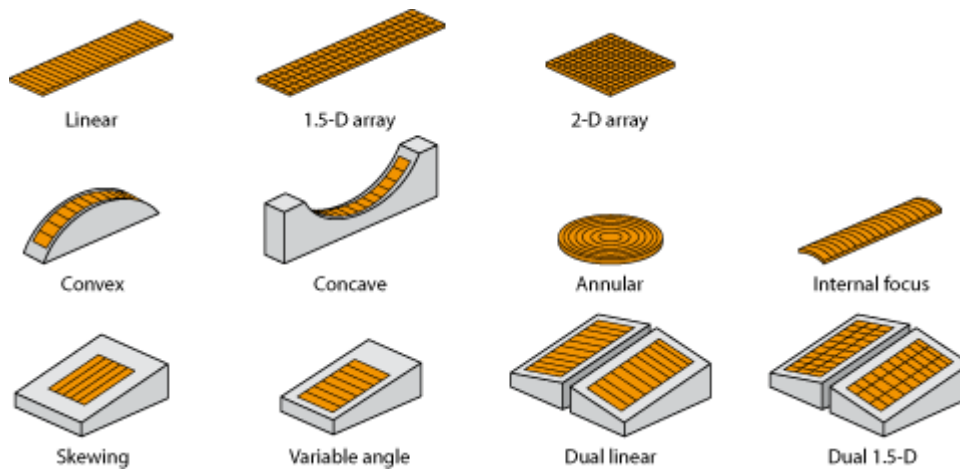
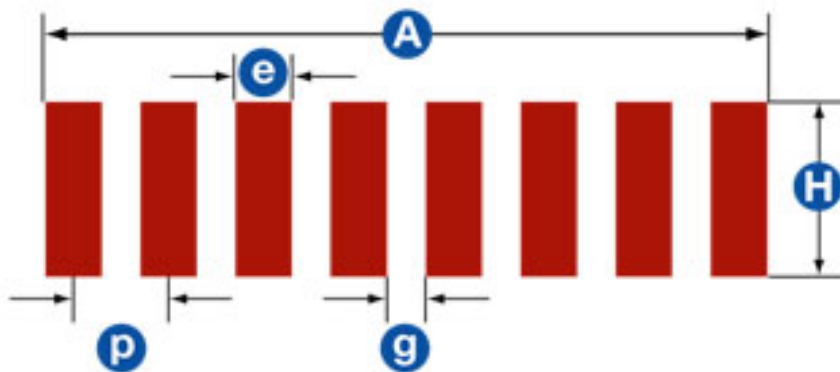


Imagen 36: Configuraciones phased array [14]

4.1.2.2. Sistema utilizado

Palpador

Para los ensayos con phased array se han utilizado dos equipos diferentes con un mismo palpador. Dicho palpador, de geometría lineal, posee una frecuencia de 5 MHz, suficiente para penetrar en el material compuesto y obtener la resolución necesaria en profundidad. Tiene un ancho de banda de un 10% a los 6 dB de caída de presión acústica. Sus 32 elementos están geoméricamente dispuestos de la forma que muestra la imagen 37:



Donde:
 $e=0.9\text{ mm}$
 $g=0.1\text{ mm}$
 $p=1\text{ mm}$
 $H=6\text{ mm}$
 $A=31.9\text{ mm}$

Imagen 37: Configuración array utilizado

El fabricante, **Imasonic** en este caso, es el responsable de caracterizar las propiedades de los elementos piezoeléctricos tanto por separado como trabajado en conjunto, para garantizar la homogeneidad de la señal emitida.

El barrido se ha configurado con la intención de cumplir con los estándares de Airbus, planteados en sus AITM. Para esto se ha elegido una apertura de 6 elementos con paso de 2 (2 mm aproximadamente ya que cada elemento mide 1 mm), y así cumplir lo especificado: un defecto de 3 mm tiene que ser detectado al menos con 2 leyes focales diferentes. El grupo de 6

elementos se ha elegido en este palpador de manera que, con los 6 mm de altura del elemento, el área activa del palpador se aproxime lo más posible a un cuadrado.

Equipos

El primer equipo empleado ha sido un **Omniscan SX**, propiedad de Tecnatom y proporcionado por Olympus. Este equipo portátil es válido tanto para inspecciones manuales como automáticas ya que existe la posibilidad de conectar un encoder, elemento que se encarga de relacionar las coordenadas físicas del punto donde se está realizando la inspección con la coordenada donde este se representa en pantalla. Esto es necesario para generar un C-Scan, similar a una vista en planta de la pieza, sobre el que se puedan dimensionar los defectos.

Este equipo se ha utilizado principalmente para garantizar la viabilidad de la técnica y comprobar que con los parámetros elegidos, principalmente frecuencia del palpador, son los adecuados para la inspección de este material. Para ello se comprueba la detección de los defectos artificiales que se habían insertado en los laminados durante la etapa de fabricación.

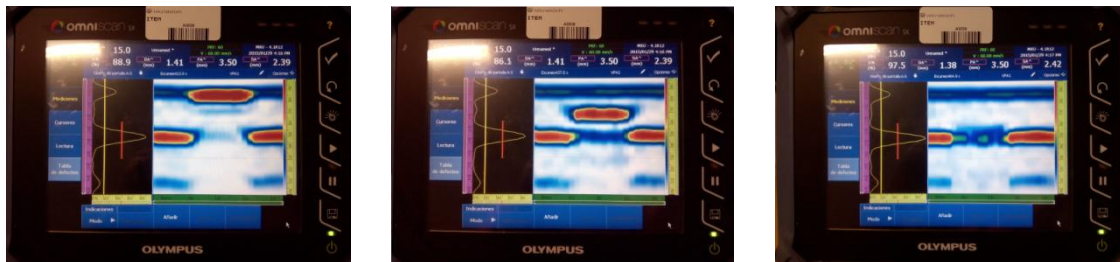


Imagen 38: Insertos artificiales detectados

La imagen 38 muestra varios B-Scan, similares a un corte transversal de la pieza, y se pueden identificar los defectos artificiales. En la primera, el que está más cercano a la superficie del material, se ve casi al mismo nivel que el eco de entrada, aunque con mayor amplitud. La segunda muestra el defecto que está justo en la mitad del espesor de la pieza y la tercera el que está cercano al fondo. Éste último no es identificable por su propio eco si no por la ocultación del eco de fondo en la zona en que se sitúa.

Una vez comprobada la viabilidad de la técnica, se procedió a utilizar un sistema automático para la inspección completa de las piezas, como en la imagen 39. Este segundo sistema cuenta con una mesa de inspección automática de 3 ejes (X, Y, Z) y una pequeña cuba para hacer la inspección en inmersión, es decir, el medio acoplante es agua.

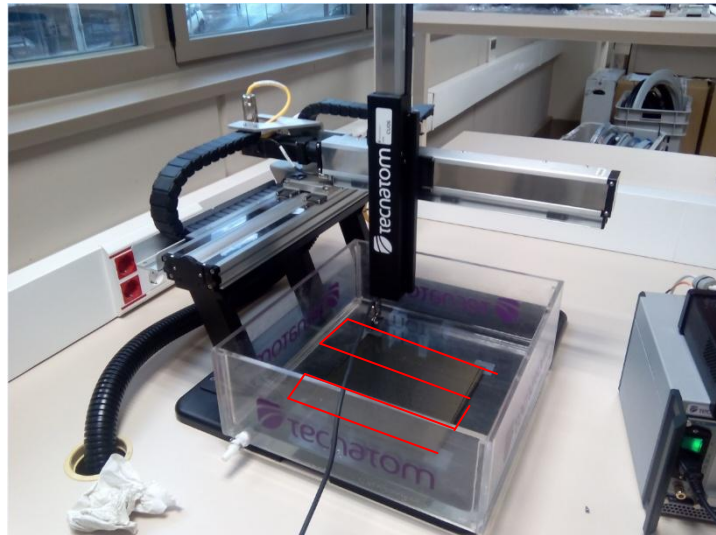


Imagen 39: Mesa de inspección automática

El palpador se fija en el extremo del eje vertical con la superficie activa enfrentada y paralela a la superficie de la pieza. Mediante el SW controlador del sistema automático, **Sirocco Multi**, se crea una trayectoria en forma de almena (en rojo sobre la imagen) que completa la inspección de toda la superficie.

El sistema de control electrónico llamado **SONIA** es el que se encarga de controlar la adquisición de datos: mediante la conexión con el encoder, los datos recibidos son representados correctamente en un C-Scan. Otra parte de la electrónica importante es la **FPA-128**, elemento encargado de recoger los datos que provienen del palpador y transformarlos en señales útiles para la evaluación de los ultrasonidos. Sus 128 canales indican que se puede utilizar con este módulo un palpador de hasta 128 elementos. Todos estos elementos se conectan con cable de red al ordenador de control y de adquisición de datos. Estos equipos aparecen en la imagen 40.

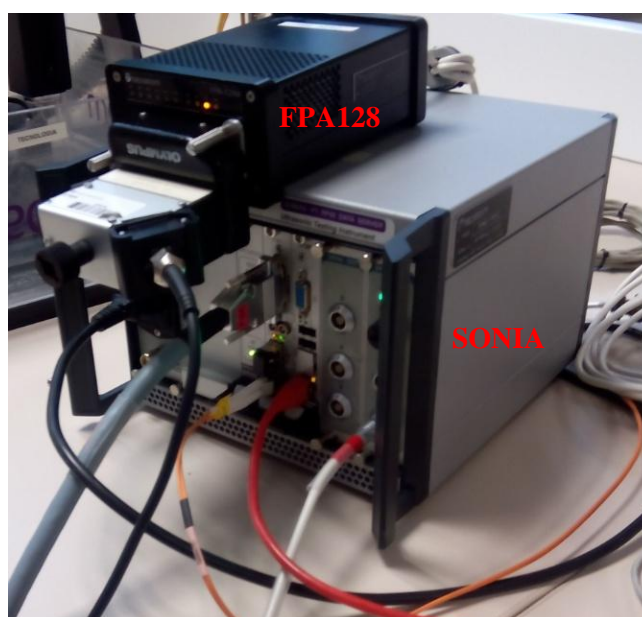


Imagen 40: Módulos de electrónica

Todos los datos se adquieren y se evalúan utilizando un SW desarrollado por Tecnatom, **InspectView**, a través del cual se puede configurar la inspección completa proporcionando información acerca del palpador y de la pieza y creando las leyes focales necesarias para realizar el barrido lineal requerido. Antes de la adquisición de datos es necesario calibrar el material por lo que en un principio habrá que posicionar el palpador en una zona sana de la pieza. El control de máquina en este caso se realiza con otro equipo independiente, pero existen otras versiones de este SW en las que el control de máquina está integrado.

Tras la adquisición de datos de las diferentes piezas se procede a su evaluación. Los resultados de esta parte del proyecto serán mostrados en apartados posteriores.

4.1.3. Ultrasonidos láser

4.1.3.1. Técnica

Esta técnica utiliza el principio de la propagación del sonido a través de los sólidos, pero la generación de las ondas no se realiza con un piezoeléctrico. El estado del arte de la tecnología de inspección por ultrasonidos involucra diferentes disciplinas como óptica, acústica y mecánica de los materiales. La ventaja principal de esta técnica es que no necesita contacto físico ni acoplamiento entre sistema de inspección y pieza.

Hasta 1962 no fue medida por un piezoeléctrico la primera señal de ultrasonidos generada por láser. Más tarde se descubrió que combinado con un interferómetro óptico el láser también podía utilizarse como detector de la señal. Actualmente un sistema de ultrasonidos generados por láser se compone de 4 módulos principales: láser generador, láser detector, interferómetro y unidad de control, que adquiere y procesa las señales.

Utilizando el sistema láser, al contrario que con la técnica convencional, la onda no se produce por un elemento externo sino que se crea por el propio material. Este hecho tiene la desventaja de no poder ajustar la ganancia y con ella la amplitud de la señal. La absorción de la luz láser por el material provoca un repentino incremento de la temperatura en la pieza que provoca su expansión térmica y un aumento de las tensiones en la zona cercana a la superficie. Éstas últimas son las que producen las ondas ultrasónicas por lo que éstas son muy dependientes del comportamiento que tenga el material frente al láser.

En el caso de materiales compuestos fibra de carbono-epoxi, las primeras micras de la superficie del material están compuestas de resina. Eligiendo una longitud de onda adecuada que sea absorbida por este material se conseguirá un calentamiento homogéneo en el espesor de resina y no se llegará a dañar el material. Si la longitud de onda es demasiado pequeña de manera que la resina es transparente a ella, serán las primeras capas de fibra de carbono las que se calienten y se quemen. La longitud de onda con la que trabaja este sistema son 10.6 μm , siendo absorbida por la resina epoxi, aunque este valor depende del espesor de resina. El comportamiento del material en función de la longitud de onda del láser se refleja en la imagen 41.

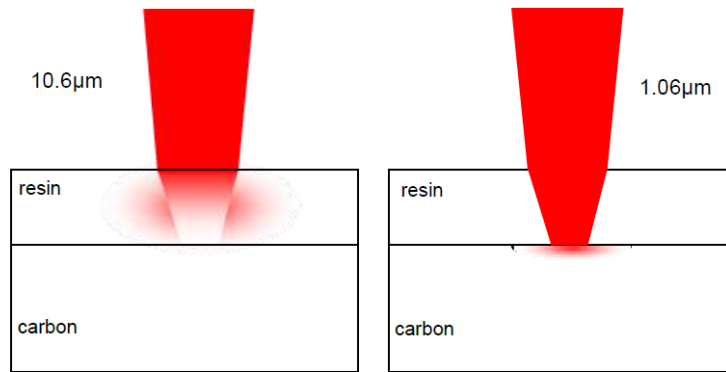


Imagen 41: Penetración del láser en función de la longitud de onda

El calentamiento se tiene que producir en el modo termoelástico, ya que si se produce en el ablativo, se supera el umbral de daño en el material. El perfil del láser debe ser homogéneo para que no se produzcan puntos calientes y lo suficientemente ancho para que el campo cercano sea pequeño. Esto se consigue con lentes que suavizan el perfil del haz y controlan el diámetro.

A diferencia de las inspecciones con phased array en las que la frecuencia está fijada por el palpador, el láser puede alcanzar un ancho de banda mayor, que en este caso puede variar entre 0,5 y 20 MHz. En cualquier caso, la estructura interna del material filtra frecuencias superiores a los 6 MHz.

La detección de la respuesta del material mediante láser se basa en principios ópticos de medida de pequeños desplazamientos de la superficie. Se utiliza para ello la aplicación del efecto Doppler, representado en la imagen 42. Para esto se necesita una señal láser muy estable, que ilumina la superficie del material perfectamente sincronizada en tiempo y espacio con la señal de generación. Esta señal de detección es reflejada en la superficie y desfasada de la original, con la que se compara. En función del estado de vibración de la superficie, la señal se diferenciará más o menos de la original y comparándola con esta se podrá detectar en qué puntos la pieza se comporta de manera distinta, es decir, tiene defectos. Las señales recibidas están moduladas tanto en frecuencia como en intensidad y el interferómetro será el encargado de transformarlas.

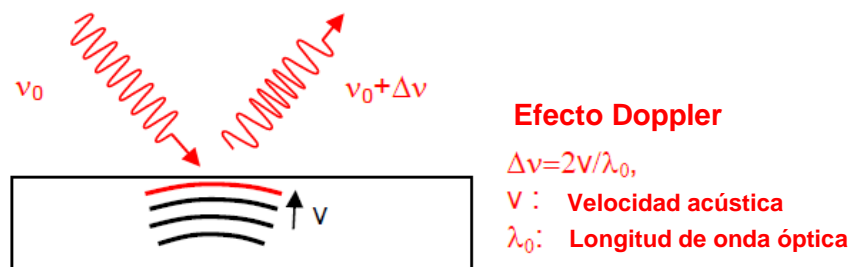


Imagen 42: Efecto Doppler en la superficie de la pieza

Se requieren propiedades diferentes para la generación y la detección por lo que existen diferentes tipos de láser en uso.

4.1.3.2. Instalaciones

En las instalaciones disponibles en Tecnatom el sistema del que se dispone comprende un láser de generación por CO₂, un láser de detección de Nd:YAG, muy estable, y un interferómetro Fabry-Perot confocal de doble cavidad. Un esquema general del funcionamiento del sistema sería el siguiente mostrado en la imagen 43.

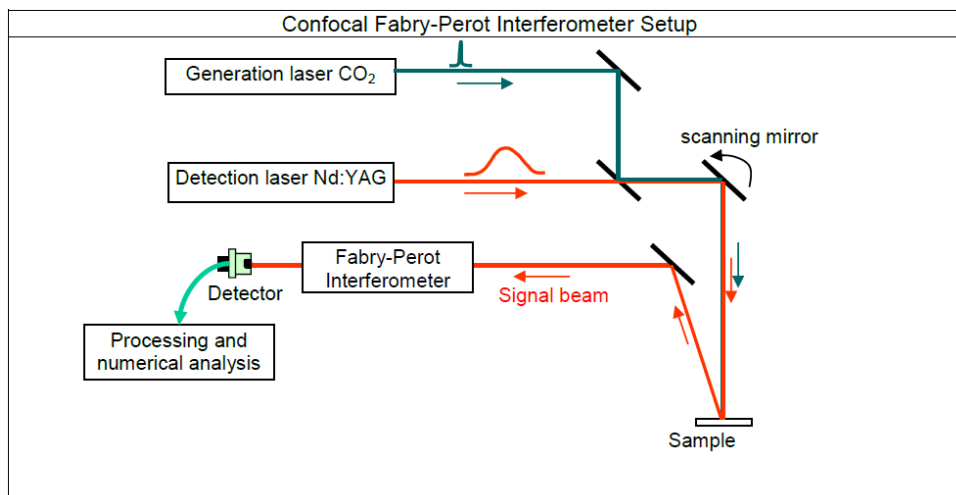


Imagen 43: Esquema del sistema láser utilizado

El láser de generación posee las siguientes características:

- Láser pulsado industrial de CO₂
- Longitud de onda: 10.6 μm
- Anchura de pulso: <100 ns
- Energía de pulso: >180 mJ (ajustable)
- Frecuencia de repetición: 600 Hz (determina la velocidad de inspección)
- El haz láser llega hasta la cabeza del sistema a través de un complejo sistema de espejos que lo orientan

Las propiedades del láser de generación son las siguientes:

- Láser tipo Nd:YAG (gran estabilidad)
- Longitud de onda: 1.064 μm
- Anchura de pulso 250 μs
- Potencia de pulso: 500 W
- Frecuencia de repetición: > 1 KHz
- Este láser se transmite hasta la cabeza a través de fibra óptica.

El interferómetro encargado de recibir las señales es un Fabry-Perot confocal de doble cavidad. Su estabilización es automática y su trabajo es comparar tanto en desfase (efecto Doppler) como en intensidad, la señal de referencia generada por el detector con la señal respuesta de la pieza cuando ésta pasa a través de sus espejos y cavidades. Después, la unidad de control procesa las señales y las convierte en una señal que pueda ser evaluada como los ultrasonidos convencionales.

