

Aplicación de la Técnica No Destructiva de Ultrasonido para la Evaluación de Materiales
Compuestos Usados en la Industria Aeroespacial: Estado del Arte

Diego Fernando Martínez Niño

Jhon Freddy Delgado Suárez

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Metalúrgico

Directora

Ana María Pérez Ceballos

Ph. D. Ingeniería Metalúrgica

Codirector

Carlos Andrés Galán Pinilla

M. Sc. ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

En primera instancia queremos agradecer a la Universidad Industrial de Santander (UIS) por nuestra formación académica, subsiguientemente agradecemos a la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales por su empeño e interés en la formación personal y profesional, ofreciéndonos momentos que quedaran en la memoria de cada uno de nosotros. Agradecemos a nuestros profesores de carrera, en especial a nuestros directores de proyecto la profesora Ana María Pérez Ceballos y el profesor Carlos Andrés Galán Pinilla, los cuales nos acogieron desde un principio brindándonos su apoyo y sus conocimientos, siendo determinantes para la culminación de este proyecto.

Yo, Jhon Freddy Delgado Suárez quiero extender un profundo agradecimiento a Dios dado que es lo más importante en mi vida, seguidamente agradezco a mi hermano Juan David Delgado Suarez por ser mi motor incondicional en cada instancia de mi vida; agradezco a mis padres (Diógenes y Arlet) por brindarme su apoyo absoluto y permitirme ser una persona con valores y con grandes metas.

Yo, Diego Fernando Martínez Niño quiero extender un profundo agradecimiento a Dios primordialmente por permitirme tener y disfrutar a mi familia, a mis padres (Claudia y Abraham) por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad y a mis hermanos (Fabián y Adrián) quienes han sido siempre mi ejemplo a seguir, también quiero agradecer a mi Tía (Martha) quien toda la vida ha sido un apoyo incondicional para mi vida y la de mi familia siendo como una segunda madre; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este.

Tabla de Contenido

Introducción	9
1. Objetivos	11
Objetivo General.....	11
Objetivos Específicos.....	11
2. Materiales Compuestos	12
2.1 Componentes	13
2.1.1 Matriz	13
2.1.1.1 Matriz polimérica.....	14
2.1.1.2 Matriz Metálica	16
2.1.1.3 Matriz Cerámica.....	16
2.1.2 Refuerzo	16
2.1.2.1 Partículas.....	17
2.1.2.2 Fibras.....	17
2.1.2.3 Estructurales.....	20
2.1.3 Combinaciones Matriz - Refuerzo.....	20
2.2 Principales materiales compuestos usados en la industria aeroespacial	21
2.3 Procesos de fabricación de los principales materiales compuestos utilizados en la industria aeroespacial.....	22
2.3.1 Fabricación con preimpregnados.....	23
2.3.1.1 Apilamiento Manual (<i>Hand lay up</i>).....	23
2.3.1.2 Encintado automático ATL (<i>Automatic Tape Lay up</i>).....	23
2.3.1.3 Encintado automático FP (<i>Fiber Placement</i>).....	24

2.3.1.4 Moldeo en Autoclave.	24
2.3.2 Fabricación de fibras secas	24
2.3.2.1 Moldeo por infusión de película de resina (RFI, por sus siglas en inglés).	24
2.3.2.2 Moldeo por transferencia de resina (RTM, por sus siglas en inglés).....	25
2.3.3 Fabricación de estructuras tipo sándwich en la industria aeroespacial	25
2.4 Principales componentes fabricados con materiales compuestos en la industria aeroespacial	26
3. Defectos más recurrentes en materiales compuestos de la industria aeroespacial	28
3.1 Defectos más recurrentes durante su fabricación	30
3.2 Defectos más recurrentes en servicio.....	32
4. Ultrasonido para la evaluación de materiales compuestos de la industria aeroespacial	33
4.1 Ensayos No Destructivos (END)	34
4.2 Ensayo No Destructivo de ultrasonido (UT)	35
4.2.1 Principales técnicas de ultrasonido en materiales compuestos.....	36
4.2.2 Representación de datos	38
4.3 Particularidades del ensayo de ultrasonido en la evaluación	40
5. Conclusiones	42
Referencias Bibliográficas	44

Lista de Tablas

Tabla 1	Clasificación de matrices utilizadas en la fabricación de materiales compuestos	14
Tabla 2	Clasificación de los materiales compuestos según la forma en que se encuentra el refuerzo	17
Tabla 3	Clasificación de las fibras según su origen.....	18
Tabla 4	Combinaciones matriz - refuerzo.....	21
Tabla 5	Componentes fabricados en materiales compuestos en aeronaves militares y comerciales	26
Tabla 6	Defectos de los materiales compuestos usados en la industria aeroespacial	29
Tabla 7	Técnicas de ultrasonido para detección de defectos en materiales compuestos	37
Tabla 8	Técnicas de representación de datos	38
Tabla 9	Variables en la aplicación del ensayo de ultrasonido en materiales compuestos	41
Tabla 10	Coeficientes de transmisión y reflexión en interfaces	41

Lista de Figuras

Figura 1 Clasificación de las resinas de acuerdo con su resistencia a la temperatura	15
Figura 2 Representación de las diferentes orientaciones de las fibras	19
Figura 3 Partes del AIRBUS A380 fabricadas en materiales compuestos	28
Figura 4 Defectos más recurrentes en manufactura y servicio	30
Figura 5 Técnicas de representación en ensayos por ultrasonido	39

Resumen

Título: Aplicación de la Técnica No Destructiva de Ultrasonido para la Evaluación de Materiales Compuestos Usados en la Industria Aeroespacial: Estado del Arte^{**}

Autor: Diego Fernando Martínez Niño, Jhon Freddy Delgado Suárez^{††}

Palabras Clave: Materiales Compuestos, Ensayos No Destructivos, Ultrasonido

Descripción: Históricamente la industria aeroespacial ha impulsado constantemente el desarrollo de materiales estructurales, con el fin de mejorar el rendimiento de sus aeronaves. Los materiales compuestos son combinaciones de dos o más componentes, de forma que las propiedades del material final sean superiores a la de sus componentes por separado (Stupenengo, 2011). Sus dos principales componentes son una matriz (fase continua) en la cual el refuerzo queda embebido y un refuerzo (fase discontinua) que le confiere alguna propiedad que la matriz no posee. Existe una gran variedad de combinaciones de estas dos fases, permitiendo la fabricación de materiales compuestos con propiedades específicas requeridas dependiendo de la aplicación, el primer objetivo de este trabajo es identificar las principales combinaciones que son utilizadas en la producción de componentes para la industria aeroespacial. En la actualidad, estos materiales desempeñan un papel importante en la fabricación de un gran porcentaje de elementos para las estructuras de las aeronaves y continúan evolucionando progresivamente, debido a que otorgan propiedades excepcionales con una baja densidad.

De acuerdo con su compleja fabricación, en algunos casos, se suele presentar una gran variedad de defectos, generados desde la implementación de las materias primas utilizadas, hasta los errores humanos en procesos no automatizados, también se llegan a presentar durante su servicio debido a las condiciones de uso o factores externos. En todos estos casos se requiere de inspección y validación con el fin de evitar fallas de los componentes o piezas. Usualmente, los Ensayos No Destructivos son los más utilizados para la inspección de estos materiales debido a su alta efectividad y sensibilidad para la detección de defectos. Este trabajo busca explicar las particularidades que se presentan en la aplicación del ensayo de ultrasonido para la evaluación de estos materiales.

^{**} Trabajo de Grado

^{††} Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Directora: Ana María Pérez Ceballos, PhD. Codirector: Carlos Andrés Galán Pinilla, M. Sc

Abstract

Title: Application of the Non-Destructive Ultrasound Technique for the Evaluation of Composite Materials Used in the Aerospace Industry: State of the Art^{‡‡}

Author: Diego Fernando Martínez Niño, Jhon Freddy Delgado Suárez^{§§}

Key Words: Composite Materials, Non-Destructive Testing, Ultrasound

Description: Historically, the aerospace industry has constantly pushed for the development of structural materials to improve the performance of its aircraft. Composite materials are combinations of two or more components, so that the properties of the final material are superior to those of its separate components (Stupenengo, 2011). Its two main components are a matrix (continuous phase) in which the reinforcement is embedded and a reinforcement (discontinuous phase) that confers some property that the matrix does not possess. There is a great variety of combinations of these two phases, allowing the manufacture of composite materials with specific properties required depending on the application. The first objective of this work is to identify the main combinations that are used in the production of components for the aerospace industry. Currently, these materials play an important role in the manufacture of a large percentage of elements for aircraft structures; and they continue to evolve progressively, because they provide exceptional properties with a low density.

According to their complex manufacturing, in some cases, a great variety of defects are usually presented, generated from the implementation of the raw materials used, to human failures in non-automated processes, they also occur during their commissioning due to the conditions of use or external factors. In all these cases, inspection and validation are required to avoid component or part failures. Usually, Non-Destructive Tests are the most used for the inspection of these materials due to their high effectiveness and sensitivity for the detection of defects. This work seeks to explain the particularities that are presented in the application of ultrasonic testing for the evaluation of these materials.

^{‡‡} Degree Work

^{§§} Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering. Advisor: Ana María Pérez Ceballos, PhD. Co-advisor: Carlos Andrés Galán Pinilla, M. Sc

Introducción

Los materiales compuestos son combinaciones macroscópicas de dos o más materiales diferentes que poseen una interfase discreta y reconocible que los separa; estos materiales han ganado relevancia en la aplicación de alta ingeniería y tecnología debido a sus excelentes propiedades físico-mecánicas. La mayoría de los materiales compuestos poseen una alta resistencia mecánica al mismo tiempo que una baja densidad, esta relación se denomina resistencia específica (Stupenengo, 2011). Inicialmente, se utilizaban como refuerzos para diferentes estructuras, en la actualidad su uso ha tomado más importancia implementándose para soportar cargas primarias y secundarias, en las que una falla podría generar repercusiones catastróficas. La industria aeroespacial es un campo de aplicación en el cual los materiales son sometidos a ambientes de gran exigencia, por esta razón, los materiales compuestos son ideales para la fabricación de los principales componentes de esta industria (Nsengiyumva et al., 2021). Debido a su significativo rol estructural, es necesaria la inspección continua para la detección de defectos o discontinuidades que puedan afectar el buen comportamiento de estos componentes en servicio. Por este motivo, se utilizan una gran variedad de Ensayos No Destructivos, los cuales proporcionan información acerca de la integridad del componente evaluado (Bossi & Georgeson, 2019). El principal objetivo de esta monografía es explicar las particularidades que se presentan cuando se aplica el método de ultrasonido para la evaluación de los materiales compuestos usados en la industria aeroespacial a partir de revisión de la literatura. Actualmente en Colombia, son pocas las instituciones que dirigen su campo de investigación al estudio de esta temática, por lo tanto, es muy escasa la información que se encuentra en la literatura nacional, así pues, este trabajo de revisión busca cerrar esta brecha y contribuir al conocimiento en esta área.

