



Determinación de inclusiones porosas y delaminaciones en materiales compuestos mediante ultrasonidos

Apellidos, nombre	Fombuena Borràs, Vicent (vifombor@upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales (DIMM)
Centro	Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA) Universitat Politècnica de València (UPV)

1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a mostrar la posibilidad de detectar posibles defectos en materiales compuestos mediante la utilización de una técnica de Ensayos No Destructivos (END) como es la técnica de ultrasonidos. En este caso se determinará la posible detección de porosidad y delaminaciones presente en materiales compuestos.

2 Introducción

Los materiales compuestos poseen una balanza de propiedades excelente tal y como refleja sus elevadas propiedades mecánicas respecto a su ligereza. Esta combinación de propiedades mecánicas junto con su elevada variedad y su competitividad económica han dado lugar a que en los últimos años hayan incrementado su utilización. La combinación de diferentes matrices (normalmente polímeros termoplásticos o termoestables) con diferentes fibras (vidrio, carbono entre las más conocidas) permite conseguir una gran variedad de materiales que se pueden adaptar a aplicaciones muy diversas¹. Como consecuencia, la utilización de materiales compuestos reforzados con fibras, se utiliza en sectores tanto de bajo como elevado carácter tecnológico, como es el sector de la construcción, aerogeneradores, sector náutico y ferroviario, deporte de élite, automoción, y sectores tan exigentes como el médico, militar o aeronáutico-aerospacial^{2,3}.

Las técnicas de procesado de materiales compuestos, entre las que se encuentran sistemas RTM (utilización de un molde cerrado donde se incorpora la resina) o VART (Vacuum assisted RTM) ofrecen un buen acabado por ambas caras, capacidad de producir piezas de diversos tamaños y complejidad dimensional, trabajar con gran variedad de resinas y refuerzos, control preciso de espesores y poca emisión de gases^{4,5}.

No obstante, estos sistemas de procesado también pueden acarrear una serie de defectos típicos que a continuación se describen:

- **Delaminación:** Uno de los defectos más comunes. Puede ocurrir por falta de unión entre capas sucesivas
- **Porosidad:** Defecto puntual o por acumulación de pequeñas discontinuidades. Puede ser producido por un movimiento relativo entre dos capas consecutivas cuando el proceso de entrecruzado de la resina ya ha empezado.
- **Porosidad generalizada:** Afecta a toda la pieza como consecuencia de una escasa presión durante el proceso de curado
- **Inclusión de objetos extraños o escoria:** Mediante este nombre se generaliza la inclusión de restos, como plásticos procedentes de la protección de los tejidos, presentes en el seno del composite⁶.

Por todos estos posibles defectos y debido a la aplicación de los materiales compuestos en sectores altamente tecnológicos es necesaria la aplicación de controles de calidad para garantizar la homogeneidad y calidad de los materiales compuestos. Una de las técnicas más versátiles y que en el presente artículo desarrolla es el método de inspección por ultrasonidos. En esta técnica, un haz ultrasónico se propaga a través del material y se refleja, difracta y atenúa haciendo posible la detección de heterogeneidades. En la capacidad de reflejar un haz

ultrasónico por parte de una imperfección, como una inclusión de un cuerpo extraño o de una porosidad, estará la clave para poder detectar un posible fallo. En este artículo encontrarás la forma de calcular que cantidad de haz ultrasónico será reflejado o difractado, y como consecuencia si será posible detectarlo.

3 Objetivos

Tras finalizar la lectura de este artículo el alumno será capaz de:

- Determinar las principales imperfecciones presentes en materiales compuesto
- Identificar los principales fenómenos físicos de interacción de una onda ultrasónica con el material compuesto. Aquí se centrará el estudio en los fenómenos de propagación y recepción de haces ultrasónicos en materiales compuestos, puesto que son los que determinarán si una imperfección puede ser detectada o no.
- Calcular e interpretar numéricamente el porcentaje de onda transmitida y reflejada en un caso concreto de una imperfección en un material compuesto.