A la hora de evaluar los datos, el sistema nos da la posibilidad de adquirir 2 formatos de datos diferentes, por lo que se han utilizado también 2 software distintos. Por un lado el formato

de datos .nka ha sido evaluado utilizando **NDTkit**, software desarrollado por Airbus, del que Tecnatom dispone una licencia temporal. Por otro lado los archivos .RF.iaf se evalúan con el SW desarrollado por Tecnatom ya comentado con anterioridad **InspectView**. Cabe destacar la polivalencia de este SW que puede ser utilizado para adquirir y evaluar señales utilizando diferentes técnicas.

Más adelante se comentan los resultados y conclusiones obtenidas de la inspección de los diferentes laminados utilizando los ultrasonidos generados por láser.

4.2. Descripción de la técnica de termografía

La termografía infrarroja es una técnica que precisa y aprovecha descubrimientos históricos como fueron el termómetro y el hecho de que la luz, separada en sus componentes espectrales, poseyera mayor cantidad de energía cuando su longitud de onda se situaba por encima de la del color rojo, es decir, en el espectro infrarrojo. Este fenómeno descubierto hacia 1800 se combina con la aparición de los termopares, dispositivos capaces de generar una diferencia de potencial al variar su temperatura, para dar lugar a detectores térmicos que no necesitaran contacto.

Como en casi todos los ámbitos de la técnica, la termografía experimentó un gran desarrollo en los periodos de guerra, principalmente utilizándose para el seguimiento y localización de objetivos.

En la actualidad, las cámaras detectoras de señales infrarrojas, están compuestas de una matriz de semiconductores detectores que tras procesarse su señal permiten obtener imágenes térmicas de gran calidad.

4.2.1.1. Técnica

Ésta es una técnica no destructiva que no necesita contacto directo con las piezas. Utiliza dispositivos que capturan la energía térmica que irradia la pieza y ésta es transformada a temperatura de la superficie. Así, la pieza puede ser identificada por su mapa de temperaturas. Como se ha comentado previamente la cámara funciona como un vídeo normal, pero en lugar de fotodetectores para representar la imagen, tiene sensores de radiación infrarroja cuya señal puede ser convertida en un mapeo de temperatura.

Para medir dicha radiación infrarroja pueden aplicarse diferentes conceptos. Un sistema de termografía pasiva se basa en la medida del estado “natural” de los materiales, diferenciando defectos internos mediante variaciones de su emisividad o diferente respuesta al entorno. Por otro lado, para aplicar termografía activa hay que utilizar una fuente de excitación para calentar el material y ver su respuesta tanto en calentamiento como en enfriamiento.

Las piezas pueden excitarse mediante diferentes técnicas: vibración, inductiva, óptica o por aire caliente. La más utilizada y la empleada durante la realización de éste proyecto es la excitación óptica a través de focos halógenos. La energía óptica de estos focos alcanza la pieza y aumenta la temperatura de su superficie. Este aumento genera después una onda térmica en el material que se propaga en su interior mediante conducción. Este proceso se representa en la imagen 44. La utilidad de esta técnica se basa en que los defectos tengan un comportamiento diferente al del material base frente a la transmisión del calor. La excitación podrá ser de forma continuada o intermitente, elección que dependerá principalmente del tipo y espesor del material.

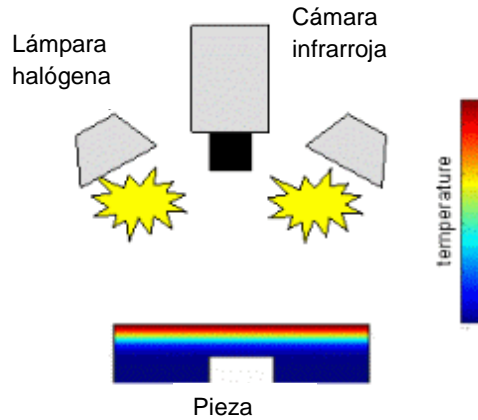


Imagen 44: Excitación óptica del material

Otras de las elecciones que hacer a la hora de configurar la inspección es la posición relativa cámara-pieza-focos. De esto dependerá la penetración de la onda térmica en el material y la consiguiente detección de radiación infrarroja por parte de la cámara. Hay dos tipos de posicionamiento: reflexión y transmisión. En el primero cámara y foco de excitación se colocan en el mismo lado de la pieza y principalmente es válido para espesores pequeños ya que la onda térmica tiene suficiente potencia para hacer el camino de ida y vuelta dentro del material. En transmisión, foco y detector se colocan en lados opuestos del material, utilizándose este modo en grandes espesores en los que no se detectarían cambios si la energía tuviera que recorrer doble camino. Estos modos son esquematizados en la imagen 45.

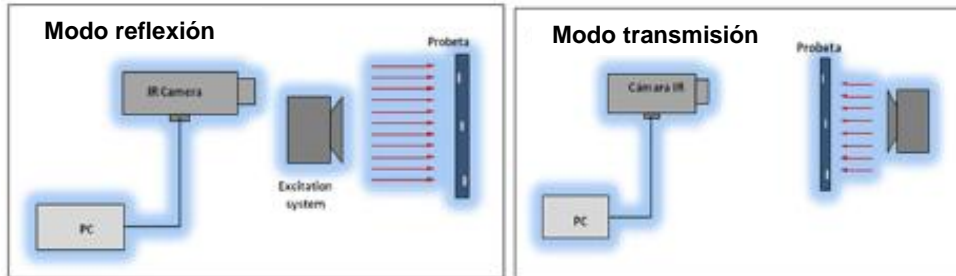


Imagen 45: Posición relativa de los elementos de inspección

4.2.1.2. Sistema utilizado

De todos los modos y parámetros que han sido comentados, se ha elegido excitación óptica y modo de reflexión para la realización de este proyecto, por haberse obtenido con ellos los mejores resultados.

La cámara utilizada propiedad de Tecnom, imagen 46, es una VARIO CAM HR y tiene las siguientes características:

- Rango de temperatura: $-40^{\circ}\text{C} \div 600^{\circ}\text{C}$
- Sensibilidad térmica: $<30 \text{ mK @ } 30^{\circ}\text{C}$
- Frecuencia de adquisición: $50\div 60\text{Hz}$

- Rango espectral: 7.5÷14 μm
- Tipo de detector: microbolometer (640 x 480 pixel)



Imagen 46: Cámara de termografía

La excitación empleada son focos halógenos de 750 W como los de la imagen 47. Hay disponibilidad de 4 de estas lámparas pero por dimensiones del foco y de la pieza solo uno es necesario para la inspección.

La excitación se ha realizado de manera intermitente con 2 objetivos: poder ver en un mismo ensayo diferentes tramos de enfriamiento y calentamiento y también para disminuir el tiempo en el que se aporta energía a las piezas ya que éstas son de pequeño espesor y no es necesario mucho aporte térmico.



Imagen 47: Lámparas halógenas utilizadas

5

Resultados y análisis

5. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con cada una de las inspecciones realizadas a los 8 laminados diferentes. Según la técnica, se han preparado diferentes análisis de los datos obtenidos que mostrarán las conclusiones más características.

5.1. Ultrasonidos Convencionales

A la hora de aplicar este método se ha empleado un equipo manual USM-35 y un palpador convencional monocristal de 5 MHz, descritos en el capítulo anterior. El objetivo de esta primera batería de ensayos ha sido encontrar una correlación entre las velocidades de propagación de sonido en el material y sus diferentes ciclos de curado. También la atenuación que el material provoca en las ondas sonoras ha sido calculada para detectar una posible influencia de la temperatura y el tiempo, los parámetros variados en los ciclos.

5.1.1. Calibración

Los palpadores de ultrasonidos miden el tiempo que tarda la onda sónica en recorrer el interior del material, llegar hasta la cara de fondo y volver. Calibrar consiste en relacionar el espesor de la pieza escogida con el tiempo medido entre ecos de entrada y de fondo de esta pieza. Al relacionar espacio y tiempo se obtiene un valor de velocidad de propagación del sonido en el punto en el que se realiza la calibración. La calibración se tiene que llevar a cabo en una zona sana y de caras paralelas, para que el recorrido del sonido no sea engañoso.

Para realizar esta tarea en producción industrial siguiendo las normas establecidas se diseñan y fabrican *reference standards*, piezas del mismo material a inspeccionar, con diferentes espesores y totalmente sanas (no se supone ningún defecto de fabricación).

Un hecho que puede falsear los resultados obtenidos con este ensayo es la diferencia comentada con anterioridad entre los acabados superficiales de las 2 caras de las piezas. Puede que las caras sean paralelas, pero el aumento de rugosidad en una de ella puede que haga que o no se perciba en toda su magnitud el eco de fondo por dispersión de las ondas o que el sonido no inicie su propagación de manera uniforme. Esta diferencia entre superficies se muestra de manera ampliada en la imagen 48.



Imagen 48: Acabado superficial aumentado (corte transversal)

Para calibrar se ha escogido la cara lisa como emisora por lo que se detectará el eco de fondo de la rugosa. El procedimiento marca que la calibración se tiene que realizar sobre 2 espesores diferentes, pero a falta de variación de éste, se utilizarán las 2 primeras repeticiones de la única medida de espesor, marcando la primera con los 1,9 mm medidos en la práctica y la segunda con 3,8 mm, el doble ya que el sonido ha recorrido el doble de camino antes de detectarse esta indicación.

La señal obtenida en la mayoría de las piezas es la de la imagen 49, donde el campo cercano se evita con una zapata de metacrilato.

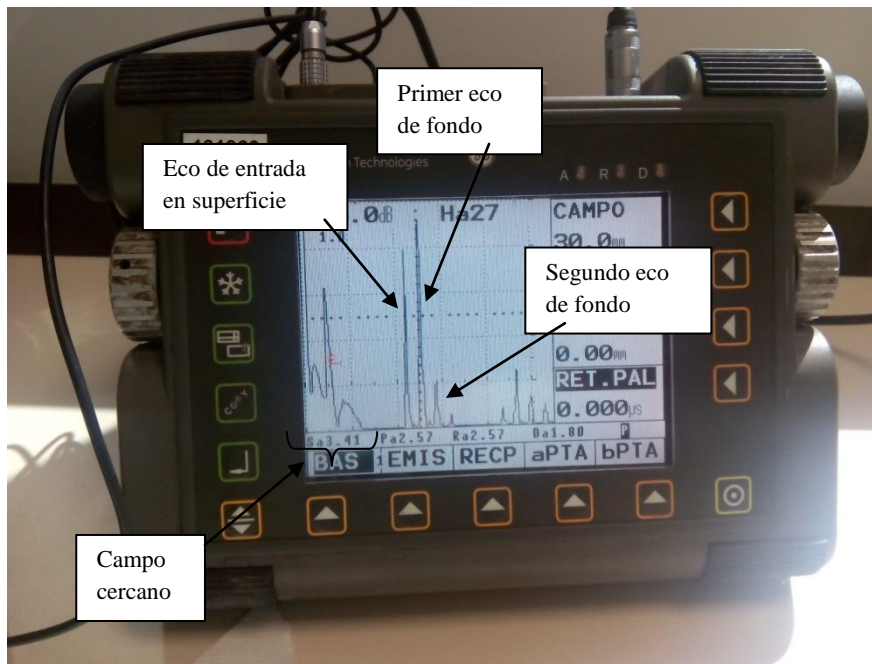


Imagen 49: Señal ultrasonica recibida del material

Al marcar la distancia de estos ecos, el equipo calcula automáticamente la velocidad de propagación del sonido. Esta velocidad ha sido calculada en 6 puntos del material diferentes para cada pieza y a continuación se ha realizado un análisis estadístico con estos datos para eliminar la influencia de la heterogeneidad del material. Los resultados han sido los mostrados en la tabla 7 (con la velocidad de propagación en m/s):

Medida →	1	2	3	4	5	6	
Ciclos	1a	3029	3102	3123	3009	3091	3081
	1b	3029	3040	2961	3070	3123	3091
	2a	3081	2814	3123	3070	3081	2780
	2b	2832	3123	3070	3134	3060	3060
	2c	2788	3070	2970	3155	3040	3155
	3a	3155	3112	3123	3060	3050	3081
3b	3200	3091	3070	3144	3102	3102	

Tabla 7: Velocidades de propagación medidas

Las velocidades medias y coeficiente de variación (desviación estándar respecto al valor medio en porcentaje) que se obtienen son las de la tabla 8:

	1a	1b	2a	2b	2c	3a	3b
Media aritmética (m/s)	3072.5	3052.3	2991.5	3046.5	3029.7	3096.8	3118.2
Coef. de variación (%)	1.44	1.84	5.09	3.61	4.55	1.3	1.5

Tabla 8: Resultados análisis estadístico

Representando gráficamente estos resultados en la imagen 50, se puede llegar a algunas conclusiones a través de la interpretación visual y analítica de los valores. En cada grupo de gráficas se han incluido los datos del ciclo de referencia, 1a, para poder comparar con el material diseñado por el fabricante.

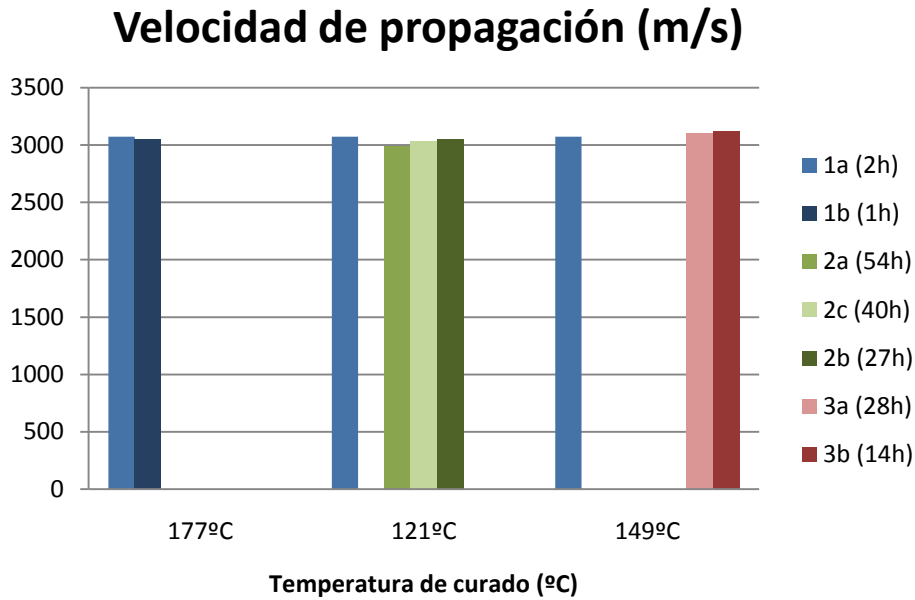


Imagen 50: Comparación de velocidades de propagación

En detalle los valores en la imagen 51:

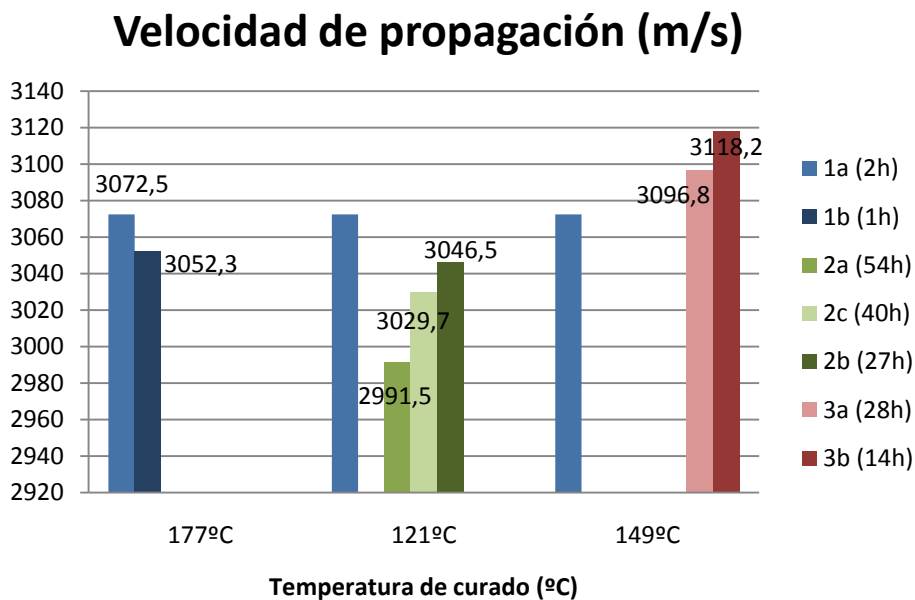


Imagen 51: Comparación de las velocidades de propagación en detalle

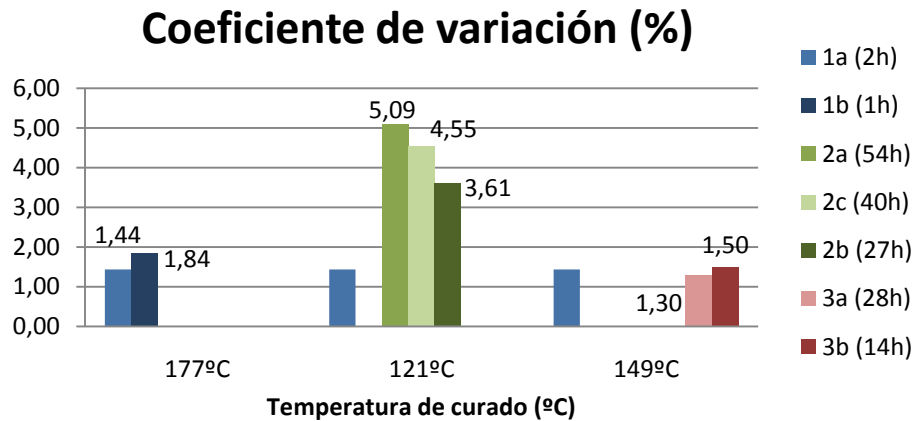


Imagen 52: Coeficientes de variación de las velocidades medidas

Respecto al valor de velocidad del ciclo base (1a), la velocidad en el resto de materiales tiene una diferencia de: -0.66% (1b), -2.64% (2a), -1.4% (2b), -0.84% (2c), +0.79% (3a), +1.48% (3b). Estos valores son pequeños y la propia variación de las medidas cubre en algunos casos estas diferencias.

Atendiendo a estas gráficas se puede ver un comportamiento bastante diferente en la segunda serie de ciclos, es decir, en los que corresponde a una temperatura de curado de 121°C. La velocidad media es más baja que en los otros casos y la tendencia es a aumentar si disminuye la duración del ciclo. También en la variabilidad de los valores (imagen 52) se observa esta tendencia diferente; la desviación es mayor en los ciclos de menor temperatura, siendo incluso mayor esta desviación que la del valor medio de velocidad de estos ciclos respecto al valor del ciclo 1a.

Se podría concluir de estos hechos, que con un curado a 121°C no se llegan a alcanzar las mejores propiedades del material, ya que una menor velocidad de propagación implica menor grado de compactación en el material.

Sin embargo en la serie 3 de ciclos, aunque curados a menor temperatura que la serie 1, alcanzan unos mayores valores de velocidad del sonido y con esto podría deducirse que también un mayor grado de curado o compactación. En este caso, el aumentar el tiempo de curado contrarrestaría la temperatura más baja.