Inicialmente, el proyecto se abordó con una revisión exhaustiva de investigaciones publicadas en los últimos años, las cuales se centraron en los Ensayos No Destructivos aplicados en materiales compuestos usados en la industria aeroespacial. Esta revisión se llevó a cabo mediante el uso de bases de datos, libros, revistas y artículos de investigación. Con base en las diferentes revisiones realizadas se encaminó el proyecto a la aplicación del ensayo de ultrasonido para evaluar los materiales compuestos usados en la industria aeroespacial. Consecutivamente, se procedió a identificar los principales materiales compuestos utilizados en esta industria, destacándose los compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de carbono, vidrio y orgánicas, los compuestos de matriz metálica reforzados con materiales cerámicos (CERMET) y, por último, los que presentan gran espesor con estructura tipo sándwich. Teniendo identificados los principales compuestos usados en la industria aeroespacial, se procedió a delimitar los defectos más recurrentes que presentan estos materiales durante sus diferentes procesos de fabricación, operación y en servicio. Finalmente, se indago acerca de la aplicación del ensayo de ultrasonido empleado para la detección de los diferentes defectos que presentan estos materiales. A partir de esto, se explican las diferentes particularidades que se originan en la evaluación de los principales materiales compuestos usados en la industria aeroespacial mediante el Ensayo No Destructivo de ultrasonido. Se estructuró la investigación en tres capítulos, los cuales abordan toda la información necesaria para el entendimiento de la aplicación del ensayo de ultrasonido en la evaluación de materiales compuestos aplicados a componentes de la industria aeroespacial.

1. Objetivos

Objetivo General

Determinar, a partir de una revisión literaria, el uso del Ensayo No Destructivo de ultrasonido para la evaluación de materiales compuestos aplicados a componentes de la industria aeroespacial.

Objetivos Específicos

Identificar los principales materiales compuestos aplicados en la fabricación de componentes para la industria aeroespacial.

Determinar los defectos más recurrentes en los materiales compuestos usados en la industria aeroespacial.

Explicar la relación entre las particularidades de los materiales compuestos usados en la industria aeroespacial y la aplicación del ultrasonido como método no destructivo de evaluación de estos materiales.

2. Materiales Compuestos

Se entiende como material compuesto a la unión macroscópica de dos o más componentes (materiales) diferentes, que poseen una interfase discreta y reconocible (Larroché, 2000; Stupenengo, 2011). Estos materiales tienden a ser en algunos casos anisotrópicos, debido a que son heterogéneos en todo su volumen. Aun así, sus propiedades son superiores a la de sus predecesores los metales, cerámicos y polímeros (Derek, 2003). Existen materiales compuestos naturales tales como el hueso (formado por fibras cortas y poco resistentes de colágeno embebidas en una matriz de un mineral denominado hidroxiapatita) y la madera (conformado por fibras de celulosa en una matriz de lignina y hemicelulosa). Sin embargo, la mayoría de los materiales compuestos usados son diseñados y fabricados por el hombre (Derek, 2003; Gay, 2014; Larroché, 2000; Stupenengo, 2011). La primera aplicación se remonta a casi 4000 a.C., donde los egipcios elaboraban el adobe (mezcla de arcilla y arena con paja) para la fabricación de ladrillos de construcción, pero es hasta en el siglo XX donde se empieza a entender que es un material compuesto desde el punto de vista científico y tecnológico. Con base en esto, se inicia la fabricación de los primeros materiales compuestos, que corresponden a fibra de vidrio combinada con matrices fenólicas y poliésteres para aplicaciones eléctricas, construcción de embarcaciones y placas ondulares (Santiago et al., 2003).

En la industria aeroespacial surge la necesidad de mejorar el rendimiento de las aeronaves, esto conllevó a la utilización de materiales compuestos con el fin de otorgar propiedades físicas superiores como alta resistencia y rigidez, sin desestimar la demanda de una baja densidad con el fin de disminuir el gasto de combustible y potencia de los motores. Inicialmente, en la aviación se utilizaban los materiales compuestos solo en estructuras secundarias. Una de las primeras aplicaciones fue el compuesto epoxi reforzado con boro para las pieles de los empenajes de los

cazas F14 y F15 de EUA. Paulatinamente, la fabricación de materiales compuestos ha mejorado en conocimiento y desarrollo, haciendo que se apliquen en la fabricación de estructuras primarias como alas y fuselajes (Echeverria, 2002; Kessler, 2012). En sus comienzos, el porcentaje estructural de materiales compuestos en un avión era muy bajo, por ejemplo, en el F15 se aplicaba aproximadamente el 2% de materiales compuestos para su fabricación. Sin embargo, este porcentaje ha crecido considerablemente, pasando del 19% en el F18 al 24% en el F22. Asimismo, se tiene la aplicación en estructuras primarias, por ejemplo, el AV-8B Harrier GR7 tiene secciones de ala y el GR7A presenta un fuselaje trasero fabricados en materiales compuestos (Quilter, 2004).

2.1 Componentes

Los materiales compuestos están conformados fundamentalmente por dos fases las cuales son la matriz y el refuerzo. La matriz proporciona las propiedades físicas, químicas y eléctricas, a su vez el refuerzo otorga alguna propiedad faltante de la matriz. “Además de refuerzo y matriz existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de características peculiares para cada tipo de fabricación y aplicación.” (Cox & Menshykov, 2017; Stupenengo, 2011). En general, los materiales compuestos presentan dos clasificaciones, según el tipo de matriz y según el tipo de refuerzo. La clasificación según el tipo de matriz se da de acuerdo con la naturaleza de esta y la clasificación según el refuerzo se cataloga dependiendo de la forma del constituyente.

2.1.1 Matriz

La matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda embebido, también es el constituyente menos rígido en el material compuesto. Tiene como funciones principales dar estabilidad al compuesto transfiriendo las cargas al refuerzo, resguardar el refuerzo del deterioro mecánico y químico externo; y por último evitar la propagación de grietas (Santiago et al., 2003).

Las matrices se dividen en dos tipos según su naturaleza, orgánicas e inorgánicas, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Clasificación de matrices utilizadas en la fabricación de materiales compuestos

INORGÁNICAS		Matrices cerámicas Matrices metálicas
	Termoestables	Epoxi, Viniléster, poliéster, fenólica, esteres cianato, Bismaleimidas, Poliimida, Polieteramida
ORGÁNICAS	Termoplásticas	Policloruro de vinilo (PVC), Copolímeros de estireno (ABS, SAN), Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Policarbonato (PC), Polimetacrilato de Metilo (PMMA), Acetato, Poliestireno (PS), Polioximetileno (POM), PBT, Polieterimida, PET, Nylon, Poliamida, PEEK, PEKK, PAI, PAS

Nota: Tomado de: (Larrodé, 2000).

De acuerdo con el tipo de matriz los materiales compuestos se pueden clasificar en: compuestos de matriz polimérica, compuestos de matriz cerámica y compuestos de matriz metálica.

2.1.1.1 Matriz polimérica. Las matrices poliméricas u orgánicas son las más utilizadas para compuestos en aplicaciones aeroespaciales comerciales y de alto rendimiento. Se caracterizan por su baja densidad y fácil fabricación. Para la elaboración de materiales compuestos se utilizan dos tipos de matrices poliméricas las cuales son: las termoestables y las termoplásticas.

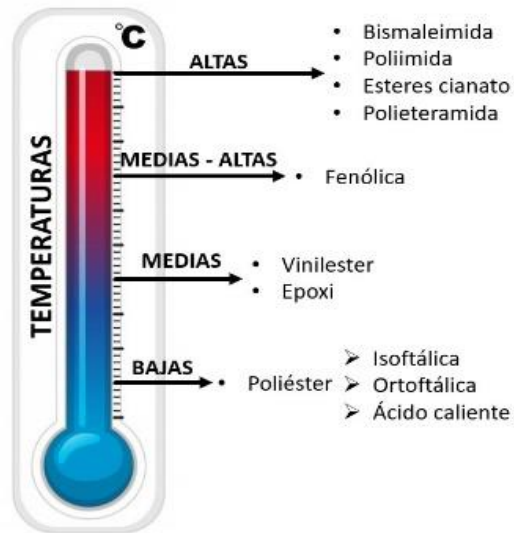
- **Matrices termoestables**

El estado inicial de estas matrices es un líquido viscoso, que por efecto de una reacción de endurecimiento pasa por un estado de gel y se transforma finalmente en estado sólido, este proceso se conoce como curado. Sus principales características son: alta estabilidad dimensional, alta estabilidad térmica, resistencia a la fluencia y buenas propiedades como aislante térmico y

eléctrico. A temperatura ambiente estos polímeros son duros y rígidos, pero al mismo tiempo frágiles y tienden a reblandecerse muy poco por la acción del calor (Dietrich & Edicions, 2005). En la figura 1 se presentan los diferentes tipos de resinas clasificadas de acuerdo con las máximas temperaturas que pueden llegar a soportar.

Figura 1

Clasificación de las resinas de acuerdo con su resistencia a la temperatura



Nota: La Figura muestra la clasificación de las diferentes resinas de acuerdo con su temperatura de utilización. Adaptada de: (Larrodé, 2000).

- **Matrices termoplásticas**

Se presentan en estado sólido ya polimerizadas, se funden o plastifican con un suministro de calor permitiendo moldearse, adaptarse a diferentes formas y reciclarse. Se caracterizan por una alta relación resistencia/densidad unas propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y gran resistencia a los ácidos, disolventes y álcalis. Su estructura final se caracteriza por tener grandes moléculas lineales ramificadas que le dan la característica de la cristalinidad. (Besednjak, 2009; Kessler, 2012). Este tipo de matrices no están muy introducidas en el campo aeronáutico, sin embargo, actualmente se están realizando estudios de matrices termoplásticas avanzadas para la fabricación de componentes que requieren altas prestaciones.






2.1.1.2 Matriz Metálica. Las ventajas de las matrices metálicas en comparación con las matrices poliméricas son la alta resistencia a la tracción, alto punto de fusión, bajo coeficiente de expansión térmica, estabilidad dimensional, alta ductilidad y resistencia a la humedad, aunque sus procesos de fabricación son más difíciles y costosos (Natarajan et al., 2014). Comúnmente, los materiales que se usan para este tipo de matriz son aleaciones ligeras de Al, Ti y Mg; y también otros tipos de aleaciones de Cu, Ni, Pb, no obstante, el Al es el de mayor consumo debido a su bajo costo, baja densidad, buena resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas.

2.1.1.3 Matriz Cerámica. Los materiales compuestos de matriz cerámica son los más recientes y actualmente se siguen investigando dado que proporcionan propiedades como buena resistencia a altas temperaturas, bajo coeficiente de expansión térmica, baja densidad, alta estabilidad química y buena refractariedad. También tiene limitantes como baja resistencia a la tracción, baja resistencia al impacto y al choque térmico. Las matrices más comunes son los vidrios, los vitrocerámicos, el carbono, el SiC, el Si₃N₄, los aluminatos y los óxidos (L, 2013; Rana & Figueiro, 2016).

2.1.2 Refuerzo

Es la fase discontinua, la cual le proporciona al material compuesto alguna propiedad faltante de la matriz. Generalmente, el refuerzo se utiliza para incrementar la resistencia y rigidez, pero también se pueden aplicar para mejorar la resistencia a la abrasión y al calor (Angel et al., 2013; Stupenengo, 2011). A partir de la forma y disposición en que se encuentre el refuerzo, los materiales compuestos se clasifican en: compuestos reforzados con partículas, compuestos reforzados con fibras y compuestos estructurales, como puede verse en la tabla 2.

Tabla 2*Clasificación de los materiales compuestos según la forma en que se encuentra el refuerzo*

Estructura	Refuerzo	Material Compuesto	Propiedades
	Partículas	Particulado	Isotrópico
	Fibras cortas	De fibra discontinua	Aleatorio-isotrópico Alineado-Anisotrópicos
	Fibras largas	De fibra continua	Ortotrópico
	Láminas	Estructural	Anisotropía en todo el espesor
	Láminas, Núcleo	Sándwich	La mayoría son anisotrópicos

Nota: Adaptado de: (Keifer & Effenberger, 1967; Ugena & Pozuelo, 2018).