4 Desarrollo

Por tanto, por un lado tenemos que los materiales compuestos se emplean en ingeniería cada vez en mayor proporción. No obstante, hay que tener en cuenta que una de sus principales ventajas, sus elevadas propiedades mecánicas, va ligado a un control de calidad del producto exhaustivo. La presencia de delaminaciones, porosidad puntual o generalizada o incluso presencia de restos de otros materiales, tendrá como consecuencia una notable reducción de la calidad del material compuesto y como consecuencia de sus propiedades. En sectores de elevado carácter tecnológico es necesario la aplicación de controles de calidad, como el de ultrasonidos para garantizar una excelente calidad en los materiales finales.

A continuación, describimos como podemos saber si una muestra de material compuesto posee o no posee porosidades de aire puntuales o generalizadas incluso delaminaciones:

1. En primer lugar, describiremos los fenómenos de interacción de un haz ultrasónico con el material con el fin de entender que fenómenos físicos ocurren y cuales nos van a permitir aplicar un haz ultrasónico como control de calidad en materiales compuestos.
2. Seguidamente plantearemos un caso real. Para ello, se seleccionará un tipo de resina y de fibra como refuerzo y se estimarán unas condiciones de trabajo para la técnica de ultrasonidos.
3. Por último, interpretaremos los resultados obtenidos y llegaremos a unas conclusiones de por qué una porosidad puede o no puede ser detectada en un material compuesto

4.1 Interacciones del haz ultrasónico con la materia.

Para poder llevar a cabo este tipo de inspecciones es necesario contar con un transductor ultrasónico. Es un mecanismo capaz de convertir la energía eléctrica en mecánica (generando una pequeña vibración y actuando como emisor) y viceversa (recibiendo una pequeña vibración y convirtiéndola en energía eléctrica,



actuando como receptor). Esto ocurre gracias a fenómenos físicos como el efecto piezoeléctrico (presente en cristales de cuarzo) y el efecto magnetostrictivo.

Hay que tener en cuenta que cuando un haz ultrasónico atraviesa una materia, la interacción del propio haz con los átomos va a provocar ciertos fenómenos físicos que conviene tener en cuenta para interpretar correctamente este tipo de ensayos.

- En primer lugar, habrá que definir que es la **frecuencia (F)** de una onda. La frecuencia de un haz ultrasónico (superior a los 20 kHz) es una medida del número de vibraciones por segundo en un punto determinado. Las frecuencias se miden en Hertz (Hz) en el Sistema Internacional. El tiempo recorrido entre dos repeticiones es el periodo de la onda (T). Como se ha comentado, se considera que cualquier frecuencia por encima de los 20 kHz es un haz ultrasónico. No obstante, en la práctica se operan en rangos entre los 50 y los 200 MHz.
- La **velocidad de propagación V_l** es otro de los aspectos críticos que debes conocer. Es la velocidad a la cual las vibraciones pasan a través de la materia y va a depender en gran medida de las propiedades intrínsecas del material y del modo de vibración. La velocidad de propagación varía de forma inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad (φ) y de forma directamente proporcional a la raíz cuadrada de la elasticidad. Además, un factor que afecta de forma directa a la velocidad es el coeficiente de Poisson (γ) (cociente entre deformaciones laterales y axiales). Con todo esto la velocidad se puede obtener de la siguiente forma:

$$V_l = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \gamma)}{\varphi \cdot (1 + \gamma) \cdot (1 - 2\gamma)}} \quad (1)$$

Donde V_l es la velocidad longitudinal, E es el módulo de Young, y el Coeficiente de Poisson y φ la densidad.

- No todos los materiales se van a comportar de igual forma cuando sean traspasador por una onda ultrasónica. Esta resistencia que oponen los materiales al paso de una onda ultrasónica es la **impedancia acústica (Z)** y también la podremos determinar de forma experimental mediante la siguiente fórmula:

$$Z = V_l \cdot \varphi \quad (2)$$

Donde Z es la impedancia, V_l la velocidad longitudinal y la φ densidad.