Si se comparan entre sí ciclos con la misma temperatura se podrá observar la influencia que tiene el tiempo de curado en la velocidad de propagación del sonido:

- En la primera tanda de ciclos a 177°C se observa que la velocidad se reduce al hacerlo la duración del ciclo, debido posiblemente a una falta de compactación por no completarse el ciclo diseñado.
- En los otros ciclos, en cambio, la tendencia es la opuesta; al reducirse el tiempo del ciclo, aumenta la velocidad. Esta variación no sigue una tendencia lineal, según se puede comprobar en los ciclos de 121°C (donde hay más de 2 puntos).

Esta diferencia de tendencia entre un grupo de ciclos y los otros podría deberse a la diferente ejecución, es decir, la interrupción producida en el curado de los ciclos de 121 y

149°C. A pesar de estas diferencias y tendencias las velocidades varían en un pequeño rango, siendo la mínima 2991.5 m/s y la máxima 3118.2 m/s.

En el laminado sin curar no ha sido posible medir ninguna velocidad con el palpador de 5 MHz elegido por lo que únicamente se ha podido estudiar su atenuación.

5.1.2. Atenuación

La atenuación del material pretende demostrar la caída de la presión acústica en el interior de éste debida a los efectos de dispersión y absorción en el material. En el material compuesto es el primero de estos efectos el que tiene mayor influencia, por la cantidad de interfaces internas que suponen cada una de las láminas que componen el laminado.

Normalmente esta propiedad se mide en dB/mm, es decir, en caída de presión acústica por unidad de longitud recorrida por el sonido. En los 7 laminados que han pasado por el autoclave se ha podido medir esta magnitud observando la caída de amplitud del segundo eco respecto del primero y sabiendo que entre ellos el sonido ha recorrido 2 veces el espesor (tiene que ir hasta el fondo y volver para volver a ser detectado).

En el que no está curado no se ha podido aplicar este método ya que no se detecta ningún eco de fondo. La caída que se ha medido en este caso es la del eco de emisión en superficie, comparando la amplitud cuando el palpador está libre y cuando está en contacto con la pieza (imagen 53).



Imagen 53: Señal de emisión sin contacto

Se produce una caída en el eco de emisión para el laminado sin curar desde un 98% de altura de pantalla sin contacto hasta un 37%. Además de disminuir la amplitud, también desaparecen sucesivas repeticiones del eco de emisión. En la imagen se pueden identificar hasta 4 de estas repeticiones, teniendo sólo una al entrar en contacto el palpador con la pieza sin curar.

La única medida sacada de este material es por tanto los 8.46 dB de caída del eco de emisión (de 98 a 37 % de altura de pantalla), sin que esto se refleje en detectar el eco de fondo.

De los otros laminados sí se ha podido obtener una medida de la atenuación en el material como la descrita unos párrafos más arriba. Los resultados han sido los siguientes reflejados en la tabla 9:

	1a	1b	2a	2b	2c	3a	3b
Altura 1°eco (%)	100	95	100	95	98	99	100
Altura 2°eco (%)	20	18	21	20	21	22	55
Caída en dB	13.98	14.45	13.56	13.53	13.38	13.06	5.19
dB/mm	3.68	3.80	3.57	3.56	3.52	3.44	1.37

Tabla 9: Atenuación en los diferentes laminados

Como se puede apreciar en la fila resaltada, todos los valores de atenuación son similares excepto el del material sometido al ciclo 3b. Esta diferencia tan marcada bien puede ser debida a un error de medida en el punto elegido o al hecho de que hubiera un defecto localizado en esta zona causado por la fabricación manual.

5.2. Ultrasonidos Phased Array

Mediante esta técnica, complementada con el sistema de inspección automática, se ha realizado un escaneo completo de la superficie de las diferentes probetas, por ambas caras ya que, como se comentó anteriormente, los diferentes acabados superficiales pueden dar lugar a una diferente respuesta ultrasónica.

Las medidas tomadas en este ensayo han sido de la amplitud de la señal ultrasónica y, sobre éstas, también se han realizado análisis estadísticos en diferentes zonas para comparar la señal en áreas cercanas a los defectos con otras más alejadas.

5.2.1. Desarrollo del ensayo

La inspección se ha realizado con un palpador de 5 MHz y 32 elementos en inmersión, para lo que ha sido necesario un recipiente lleno de agua, elemento acoplante en este tipo de inspecciones, como el de la imagen 54. La única probeta que no ha sido evaluada con esta técnica es la que no está curada ya que la inmersión podría haber hecho que el material absorbiera agua y dañara su estructura interna.

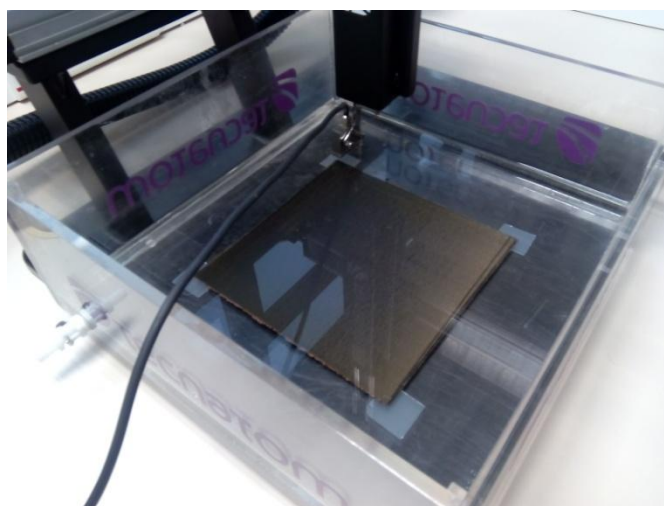


Imagen 54: Probeta en la cuba de inspección automática

Para la evaluación de los datos recogidos hay que configurar mediante software las llamadas “puertas”. Éstas permiten seleccionar el rango de datos a representar, tanto en profundidad (recorrido del sonido) como en amplitud, para solo utilizar la parte de la señal que pueda ser de utilidad. En este caso se han configurado de manera que la señal representada es la recibida entre el eco de entrada en pieza y el eco de fondo, es decir, que lo que aparezca en la imagen será lo que haya en el interior del material. Se obtendrán medidas de la amplitud de la señal y de la posición en profundidad del eco de amplitud más alta.

Tras la adquisición de los datos, aparte de analizar los datos estadísticos, el software InspectView también permite realizar mediciones sobre las piezas. En este caso resulta interesante porque se puede comprobar el tamaño de los insertos de nylon incluidos entre las láminas. Estos se verán identificados tanto por una amplitud diferente a la del material en su entorno, como por un recorrido del sonido diferente. Se comportarán como delaminaciones dentro del material que darán un eco anterior al eco de fondo.

5.2.2. Resultados en amplitud

Las cartografías obtenidas de las diferentes piezas con los defectos dimensionados sobre ellas están representadas utilizando una escala de grises de negro a blanco. El límite inferior, color negro, se relaciona con un 0% de amplitud de la señal. Si la señal recibida ocupa el 100% de la altura de pantalla en el A-Scan, el color asociado a este valor es el blanco.

Las siguientes tablas 10 y 11 muestran los resultados en amplitud de cada uno de los ciclos y por ambas caras de las probetas, así como la medida de los defectos obtenida.

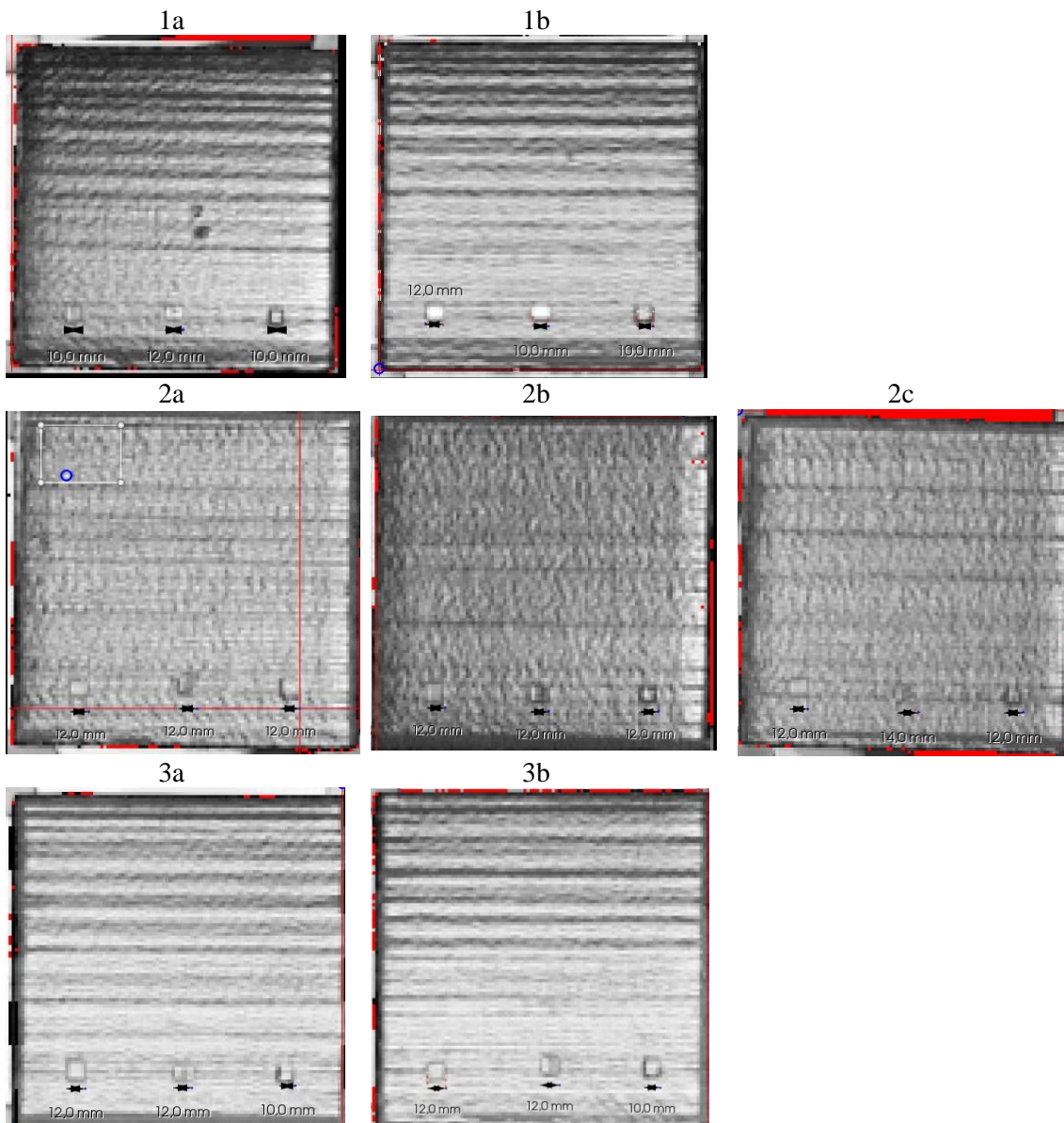


Tabla 10: C-Scan de amplitud obtenido de las superficies lisas

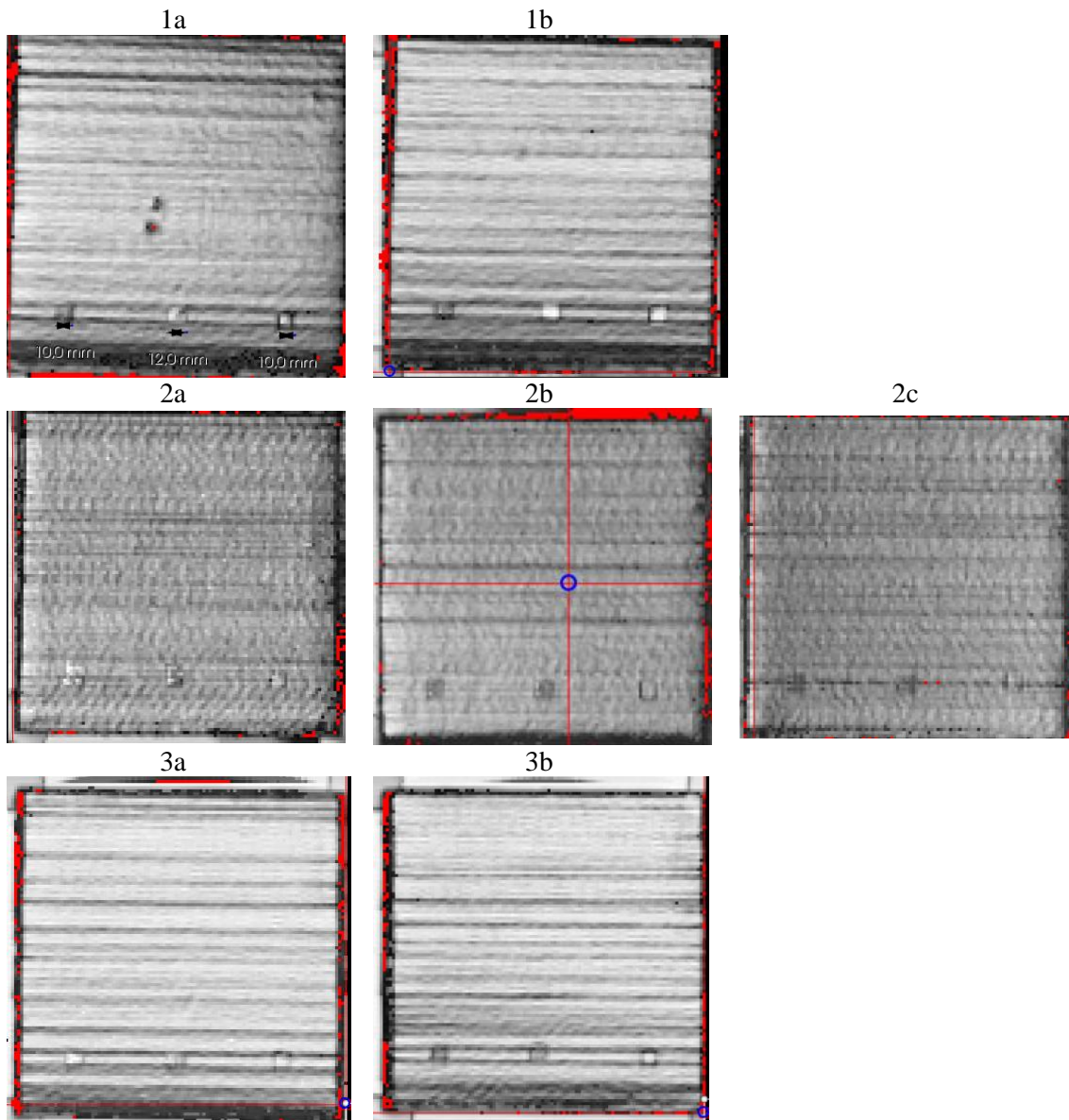


Tabla 11: C-Scan de amplitud obtenido de las superficies rugosas

Tras mostrar los resultados en amplitud de las diferentes inspecciones, se pueden sacar varias conclusiones a simple vista antes de acudir al análisis numérico y estadístico de los resultados.

Atendiendo a la nitidez con la que se pueden apreciar los defectos, en la serie 1 y 3 se aprecian con mayor calidad y con el contorno más definido, mientras que en la serie 2 están más difuminados con el material sano.

En todas las probetas se puede ver claramente la orientación de las fibras de los laminados unidireccionales (horizontal).

En los ciclos que menos homogeneidad se aprecia es en la serie 2. Esto puede ser debido a que la temperatura de su ciclo está muy lejos de la propuesta por el fabricante y a pesar de que se complemente con mayor duración, no llega a alcanzarse el mismo grado de polimerización en el material. Comparando los ciclos 3 y 1 que son más parecidos, se podría

decir incluso que el curado a 149°C (serie 3) da una señal más “limpia” y de mayor amplitud que el curado a los 177°C que recomienda el fabricante. Puede que en este caso, al no ser la temperatura de curado tan baja, el aumentar la duración del ciclo sí que ayude a completar la reacción de polimerización. Este hecho coincide con la conclusión que se obtenía en el apartado anterior, en el que también se observaba un mayor valor de velocidad de propagación del sonido en la serie 3.

A pesar de estas conclusiones obtenidas con el análisis visual de los resultados hay que tener en cuenta que la calidad de la señal es muy sensible a la perpendicularidad del palpador con la superficie. La influencia de este factor se ha disminuido al usar un sistema automático que siempre posiciona el palpador de la misma manera y colocando las piezas siempre apoyadas sobre el fondo de la cuba de inspección, pero las propias irregularidades de las probetas pueden causar un ligero cambio en la incidencia de la onda ultrasónica.

Por esto también se aprecian diferencias si la inspección está hecha desde la cara lisa o desde la rugosa: desde esta última parece haber una amplitud mayor, hecho que puede deberse a tener la cara lisa como fondo para que la onda rebote de manera más uniforme y el eco tenga una amplitud más homogénea.

5.2.3. Resultados en recorrido del sonido

El mismo análisis de las cartografías de amplitud (C-Scan) se puede hacer para las de recorrido del sonido, que muestran en este caso la profundidad a la que aparece el eco de mayor amplitud de la señal.

En este caso se ha empleado una paleta de colores tipo “rainbow”, como la de la imagen 55, que va desde el rojo, color que se correspondería con un eco muy cercano a la superficie de la pieza, hasta el azul, que en este caso se relaciona con el eco de fondo de la pieza.



Imagen 55: Escala de colores empleada en recorrido del sonido

Esta visualización depende más que la de amplitud de la configuración de la puerta. Si la puerta no se establece en la posición correcta se pueden perder ecos de defectos. Por ejemplo, el objetivo en este proyecto es saber lo que pasa en el interior del material por lo que las puertas se han configurado empezando justo tras el eco de entrada en pieza (para eliminar la saturación de la señal ya que este eco suele ser de muy alta amplitud) y finalizando tras el eco de fondo. Puede ocurrir que un defecto muy cercano a la superficie se confunda con este eco de entrada y no llegue a pasar por la puerta y ser representado por lo que se estaría perdiendo información.

En esta pieza se podría tener este problema, ya que los defectos izquierdo y derecho en la imagen van a estar muy cerca de las superficies superior e inferior de la pieza (solo están situados a una lámina de profundidad respecto a las superficies). Los ecos de los defectos podrían confundirse con los de entrada y fondo, pero que esto ocurra depende de la frecuencia de inspección empleada. En este caso, los 5 MHz utilizados son suficientes para tener la resolución en profundidad requerida para detectar estos defectos, por lo que son perfectamente identificables en los C-Scan de recorrido del sonido.

A continuación se muestran los resultados en recorrido del sonido por ambas caras, en las tablas 12 y 13 ya que como se ha visto en los resultados en amplitud, la señal es diferente.