2.1.2.1 Partículas. Los materiales compuestos reforzados con partículas suelen ser más efectivos en cuanto menor tamaño tengan las partículas y más homogéneamente distribuidas estén en la matriz (Aircraft, 2005). Este tipo de refuerzo se clasifica a su vez en partículas grandes y otros consolidados por dispersión. Generalmente, los consolidados por dispersión son óxidos metálicos con partículas entre 10 a 250 nm de diámetro (Stupenengo, 2011), los cuales son utilizados para la fabricación de componentes en la industria aeroespacial dado que la resistencia de estos materiales no decrece a medida que aumenta la temperatura y sus propiedades tienden a ser isotrópicas.

2.1.2.2 Fibras. Los materiales compuestos más ampliamente usados son aquellos reforzados con fibras. Las fibras otorgan al material compuesto resistencia y buen comportamiento mecánico, incluyendo baja densidad. La principal división entre las fibras se establece de acuerdo con su origen, pudiendo ser orgánicas o sintéticas; junto con su longitud en: cortas, largas y continuas (Cox & Menshykov, 2017; Dietrich & Edicions, 2005). En la tabla 3 se presenta la clasificación de las fibras según su origen.

Tabla 3*Clasificación de las fibras según su origen*

Fibras de origen mineral	Fibras Cerámicas (Carburo de silicio, Aramida) Fibras metálicas Fibras de origen inorgánico (Carbono, Vidrio, Boro)
Fibras de origen orgánico	Aramida, Polietileno

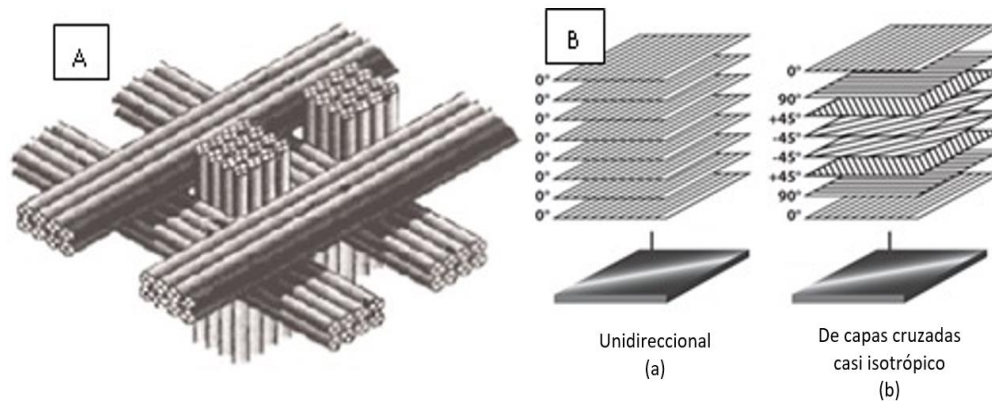
Nota: Tomado de: (Larrodé, 2000).

Los factores para tener en cuenta a la hora de usar este tipo de refuerzo son la longitud, diámetro, orientación, concentración y las propiedades de las fibras. La relación longitud/diámetro es la que determina la resistencia que la fibra le va a conceder a la matriz, entre menor sea el diámetro disminuirá el número de defectos dificultando su propagación y a mayor longitud de las fibras su resistencia será mayor.

Teniendo en cuenta su concentración y orientación, cuanto mayor es el contenido de fibras del material, mayor será el incremento de resistencia del compuesto. Sin embargo, concentraciones mayores al 80% en volumen, no son convenientes debido a que la matriz no lograría impregnar completamente las fibras. En cuanto a su dirección, las fibras cortas se introducen habitualmente al azar, proporcionando un comportamiento isotrópico y facilitando la preparación. Por otro lado, las fibras largas y continuas se ubican habitualmente alineadas en una determinada dirección, proporcionando una excelente resistencia en dicha dirección y poca resistencia en la dirección transversal suministrando propiedades anisotrópicas en el compuesto. Para corregir este comportamiento, se recurre a la introducción de fibras largas apiladas en diferente dirección, o incluso formando entramados tridimensionales con el propósito de alcanzar isotropía en el compuesto como se puede observar en la figura 2.

Figura 2

Representación de las diferentes orientaciones de las fibras



Nota: A) Tejido tridimensional para compuestos reforzados con fibras. B) (a) Estructura compuesta unidireccional de varias capas. (b) Estructura compuesta de varias capas cruzadas. Tomado de: (Larroché, 2000; Stupenengo, 2011).

El material de las fibras es resistente, rígido y ligero con alto punto de fusión, estos materiales tienen un alto módulo específico como es el caso de las fibras de origen inorgánico, estas fibras son las más utilizadas como refuerzo para la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica. Dentro de esta clasificación, la fibra de vidrio es ampliamente usada debido a que posee una buena relación resistencia/peso, bajo costo y fácil fabricación, sin embargo, en la industria aeroespacial la que destaca en la fabricación de componentes de las aeronaves es la fibra de carbono por su elevada resistencia mecánica, dureza, resistencia a la fatiga con una densidad bastante inferior a la fibra de vidrio.

Por otra parte, las fibras de origen orgánico como la aramida se utilizan en aplicaciones que requieran alta resistencia a la tracción con baja densidad y elevada resistencia al impacto, no obstante, tiene limitantes como baja resistencia a la compresión, sensibilidad a la humedad y su costo es cinco veces mayor a la fibra de vidrio restringiendo su utilización para aplicaciones específicas.

2.1.2.3 Estructurales. Están formados tanto por materiales compuestos como por materiales homogéneos y sus propiedades no solo dependen de los materiales constituyentes sino de la geometría del diseño de los elementos estructurales (Platas, 2016). Entre los compuestos estructurales se destacan los laminados y los paneles sándwich. Un material compuesto laminar consta de láminas o paneles, las cuales poseen una dirección preferente con elevada resistencia, apiladas y pegadas entre sí; de modo que la orientación de la dirección varía en cada una de las sucesivas capas (Mart et al., 2021; Platas, 2016).

Los paneles sándwich están formados por dos láminas o pieles relativamente delgadas y resistentes, las cuales están separadas por un núcleo que es más ligero y mucho más grueso que las láminas, y a su vez, están fijadas por un adhesivo el cual mantiene unido las pieles al núcleo. Las láminas resisten la mayor parte de las cargas en el plano junto a cualquier esfuerzo de flexión transversal, estas se fabrican principalmente en acero, aleaciones de aluminio, madera y plásticos reforzados. El núcleo es fabricado con materiales muy ligeros como polímeros espumosos, aleaciones de aluminio, cauchos y madera de balsa; siendo su principal función mantener separadas las caras evitando las deformaciones perpendiculares a estas, proporcionando flexibilidad y resistencia a la cizalladura (Aircraft, 2005). Además de esto, los núcleos presentan diferentes disposiciones dentro del panel tipo sándwich tales como expandido, nervada y nido de abeja, siendo este último el más utilizados en la fabricación de fuselajes y planos estabilizadores en las aeronaves de la industria aeroespacial.

2.1.3 Combinaciones Matriz - Refuerzo

La tabla 4 presenta las diferentes combinaciones que se pueden formar entre la unión de los dos principales componentes: matriz y refuerzo, estableciendo así algunos ejemplos de los distintos tipos materiales compuestos que se pueden fabricar.

Tabla 4

Combinaciones matriz - refuerzo

Matriz Refuerzo	Metal	Cerámico	Polímero
Metal	Partes de metalurgia de polvos infiltradas	Cermets	Algunos compuestos de moldeo Balatas
Cerámico	Cermets Carburos cementados Metales reforzados con fibra	Al ₂ O ₄ reforzada con bigotillos de SiC	Compuestos para moldeo de plásticos Plásticos reforzados con fibra de vidrio
Polímero	No Disponible	No Disponible	Epóxicos reforzados con Kevlar
Elementos (C, B, etc.)	Metales reforzados con fibra	No Disponible	Hule con negro de humo Plástico reforzado con boro, o carbono.

Nota: Tomado de: (Angel et al., 2013).

2.2 Principales materiales compuestos usados en la industria aeroespacial

La industria aeroespacial requiere materiales con altas características debido al aumento tecnológico que se viene dando hasta la actualidad. Este sector de alta exigencia implementa el uso de los materiales compuestos para la fabricación de componentes en sus aeronaves dado que estos materiales proporcionan altas propiedades mecánicas con una baja densidad. En la actualidad, el porcentaje utilizado de materiales compuestos en los aviones es alrededor del 50%, a causa de los altos costos de sus materias primas y los difíciles procesos de fabricación. El principal objetivo de esta industria es disminuir considerablemente el peso de sus aeronaves logrando así un mejor rendimiento, una mayor carga útil, ahorro combustible y además de esto poder mejorar la eficiencia de vuelo. De acuerdo con estos requerimientos se fundamenta el alto uso de los materiales compuestos de matriz polimérica, puesto que estos materiales reforzados con fibras poseen alta resistencia y alto módulo específico. Las fibras más utilizadas en este sector son las de carbono, vidrio, aramida y boro; destacando la fibra de carbono por su mayor resistencia mecánica y rigidez ante las otras fibras contando con una muy baja densidad. Los últimos avances

en la industria aeroespacial muestran un incremento en la utilización de materiales compuestos con estructuras tipo sándwich debido a que se pueden lograr estructuras con un aumento de espesor bastante considerable manteniendo una baja densidad. Este material posee una alta rigidez a la flexión y una buena resistencia térmica, por esto generalmente los componentes que se fabrican con estos materiales son alas y flaps, los cuales están sometidos constantemente a esfuerzos de compresión y tracción donde una falla de estos componentes o piezas podría llevar a un daño catastrófico de la aeronave. Una limitante de estos compuestos estructurales son las delaminaciones o rotura en servicio siendo algo muy grave para esta industria, en consecuencia, se siguen estudiando procesos los cuales busquen disminuir los defectos más recurrentes que se presentan en estos materiales.

2.3 Procesos de fabricación de los principales materiales compuestos utilizados en la industria aeroespacial

Las propiedades finales de una pieza de material compuesto producida a partir de distintos materiales no dependen solo de las propiedades individuales de la matriz y el refuerzo sino, también, del modo mediante el cual se diseñan y procesan dichos materiales (Clyne & Hull, 2019; Stupenengo, 2011). Los procesos empleados para la fabricación de materiales compuestos con matriz polimérica se han aplicado desde hace algunos años, mientras que los procesos para la fabricación de materiales compuestos con matrices cerámicas y metálicas se encuentran actualmente en desarrollo.

Más del 90% de los componentes estructurales de material compuesto fabricados para la industria aeroespacial se fabrican por laminación manual o automática de preimpregnados y el posterior curado en autoclave de la pieza. El proceso de fabricación de estos preimpregnados consiste en dos hojas de papel o láminas metálicas muy finas que pasan a través de dos rodillos

para poder ser prensadas en caliente. Una hoja funciona como desechable, la cual previamente pasa por una tolva que la cubre con una resina caliente mientras que la otra hoja se despliega como soporte. A su vez se tienen unos carretes de fibras los cuales pasaran en unión con las hojas a través de los rodillos para así lograr una cinta de preimpregnado. El producto final se enrolla sobre un núcleo de cartón formando una bobina, al tiempo que se elimina la hoja desechable (Aircraft, 2005; Breijo, 2017). Los preimpregnados mayoritariamente utilizados en la industria aeroespacial son los de Carbono/Epoxi porque presentan las mejores propiedades.