- No obstante, hay que tener en cuenta que la velocidad e intensidad de la onda no será constante, puesto que la interacción del propio haz con la materia va a provocar fenómenos una disminución de la energía. La **atenuación** es la pérdida progresiva de la energía de las señales ultrasónicas, el mismo efecto por el cual la música de tú vecino se escucha más débil después de cerrar la puerta. Como consecuencia, en la técnica de ultrasonidos, tal y como verás en la resolución de la parte práctica, el rebote de una onda ultrasónica (eco) será más débil que la onda incidente.

El sonido intentará avanzar en línea recta siempre y cuando la densidad del medio y homogeneidad sean uniformes. En el momento en que encuentre algún elemento distinto al del medio por el circula, se producirá una desviación de la

dirección del haz. A este efecto se le conoce como **dispersión**. En el momento que el haz ultrasónico encuentre algún elemento distinto (lo que se conoce como reflector) parte de la onda lo va a atravesar (**onda transmitida o refractada**) y parte va a rebotar (**onda reflejada**). Este fenómeno es el mismo que le ocurre a la luz según una ley que seguro bien conoces, la **Ley de Snell**.

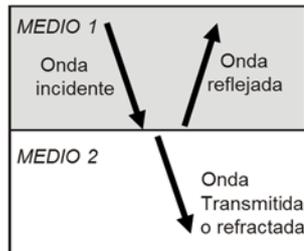


Figura 1. Fenómeno de reflexión y transmisión de una onda sónica.

Para determinar de forma práctica que cantidad de sonido va a ser refleja y cual va a ser transmitida deberá aplicar las siguientes fórmulas:

$$\boxed{\%R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}} \quad \boxed{\%T = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}} \quad (3)(4)$$

Donde Z_1 es la impedancia del medio donde se propaga el sonido, Z_2 es el elemento reflector, $\%R$ es la cantidad de onda reflejada y $\%T$ la cantidad transmitida⁷.

Por tanto, como ya podrás intuir, en un ensayo de inspección por ultrasonidos, el haz ultrasónico avanzará por la matriz polimérica y en el momento en que encuentre lo que se denomina un reflector (por ejemplo, una porosidad, una fibra o inclusión de otro material) parte de esta onda será reflejada pudiendo ser detectada por el receptor. Lo que nos interesa, es que la cantidad de onda reflejada sea lo más elevada posible. De esta forma, este "eco" será fácilmente detectable, a pesar de fenómenos descritos como la atenuación, dispersión, etc.

A continuación, describiremos un caso real: la caracterización de un material compuesto de fibra de carbono mediante la técnica de ultrasonidos.

Una vez establecido la interacción física de una onda ultrasónica con la materia, vamos a plantear un caso real. El problema que se pretende resolver es la determinación de posibles defectos en un material compuesto técnico y de gran utilización en múltiples sectores. Este compuesto se desarrolla a partir de fibra de carbono como refuerzo y resina epoxy como matriz polimérica.

Como se ha descrito anteriormente, si estos materiales compuestos quieren ser utilizados en sectores de elevado carácter tecnológico debemos garantizar que no posee ningún defecto puntual que reduzca sus propiedades mecánicas. Los principales defectos que deseamos evaluar son:

- La posible existencia de **porosidad puntual o generalizada**. Estos defectos serán inclusiones de aire en el seno de la matriz polimérica. Como se ha descrito pueden haberse provocado en el proceso productivo por una escasa presión durante el proceso de curado de la resina o de un movimiento entre capas

después de que la resina ya haya empezado su proceso de entrecruzamiento molecular.

- También evaluaremos la posible **delaminación** de una capa de fibra de carbono. La delaminación se reconocerá por la existencia de presencia de aire debido al desprendimiento de sucesivas capas de fibra por una falta de adhesión entre ellas.