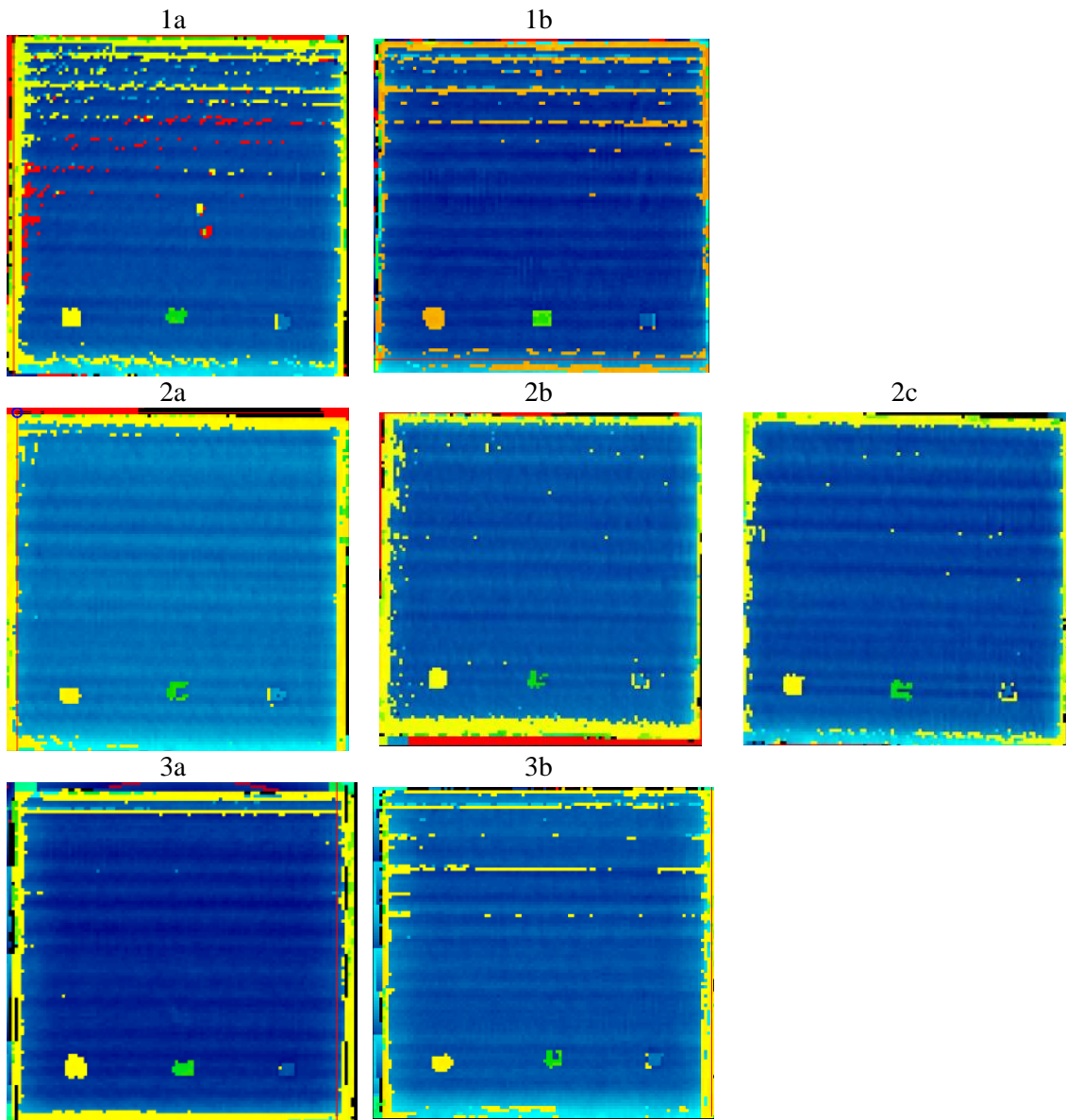


Tabla 12: C-Scan en recorrido del sonido obtenido de las superficies lisas

Se puede apreciar en estas imágenes que cada uno de los defectos se ve de un color diferente que corresponde a su profundidad. Teóricamente el amarillo correspondería a 0.2 mm, espesor aproximado de una lámina, el verde intermedio estaría a 1 mm de profundidad y el último azul que se confunde con el fondo pero unos tonos más claros se asociaría a 1.8 mm. Esto sería el resultado ideal si el laminado midiera 2 mm de espesor, pero en realidad la medida es de 1.9 mm.

Hay que tener en cuenta que asignarle un espesor teórico a cada lámina de 0.2 es aproximado y que tras el curado en el autoclave y la compresión causada por el vacío, los espesores de las láminas varían y no de la misma forma dependiendo de la profundidad a la que estén, por acumulación de resina en las capas más bajas.

Más adelante se proporcionará una tabla (14) donde se indiquen las profundidades a las que han sido detectados los diferentes defectos. A continuación, los resultados de la inspección desde la cara rugosa.

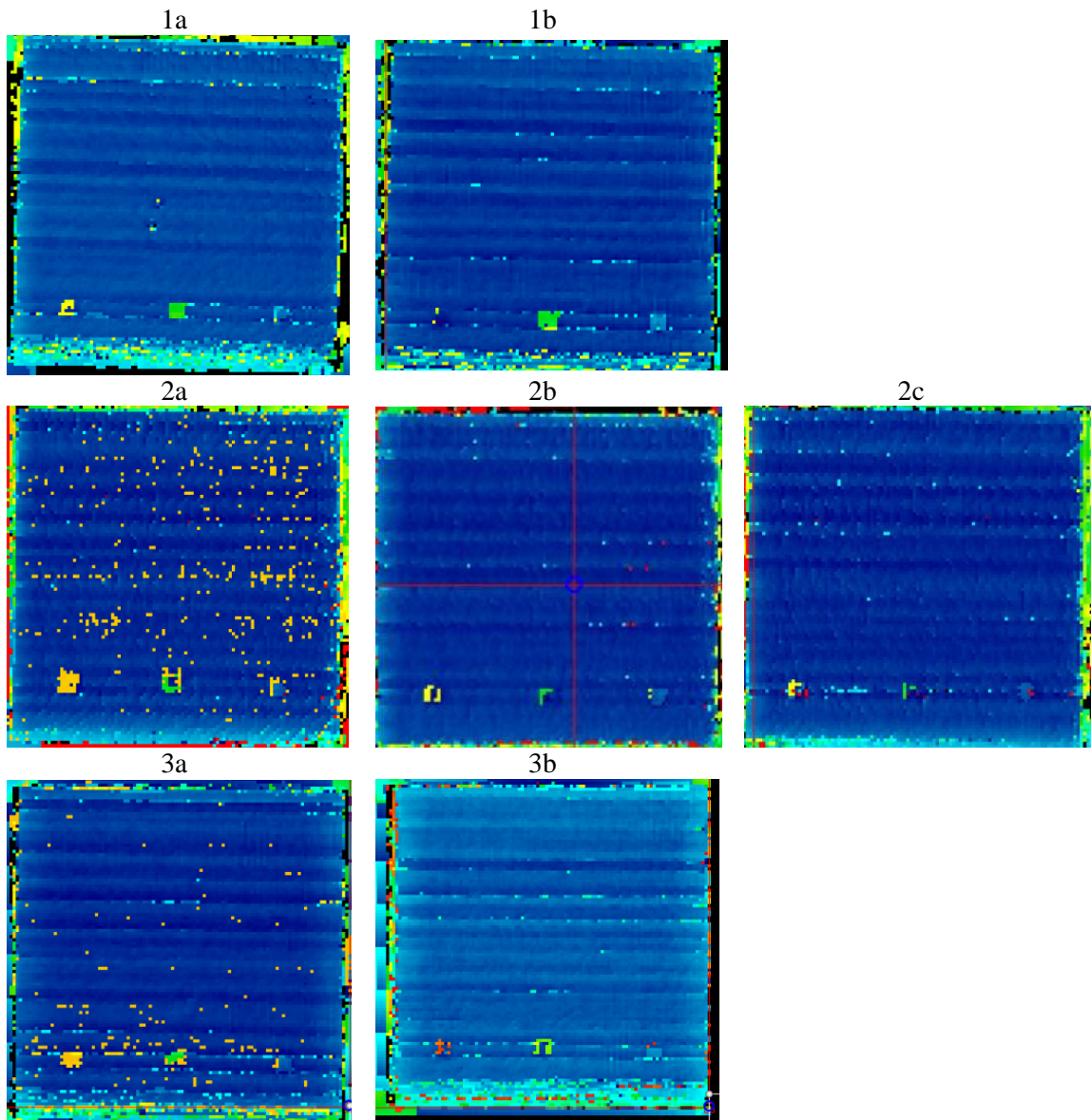


Tabla 13: C-Scan en recorrido del sonido obtenido de las superficies rugosas

A simple vista se observa que desde la cara rugosa parece que la señal tiene más ruido y que los defectos no se ven tan definidos como desde la cara lisa. En la mayoría de los defectos se pierde señal en el centro.

Los defectos se han numerado de 1 a 3 de izquierda a derecha, en el orden en que aparecen en la imagen 56. El de la izquierda siempre será el más cercano a la cara superior y el de la derecha el más próximo al fondo de pieza.

Un corte transversal de la pieza daría la siguiente representación:

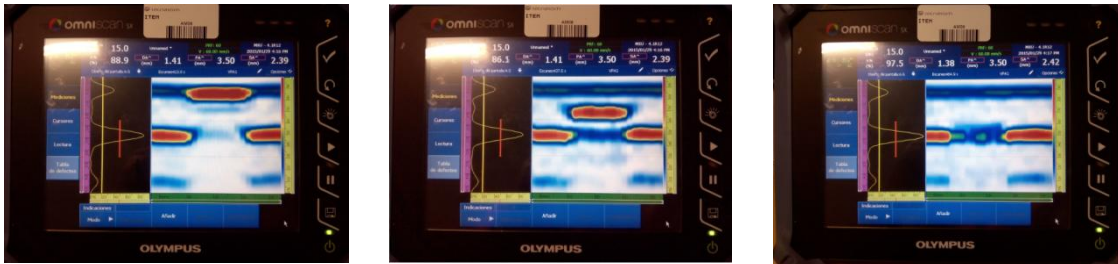


Imagen 56: B-Scan de cada uno de los defectos

	1a			1b		
Defecto	1	2	3	1	2	3
Tamaño (mm)	10	12	10	12	10	10
Profundidad (mm)	0.5	1.08	1.79	0.3	0.93	1.78

	2a			2b			2c		
Defecto	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Tamaño (mm)	12	12	12	12	12	12	12	14	12
Profundidad (mm)	0.54	1.11	1.91	0.4	1.1	1.92	0.5	1.04	1.87

	3a			3b		
Defecto	1	2	3	1	2	3
Tamaño (mm)	12	12	10	12	12	10
Profundidad (mm)	0.42	1.02	1.82	0.5	1.05	1.8

Tabla 14: Medida y posicionamiento de los defectos mediante señal ultrasónica

Observando los datos de profundidad de las tablas se aprecia que los defectos número 1 están más lejos de la superficie inicial que los defectos número 3 de la superficie de fondo (a 1.9 mm). Esto puede ser debido a que son los más cercanos a la cara lisa, superficie que estaba en contacto con el molde/herramienta, es decir, era la cara inferior durante el curado y puede que esto causara una ligera acumulación de resina, mayor que en las caras superiores.

También se puede observar que el defecto número 3 en los ciclos de curado 2 se mide prácticamente sobre la superficie final o más atrás (1.91, 1.92 y 1.87 mm), hecho físicamente imposible ya que los laminados miden 1.9 mm de espesor. La causa de estas medidas erróneas es que la peor calidad de este material no ha permitido calibrar correctamente en una zona sana, es decir, la velocidad de propagación obtenida en la zona sana no se corresponde con la que hay en la zona cercana a los defectos. En este material, como se observó en el apartado anterior, existían mayores desviaciones en las medidas de velocidad de propagación.

En cuanto a la medida de los defectos, existe una resolución de 2 mm por lo que solo se han tomado medidas de 10, 12 y 14 mm. La medida exacta del defecto son 10 mm por lo que la mayoría de los que se han medido están dimensionados, esto puede ser debido a que el contorno

del defecto no coincida con el contorno del pixel que representa cada punto con datos ultrasónicos, y por lo tanto invada el contiguo, aumentándose así la dimensión medida. En el caso de la segunda serie de ciclos, la mayor irregularidad del material hace que esto ocurra en todos los casos, llegándose a dimensionar uno de los defectos de 10 como uno de 14 mm.

Finalmente, para visualizar la posición de estos defectos en un A-Scan, se va a mostrar la señal en zona sana de la pieza comparada con la señal ultrasónica en puntos donde se encuentran los defectos para ver que estos siempre aparecen entre el eco de entrada y el de fondo. Solo se van a mostrar los A-Scan de un laminado, ya que los de todas las probetas son similares y la única diferencia apreciable ya está reflejada en las anteriores tablas (medida y posicionamiento de defectos).

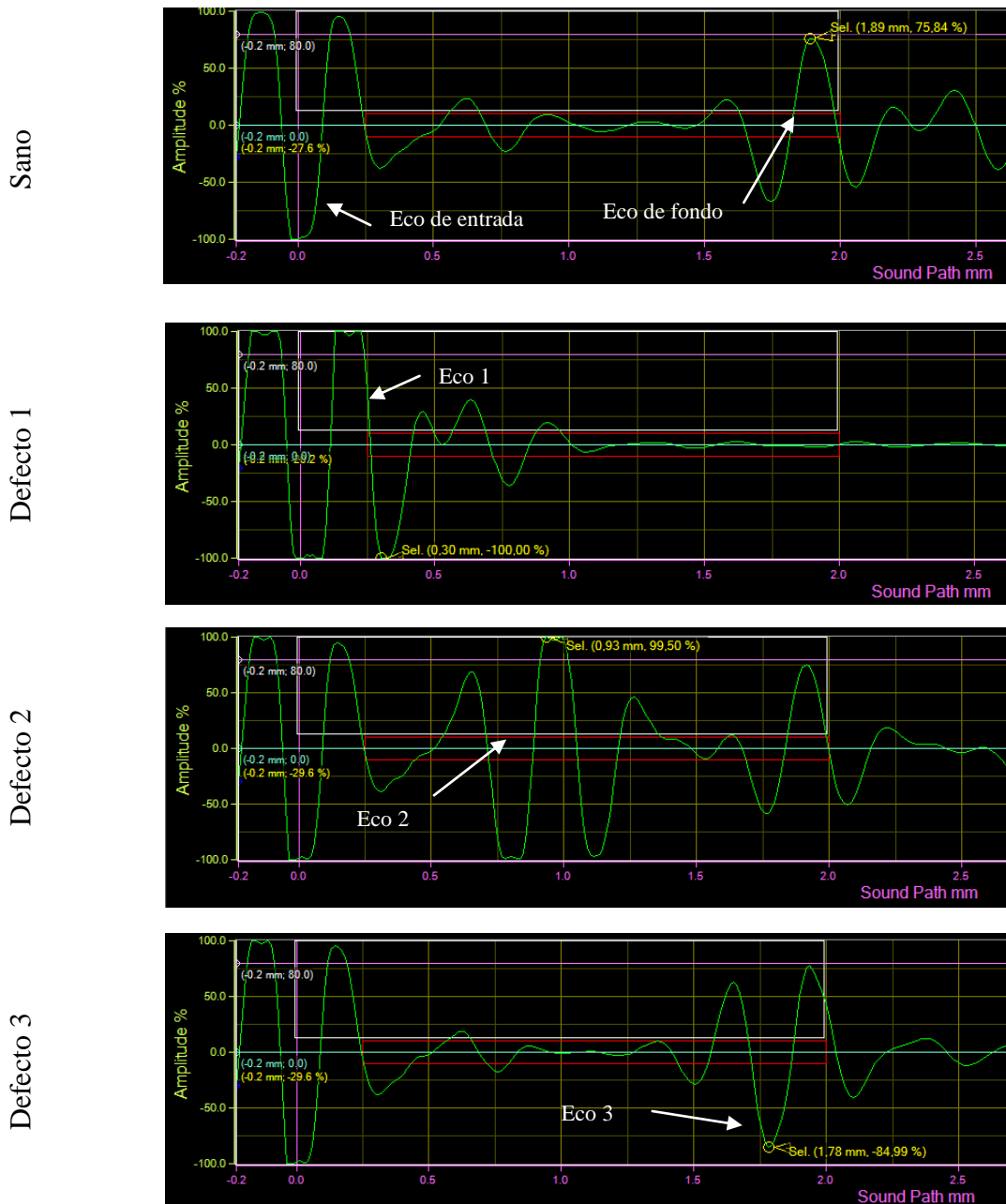


Imagen 57: A-Scan señal en zona sana y en defectos

Comparando estas señales se puede apreciar que el eco del defecto intermedio es el que está más definido, mientras que los defectos 1 y 3 podrían confundirse con el eco de entrada y el de fondo, respectivamente, por estar muy cerca de las superficies. La posición del defecto se define al estar el punto de mayor amplitud de la onda ligeramente atrasado o adelantado respecto al punto de la onda que define el inicio y el final de la pieza.

5.2.4. Análisis estadístico de los resultados en amplitud

Se ha realizado un análisis estadístico de los valores de amplitud en cada uno de los laminados por ambas caras. Para ello se han seleccionado áreas del mismo tamaño y se han posicionado en diferentes partes de los laminados, cerca y lejos de los defectos. Se han tomado medidas de la amplitud media en estas áreas y de las desviaciones estándar representadas como coeficiente de variación y los resultados son los representados en las imágenes 58 y 59:

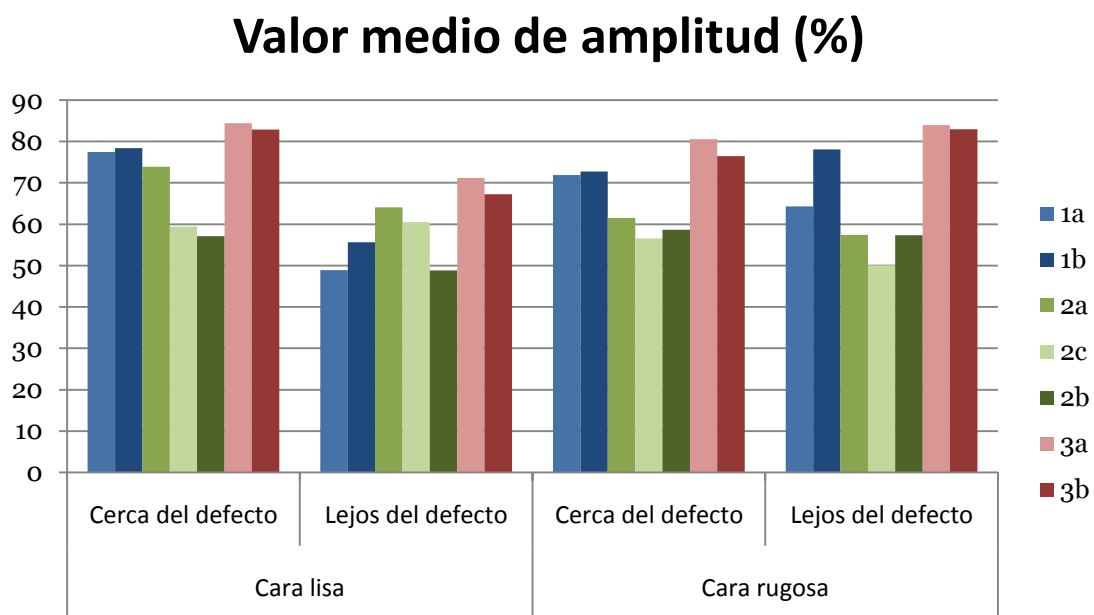


Imagen 58: Amplitud de la señal ultrasónica en diferentes zonas de las probetas

A simple vista no parece observarse ninguna relación entre los diferentes grupos (cara lisa, rugosa, cerca, lejos del defecto, etc.) ya que en la inspección desde la cara lisa se observan mayores amplitudes cerca del defecto, al contrario que en la inspección desde la otra cara, que las mayores amplitudes están en la zona sana lejos del defecto.