2.3.1 Fabricación con preimpregnados

A partir de la cinta preimpregnada se presentan múltiples procesos posteriores para la fabricación de los principales componentes y estructuras en la industria aeroespacial. Existen diferentes técnicas de apilamiento en la producción de estos materiales:

2.3.1.1 Apilamiento Manual (*Hand Layup*). Procedimiento empleado para la fabricación de piezas de tamaño pequeño/mediano y configuraciones de complejidad geométrica pequeña a muy alta. Se realiza mediante el corte del material preimpregnado en patrones, colocando posteriormente capas en plantillas (sólidas, ploteadas sobre película indeformable o plantillas láser) manualmente y realizando cada 3 a 5 capas bolsa de compactación (bolsa de vacío a temperatura ambiente) para reducir el aire atrapado durante el moldeo (Dietrich & Edicions, 2005; Maga, 2018).

2.3.1.2 Encintado automático ATL (*Automatic Tape Lay up*). Utilizado para la fabricación de piezas de gran tamaño de pequeña curvatura, grandes espesores y apilados complejos; contando con una calidad y repetitividad alta en elevados volúmenes de fibra con baja porosidad. El apilado se realiza mediante un cabezal montado en una maquina CN con múltiples ejes, el cual está dotado de un rodillo de cinta preimpregnada que va depositando tiras de esta sobre

un herramental encintando un modelo de capas de diferentes geometrías y orientaciones. Requieren de una inversión más alta, pero con un bajo costo en mano de obra (Balasubramanian et al., 2018; Todoroki et al., 2021).

2.3.1.3 Encintado automático FP (*Fiber Placement*). Empleado para la fabricación de piezas de gran tamaño, gran curvatura, grandes espesores y apilados complejos. Consiste en posicionar rodillos con mechas preimpregnadas controladas por CNC, las cuales se van depositando en tiras de manera independiente sobre el molde. Se usa en la producción de piezas como trampa de tren de aterrizaje o secciones de fuselajes, o aplicaciones que requieren direccionado de las mechas (*tow steering*) (Ashby & Johnson, 2010; Vigilancia, 2010).

2.3.1.4 Moldeo en Autoclave. Es el más ampliamente utilizado en la industria aeroespacial para el proceso de curado, siendo un sistema que proporciona en un espacio limitado condiciones controladas de presión y temperatura. La presión se consigue inyectando un fluido como aire o nitrógeno y la temperatura de forma similar a un horno, pero favoreciendo el intercambio de calor mediante la presencia de corrientes turbulentas. Se obtienen piezas de geometrías complejas, alta calidad dimensional, grandes dimensiones, con baja porosidad y usando altos porcentajes de fibra; también es posible la elaboración con tejido, cinta unidireccional y núcleos teniendo siempre un curado controlado (Ashby & Johnson, 2010; Maga, 2018; Vigilancia, 2010).

2.3.2 *Fabricación de fibras secas*

La impregnación fibra/resina en este caso se realiza durante el propio proceso de conformado, las técnicas más utilizadas son:

2.3.2.1 Moldeo por infusión de película de resina (RFI, por sus siglas en inglés).

El proceso de infusión de película de resina (RFI) requiere solo un molde macho o hembra de la forma deseada, donde las telas secas se colocan intercaladas con capas de película de resina

semisólida precatalizada suministrada en un papel desprendible. Luego, la capa se embolsa al vacío para eliminar el aire a través de las telas secas. Finalmente, la resina se cura térmicamente en un horno o autoclave, mientras se aplica vacío. Este proceso permite alcanzar una alta resistencia específica pero generalmente no se utiliza para la fabricación de piezas estructurales (McIlhagger et al., 2015; Meola et al., 2017).

2.3.2.2 Moldeo por transferencia de resina (RTM, por sus siglas en inglés). Este proceso se diferencia de los otros en que las fibras se introducen secas en el molde y la resina se inyecta con el molde una vez cerrado, es fundamental la elaboración de la preforma del refuerzo antes de introducirse al molde. Facilita la colocación de los refuerzos en el molde y permite integrar refuerzos localizados (McIlhagger et al., 2015; Meola et al., 2017).

2.3.3 *Fabricación de estructuras tipo sándwich en la industria aeroespacial*

Los compuestos estructurales tipo sándwich son ampliamente utilizados en la fabricación de componentes para la industria aeroespacial. Dentro de estos compuestos los más utilizados son los de panal de abejas en fuselajes y planos estabilizadores de los aviones, para la fabricación de estos núcleos existen dos formas las cuales son por expansión y corrugación, siendo este último el principalmente utilizado.

Corrugación: Método empleado solo para metales, los cuales son usualmente aleaciones de aluminio ligeras, estas láminas del metal pasan por un rodillo corrugado que le dan la forma final. El núcleo se forma pegando entre sí varias láminas corrugadas (formando huecos hexagonales, rectangular, etc.), posteriormente se aplica el adhesivo y se pegan las pieles que pueden ser de aluminio o plásticos reforzados en cada cara del núcleo y se construye la estructura compuesta de nido de abeja (Malavia Otero, 2012; Ugena & Pozuelo, 2018).

2.4 Principales componentes fabricados con materiales compuestos en la industria aeroespacial

Inicialmente, los materiales compuestos se aplicaban en la industria aeronáutica para la fabricación de componentes estructurales secundarios como alerones, superficie de control del timón y elevadores. Sin embargo, debido a los avances de estos y la alta necesidad de mejorar constantemente las estructuras de los aviones, se ha impulsado la fabricación de componentes estructurales primarios como fuselajes, componentes de las alas, empenajes, entre otros. La tabla 5 muestra las principales aeronaves de aviación militar y comercial, en las cuales se ha utilizado un gran porcentaje en peso de materiales compuestos. En la aviación comercial se destacan dos compañías: Airbus y Boeing, las cuales han sido pioneras desde sus comienzos con la implementación de materiales compuestos en sus aviones.

Tabla 5

Componentes fabricados en materiales compuestos en aeronaves militares y comerciales

Avión (militar)	Componentes en materiales compuestos	Avión (comercial)	Componentes en materiales compuestos
C-17	Cubiertas de las alas, carenado, cono de cola grande, etc.	Boeing 737	Alerón, superficie de control del timón, elevador, etc.
F-15	Cubierta de cola vertical y horizontal, estabilizador vertical, freno de velocidad, etc.	Boeing 757	Superficie de control, inversor de empuje, puerta del tren de aterrizaje, puertas de bloqueo, etc.
F-16	Cubierta horizontal y vertical de la cola, superficie de control, etc.	Boeing 767	Estabilizador horizontal, Empenaje, superficie exterior, etc.
F-22	Alas, marco del fuselaje delantero, Empenaje, etc.	Boeing 777	Timón, superficie de control, panel lateral del fuselaje, estabilizador, etc.
F/A-18 E/F	Cubierta del ala, cubierta del fuselaje, etc.	Airbus 300	Radomo, paneles de cobertura de las alas, carenados de los pilones, etc.
Euro-Fighter Aircraft (EFA)	Monocasco, Cubierta del ala, timón, estructuras marcos, superficie húmeda, Flaperones, largueros, etc.	Airbus 310	Aleta de dirección, timón, carenado de pilón, alerón, etc.

Avión (militar)	Componentes en materiales compuestos	Avión (comercial)	Componentes en materiales compuestos
Advanced Jet Fighter (AJF)	Estabilizador de cola vertical.	Airbus 320	Estabilizador, plano de cola horizontal, aletas, etc.
Joint strike fighter (JSF-F35)	Cubierta superior del ala, conductos de admisión, cubierta del fuselaje, superficie de control, cubierta de acceso al motor panel, etc.	Airbus 330	Aletas, Empenaje, viga del suelo, mampara de presión, palanca de control, etc.
AH-64A	Las aspas del rotor, los carenados del borde de ataque inferior, cabina de popa, estabilizador, etc.	Airbus 380	Caja central del ala, paneles superiores del fuselaje, flaps exteriores, spoilers y alerones, Ala exterior, vigas del piso de la cubierta superior, Empenaje y fuselaje, carenados de motor, etc.
		Airbus 350XWB	Paneles del fuselaje, marcos de las ventanas, armazones, clips y puerta, marco de la puerta híbrida, sección del morro, estabilizador horizontal, conjunto de aleta y timón, etc.

Nota: Adaptado de: (Das et al., 2020)

Los aviones A380 y A350XWB presentados en la tabla 5, son las últimas aeronaves en las que se ha implementado un porcentaje en peso de 25% y 53% de materiales compuestos en sus estructuras respectivamente (Airbus, 2019; Marsh, 2010; Vision & Aerodynamics, 2004), este último avión es actualmente la aeronave con mayor porcentaje en peso de materiales compuestos proporcionando ventajas como: mayor aerodinámica con niveles de eficiencia de vuelo inigualables, menor costo de combustible siendo a su vez altamente ecológico y logrando una reducción en peso del 14% en comparación con el Boeing 777 (Airbus, 2019; Marsh, 2010).

En la figura 3 se presenta el avión Airbus A380 con los principales componentes fabricados en materiales compuestos, siendo el compuesto polimérico reforzado con fibra de carbono (CFRP, por sus siglas en inglés) el principal material compuesto empleado para la fabricación de estos componentes. Además de esto, se proporciona información del método de moldeo usado para la producción de cada componente.

Figura 3

Partes del AIRBUS A380 fabricadas en materiales compuestos



Nota: Diferentes partes del Airbus 380 fabricadas en materiales compuestos junto a sus diferentes tipos de moldeo. Tomado de: (Cox & Menshykov, 2017).

3. Defectos más recurrentes en materiales compuestos de la industria aeroespacial

Los materiales compuestos pueden presentar gran variedad de defectos desde el procesamiento de sus materias primas (matrices, refuerzos, recubrimientos) hasta su puesta en operación y en servicio (Heslehurst, 2014). En la tabla 6 se muestran los principales defectos que pueden surgir durante los diferentes procesos de fabricación y moldeo de los materiales compuestos poliméricos laminados y de estructuras tipo sándwich, los cuales son los más utilizados en la industria aeroespacial. Consecutivamente se exhiben los defectos más recurrentes que se presentan durante la puesta en operación y en servicio de los diferentes componentes fabricados para esta industria.

Tabla 6*Defectos de los materiales compuestos usados en la industria aeroespacial*

Material compuesto	Procesos	Defectos	Causa de los defectos
		En manufactura	En servicio
Laminado	- Moldeo Manual - Encintado	Consolidación, porosidad, relación fibra-resina, inclusiones, microgrietas, delaminación y arrugas	Daño por impacto Daño por calor Golpe por rayos
	Automático ATL - Encintado Automático FP - RTM		
Sándwich	- Núcleo de Nido de Abeja	Consolidación de la lámina de cara, unión lamina de cara y el núcleo, ruptura del núcleo, inclusiones y arrugas	Ingreso de humedad Corrosión Daño por impacto Daño por el ambiente Golpe por rayos
	- Núcleo de espuma		

Nota: Adaptado de: (Bossi & Georgeson, 2019).

Los complicados procesos de fabricación de materiales compuestos poliméricos laminados que involucran variables como temperatura, presión y reacciones químicas, pueden dar lugar a la formación de diferentes anomalías como porosidades, delaminaciones e inclusiones las cuales afectan la calidad del producto final (Bossi & Georgeson, 2019; Meola et al., 2017). Adicional a esto en los compuestos de estructura tipo sándwich, los cuales están constituidos por dos pieles (láminas), adhesivos y un núcleo pueden llegar a presentar mayor cantidad de defectos debido a las posibles fallas de consolidación de estos tres elementos.