4.2 Resolución del proceso de inspección de un material compuesto de fibra de carbono mediante ultrasonidos.

En primer lugar, debemos tener en cuenta los tres tipos de materiales que nos podemos encontrar en la inspección técnica mediante ultrasonidos. El primero de ellos será la matriz polimérica, en este caso una **resina de tipo epoxy**, el segundo de los materiales será la **fibra de carbono** utilizada como refuerzo y el tercero que nos podemos encontrar es la presencia de aire en forma de porosidad o delaminación.

El primer objetivo que nos marcamos es determinar cuáles van a ser la velocidad de propagación del sonido (**V_l**) en los diferentes medios y su impedancia acústica (**Z**), puesto que de estos parámetros dependerá la cantidad de sonido reflejado y transmitido. Para calcular dichos parámetros debemos recopilar los siguientes datos: Módulo de Young (**E**), Coeficiente de Poisson (**γ**) y densidad (**ρ**).

Tabla 1. Valores de densidad, módulo elástico y coeficiente de Poisson para los materiales presentes en el compuesto.

MATERIAL	DENSIDAD (Kg/m ³)	MODULO ELÁSTICO (Gpa)	COEF. POISSON (γ)
RESINA EPOXY	1150	3,08	0,4
FIBRA CARBONO	1850	370	0,1

Hay que tener en cuenta que la velocidad de propagación del sonido por el aire es un dato conocido (340 m/s), por lo que no es necesario calcularla.

4.2.1 Inspección de porosidad

La primera parte de la resolución del problema consistirá en determinar si es posible detectar si existen porosidades de aire en el material compuesto. Previamente debemos especificar que se utilizará un **palpador de incidencia normal** con una **frecuencia de 10 MHz** que producirá una **intensidad de 200 dB**. Recordemos que, en caso de existir porosidad por una falta de presión durante el proceso de conformado, esta tendrá lugar en el seno de la resina epoxy, por lo que debemos evaluar la combinación de estos dos materiales.

Con los datos recopilados en la Tabla 1 podemos calcular la velocidad de propagación del sonido (**V_l**) a través de los materiales y su correspondiente impedancia acústica (**Z**) aplicando las fórmulas 1 y 2. Los valores obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2. Valores de velocidad de propagación del sonido e impedancia acústica de los diferentes materiales.

MATERIAL	VELOCIDAD (m/s)	IMPEDANCIA (Z) (kg/m ² s) · 10 ⁶
EPOXY	340,0	0,4
FIBRA CARBONO	14301,9	26,5
AIRE	340,0	0,0004

Para tratar de determinar si una inclusión de aire es detectable utilizando un haz ultrasónico de 200 dB deberemos calcular el porcentaje de onda reflejada (%R) y onda transmitida (%T) siguiendo las fórmulas 3 y 4. En este caso la resina epoxy será el material 1 y la posible inclusión de aire el 2:

Tabla 3. Porcentaje de onda reflejada (%R) y transmitida (%T) para una inclusión de aire en una resina epoxy.

MATERIAL	REFLECTANCIA (%R)	TRANSMITANCIA (%T)
EPOXY (Z ₁)	-99,97%	0,03%
AIRE (Z ₂)		

Según los resultados obtenidos, prácticamente la totalidad del sonido será reflejado al encontrarse con la posible inclusión de aire. Esto es un factor positivo, puesto que este "eco" de elevada potencia será fácilmente detectable por el receptor. El hecho de que aparezca un signo negativo (-99,97%) repercute únicamente en una inversión en la señal reflejada. La intensidad reflejada será el producto de multiplicar la potencia incidente (200 dB) por el porcentaje de onda reflejado (-99,97%), lo que dará una intensidad de 199,94 dB, por lo que prácticamente no existe atenuación de la onda y la inclusión de aire será fácilmente identificable. Gráficamente el proceso quedaría representado de la siguiente forma:

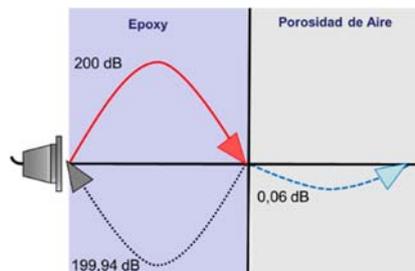


Figura 2. Representación gráfica de una detección de una porosidad de aire en una resina epoxy

Por tanto, hemos comprobado como la inclusión de una porosidad de aire puntual o acumulada en una resina epoxy puede ser fácilmente detectada mediante un ensayo mediante ultrasonidos utilizado como control de la calidad para garantizar la máxima calidad de los materiales compuestos desarrollados.

4.2.1 Inspección de delaminación

¿Será posible utilizando el mismo sistema que el planteado anteriormente detectar si existe una delaminación en las capas de fibra de carbono? Vamos a plantear el problema.

Si existe una delaminación se va a producir entre capas sucesivas de la fibra de carbono utilizada como refuerzo. Por lo tanto, hay que tener en cuenta que el recorrido del haz ultrasónico va a atravesar la matriz polimérica de resina, la fibra de carbono y se va a encontrar con la delaminación (sí es que existe) antes de atravesar la siguiente capa de fibra de carbono. Gráficamente se puede entender fácilmente el recorrido del haz.

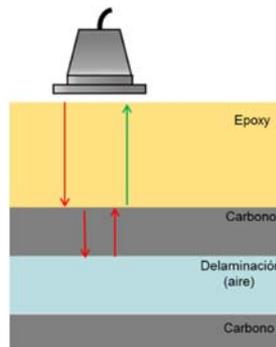


Figura 3. Recorrido de la onda ultrasónica para detectar una delaminación

Hay que tener en cuenta que la muestra va a recorrer la resina de tipo epoxy hasta que se encuentre con la fibra de carbono. En este momento, parte de la onda la atravesará y parte rebotará de nuevo a la resina epoxy. Lo que nos interesa en este primer reflector es que la cantidad de onda que atraviesa la fibra de carbono sea lo mayor posible para poder detectar la delaminación posterior. Comprobemos si esto es así:

Con los datos presentes en la Tabla 2 calculamos el porcentaje de onda reflejada (%R) y el porcentaje de onda transmitida (%T), teniendo en cuenta que Z_1 será la resina epoxy y Z_2 es la fibra de carbono.

Tabla 4. Porcentaje de onda reflejada (%R) y transmitida (%T) para una fibra de carbono en una resina epoxy.

MATERIAL	REFLECTANCIA (%R)	TRANSMITANCIA (%T)
EPOXY (Z_1)	81,14%	181,14%
FIBRA CARBONO (Z_2)		

Debido a que la fibra de carbono posee una mayor capacidad de transmitir el sonido, tal y como muestra su impedancia (Z), la onda transmitida va a aumentar su

potencia a un 181,14% lo que daría una intensidad de onda de 362 dB, lo cual es beneficioso si queremos que la onda llegue hasta la posible delaminación.

Ahora vamos a calcular cómo reaccionará la onda al atravesar la fibra de carbono y llegar a la delaminación (presencia de aire). Hay que tener en cuenta que la nueva onda incidente es la calculada como transmitida anteriormente (362 dB).

Tabla 5. Porcentaje de onda reflejada (%R) y transmitida (%T) para una delaminación en una fibra de carbono.