Una tendencia que se repite en todos los grupos y que ya se obtuvo como conclusión en el análisis de los C-Scan, es el hecho de que la amplitud de la serie 3 de ciclos es siempre mayor o en el rango de valores de la serie 1, causado posiblemente por el aumento en la duración del ciclo sin que la disminución de la temperatura haya alcanzado un valor que comprometería el estado de la resina del material.

La serie de ciclos 2 es independiente a esta tendencia. En ocasiones es mayor y en otras es menor, incluso al observar que es lo que pasa al disminuir la duración del ciclo (2a → 2c → 2b) no hay ninguna conclusión posible ya que en el caso de la inspección desde la cara lisa la amplitud disminuye con la duración del ciclo, pero no existe el mismo comportamiento en los

resultados de la inspección desde la cara rugosa, donde la menor amplitud es para la duración intermedia. También se puede decir de esta serie de curados que se obtienen en todos los casos valores intermedios del conjunto de amplitudes medidas. Valores en apariencia más uniformes pero que reflejan una falta de definición de la señal en el material, más difusa y sin un eco claro.

Volviendo a la comparación de las series 1 y 3, atendiendo a la influencia de la duración del ciclo para cada una de las temperaturas de curado, en todos los grupos, para los curados tipo 1 la amplitud aumenta al disminuir la duración. Lo contrario ocurre en los ciclos tipo 3, para los que la amplitud disminuye al disminuir la duración. Esta diferencia de comportamientos frente a la variación de tiempo de curado también se observó en la parte de calibración con el cálculo de velocidades de propagación. Con esto se afianza la hipótesis de que las interrupciones en el curado del ciclo pueden haber tenido ciertos efectos en las propiedades del material.

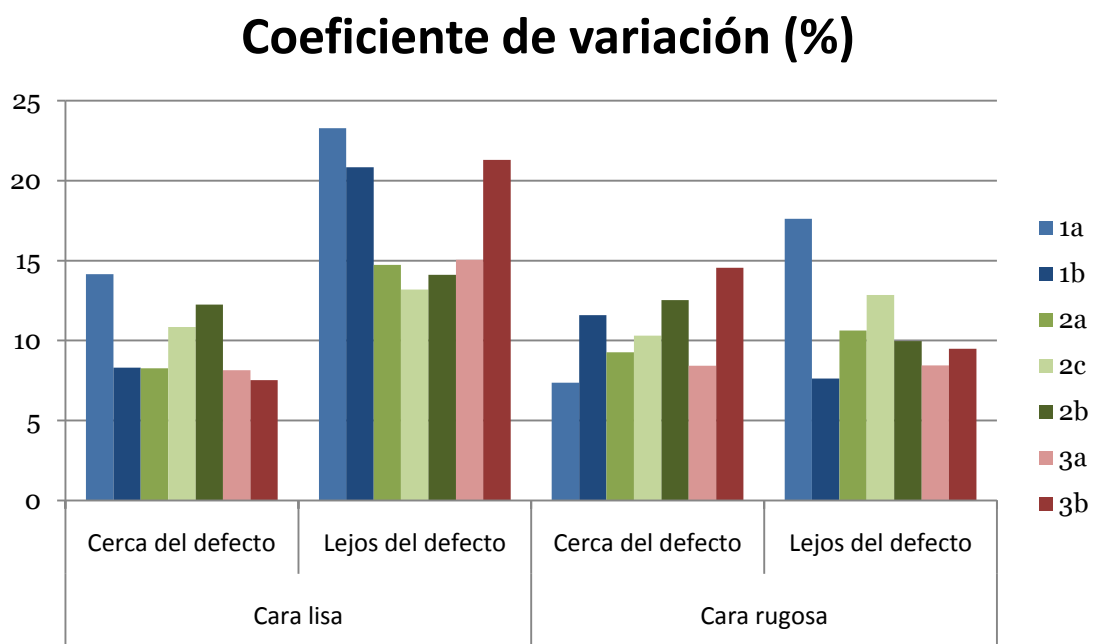


Imagen 59: Coef. de variación de la señal ultrasónica en diferentes zonas de las probetas

Si se comparan los coeficientes de variación respecto al valor medio mostrado en la gráfica previa, destaca el hecho de que para amplitudes mayores la dispersión es menor y viceversa. Esto es debido a que cuando la señal tiene un eco alto y bien definido tiene menos variaciones, y al contrario, cuando el eco tiene menor altura y no se define completamente tiene más posibilidades de variar de un punto a otro.

La serie 2 sigue quedando en valores intermedios del conjunto de desviaciones con un nivel bastante acotado. En la inspección desde la cara lisa lejos del defecto, es la zona donde mayores desviaciones y menor nivel de amplitud se obtienen, debido posiblemente a un fondo de pieza irregular (superficie rugosa de peor calidad en la zona sana).

5.3. Ultrasonidos láser

Como se ha explicado en el capítulo anterior, la técnica de inspección mediante ultrasonidos generados por láser es una técnica con ciertas ventajas como el margen de incidencia angular o el no necesitar contacto. Por esta y otras causas es una técnica que se está introduciendo en producción por proporcionar una inspección 100% completa de piezas complejas.

5.3.1. Desarrollo del ensayo

Durante la realización de este ensayo las piezas se han dispuesto en una mesa bajo la cabeza láser como se muestra en la imagen 60. Con una misma configuración del ensayo se puede conseguir un área de inspección suficientemente grande como para adquirir los datos de todas las probetas a la vez, sin tener que ir posicionando una a una.



Imagen 60: Configuración ensayo láser UT

Las probetas están dispuestas por filas empezando desde la esquina superior de la imagen y acabando en la derecha (Fila 1: 1a, 1b y no curado; Fila 2: 2a, 2b y 2c; Fila 3: 3a y 3b).

La adquisición de datos se ha hecho con una velocidad de 600 Hz y con una resolución de 2x2 mm. Esto quiere decir que se han tomado datos de un punto cada 2 mm y que en 1 segundo se recogen datos de 600 puntos. La trayectoria de adquisición de datos sigue la

geometría de un peine, generando ultrasonidos punto a punto por filas de 2 mm y al acabar una vuelve al principio de la siguiente.

Los datos se generan con un spot láser, diámetro del haz óptico de láser, de 12 mm mientras que la zona de detección tiene un diámetro de 5 mm. Estos dos puntos, generación y detección van sincronizados en tiempo y espacio para que no exista pérdida de datos. El mismo principio que para el phased array cuando los elementos piezoeléctricos están transmitiendo y recibiendo a la vez.

Una vez adquirida la señal se puede evaluar configurando diferentes puertas al igual que en el análisis anterior ya que lo que se realiza es un postprocesado de la señal mediante software. En este caso el SW utilizado para la evaluación ha sido NDTkit, desarrollado y cedido por Airbus.

5.3.2. Evaluación de los C-Scan

Al igual que cualquier otra señal ultrasónica, se tienen las cartografías de amplitud y de recorrido del sonido que se van a mostrar a continuación. En este caso la inspección también se ha realizado por ambas caras de las probetas obteniéndose resultados muy diferentes por uno y otro lado por las razones que se explicarán más adelante.

Las paletas para representar los datos obtenidos serán las mismas que en el apartado anterior, escala de grises de negro a blanco para amplitudes y escala de colores para el recorrido del sonda. Lo que sí cambiará serán los límites de estas escalas, sobre todo en la de amplitud, ya que los valores son menores que en el caso de phased array. Los límites se modificarán con la intención de conseguir una buena cartografía con el contraste suficiente para poder identificar los defectos.

Para la cara rugosa se han obtenido los resultados en amplitud de la imagen 61:

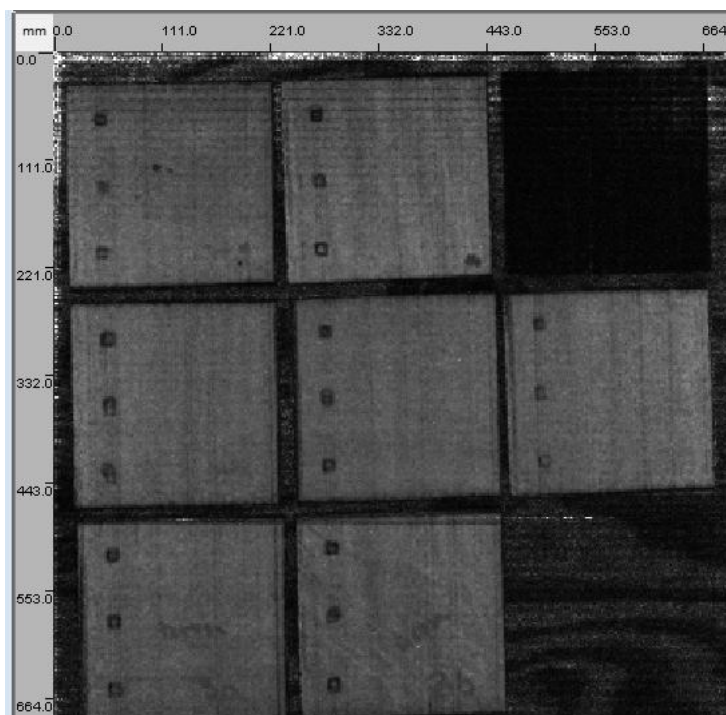


Imagen 61: C-Scan en amplitud desde cara rugosa

El hecho que más destaca, en la esquina superior derecha de la imagen, es que de la probeta sin curar ni siquiera se obtiene señal, simplemente ruido de muy baja amplitud. Esto es debido a la falta de compactación y de polimerización de la resina, que hacen que el material tenga un alto grado de porosidad y esté lleno de interfases que atenúan y dispersan la señal ultrasónica.

Entre los otros laminados apenas se aprecian diferencias a simple vista, por lo que habrá que realizar un análisis numérico para poder obtener alguna conclusión. La dirección de las fibras (vertical en este caso) sigue siendo apreciable aunque con menor intensidad con la que se veían en la adquisición con phased array. En recorrido del sonido si se apreciará más la dirección de las fibras, ya que la curvatura que provoca en la rugosidad puede dar lugar a la medida de diferentes “espesores”.

Los defectos en las piezas son fácilmente identificables por tener una menor amplitud y pueden detectarse completamente por caída de eco de fondo, es decir, configurando una puerta de altura superior a la amplitud del defecto y en el C-Scan se tendrá un vacío en esta zona (imagen62).

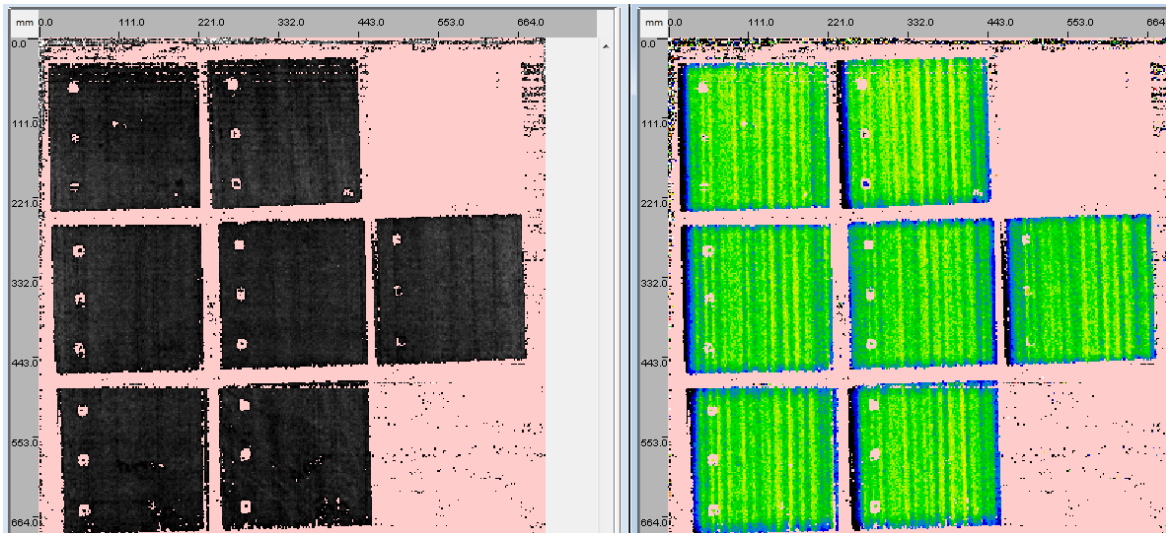


Imagen 62: Detección de defectos por caída de eco de fondo en amplitud y recorrido del sonido

También se pueden configurar las puertas igual que en el caso de phased array para que represente lo que haya en el material entre el eco de entrada y el de fondo, para así poder constatar que los defectos se detectan en diferentes profundidades.

Con esta puerta, como se verá más adelante en la imagen 63, la dirección de las fibras se representa más claramente, al centrarse en el interior del material. Sin embargo el único defecto identificable en profundidad es el central ya que su eco está bien diferenciado de entrada y fondo (en verde en la siguiente imagen). Los defectos 1 y 3 se confunden con los ecos de las respectivas superficies a las que están próximos. Se puede decir que con esta técnica no habría suficiente resolución de la señal en profundidad, pero aplicando diferentes filtros digitales se podría solucionar este problema.

Se continúa constatando que con cualquier configuración de evaluación sigue sin obtenerse señal clara de la probeta no curada cuando incluso las vetas de la madera bajo las piezas ofrecen señal ultrasónica.

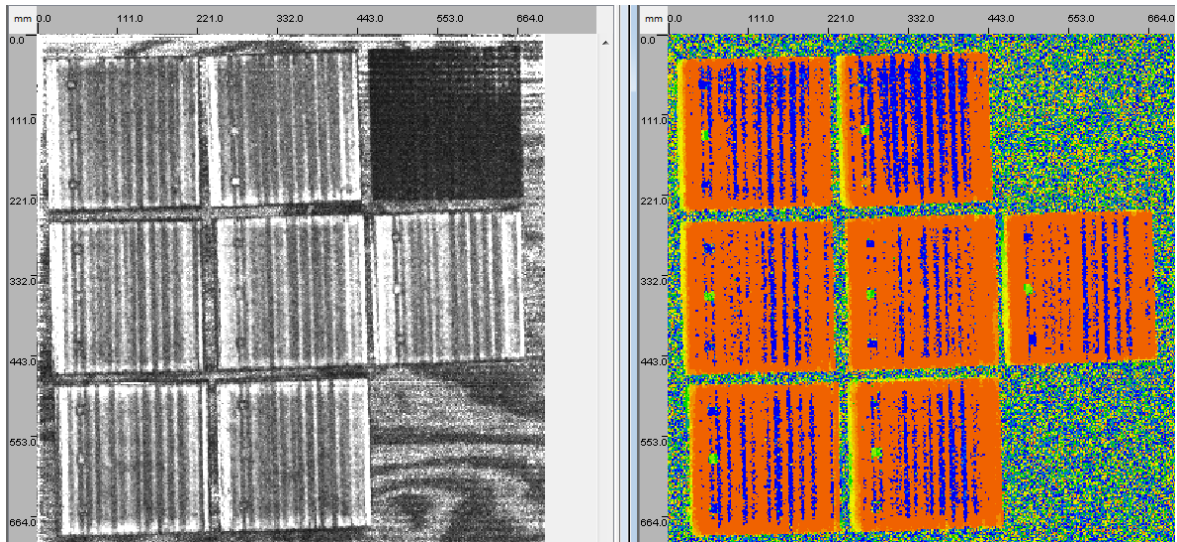


Imagen 63: Configuración de puertas en el interior del material

La señal obtenida de la cara lisa de las probetas puede que sea menos fiable a la hora de obtener conclusiones ya que el resultado en amplitud es el de la imagen 64:

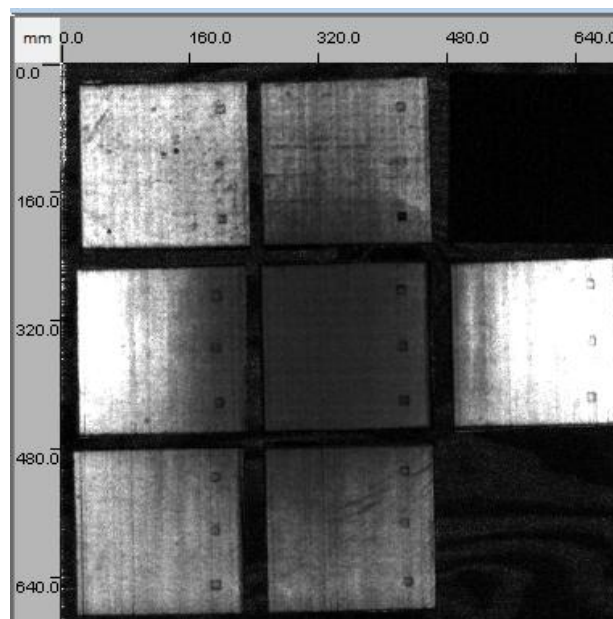


Imagen 64: C-Scan de amplitud desde cara lisa

Esta zona oscura es debida al procesado que el sistema hace de la señal recibida en función del ángulo de incidencia. Este efecto es únicamente apreciable en superficies lisas ya que la luz láser que incide en la pieza se refleja más que en una superficie rugosa. Esto hace que la energía térmica generada en la pieza sea menor y también así la señal ultrasónica. El sistema detecta automáticamente esta disminución de señal recibida e incrementa una ganancia digital interna que hace que se sature la señal alrededor del centro de la imagen.

Existe un algoritmo de corrección digital que evita este aumento excesivo de la amplitud y el resultado tras aplicarlo es el mostrado en la imagen 65:

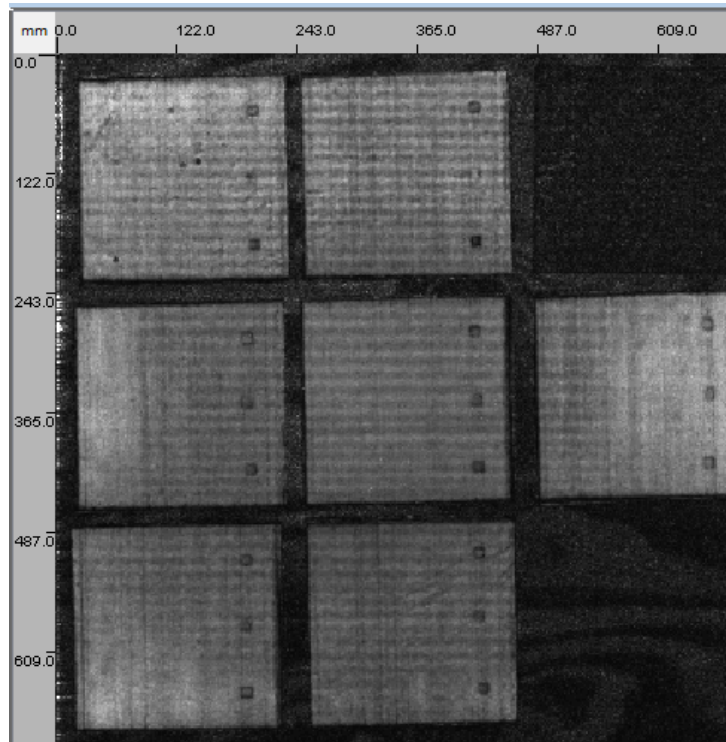


Imagen 65: C-Scan de amplitud después de aplicar la corrección

Se elimina el efecto de bordes saturados pero aparecen unas líneas horizontales que tienen que ver con la operación del interferómetro. Estas líneas no deberían mostrarse, por eso se ha comentado con anterior que posiblemente sean más fiables los datos ultrasónicos obtenidos de la cara rugosa.