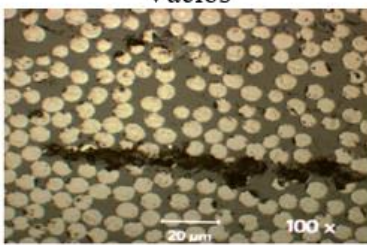
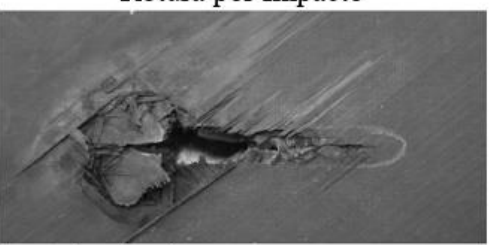
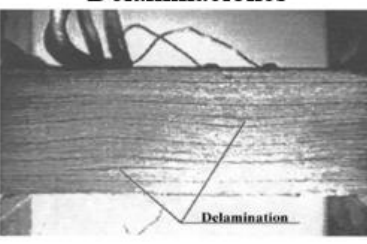
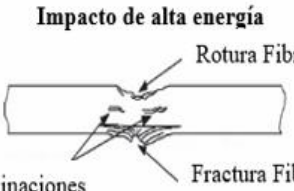

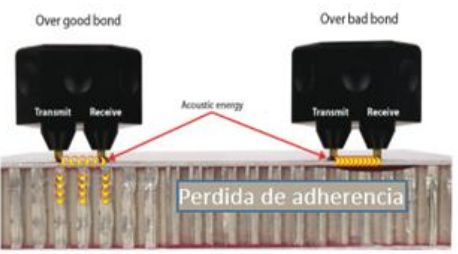
Por otra parte, los diferentes componentes de las aeronaves fabricados con estos materiales pueden verse afectados por causas externas como humedad, exposición al calor, cargas e impacto dando origen a posibles defectos durante su servicio y afectando considerablemente su funcionamiento (Bossi & Georgeson, 2019).

En la figura 4 se muestra una representación de los defectos más recurrentes que pueden originarse en la manufactura de materiales compuestos laminados y paneles sándwich; además, se

representan los defectos más repetitivos que se generan a causa de las difíciles condiciones a las que se ven sometidos estos materiales durante su servicio.

Figura 4

Defectos más recurrentes en manufactura y servicio

En Manufactura	En servicio	Referencias
<p>Vacíos</p> 	<p>Rotura por Impacto</p> 	<p>- (Heslehurst, 2014) - (Talreja, 2015)</p>
<p>Delaminaciones</p> 	<p>Delaminaciones, Rotura, Fractura</p> <p>Impacto de alta energía</p> 	<p>- (Heslehurst, 2014) - (Talreja, 2015)</p>
<p>Desprendimiento</p> 	<p>Perdida de adherencia</p> 	<p>- (Park et al., 2014) - (OLYMPUS, 2017)</p>

Nota: Adaptado de: (Heslehurst, 2014; OLYMPUS, 2017; Park et al., 2014; Talreja, 2015)

3.1 Defectos más recurrentes durante su fabricación

Entre los procedimientos que permiten la producción de compuestos, el más importante es probablemente el de curado de resina. Este proceso debe optimizarse con el fin de conseguir componentes adecuados que respondan a los requisitos de diseño estructural (Meola et al., 2017). Un mal proceso de curado donde no se optimicen parámetros de temperatura, presión, duración y

sangrado de la resina, puede originar la presencia de porosidades que pueden ser críticas y reducir la resistencia al esfuerzo cortante interlaminar en un 7% por cada 1% en contenido de porosidad (Towsyfyán et al., 2020). Debido al alto índice de defectos que se exhiben durante la fabricación, se han establecido cuatro criterios que catalogan de “buena calidad” a un material compuesto como se explica a continuación (Miravete, 2020):

- En materiales preimpregnados se acepta solo 1-2% de porosidad en procesos realizados en vía húmeda.
- En la consolidación del laminado para preimpregnados, la máxima fracción de volumen de fibra que se puede alcanzar es 70%.
- Se debe tener un óptimo proceso de curado para la formación de laminado sólido.
- La orientación de la fibra debe adaptarse según los requerimientos de diseño.

Por otra parte, otro defecto muy recurrente es la delaminación, la cual puede surgir por la falta de unión entre capas sucesivas o daños por impacto en servicio (Fombuena Borrás, 2016). Este tipo de defecto ocasiona la disminución de la resistencia a la compresión de los materiales compuestos, debido a que permite que el desplazamiento fuera del plano de las capas se produzca con mayor facilidad conduciendo a fallas a través del espesor o discontinuidades debido a grietas, caídas de capas o bordes libres (Towsyfyán et al., 2020). Identificar este defecto es de gran importancia para los componentes fabricados con materiales compuestos poliméricos reforzados con fibra de carbono (CFRP, por sus siglas en inglés) dado que presentan una baja resistencia a la delaminación.

El defecto más recurrente de las estructuras tipo sándwich con núcleos en forma de panel o de espuma durante su proceso de fabricación son las delaminaciones, la cual puede explicarse como la tendencia a que se produzca rotura a causa de los esfuerzos cortantes de la unión existente

entre el núcleo y las láminas (pieles), ocasionando desuniones en la interfaz piel-adhesivo o en la interfaz adhesivo-núcleo (Alba et al., 1996; Smith, 2009).

3.2 Defectos más recurrentes en servicio

Los daños y degradación de los materiales en servicio pueden ser resultado de acciones mecánicas localizadas (discretas) o distribuidas (no discretas o globales) en toda la estructura. Los daños discretos son causados generalmente por los impactos de proyectiles que desencadenan daños posteriores como agrietamiento de la matriz, abolladuras, delaminación, fractura, muescas, ampollas, arrancamiento de fibra, daños por impacto apenas visibles (BVID, por sus siglas en inglés), microabolladuras y desgaste de los agujeros, entre otros. Por otra parte, los daños globales son inducidos por los ambientes hostiles como altas temperaturas, tormentas de granizo, rayos, así como los diferentes tipos de absorción de fluidos y químicos, donde la absorción a altas temperaturas de humedad es la más dañina, al mismo tiempo que la presencia de impurezas químicas (contaminantes) y la exposición a los rayos UV (Devendra & Rangaswamy, 2013; Lopresto et al., 2011; Nsengiyumva et al., 2021).

En los materiales compuestos de matriz polimérica los daños inducidos por los proyectiles causan agrietamiento de la matriz, delaminación, BVID y aplastamiento. Las BVID en las estructuras compuestas de aeronaves son un tipo de daño particularmente grave porque transfiere la energía de impacto a la zona afectada del compuesto en forma piramidal (es decir, las grietas de la matriz se propagan en forma de raíz de árbol y conllevan a la delaminación), dando lugar a una significativa degradación de las propiedades del compuesto, sin dar ninguna indicación visible en la superficie del componente de que exista este tipo de daño. Las grietas y delaminación pueden crecer lentamente bajo tensión alterna o fluctuante que conducirá a la pérdida de rigidez y, en última instancia a fallos catastróficos (Nsengiyumva et al., 2021).

En las estructuras tipo sándwich los daños por impacto suelen provocar deformación plástica, despegue de la piel del núcleo, aplastamiento del núcleo. Además, las uniones adhesivas defectuosas constituyen un sitio de acumulación para la entrada de humedad, lo que da como resultado una gran acumulación de agua que reside dentro del panel de abejas. En general, este tipo de compuesto no es utilizado en estructuras primarias de aeronaves debido a que tienden a absorber fluidos y químicos en servicio produciendo desprendimientos a largo plazo (Meola et al., 2017; Nsengiyumva et al., 2021; Vigilancia, 2010).

Es de vital importancia la evaluación rutinaria de los materiales compuestos para garantizar que las estructuras portantes cumplan su función según el diseño, así como para detectar y caracterizar los defectos de producción y los daños en servicio con el fin de informar sobre los procesos de mantenimiento y reparación (Ibrahim, 2014).

4. Ultrasonido para la evaluación de materiales compuestos de la industria aeroespacial

En la industria aeroespacial, la inspección mediante los Ensayos No Destructivos (END) es una necesidad ineludible en dos situaciones de la vida de los componentes estructurales: al finalizar su fabricación, para garantizar su integridad y calidad, y durante su vida en servicio, para detectar daños incipientes derivados del uso de la estructura. La inspección inicial debe garantizar la integridad estructural del componente, es decir, la ausencia de defectos originados durante el proceso de fabricación y posteriormente durante la vida en servicio, es conveniente la inspección con el fin de detectar posibles defectos surgidos por el uso y las exigencias mecánicas a las que se somete la estructura. El principal objetivo de estos ensayos es cubrir el 100% del volumen del componente con la necesaria sensibilidad, garantizando la detección, caracterización, dimensionamiento y localización de posibles defectos (Nsengiyumva et al., 2021; Vigilancia, 2010).

4.1 Ensayos No Destructivos (END)

La norma ASTM E1316-20^a define los END como el desarrollo y la aplicación de métodos técnicos para examinar materiales o componentes de manera que no perjudiquen la utilidad y capacidad de servicio futuras con el fin de detectar, localizar, medir y evaluar fallas; evaluar la integridad, las propiedades y la composición; y medir características geométricas (ASTM, 2021). De acuerdo con la revisión de la literatura, existen diferentes tipos de inspección para la evaluación de materiales compuestos y además gran variedad de métodos propuestos por los investigadores para la identificación de daños, evaluación y monitoreo de la integridad de estructuras compuestas de aeronaves (Gholizadeh, 2016). Los métodos sugeridos por diversos autores son: las pruebas ultrasónicas (Katunin et al., 2015; Staszewski et al., 2009), las pruebas termográficas (Katunin et al., 2015; Maierhofer et al., 2014), métodos de vibración (Katunin et al., 2015; Loutas et al., 2012; Rizos et al., 2008), y termografía infrarroja (Meola & Carlomagno, 2014).

Los métodos de Ensayos No Destructivos son complementarios entre sí, por lo tanto, se requiere mínimo dos métodos para la evaluación de un componente con el fin de tener mayor sensibilidad en el registro. Además de esto, hay principalmente cuatro consideraciones que se deben abordar en el momento de seleccionar los END más adecuados que se aplicarán en la inspección, estas consideraciones incluyen (Nsengiyumva et al., 2021):

- El tipo de daño que se va a inspeccionar en la estructura.
- El tamaño, la forma y la orientación del defecto más pequeño detectable dentro del compuesto.
- La ubicación del daño / defecto (es decir, accesibilidad, superficial o interno).
- La sensibilidad, resolución y las limitaciones posteriores del método END bajo consideración.

Para la inspección y evaluación de compuestos usados en la industria aeroespacial, uno de los métodos más utilizados es el de ultrasonido, esto se debe a las grandes ventajas como

alta velocidad de escaneo, buena resolución, buena capacidad en la detección de fallas y la capacidad de uso en el campo.

4.2 Ensayo no destructivo de ultrasonido (UT)

Es un método en el cual pulsos de alta frecuencia traspasan al material inspeccionado con el fin de detectar discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas. En este ensayo un haz ultrasónico se propaga a través del material, donde se refleja, difracta y atenúa la onda haciendo posible la detección de heterogeneidades. La clave para detectar una posible falla reside en la capacidad de reflejar un haz ultrasónico en una imperfección, como una inclusión de un cuerpo extraño o una porosidad (Fombuena Borrás, 2016). Las ondas sónicas comúnmente empleadas en las inspecciones tienen frecuencias que oscilan entre los 0,1 y 25 MHz (Hellier, 2013; Valencia Ilarregui, 2009).