MATERIAL	REFLECTANCIA (%R)	TRANSMITANCIA (%T)
FIBRA CARBONO (Z ₁)	99,997%	0,003%
AIRE (Z ₂)		

Debido a que el aire es muy mal conductor del sonido va a reflejar prácticamente la totalidad de los 362 dB que va a recibir. La cantidad de sonido que atraviesa la delaminación es prácticamente nula (0,003%). Esto es un factor positivo puesto que al receptor de ultrasonidos le va a resultar más fácil detectar una señal cuando su intensidad sea mayor. Ahora esta onda de 362 dB reflejados en la delaminación viaja de nuevo a través de la fibra de carbono hasta encontrarse con la resina de tipo epoxy. Vemos que ocurre en este último paso:

Tabla 6. Porcentaje de onda reflejada (%R) y transmitida (%T) para una resina epoxy en una fibra de carbono.

MATERIAL	REFLECTANCIA (%R)	TRANSMITANCIA (%T)
FIBRA CARBONO (Z ₁)	97,09%	2,91%
EPOXY (Z ₂)		

En este caso vemos como el 97% de los dB que lleguen a la resina epoxy serán reflejados (351 dB), con lo cual no serán detectados por el receptor de ultrasonidos. En cambio, prácticamente el 3% serán transmitidos por lo que el receptor identificará una señal de una intensidad de 10,5 dB.

Aunque ha existido una atenuación muy pronunciada entre los 200 dB que emitíamos y los 10,5 dB que recibimos, dicha señal es suficiente para poder ser detectada por el receptor de ultrasonidos. Esta atenuación es la razón por la cual en la evaluación de materiales compuestos por ultrasonidos se utilicen elevadas frecuencias e intensidades. Como resumen hemos comprobado que sí sería posible detectar una posible delaminación presente en un compuesto de fibra de carbono, aunque la atenuación de la onda supone una pérdida del 95% de la señal que habíamos emitido. Gráficamente el proceso se puede representar de la siguiente forma:

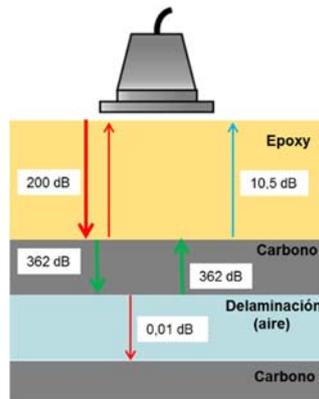


Figura 4. Recorrido de la onda ultrasónica e intensidad para detectar una delaminación

5 Cierre

La técnica de Ensayos No Destructivos (END) de ultrasonidos se presenta como una de las técnicas más atractivas para la aplicación en el control de calidad de materiales compuestos. La técnica de ultrasonidos es una técnica rápida, económica, segura para el operario y con capacidad de detectar las imperfecciones más comunes en materiales compuestos, tal y como hemos demostrado mediante la resolución del problema.

El cálculo llevado a cabo de porcentaje de onda reflejada (%R) y transmitida (%T) nos ha permitido, de una forma sencilla determinar que es posible detectar una inclusión porosa en una resina epoxy así como una delaminación en un compuesto de fibra de carbono y resina epoxy. Hay que tener en cuenta que los fenómenos de reflectancia y transmitancia de la onda provoca una atenuación del 95% de la señal, por lo que en la práctica se deberá tener en cuenta para trabajar con elevadas frecuencias e intensidades.

6 Bibliografía¹

- [1] Nicolais, L.; Meo, M.; Milella, E.: "Composite materials: a visión for the future", Ed. Springer, 2011.
- [2] Buitrago, Pérez, B.: "Apuntes", 2010.
- [3] "FlightGlobal", www.flightglobal.com, accessed on Oct 19th, (2009),
- [4] "Materiales compuestos. Tecnologías de producción". Centro tecnológico de materiales INASMET, San Sebastián, España, 1998.
- [5] <http://www.nuplex.com/composites/processes/hand-lay-up>.
- [6] "Engineered Materials Handbook, Volume I: Composites", ASM International, 1987.
- [7] Paul, E.: "Introduction to Nondestructive Testing", 2011.

¹ Se recomienda consultar el siguiente documento: Cómo citar la bibliografía en los trabajos académicos. Disponible en : <http://riunet.upv.es/handle/10251/31590>