Los defectos siguen teniendo menor amplitud que el material a su alrededor por lo que también se pueden detectar por caída de eco de fondo y comprobar su profundidad estableciendo puertas de evaluación entre el eco de entrada y el de fondo (imágenes 66 y 67).

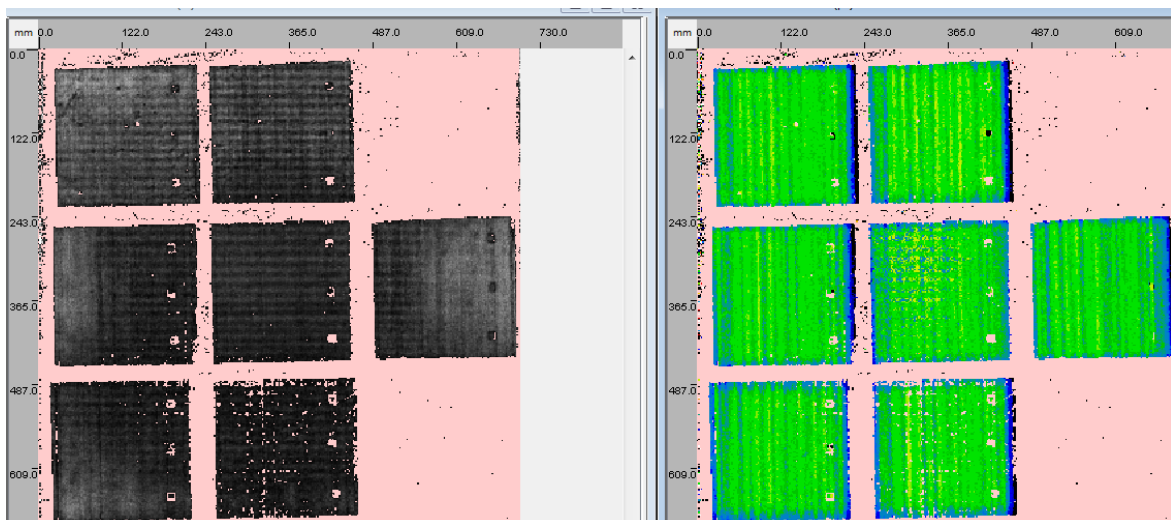


Imagen 66: Detección de defectos por caída de eco de fondo

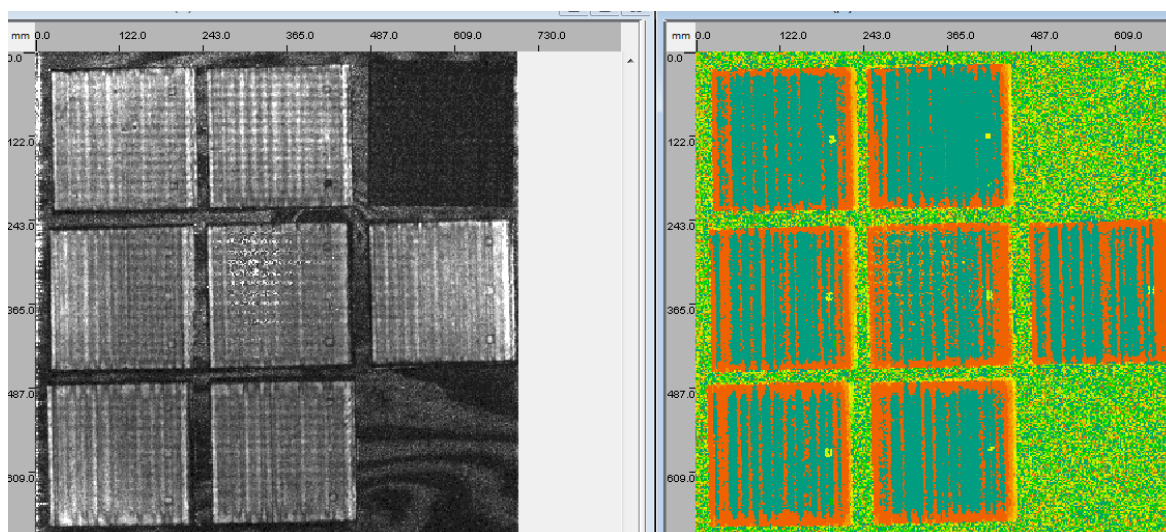


Imagen 67: Configuración de puertas en el interior del material

Otra vez el defecto intermedio es el único diferenciable en la cartografía de recorrido del sonido al mezclarse los otros con las superficies.

La probeta sin curar sigue dando el mismo resultado ruidoso de baja amplitud que en la inspección desde el otro lado, ya que para ésta, las dos superficies tienen el mismo acabado superficial.

5.3.3. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados de este ensayo se han medido, al igual que en el apartado anterior, valores medios de amplitudes y coeficientes de variación en un área determinada de las piezas, representados en las gráficas 68 y 69. No se han tomado valores en distintas áreas porque del experimento anterior no se obtuvo ninguna tendencia ni factor que influenciara los resultados claramente según el área de la pieza analizada.

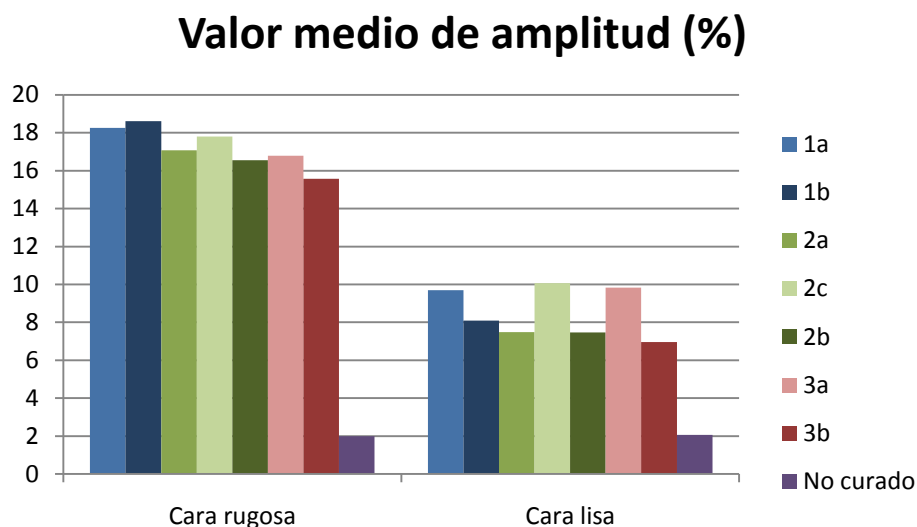


Imagen 68: Amplitud de la señal ultrasónica láser

Coeficiente de variación (%)

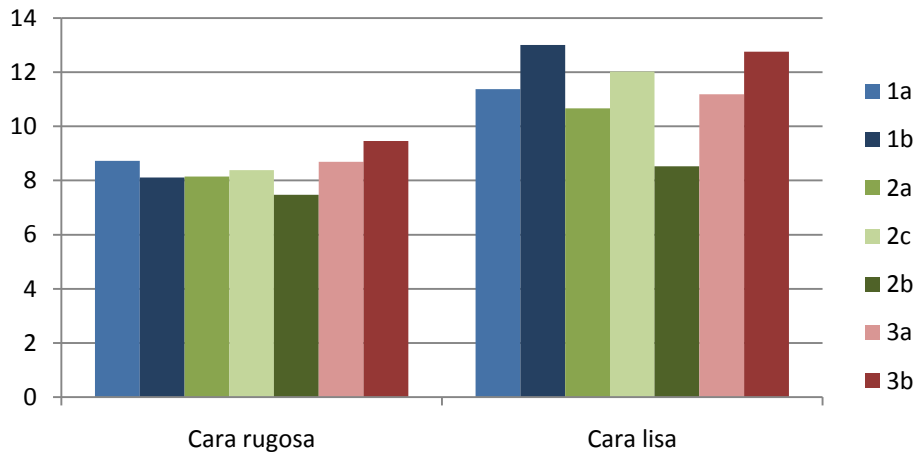


Imagen 69: Coef. de variación de la señal ultrasónica láser

En este caso tanto las amplitudes como las desviaciones toman valores mucho más uniformes que en el anterior ensayo de ultrasonidos. Esto hace que sea más difícil obtener alguna conclusión útil incluso evaluando los datos numéricos.

La única diferencia apreciable es la que se ha comentado antes entre los resultados de cara lisa y rugosa. En el caso de la inspección desde cara rugosa las amplitudes son mayores ya que la recepción de la señal es de mejor calidad. En cambio en la cara lisa aún tras aplicar la corrección los valores son menores y algo más irregulares (mayores desviaciones).

Esta técnica puede que no sea la óptima para identificar las influencias de los parámetros del ciclo de curado en el material, pero sin embargo no se queda atrás a la hora de señalar defectos o estructura interna del material.

5.4. Termografía

Como se ha comentado en la descripción de la técnica, este es un método de ensayo no destructivo que no requiere el contacto con la pieza. Durante este se excita térmicamente la pieza y a la vez se observa su comportamiento midiendo su calentamiento y enfriamiento.

5.4.1. Desarrollo del ensayo

La forma de excitación térmica de la pieza se ha definido por el sistema disponible: lámparas halógenas de 700 W cada una que iluminarán las diferentes probetas y se encargarán del aporte de energía térmica. Por dimensiones de estas lámparas sólo una será necesaria para cubrir la superficie de estas piezas.

Diferentes modos han sido probados antes de establecer la configuración definitiva de este ensayo: excitación continua (*pulsed thermography*), intermitente (*lock-in thermography*), en modos de reflexión y transmisión, etc. Todas estas opciones se han combinado con diferentes duraciones de la excitación para elegir finalmente aquella en la que visualmente se apreciaban más diferencias y se visualizaban mejor los defectos artificiales incluidos en las probetas.

En esta configuración final se emplea el modo de reflexión, esto es, con la cámara y el foco del mismo lado de la pieza, ya que el espesor de las piezas es pequeño. La excitación elegida finalmente es en forma discontinua, para así poder comparar tanto el proceso de enfriamiento como de calentamiento del material.

El periodo en el que se toman datos tiene una duración total de 30 segundos, divididos en 3 periodos en cada uno de los cuales, la iluminación está activa un 75% del tiempo. Es decir, de cada periodo de 10 segundos, 7.5 segundos se excita térmicamente la pieza y los otros 2.5 segundos restantes la probeta inicia el enfriamiento, para volver a calentarse en el siguiente periodo. Este ciclo se muestra en la imagen 70.

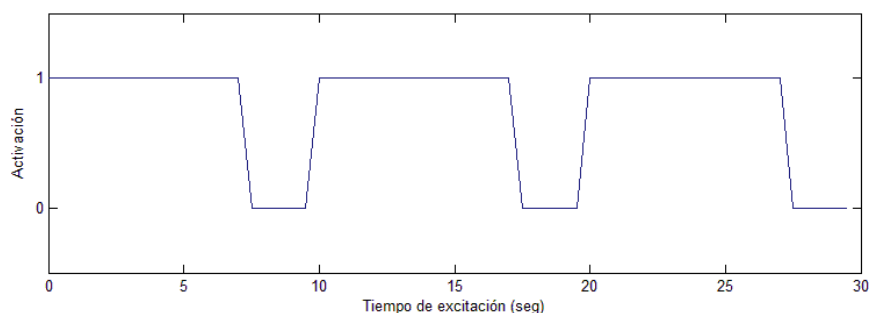


Imagen 70: Ciclo de excitación térmica

Tras la propagación de esta onda térmica por conducción a través del material, la señal vuelve y es recogida por la cámara. El software encargado de transformar la radiación infrarroja recibida en un mapeo de temperaturas, da también la posibilidad de obtener las transformadas de Fourier de la señal en amplitud y fase, que darán información acerca del comportamiento térmico tanto del material como de los defectos. En este caso, la señal transformada de amplitud es la que proporciona un resultado más representativo acerca de las probetas inspeccionadas.

5.4.2.Evaluación

Para obtener una primera impresión de los resultados, a continuación se muestran los mapas de temperatura, ajustados a la escala de temperatura presente en las probetas, en una escala de grises donde el valor mínimo corresponde al negro y el máximo al blanco. El ensayo al igual que los de ultrasonidos, ha sido realizado por ambas caras y se visualiza en las tablas 15 y 16.

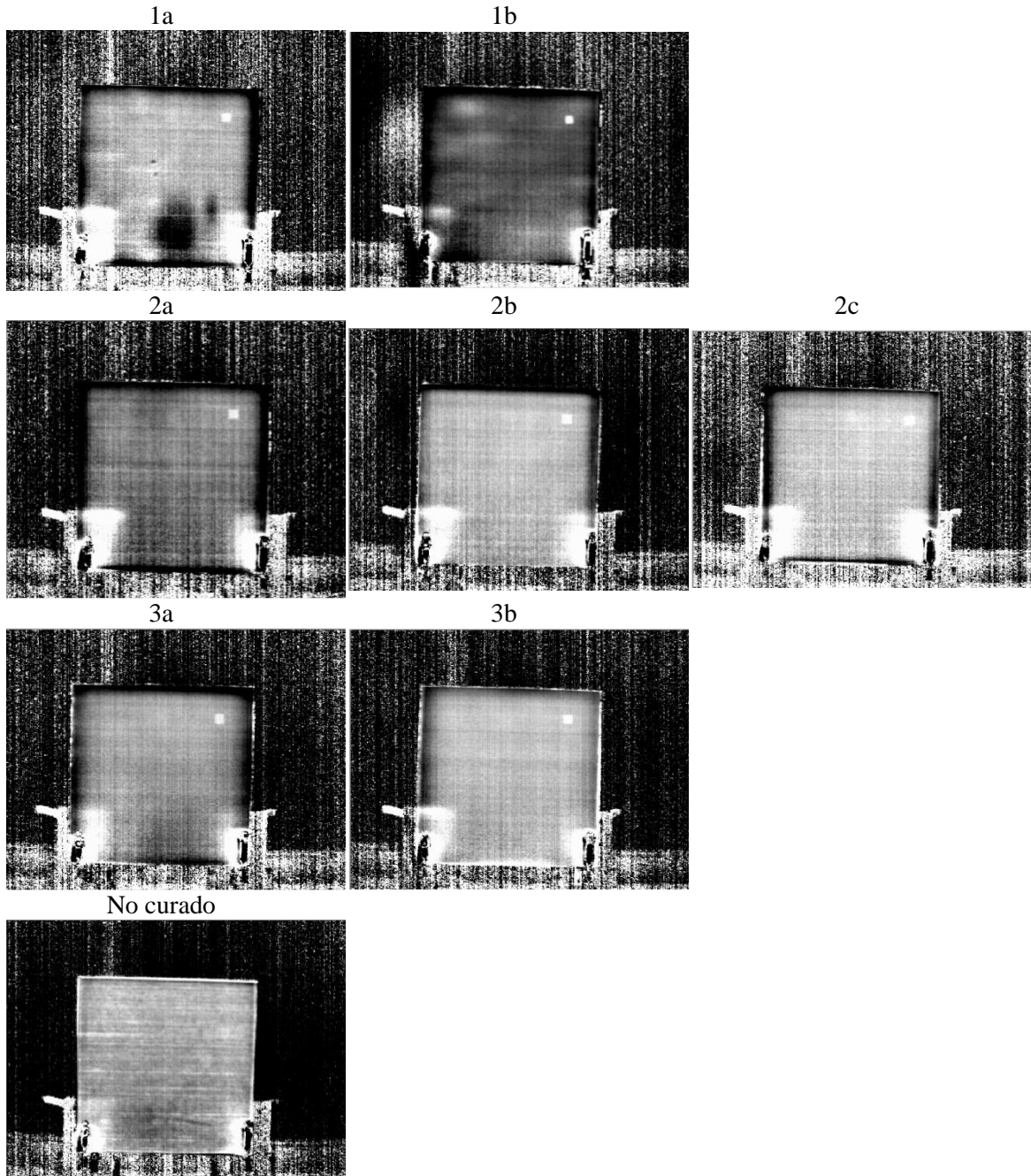


Tabla 15: Mapa de temperaturas (inspección por cara lisa)

A continuación, los resultados por la otra superficie de las probetas:

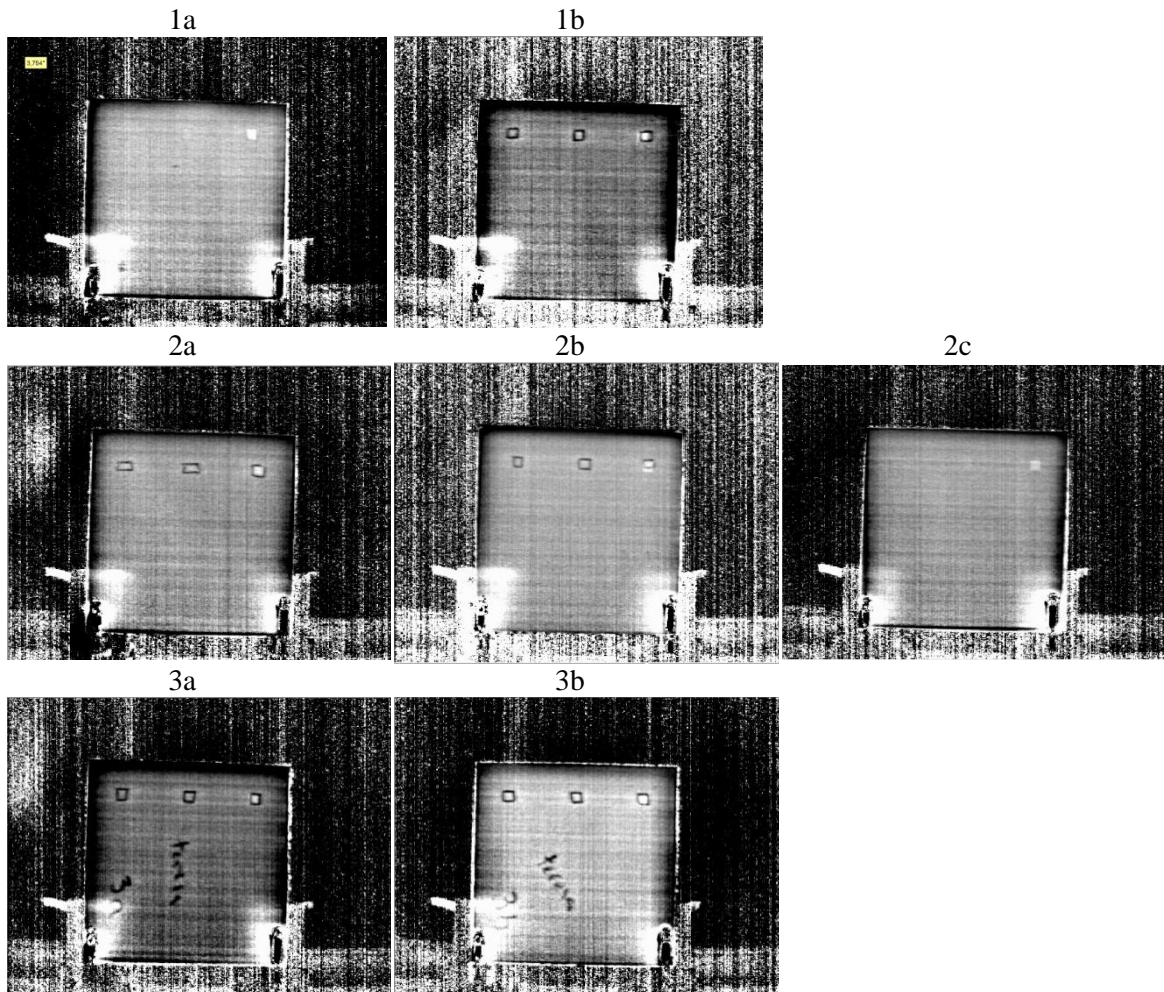


Tabla 16: Mapa de temperaturas (inspección por cara rugosa)

No todas las imágenes térmicas están escaladas a las mismas temperaturas sino que se ha ajustado el contraste en cada una. Por esto no se pueden comparar directamente, cosa que se hará más adelante representando gráficamente los gradientes de temperatura.