Las pruebas ultrasónicas (UT) utilizan ondas mecánicas para probar la calidad de los objetos. La onda de ultrasonido se genera por vibración mecánica de un transductor que convierte una señal eléctrica en movimiento mecánico y viceversa. Al introducir un pulso corto de energía eléctrica o una ráfaga de tono en el transductor, genera un pulso de presión que cuando se acopla a la pieza compuesta, creará una onda de ultrasonido en la estructura bajo prueba. La onda viajará en el material compuesto en una banda de frecuencia y una velocidad particular. Dentro de las especificaciones más comunes para la inspección de compuestos esta la frecuencia central utilizada normalmente, la cual oscila entre 1 y 25 MHz (Bossi & Georgeson, 2019). Las altas frecuencias reducirán la longitud de onda, lo que hará que la inspección sea más sensible a las características pequeñas y la interpretación de capas individuales (Bossi & Giurgiutiu, 2015)

La velocidad de propagación de las ondas dependerá del medio en el que se propague, teniendo en cuenta las propiedades intrínsecas del material y el modo de vibración de este. En materiales compuestos, el uso de métodos ultrasónicos convencionales para la inspección puede

ser un desafío debido a la naturaleza anisotrópica de las estructuras de algunos compuestos. La propagación de ondas en estructuras compuestas anisotrópicas es compleja, y la dispersión aleatoria, así como la alta atenuación (pérdida progresiva de la energía de la señal ultrasónica) de las ondas ultrasónicas (Valencia Ilarregui, 2009), reduciendo la probabilidad de la detección de defectos (Hassen et al., 2016; Taheri & Hassen, 2019; Taheri et al., 2014). La atenuación del ultrasonido a través de un compuesto es una medida de la consolidación del material, la cual se mide en unidades de decibeles (dB), esta medida depende de la frecuencia: por ejemplo, a 5 MHz en un laminado compuesto, la atenuación podría estar en el rango de 1.5 - 2 dB/mm, mientras que a 1 MHz los valores podrían ser la mitad de esto. Los valores están sujetos a las características específicas de las fibras, la resina, la relación fibra-resina, el tipo de capa y la disposición. La atenuación aumentará por el contenido de porosidad, por esto la medición del nivel de porosidad por atenuación ultrasónica se utiliza para la aceptación del producto compuesto. Un criterio típico es que menos del 2% de porosidad es aceptable para los procesos de fabricación. Una porosidad superior al 4% puede resultar en una caída significativa en el rendimiento. La detección de características en el laminado compuesto, como delaminación o inclusiones, es una función de la transmisión o reflexión del ultrasonido a través del material (Bossi & Giurgiutiu, 2015; Ibrahim, 2014).

4.2.1 Principales técnicas de ultrasonido en materiales compuestos

Las pruebas ultrasónicas presentan diversas variantes en el momento de medir la propagación de las ondas dentro del material, debido a esto existen diferentes técnicas de aplicación. En la tabla 7 se presentan las principales técnicas de ultrasonido aplicados en la detección de defectos de materiales compuestos utilizados en la industria aeroespacial.

Tabla 7

Técnicas de ultrasonido para detección de defectos en materiales compuestos

Defecto	Material Compuesto	Técnica de ultrasonido	Frecuencias	Referencias
Porosidades	- MCL	- Transmisión a través	< 1Mhz	(I. Workman, 2007; Kersemans et al., 2014)
	- Núcleo de abeja - Núcleo de espuma	- Transmisión a través polar	1.5 a 6 MHz	
Delaminaciones	- MCL	- Transmisión Indirecta	2.25 a 5 MHz	(Hay et al., 2003; I. Workman, 2007; Kessler et al., 2002; Scarponi & Briotti, 2000)
	- Núcleo de abeja - Núcleo de espuma	- Pulso-Eco - <i>Phased Array</i> con Ondas <i>Lamb</i>	> 5Mhz 5 a 15 MHz 15 a 50 KHz	
Desprendimiento de Piel-Núcleo	- Núcleo de abeja	- Barrera Frecuencia (<i>Pitch and Catch</i>) de RF, impulso, barrido.	2 a 50 KHz	(OLYMPUS, 2020a; VIDEOS, 2020; Visual, 2020)
	- Núcleo de espuma	- Transmisión a través	1 a 2.25 MHz	
Falta de Consolidación	- MCL	- Pulso-Eco con placa reflectora	1 a 5 MHz	(Hay et al., 2003; I. Workman, 2007)
	- Núcleo de abeja - Núcleo de espuma			
Vacíos	- MCL	- Transmisión a través	< 1Mhz	(I. Workman, 2007 Taheri & Hassen, 2019; Scarponi & Briotti, 2000)
		- <i>Phased Array</i> 16 elementos - <i>Phased Array</i> con Ondas <i>Lamb</i>	0.5 a 1.5 MHz 15 a 50 KHz	
Arrugas	- MCL	- Barrera de Frecuencia (<i>Pitch and Catch</i>) con B-Scan - <i>Phased Array</i> 64 elementos	> 3 MHz 5Mhz	(Fernández-López et al., 2014; I. Workman, 2007)
Daños por Corrosión	- MCL	- Resonancia	< 100 KHz	(Bossi & Giurgiutiu, 2015; OLYMPUS, 2020b)
	- Núcleo de abeja - Núcleo de espuma	- <i>Phased Array</i> de roldana (<i>Roller Form</i>)	3,5Mhz a 5Mhz.	
Inclusiones	- MCL	- Transmisión a través	< 1 MHz	(I. Workman, 2007; Sutanu & Debasis, 2010)
	- Núcleo de abeja - Núcleo de espuma	- <i>Shannon Entropy C-Scan</i>	0.175 MHz	
Salud Estructural	- MCL	- Difracción del tiempo de vuelo (TOFD) - Método de impedancia electromecánica	15 a 750 KHz 10 KHz a 1 MHz	(Gresil et al., 2017; Pavelko et al., 2011)

Nota: Se presenta el significado de la sigla MCL: Material Compuesto Laminado, RF: Forma de onda con frecuencia fija o Radiofrecuencia.

Las técnicas de ultrasonido tienen generalmente tres variantes en función de la aplicación del acoplante los cuales son: inmersión, contacto directo y chorro de agua (*Water Squirter*, por sus siglas en inglés). En inmersión se sumerge la pieza en el medio acoplante (agua generalmente), si los defectos se propagan hasta los bordes el agua puede penetrar y así disminuir la impedancia acústica dificultando el ensayo. Debido a que es menor la impedancia agua/material que aire/material, se deben sellar los bordes de la pieza para impedir la penetración del agua. La inspección por chorro de agua entra a reemplazar la técnica de inmersión, debido a que esta no es adecuada para la inspección de grandes piezas. Consiste en la colocación de la pieza entre dos chorros de agua enfrentados en la misma línea, pero con sentidos contrarios que sirven de acoplante. En el caso del contacto directo no se requiere de un medio acoplante, los palpadores o transductores se colocan directamente en contacto con la superficie del material compuesto.

4.2.2 Representación de datos

Existen principalmente tres tipos de representación de datos obtenidos tras la transmisión del pulso ultrasónico y recepción de su información. Los equipos más modernos son capaces de emplear las tres técnicas de representación de datos (García Medina, 2013). La tabla 8 presenta las características de cada tipo de representación, agregado a esto, la figura 5 ilustra los detalles en cada tipo de representación.

Tabla 8

Técnicas de representación de datos

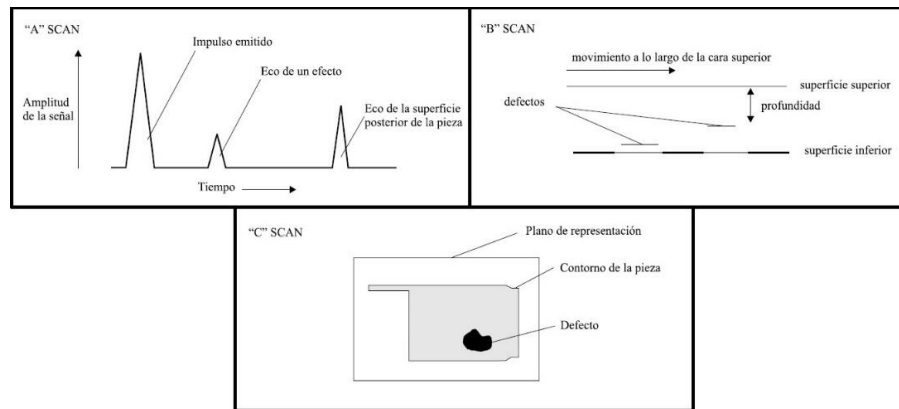
Técnicas de representación	Características
A-SCAN	Se representa la cantidad de energía recibida en función del tiempo. Las cantidades relativas de energía son representadas en el eje vertical, mientras que el tiempo transcurrido es representado en el eje horizontal. La amplitud da una idea de las características del defecto y su desplazamiento la profundidad a la que se encuentra.

Técnicas de representación	Características
B-SCAN	Se representa la profundidad y la distribución del defecto en una sección transversal. El tiempo de “viaje” de la onda (o su equivalente en profundidad) es visualizado en el eje vertical, mientras que la posición del cabezal es representada en el eje horizontal. Es útil para identificar ubicaciones de ecos internos, como inclusiones o cambios de características en una pieza, como caídas de capas y distorsiones fuera del plano, como arrugas.
C-SCAN	Se representa un registro de las discontinuidades del material proyectados en un plano perpendicular al de emisión del haz, no encontrándose en esta representación la profundidad de los defectos. Es capaz de medir delaminaciones, aberturas o huecos en láminas, inclusiones, zonas ricas y zonas pobres en resina, rasguños en la superficie y burbujas. Esta técnica es más apropiada para la determinación de calidad global que para la detección de defectos específicos

Nota: Adaptado de: (ASTM, 2017; García Medina, 2013; Hellier, 2013; Miravete, 2020; Rimoldi & Mundo, 2012).

Figura 5

Técnicas de representación en ensayos por ultrasonido



Nota: Adaptado de: (Miravete, 2020).

Existen también diferentes variantes de estos tres métodos como lo son: G-SCAN que se adquiere simultáneamente imágenes C-SCAN con diferentes profundidades; P-SCAN conocido como tomografía ultrasónica y proporciona imágenes 4D (magnitud y coordenadas); X-SCAN estructura visualmente de la muestra utilizando un conjunto de secciones horizontales; Z-SCAN utilizado para construir una imagen tridimensional basada en información obtenida de exploración utilizando otros modos (Nsengiyumva et al., 2021).

4.3 Particularidades del ensayo de ultrasonido en la evaluación

En la aplicación del ensayo de ultrasonido se deben tener en cuenta las siguientes características para la evaluación de materiales compuestos usados en la industria aeroespacial. En primer lugar, se debe categorizar el tipo de material compuesto a inspeccionar (compuestos laminados o de estructura sándwich) con el fin de determinar los posibles medios (matriz, refuerzo, núcleo) en los que se va a transmitir y reflejar la onda ultrasónica. Posteriormente, se debe analizar el tipo, tamaño, forma y orientación de las discontinuidades que puede presentarse en la estructura compuesta, con el propósito de establecer las variables del ensayo más adecuadas, las cuales son la frecuencia (0.5 - 25MHz), la velocidad de propagación de la onda (dependerá de las propiedades intrínsecas del material y los modos de vibración), la impedancia acústica (será diferente para todos los materiales a causa de la densidad y velocidad de propagación de la onda), atenuación (pérdida progresiva de la energía ultrasónica). Con base en los parámetros estimados como la impedancia acústica (Z), se puede calcular el porcentaje de onda reflejada y el porcentaje de onda transmitida entre 2 medios continuos, de acuerdo con las ecuaciones 1 y 2.

$$R = (Z_2 - Z_1)/(Z_1 + Z_2) \quad (1)$$

$$T = 2Z_2/(Z_1 + Z_2) \quad (2)$$

En los materiales compuestos los componentes estructurales presentan diferentes impedancias acústicas ocasionando una gran disminución de intensidad en la onda transmitida, por esta razón se usan altas frecuencias (0.5 a 20 MHz) e intensidades para la inspección de estos materiales con el fin de lograr la reflexión en la discontinuidad y así pueda llegar una intensidad detectable de onda al transductor para su posterior interpretación mediante las técnicas de representación.