De estas imágenes se puede concluir que aquellas inspecciones en la cara lisa pueden dar resultados más representativos, ya que por la cara rugosa es donde se han marcado los defectos y el nombre de las probetas y el comportamiento térmico del elemento utilizado para marcar es muy diferente al material base. Esto da como resultado que sean apreciables los contornos de los defectos, hecho que puede influenciar la detección de los mismos y también afectar al comportamiento térmico de la superficie.

Observando el resultado del ensayo desde la cara lisa, en todas las probetas curadas se puede apreciar al menos un defecto, el que está más cerca de la superficie. El defecto central se visualiza ligeramente en algunos casos, pero posiblemente esto está influenciado por el conocimiento de que ahí tiene que haber un defecto. Sólo se observa el defecto más cercano porque es el primero en reflejar la onda térmica y ser recogida ésta por la cámara. Cuando la onda térmica llega a los otros defectos, al ser el espesor de las probetas tan pequeño, se ha

conseguido un calentamiento homogéneo del material y no se distingue el comportamiento de los insertos restantes.

Se puede comparar la temperatura alcanzada (en gradiente) en la zona sana y en el defecto, para ver el comportamiento que tienen los diferentes materiales. En las figuras de la tabla 17, la línea roja se corresponde con el perfil de temperaturas de una línea que pasa por el defecto y la azul, el perfil en una línea en zona sana.

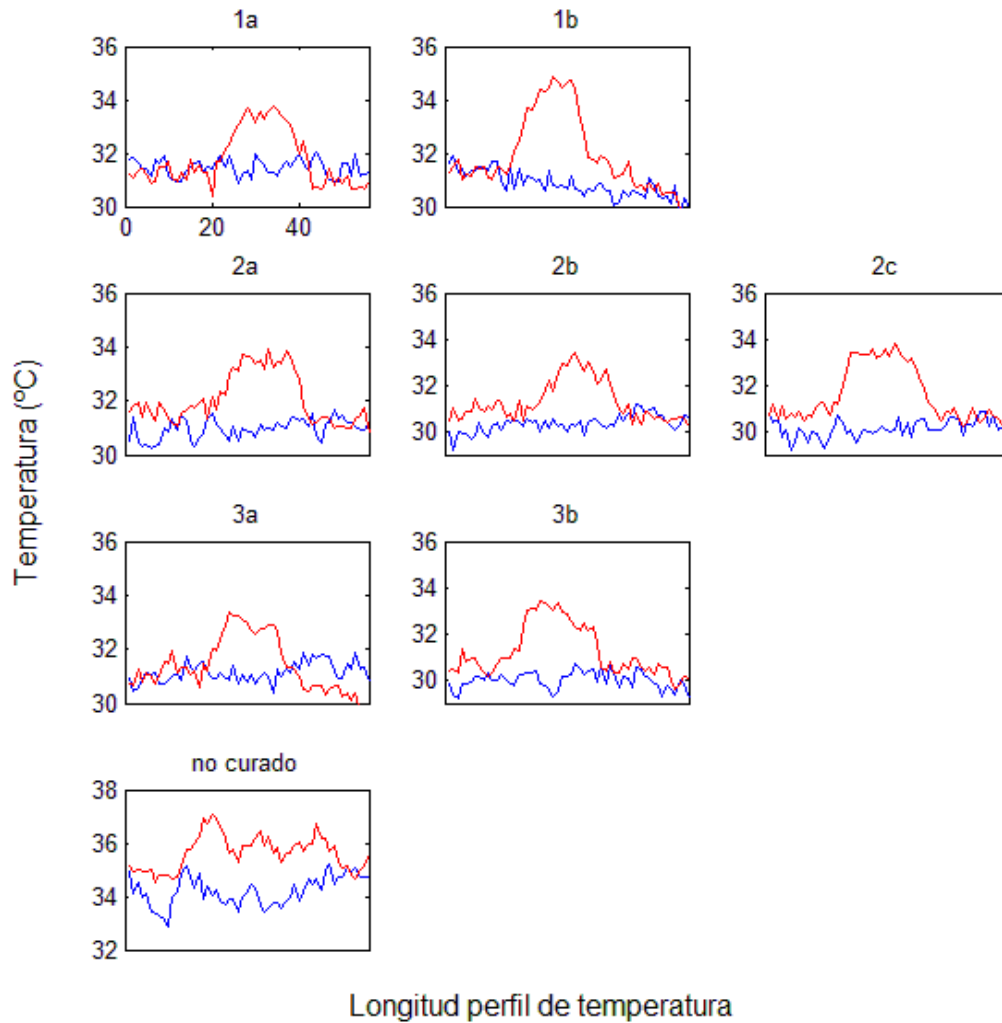


Tabla 17: Perfiles de temperatura en zona sana y defecto

En todos los casos, en el defecto se alcanza una mayor temperatura que en la zona sana de la pieza, pero no se aprecian diferencias significativas entre los diferentes ciclos de curado. Sólo existe un comportamiento diferente en el material que no está curado: tiene una mayor temperatura de base y, pese a no identificarse el defecto en la imagen, sí que se detecta una mayor temperatura en esa zona, pero más uniforme que para los materiales curados.

A continuación se van a comparar los comportamientos de calentamiento y enfriamiento de los diferentes ciclos en 2 zonas: sana y en defecto (imágenes 71 y 72).

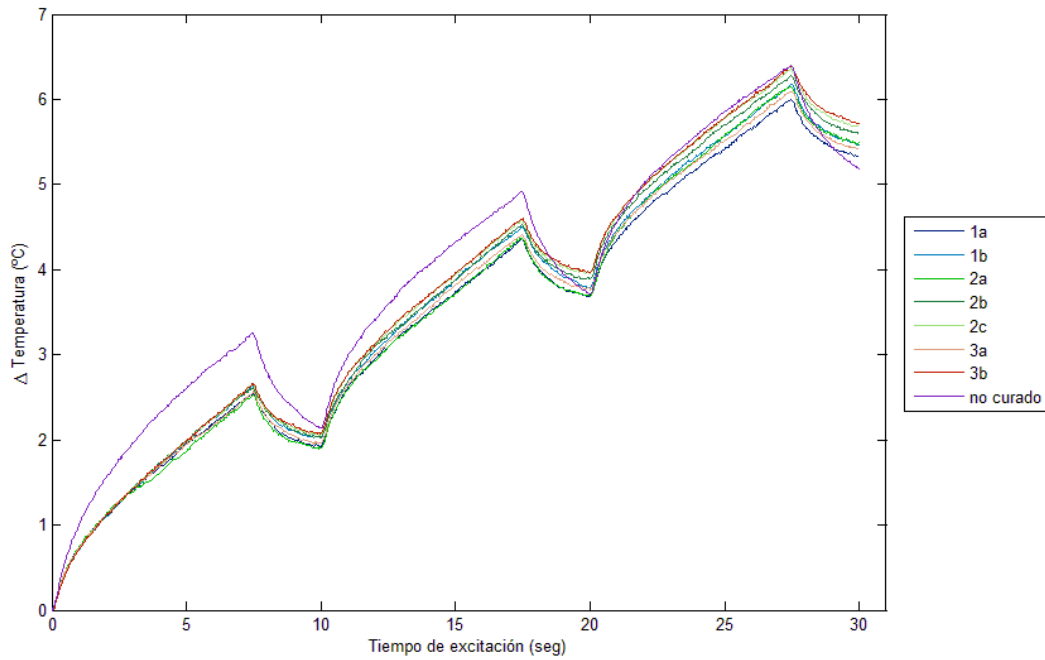


Imagen 71: Curva de calentamiento (zona sana)

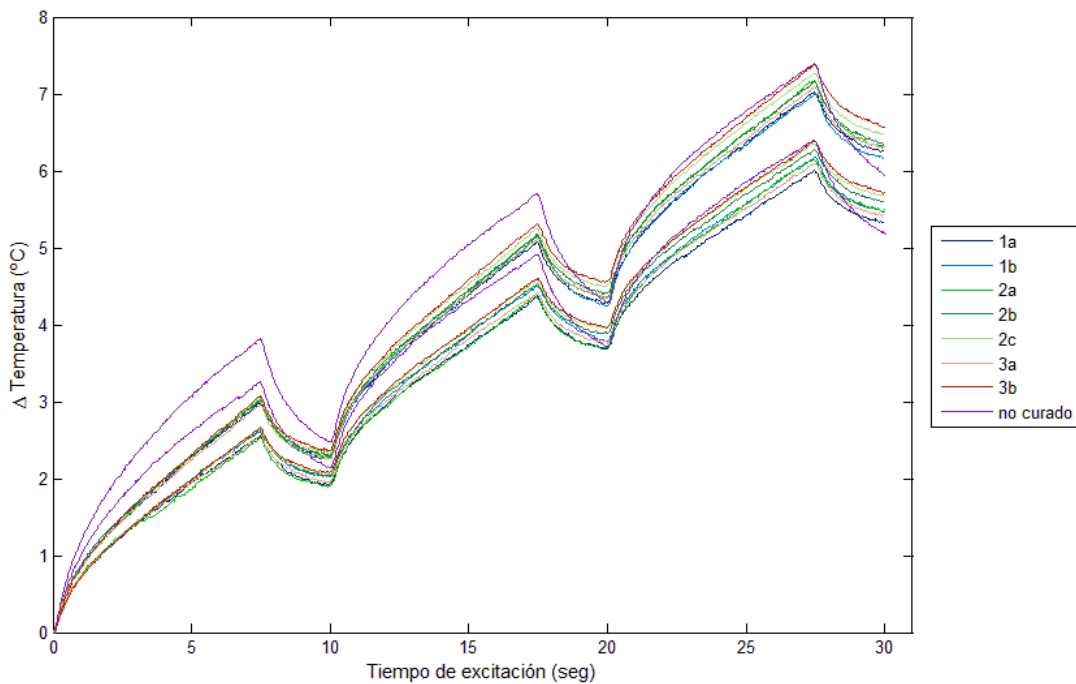


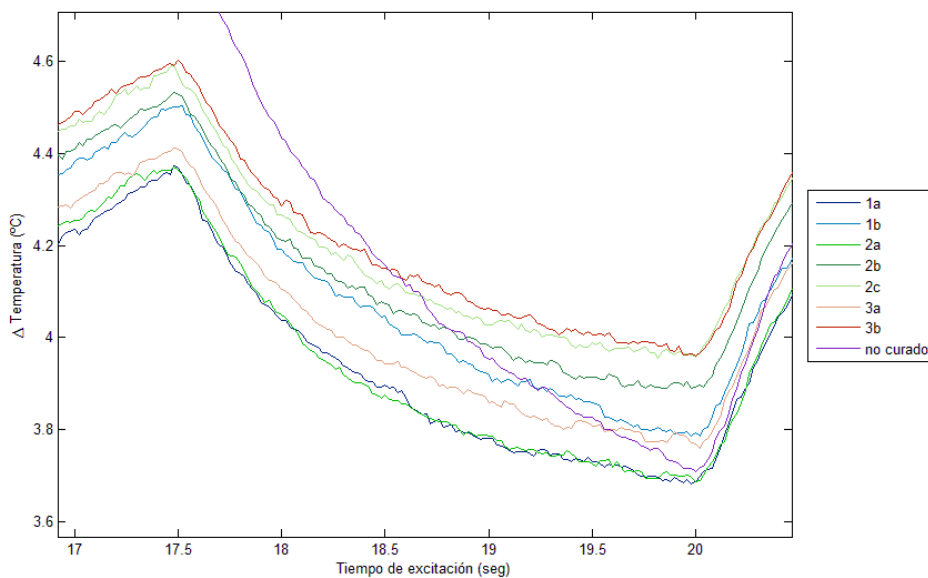
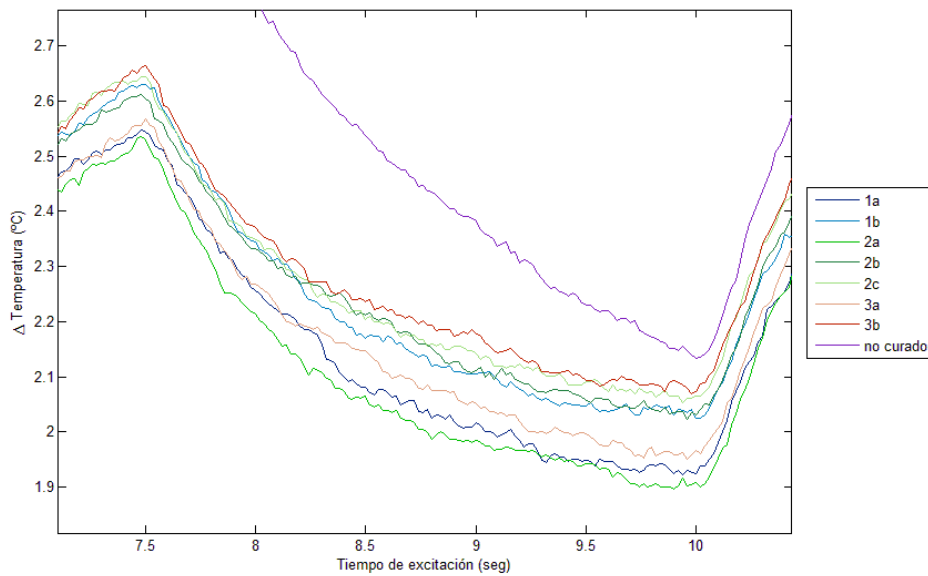
Imagen 72: Curva de calentamiento (zona sana y defecto)

A la vista de estas gráficas se puede observar la misma tendencia ente la zona con defecto o sin defecto, pero teniendo en cuenta que las medidas en el defecto responden más rápidamente al calentamiento, quedando los valores correspondientes a esta zona por encima del otro grupo.

Las gráficas comienzan en el origen porque se ha elegido representar la variación de temperaturas respecto al valor inicial en lugar del valor absoluto de las mismas en las probetas.

En la imagen en la que sólo aparece un grupo de curvas (zona sana, 71) se puede ver que en los primeros instantes del calentamiento, el material sin curar se diferencia mucho del resto, respondiendo más rápido a los cambios de temperatura (mayores pendientes). En cambio este comportamiento se neutraliza conforme avanza el tiempo de excitación. Es decir, al aumentar el tiempo de aporte energético, todos los materiales tienden a comportarse de manera uniforme.

En cuanto a la comparación de ciclos de curado a diferente temperatura realmente no se aprecia mucha diferencia a simple vista salvo que las diferentes líneas se van separando. Mirando en detalle en las zonas de cambio calentamiento-enfriamiento es posible que se observe alguna tendencia. Estos detalles se muestran en las tres figuras de la imagen 73:



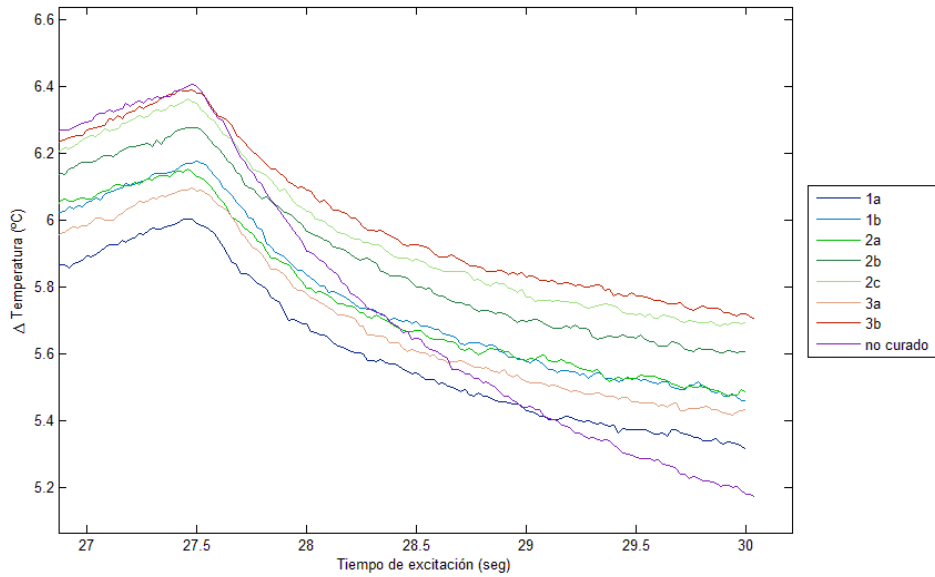


Imagen 73: Detalles de las zonas de cambio de tendencia

Aún atendiendo al detalle del comportamiento térmico con el tiempo, no se aprecia ninguna tendencia entre los diferentes grupos de ciclos, es decir, no hay una diferencia clara en el comportamiento térmico para diferentes temperaturas de curado.

Dentro de los curados a la misma temperatura, se observa que en los ciclos tipo 1 y 3, el material curado menos tiempo, alcanza mayores temperaturas (0.1 ó 0.3 °C de diferencia). En los ciclos 2 no se puede obtener ninguna correlación con el tiempo de curado.

Hay que remarcar que estas conclusiones son puramente teóricas ya que las diferencias son bastante pequeñas y además se necesitarían mayor número de muestras (más material con diferente tiempo de curado) para poder obtener una correlación con la que se pueda describir el comportamiento del material.

5.5. Comparación con el grado de curado

Finalmente, los últimos resultados introducidos en este proyecto son los relacionados con el grado de curado del material. La relación de los resultados de los ensayos no destructivos con estos valores de porcentaje de curado permitirá conectar los resultados provenientes de estas técnicas no destructivas con los resultados de los ensayos destructivos llevados a cabo en otro proyecto paralelo a este [2].

Los valores del grado de curado del material han sido obtenidos mediante un Análisis Dinámico Mecánico (DMA) en el alcance del proyecto antes mencionado.

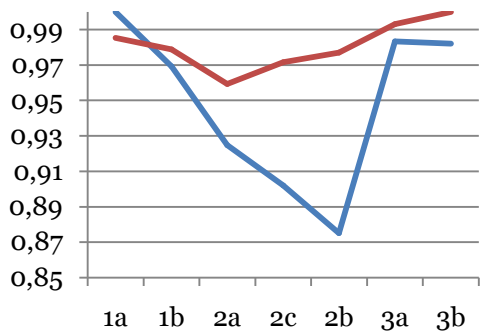
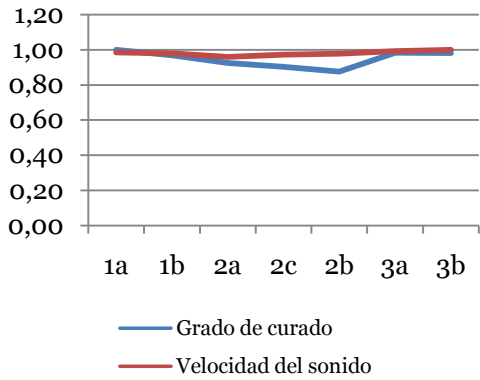
	1a	1b	2a	2c	2b	3a	3b
Grado de curado (%)	96.93	93.94	89.65	87.44	84.83	95.31	95.2
Duración (h)	2	1	54	40	27	28	14

Tabla 18: Valores del grado de curado de los materiales

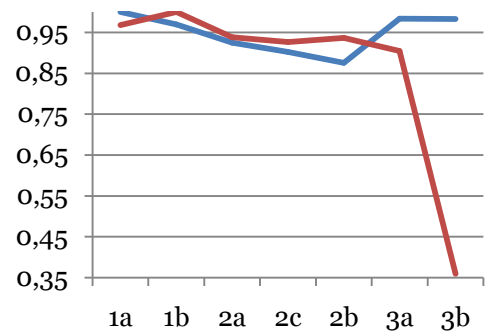
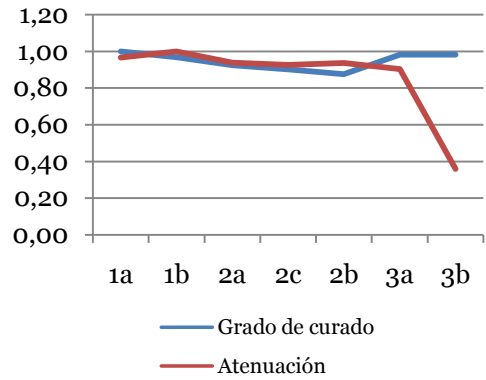
A continuación, para poder comparar directamente la tendencia de estos valores y del resto de resultados obtenidos, se van a normalizar los valores para tener las variaciones siempre en el mismo rango, entre 0 y 1. Esta normalización se aplica dividiendo los valores de cada parámetro (velocidad del sonido, amplitud de la señal, coef. de variación, etc.) por el mayor valor de cada serie. Los parámetros que se compararán serán aquellos de los que se han obtenido resultados numéricos en los anteriores ensayos, es decir, todos excepto del ensayo de termografía.

Como ya se ha comentado, los valores se muestran normalizados para poder compararlos unitariamente. Se muestran primero las gráficas en magnitud real (con origen en 0) y justo debajo de cada una de ellas, un detalle con el eje vertical ajustado a los valores obtenidos.

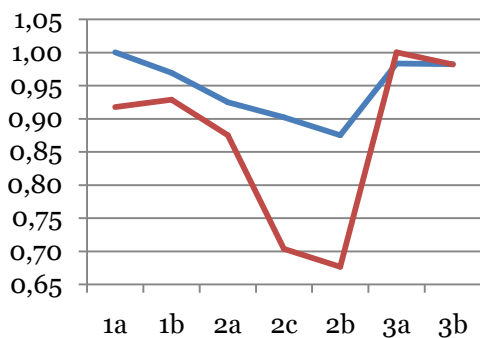
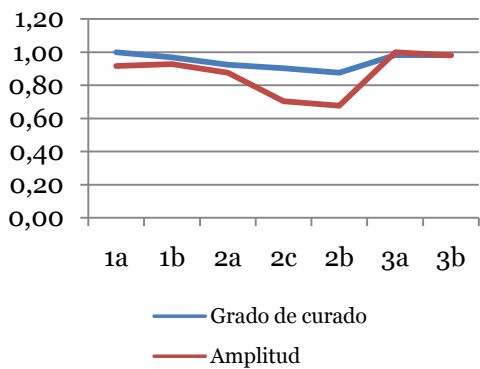
Velocidad del sonido



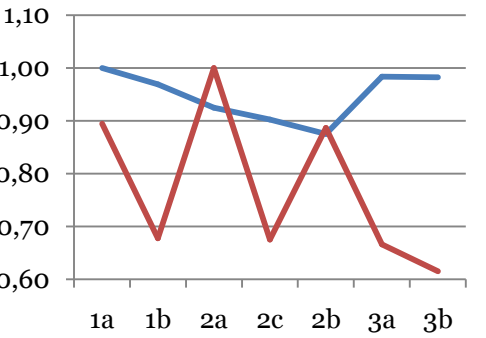
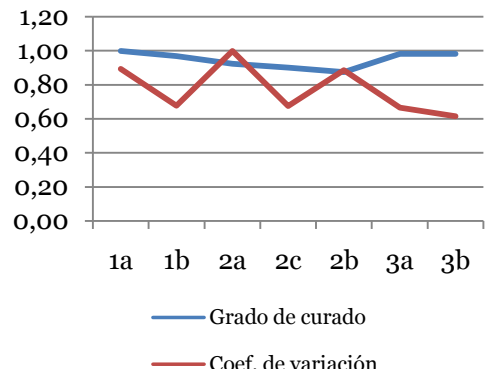
Atenuación



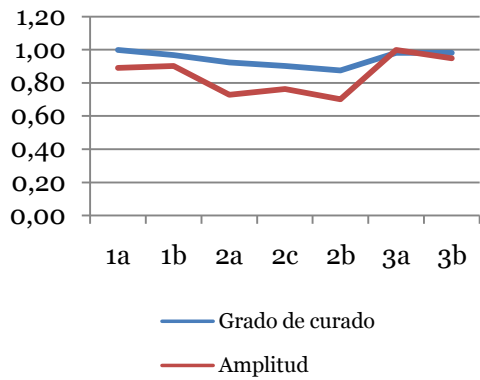
Amplitud en cara lisa PA



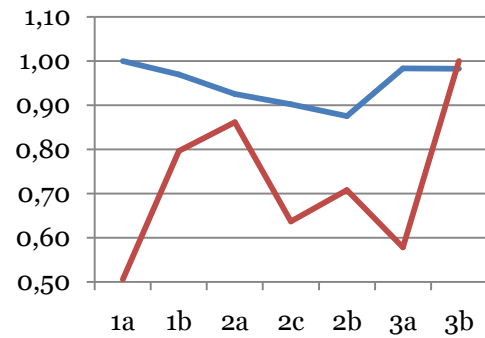
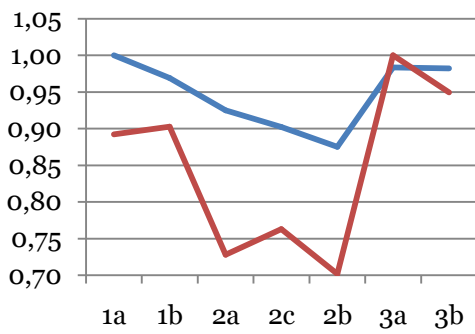
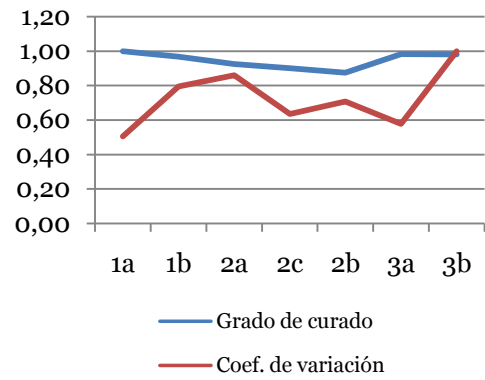
Coef. de variación



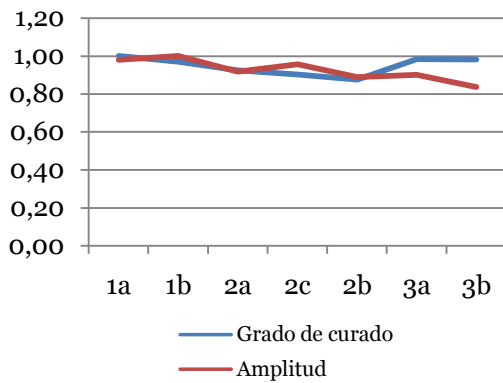
Amplitud en cara rugosa PA



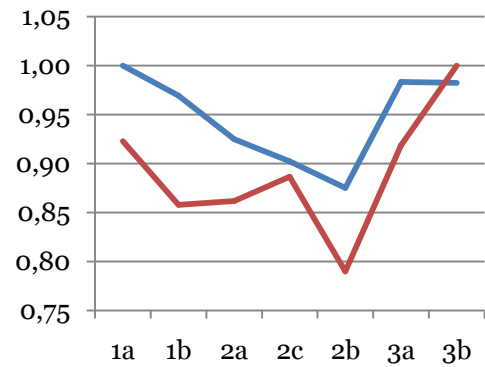
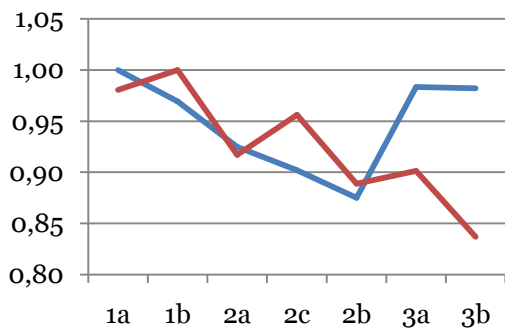
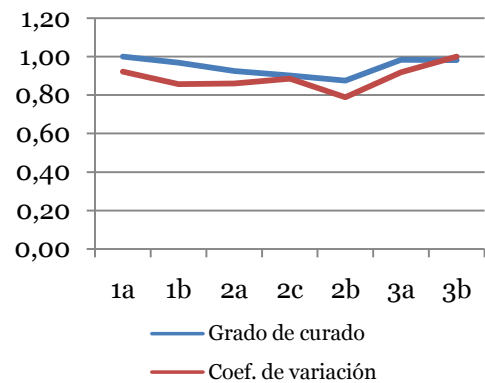
Coef. de variación



Amplitud láser



Coef. de variación



En el grado de curado, como en algunos resultados vistos en apartados anteriores, los ciclos tipo 1 y tipo 3 tienen unos valores similares mientras que los ciclos tipo 2 tienen unos valores menores.

En cuanto al resto de parámetros medidos, la velocidad del sonido y las amplitudes medias de los histogramas obtenidos de las inspecciones con phased array, tanto por cara lisa como por cara rugosa, son los valores cuya tendencia se asimila más a la del grado de curado, por lo que estos valores podrían ser una medida directa y no invasiva del material para tener una idea del grado de curado del material.

El problema de este planteamiento es que al ser los ultrasonidos un método comparativo, se necesitaría tener ciertos materiales de referencia con grado de curado conocido para poder comparar la señal en el material con la de las referencias. Este es el método que actualmente se emplea en la industria para calibrar los materiales, con probetas de referencia supuestas perfectas y sin defectos. Boeing también emplea un procedimiento similar utilizando diferentes referencias para estimar el porcentaje de porosidad presente en las piezas que fabrican.

Si se tuvieran estas probetas con los diferentes grados de curado y también los resultados de los ensayos destructivos que relacionaran este valor con las propiedades mecánicas del material, se podría establecer una relación directa entre el resultado de los ensayos no destructivos y las propiedades mecánicas.

El resto de parámetros medidos, atenuación, coeficientes de variación y amplitud de ultrasonidos láser, no guardan tanta similitud con la tendencia del grado de curado, pero por ejemplo, los coeficientes de variación dan una idea de la confianza que pueden dar los valores de amplitud.

6

Conclusiones

6. Conclusiones y trabajos futuros

El objetivo de este proyecto es determinar mediante ensayos no destructivos la influencia que tienen ciertos parámetros del ciclo de curado en el estado del material. Los parámetros de los cuales se ha evaluado su influencia han sido la temperatura y el tiempo del ciclo de curado. La intención final es poder relacionar los resultados de estos ensayos no destructivos (END) con las propiedades mecánicas del material para identificar la presencia de ciertas tensiones residuales de compresión en la resina, que según otros estudios son beneficiosas para el material.

El motivo de utilizar END es estudiar la viabilidad de que estos resultados puedan ser vinculados con las propiedades mecánicas del material a través del grado de curado. Comprobando esta posibilidad y estableciendo relaciones, se podrá determinar el estado del material de componentes finales sin para ello tener que fabricar las probetas necesarias para realizar ensayos mecánicos.

Para relacionar estos resultados con las propiedades mecánicas se utiliza como puente el grado de curado del material. En este proyecto se relacionan los resultados de END con el grado de curado, y en otro proyecto paralelo [13] se relaciona este valor con las propiedades mecánicas.

En cuanto a los resultados cuantitativos de todas las técnicas aplicadas (ultrasonidos convencionales, ultrasonidos phased array, ultrasonidos láser y termografía), no todos han dado lugar a una relación con el estado del material. Termografía y ultrasonidos láser tienen la capacidad de detectar los defectos presentes en el material pero no aportan un resultado cuantitativo claro que pueda analizarse y compararse con el grado de curado.

Del resto de técnicas aplicadas sí se ha podido sacar alguna conclusión, por ejemplo de la técnica de ultrasonidos convencionales, con la que se ha medido la velocidad de propagación del sonido. Partiendo de la base de que una menor velocidad se corresponde con una menor compactación del material (se impone más dificultad a la propagación de las ondas acústicas y existirían menores tensiones residuales de compresión), se obtiene a la vista de los resultados numéricos que los ciclos de curado a 177°C y a 149°C tienen una mejor compactación (mayor velocidad del sonido) mientras que los curados a 121°C tienen una velocidad de propagación menor. Aun así, estas diferencias no son muy significativas, ya que la diferencia entre el valor máximo y mínimo de velocidades es de apenas 127 m/s, un 4% del valor máximo medido de velocidad. Esta diferencia total es incluso menor que algunos coeficientes de variación, por lo que se podría decir que la desviación estándar escondería estas diferencias entre ciclos.

De las amplitudes medias de la señal de phased array medidas en ciertas áreas de las piezas a través de histogramas, también se han podido sacar ciertas conclusiones. La primera de ellas es que no hay mucha influencia en la zona de la pieza elegida para hacer el análisis: cerca o lejos de los defectos y de la inspección por la cara lisa o rugosa de las piezas. En todas las zonas se sigue la misma tendencia y ésta es que los ciclos tipo 1 y 3 (curado a 177 y 149°C respectivamente) tienen un comportamiento diferente a los ciclos tipo 2 (121°C). En el primer grupo se tiene una mayor amplitud con menores variaciones, es decir, la señal ultrasónica está más definida en los materiales curados a mayor temperatura. Curando a menor temperatura, se obtiene más incertidumbre en los valores medidos.

Estas dos tendencias observadas en velocidad del sonido y amplitudes de la señal ultrasónica coinciden con la del grado de curado, cuyos valores son similares en los ciclos tipo 1 y tipo 3 y ligeramente superiores a los que se miden para los ciclos tipo 2. Por esto se puede concluir que estos parámetros medidos podrían relacionarse directamente con el grado de curado del material.

Sin embargo, hay que remarcar que todas las diferencias encontradas y medidas son discretas, y que en ciertos casos, la propia variabilidad de los valores oculta o es mayor que estas diferencias entre los distintos ciclos.

El procedimiento, por tanto, para poder aplicar la inspección no destructiva y relacionar sus resultados con las propiedades mecánicas de los materiales, podría ser la fabricación de probetas de referencia con diferentes grados de curado conocidos, y de los que se conocen sus propiedades mecánicas, para luego poder comparar con estas referencias cualquier otro componente del que se quiera conocer su estado.

A la vista de todos estos resultados, como trabajo futuro se podría proponer en primer lugar, terminar la comparación y relación de estos resultados con los resultados de propiedades mecánicas y ensayos no destructivos obtenidos en un proyecto paralelo [2].

Otro punto interesante que habría que seguir estudiando es la influencia que tiene en el estado del material la interrupción del ciclo de curado. Esta idea surge de la forma en que se han curado para este proyecto los ciclos más largos. En este proyecto, solo el curado a 177°C se ha realizado de manera continua. Los curados a 149 y 121°C se han realizado en varios tramos ya que su duración ha sido superior a 14h. Con estas interrupciones, en algunos casos se han obtenido resultados que en algunos casos indican que los ciclos tipo 3 pueden tener mejores propiedades mecánicas que los ciclos tipo 1 a pesar de estar curados a menor temperatura que la recomendada por el fabricante. Tanto en velocidad del sonido como en amplitud de la señal ultrasónica, se han obtenido valores similares o superiores en los curados a 149°C frente al curado recomendado por el fabricante a 177°C.

Este efecto observado podría deberse tanto a la mayor duración del ciclo como a esas interrupciones del curado, mostradas en la imagen 23. Sería interesante continuar estos trabajos encontrando otros pares de valores de temperatura y duración del ciclo que dieran lugar a un material de características similares a las que posee el material que se obtiene del ciclo propuesto por el fabricante (177°C, 2h).

7

Referencias

7. Bibliografía y referencias

- [1] E. Correa, V. Mantic, and F. Paris “*Effect of thermal residual stresses on matrix failure under transverse tension at micromechanical level: A numerical and experimental analysis*”. Composite Science and Technology, Vol.71, pág. 622-629, 22 Marzo 2011
- [2] PFC J. Ricardo Silva “*Estudio del efecto de la temperatura de curado en las propiedades mecánicas de un material compuesto fibroso*”, 2015
- [3] Dirección web: <http://www.tecnatom.es/> (Febrero 2015)
- [4] F. Paris, J. Cañas, J.C. Marín, A. Barroso, “*Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos*” Servicio de publicaciones de la ETSI, 2012
- [5] F. Stupenengo “*Materiales y materias primas. Cap.10 Materiales compuestos*” Ministerio de Educación, 2011
- [6] A. Miravete, “*Materiales compuestos, Vol.1*” Reverté, 2004
- [7] Dirección web:
<http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm>
(Marzo 2015)
- [8] J.M. Gallardo *Apuntes de Materiales Aeroespaciales. Cáp. 16: PMC's*, 2012
- [9] J.M. Gallardo *Apuntes de Materiales Aeroespaciales. Cáp. 15: Fibras*, 2012
- [10] G. Murray, C. White, W. Weise. “*Introduction to Engineering Materials*” CRC, 2007
- [11] Dirección web: <http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/tesisuned:Ciencias-Msanchez/Documento.pdf> (Marzo 2015)
- [12] HEXCEL “*M21_global*”
- [13] HEXCEL “*Prepreg Technology*”
- [14] Dirección web: <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/phased-array/> (Mayo 2015)
- [15] Dirección web: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/ultrasonic-phased-array-inspection-of-fsw-lap-joints-september-2004/> (Mayo 2015)