La tabla 9 presenta las variables que se utilizan comúnmente en la aplicación del ensayo de ultrasonido para la evaluación de los diferentes componentes de un material compuesto, por medio de la velocidad y frecuencia utilizada para la inspección de cada material se puede calcular las diferentes longitudes de onda presentes en el ensayo; la tabla 10 muestra los diferentes coeficientes de transmisión y reflexión en la interfaz que se pueden dar entre los componentes de los materiales compuestos (Fombuena Borrás, 2016; I. Workman, 2007).

Tabla 9

Variables en la aplicación del ensayo de ultrasonido en materiales compuestos

Material	Densidad (g/cm ³)	Impedancia acústica (kg/cm ² s)	Tipo de onda	Velocidad (km/s)
Aire	0.0012	0.04	Longitudinal	0.33
Agua	1.00	148	Longitudinal	1.48
Resina	1.15	310	Longitudinal	2.70
			Transversal	1.10
Grafito Epoxi	1.55	465	Longitudinal	3.00

Nota: La tabla muestra las diferentes características de los materiales como son su densidad, impedancia acústica, tipo de onda transmitida y la velocidad de propagación de la onda en cada material. Adaptado de: (I. Workman, 2007).

Tabla 10

Coefficientes de transmisión y reflexión en interfaces

Interfase	Coefficiente de transmisión $2Z_2*(Z_2 + Z_1)^{-1}$	Coefficiente de reflexión $(Z_2 - Z_1) *(Z_2 + Z_1)^{-1}$	Amplitud de transmisión (dB)	Amplitud de reflexión (dB)
Grafito Epoxi→Aire	0.00017	-0.99983	-75.29	-0.0015
Aire→Grafito Epoxi	1.99983	0.99983	6.02	-0.0015
Agua→Grafito Epoxi	1.51713	0.51713	3.62	-5.73
Grafito Epoxi→Agua	0.48287	-0.51713	-6.32	-5.73
Resina→Grafito Epoxi	1.20000	0.20000	1.58	-13.98
Grafito Epoxi→Resina	0.80000	-0.20000	-1.94	-13.98

Nota: La tabla muestra los coeficientes de reflexión y transmisión junto con las amplitudes de las ondas reflectadas y refractadas de algunas interfaces. Adaptado de: (I. Workman, 2007).

5. Conclusiones

En virtud de lo estudiado, respecto a la aplicación del método no destructivo de ultrasonido en la evaluación de materiales compuestos usados en la industria aeroespacial, se plantean las siguientes conclusiones:

La combinación de materiales compuestos que mayoritariamente se utilizan en la industria aeroespacial corresponde a los de matriz polimérica reforzados con fibras de vidrio o carbono, dado que proporcionan alta resistencia y módulo específicos. Asimismo, los materiales compuestos estructurales tipo sándwich son ampliamente utilizados en la fabricación de componentes específicos que requieren alta resistencia térmica y a la flexión. En consideración con estas propiedades, se logra el principal objetivo de esta industria que reside en disminuir considerablemente el peso de las aeronaves consiguiendo un mejor rendimiento, una mayor carga útil y ahorro de combustible; mejorando así la eficiencia de vuelo. Actualmente más del 90% de los componentes estructurales de material compuesto fabricados para la industria aeroespacial se fabrican por laminación manual o automática de preimpregnados y el posterior curado en autoclave de la pieza. Estos procesos pueden alcanzar las mejores propiedades, sin embargo, sus costos son relativamente altos y pueden presentar problemas en su ejecución. Debido a esto se han desarrollado procesos alternativos como el RTM y RFI los cuales pueden proporcionar propiedades mecánicas similares con un bajo contenido de imperfecciones a un menor costo de producción.

Los materiales compuestos empleados en la manufactura de componentes o piezas a utilizar en las aeronaves de la industria aeroespacial pueden presentar una gran variedad de defectos, reiterándose en mayor medida las porosidades, delaminaciones, desuniones, desconsolidación entre componentes e inclusiones. Por otra parte, durante el servicio se puede

presentar otro tipo de defectos como delaminaciones, desuniones, grietas, BVID, daños por calor y corrosión, ocasionados por condiciones externas de gran exigencia como impactos, altas temperaturas, golpes por rayos, entre otros; generando una pérdida de las propiedades de los materiales y afectando en gran medida el componente fabricado, debido a esto se debe realizar inspección continua.

El Ensayo No Destructivo de ultrasonido es eficaz en la detección de porosidades, delaminaciones y desalineamiento de las fibras. Conforme al tipo, tamaño, forma y sensibilidad de la discontinuidad que pueda presentar el compuesto, se elige el método de ultrasonido más adecuado considerando las siguientes particularidades: el tipo de material compuesto, la atenuación presente en cada componente del compuesto, la frecuencia ultrasónica necesaria, la velocidad de propagación y la impedancia acústica. En compuestos laminados poliméricos reforzados con fibras, la consolidación y la porosidad se pueden detectar con el método de transmisión o pulso eco con placa reflectora, mientras que las delaminaciones, vacíos y algunas inclusiones son detectables con pruebas de transmisión directa y para la detección de arrugas se utiliza la técnica de representación B-SCAN a alta frecuencia. En las estructuras tipo Sándwich se utiliza transmisión directa mediante sistemas de chorro de agua (*Water Squiter*) en la detección de la mayoría de los defectos con frecuencias de 1Mhz, siendo también aceptado el sistema de aire acoplado. El uso de ultrasonido para la evaluación en servicio emplea haces normales para la detección de impactos en compuestos, desuniones y delaminaciones, por otra parte, el ingreso de humedad puede ser detectado a través de cambios en la velocidad y atenuación de las ondas, además se aplican haces normales o en ángulo para la detección de grietas causadas por fatiga generadas en las capas superiores de los compuestos.

Referencias Bibliográficas

- Airbus. (2019). FROM: Airport Operations Subject: A350 XWB Airframe Composite guide for firefighters Objective. (June).
- Alba, J. J., Jiménez, M. A., & Miravete, A. (1996). New " sandwich" structures conformed from three dimensional. *Materiales de Construcción*, 46(241), 23-37.
- Angel, M., Ospina, C., Sebastián, J., Ospina, V., & Daraviña, B. S. (2013). Materiales Compuestos. In.
- Aircraft, K. (2005). Tema 8 Materiales Compuestos ("COMPOSITES").
- Ashby, M., & Johnson, K. (2010). Materials and Design. *Materials and Design*. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-26530-5>
- ASTM. (2017). E2580 - Standard Practice for Ultrasonic Testing of Flat Panel Composites and Sandwich Core Materials Used in Aerospace Applications www.astm.org
- ASTM. (2021). E1316 - 21 Standard Terminology for Nondestructive Examinations. www.astm.org
- Balasubramanian, K., Sultan, M. T. H., & Rajeswari, N. (2018). 4 - Manufacturing techniques of composites for aerospace applications. In M. Jawaid & M. Thariq (Eds.), *Sustainable Composites for Aerospace Applications* (pp. 55-67). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102131-6.00004-9>
- Besednjak, A. (2009). *Materiales compuestos* (Vol. 100). Univ. Politèc. de Catalunya.
- Bossi, R. H., & Georgeson, G. E. (2019). Nondestructive testing of aerospace composites. *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, 461-489. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102679-3.00016-2>

- Bossi, R. H., & Giurgiutiu, V. (2015). 15 - Nondestructive testing of damage in aerospace composites. In P. E. Irving & C. Soutis (Eds.), *Polymer Composites in the Aerospace Industry* (pp. 413-448). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-523-7.00015-3>
- Brejjo, J. (2017). AUTOCLAVE. LOS PRE-IMPREGNADOS "PREPEG's". In.
- Cisneros Estupiñán, M. (2012). *Cómo elaborar trabajos de grado (2a. ed.)*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Clyne, T. W., & Hull, D. (2019). *An introduction to composite materials*. Cambridge university press.
- CompositesWorld. (2016). *Materials & Processes: Resin matrices for composites*. Retrieved 19/03/2021 from <https://www.compositesworld.com/articles/the-matrix>
- Cox, K., & Menshykov, O. (2017). Composites are coming. *Offshore Engineer*, 42(7), 46-47.
- Das, M., Sahu, S., & Parhi, D. R. (2020). Composite materials and their damage detection using AI techniques for aerospace application: A brief review. *Materials Today: Proceedings*.
- Derek, H. (2003). Materiales compuestos. *Materiales Compuestos*.
- Devendra, K., & Rangaswamy, T. (2013). Strength characterization of E-glass fiber reinforced epoxy composites with filler materials. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 1(06), 353-357.
- Dietrich, A. B., & Edicions, U. P. C. (2005). *Materiales compuestos: procesos de fabricación de embarcaciones*. Edicions UPC.
- Echeverria, R. (2002). *Ultrasonido - Laboratorio de Ensayos No Destructivos*. Universidad Nacional del Comahue - Facultad de Ingeniería. <https://docplayer.es/11399616->

[Universidad-nacional-del-comahue-facultad-de-ingenieria-laboratorio-de-ensayos-no-destructivos-ultrasonido-ing-ricardo-echevarria-ano-2002.html](http://www.universidadnacionaldelcomahue.cl/facultad-de-ingenieria-laboratorio-de-ensayos-no-destructivos-ultrasonido-ing-ricardo-echevarria-ano-2002.html)

- Fernández-López, A., Larrañaga-Valsero, B., & Guemes, A. (2014). Wrinkle detection with ultrasonic phased array technology. *Department of Aeronautics, Polytechnic University of Madrid (UPM), Spain.*
- Fombuena Borrás, V. (2016). Determinación de inclusiones porosas y delaminaciones en materiales compuestos mediante ultrasonidos.
- García Medina, V. (2013). Ultrasonidos: Técnica no destructiva para el estudio de monumentos. In: Universidad de Sevilla. Retrieved from <http://bibing.us.es/proyectos>
- Gay, D. (2014). *Composite materials: design and applications*. CRC press.
- Gholizadeh, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity, 1*, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008>
- Gomez, J. T. G. (2019). Manufactura y caracterización mecánica de estructuras tipo sándwich fabricadas por infusión al vacío para componentes aeronáuticos.
- Gopinath, A., Kumar, M. S., & Elayaperumal, A. (2014). Experimental Investigations on Mechanical Properties Of Jute Fiber Reinforced Composites with Polyester and Epoxy Resin Matrices. *Procedia Engineering, 97*, 2052-2063. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.448>
- Gresil, M., Poohsai, A., & Chandarana, N. (2017). Guided Wave Propagation and Damage Detection in Composite Pipes Using Piezoelectric Sensors. *Procedia Engineering, 188*, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.468>

- Hassen, A. A., Taheri, H., & Vaidya, U. K. (2016). Non-destructive investigation of thermoplastic reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 97, 244-254. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.006>
- Hay, T. R., Wei, L., Rose, J. L., & Hayashi, T. (2003). Rapid Inspection of Composite Skin-Honeycomb Core Structures with Ultrasonic Guided Waves. *Journal of Composite Materials*, 37(10), 929-939. <https://doi.org/10.1177/0021998303037010005>
- Healey, R., Wang, J., Chiu, W. K., Chowdhury, N. M., Baker, A., & Wallbrink, C. (2021). A review on aircraft spectra simplification techniques for composite structures. *Composites Part C: Open Access*, 5, 100131. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100131>
- Hellier, C. J. (2013). *Handbook of nondestructive evaluation*. McGraw-Hill Education.
- Heslehurst, R. B. (2014). *Defects and damage in composite materials and structures*. CRC press.
- I. Workman, G. L. I. K., Doron. III. Moore, Patrick O. (2007). *Ultrasonic Testing - Nondestructive testing handbook* (Vol. 7).
- Ibrahim, M. E. (2014). Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich structures: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64, 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.04.010>
- Ingemecánica. (2018). *Estudio de los materiales compuestos*. Retrieved 18/01/2021
- Johnson, A. F., Thomson, R. S., David, M., Joosten, M. W., & Waimer, M. (2020). Design and testing of crashworthy aerospace composite components. In *Polymer composites in the aerospace industry* (pp. 371-414). Elsevier.
- Katunin, A., Dragan, K., & Dziendzikowski, M. (2015). Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques. *Composite Structures*, 127, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.080>

- Keifer, G., & Effenberger, F. (1967). Scientific Principles Of Composites. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951-952.
- Kerseman, M., Martens, A., Van Den Abeele, K., Degrieck, J., Zastavnik, F., Pyl, L., . . . Van Paepegem, W. (2014). Detection and Localization of Delaminations in Thin Carbon Fiber Reinforced Composites with the Ultrasonic Polar Scan. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 33(4), 522-534. <https://doi.org/10.1007/s10921-014-0249-5>
- Kessler, M. R. (2012). Polymer matrix composites: A perspective for a special issue of polymer reviews. *Polymer Reviews*, 52(3), 229-233.
- Kessler, S. S., Spearing, S. M., & Soutis, C. (2002). Damage detection in composite materials using Lamb wave methods. *Smart Materials and Structures*, 11(2), 269-278. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/2/310>
- L, M. M. T. (2013). 12. Materiales compuestos con otras matrices. In (pp. 1-10).
- Larrode, E. (2000). *Materiales compuestos*. Antonio Miravete.
- Lopresto, V., Leone, C., & De Iorio, I. (2011). Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 717-723.
- Loutas, T. H., Panopoulou, A., Roulias, D., & Kostopoulos, V. (2012). Intelligent health monitoring of aerospace composite structures based on dynamic strain measurements. *Expert Systems with Applications*, 39(9), 8412-8422. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.179>
- Maga. (2018). Procesos de Fabricación con Preimpregnados y Autoclave. *Universidad Politécnica de Madrid*.
- Maierhofer, C., Myrach, P., Reischel, M., Steinfurth, H., Röllig, M., & Kunert, M. (2014). Characterizing damage in CFRP structures using flash thermography in reflection and

- transmission configurations. *Composites Part B: Engineering*, 57, 35-46.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.036>
- Malavia Otero, J. M. (2012). Caracterización de paneles Sandwich híbridos FRP con alma de nido de abeja de aluminio.
- Marsh, G. (2010). Airbus A350 XWB update. *Reinforced Plastics*, 54(6), 20-24.
[https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(10\)70212-5](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(10)70212-5)
- Mart, R., Guel, I. E., & Reyes, C. G. G. (2021). Módulos el mundo de los materiales MWM. CONACYT.
- McIlhagger, A., Archer, E., & McIlhagger, R. (2015). 3 - Manufacturing processes for composite materials and components for aerospace applications. In P. E. Irving & C. Soutis (Eds.), *Polymer Composites in the Aerospace Industry* (pp. 53-75). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-523-7.00003-7>
- Meola, C., Boccardi, S., & Carlomagno, G. m. (2017). Chapter 1 - Composite Materials in the Aeronautical Industry. In C. Meola, S. Boccardi, & G. m. Carlomagno (Eds.), *Infrared Thermography in the Evaluation of Aerospace Composite Materials* (pp. 1-24). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-171-9.00001-2>
- Meola, C., & Carlomagno, G. M. (2014). Infrared thermography to evaluate impact damage in glass/epoxy with manufacturing defects. *International Journal of Impact Engineering*, 67, 1-11.
- Miravete, A. (2020). *Materiales compuestos. Vol. 2* (Vol. 2). Reverte.
- Mohaghegh, M., Stone, D. L., Avila, A. F., & Bowman, K. B. (2018). Subsonic Aircraft Materials Development. In *Aerospace Materials and Applications* (pp. 305-402). American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. [doi:10.2514/5.9781624104893.0305.0402](https://doi.org/10.2514/5.9781624104893.0305.0402)

- Muhammad, A., Rahman, M. R., Bains, R., & Bakri, M. K. B. (2021). Applications of sustainable polymer composites in automobile and aerospace industry. In *Advances in Sustainable Polymer Composites* (pp. 185-207). Elsevier.
- Natarajan, N., Krishnaraj, V., & Davim, J. P. (2014). *Metal matrix composites: synthesis, wear characteristics, machinability study of MMC brake drum*. Springer.
- Nsengiyumva, W., Zhong, S., Lin, J., Zhang, Q., Zhong, J., & Huang, Y. (2021). Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures: A state-of-the-art review. *Composite Structures*, 256(June 2020), 112951-112951. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112951>
- OLYMPUS. (2017). *Control de adherencia no destructivo para materiales compuestos de aeronaves*. Retrieved 05/04/2021 from <https://www.olympus-ims.com/es/applications/non-destructive-bond-testing-aircraft-composites/>
- OLYMPUS. (2020a). *Soluciones para inspeccionar defectos y espesores BondMaster 600*. [https://www.olympus-ims.com/es/bondmaster600/#!cms\[focus\]=cmsContent10812](https://www.olympus-ims.com/es/bondmaster600/#!cms[focus]=cmsContent10812)
- OLYMPUS. (2020b). *Soluciones para inspeccionar defectos y espesores RollerFORM - Escáner Phased Array de roldana*. Retrieved 10/06/2021 from [https://www.olympus-ims.com/es/rollerform/#!cms\[focus\]=cmsContent10306](https://www.olympus-ims.com/es/rollerform/#!cms[focus]=cmsContent10306)
- Park, B., An, Y.-K., & Sohn, H. (2014). Visualization of hidden delamination and debonding in composites through noncontact laser ultrasonic scanning. *Composites Science and Technology*, 100, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.05.029>
- Pavelko, V., Ozolinsh, I., Kuzņecovs, S., & Pavelko, I. (2011, 2011). Structural health monitoring of aircraft structure by method of electromechanical impedance.

- Platas, F. (2016). Materiales matálicos cerámicos. *Universidad Autonoma del Estado de Mexico*, 68-70.
- Quilter, A. (2004). *Composites in Aerospace Applications*. Retrieved 25/03/2021 from <https://www.aviationpros.com/engines-components/aircraft-airframe-accessories/article/10386441/composites-in-aerospace-applications#:~:text=Better%20known%20man%2Dmade%20composite,which%20is%20tough%20but%20neither>
- Rana, S., & Figueiro, R. (2016). *Advanced composite materials for aerospace engineering: Processing, properties and applications*. Woodhead Publishing.
- Rimoldi, C., & Mundo, L. M. (2012). Ensayo no Destructivo por método de ultrasonido. *línea*. Available: <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Apunte%20Ultrasonido>
- Rizos, D. D., Fassois, S. D., Marioli-Riga, Z. P., & Karanika, A. N. (2008). Vibration-based skin damage statistical detection and restoration assessment in a stiffened aircraft panel. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(2), 315-337.
- Rocha, H., Semprinoschnig, C., & Nunes, J. P. (2021). Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review. *Engineering Structures*, 237, 112231. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112231>
- Santiago, M. O., Marín, C. G., & Fernández, J. R. (2003). Los Composites. Características y aplicaciones en la edificación. *Informes de la Construcción*, 54(484), 45-62.
- Scarponi, C., & Briotti, G. (2000). Ultrasonic technique for the evaluation of delaminations on CFRP, GFRP, KFRP composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 31(3), 237-243. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(99\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00076-1)

- Smith, R. A. (2009). Composite defects and their detection. *Materials science and engineering*, 3(1), 103-143.
- Soutis, C. (2020). 1 - Aerospace engineering requirements in building with composites. In P. Irving & C. Soutis (Eds.), *Polymer Composites in the Aerospace Industry (Second Edition)* (pp. 3-22). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102679-3.00001-0>
- Staszewski, W. J., Mahzan, S., & Traynor, R. (2009). Health monitoring of aerospace composite structures – Active and passive approach. *Composites Science and Technology*, 69(11), 1678-1685. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.09.034>
- Stokes, V. K. (2020). Advanced Composites – Materials with Well-Defined Reinforcement Architectures. In V. K. Stokes (Ed.), *Introduction to Plastics Engineering* (pp. 0). ASME Press. https://doi.org/10.1115/1.862IPE_ch25
- Stupenengo, F. (2011). Materiales y materias primas. *F. Stupenengo, Materiales y materias primas (pág. 7). Barranquilla: materiales compuestos.*
- Sutanu, S., & Debasis, D. (2010). Ultrasonic Detection of Inclusion Type Defect in a Composite Panel Using Shannon Entropy.
- Taheri, H., & Hassen, A. A. (2019). Nondestructive Ultrasonic Inspection of Composite Materials: A Comparative Advantage of Phased Array Ultrasonic. *Applied Sciences*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/app9081628>
- Taheri, H., Ladd, K. M., Delfanian, F., & Du, J. (2014, 2014). Phased array ultrasonic technique parametric evaluation for composite materials.
- Talreja, R. (2015). 5 - Manufacturing defects in composites and their effects on performance. In P. E. Irving & C. Soutis (Eds.), *Polymer Composites in the Aerospace Industry* (pp. 99-113). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-523-7.00005-0>

- Todoroki, A., Oasada, T., Ueda, M., Matsuzaki, R., & Hirano, Y. (2021). Reinforcing in the lay-up direction with self-heating for carbon fiber composites fabricated using a fused filament fabrication 3D printer. *Composite Structures*, 266, 113815. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113815>
- Towsyfyan, H., Biguri, A., Boardman, R., & Blumensath, T. (2020). Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33(3), 771-791. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.017>
- Ugena, C. N., & Pozuelo, E. B. (2018). Capítulo 7. Introducción a las estructuras Sandwich. In: Obtingut el.
- Valencia Ilarregui, J. (2009). Caracterización mediante técnicas de ultrasonido de un laminado de fibra de vidrio.
- Vigilancia, G. D. (2010). Armonización de las Actividades en Materiales Compuestos para Aeronáutica y Espacio en España Grupo de Vigilancia Índice. *Aeroespacial Española*, 1005, 34-34.
- Vision, A. C., & Aerodynamics, I. F. E. (2004). Taking the lead: the A350XWB. *AIRBUS*, 2004(451), 11-11. [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(04\)00159-2](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(04)00159-2)
- Visual, O. (2020). *BondMaster 600: An Advanced Guide to Finding the Correct Frequencies for Inspecting Honeycomb Composites*. Retrieved 14/06/2021 from <https://www.olympus-ims.com/es/bondmaster-600-an-advanced-guide-to-finding-the-correct-frequencies-for-inspecting-honeycomb-composites/>
- Wei, X., Xiong, J., Wang, J., & Xu, W. (2020). New advances in fiber-reinforced composite honeycomb materials. *Science China Technological Sciences*, 63(8), 1348-1370. <https://doi.org/10.1007/s11431-020-1650-9>

Zhang, X., Chen, Y., & Hu, J. (2018). Recent advances in the development of aerospace materials.

Progress in Aerospace Sciences, 97, 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.01.001>