

Tesista: Gabriela Messineo
Ingeniera Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata

Título al que aspira: Doctor en Ciencia de Materiales, UNMdP

Tema: “Análisis inverso de señales ultrasónicas aplicado a la caracterización de materiales en capas”

Director de tesis: Dra. Gloria Frontini

Co-director: Dr. Guillermo Eliçabe

Lugar de Trabajo: Facultad de Ingeniería, UNMdP

Fecha de Defensa: 28 de noviembre de 2014

Jurados: Dra. Yolanda del Pilar Vargas Hernández (Laboratorio de Ultrasonidos, Universidad de Santiago de Chile, Chile)
Dr. José Ruzzante (CNEA)
Dr. Juan Pablo Tomba (Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata)

Resumen

La caracterización de un material puede consistir en identificar propiedades del mismo, o bien, detectar discontinuidades, localizarlas y dar a conocer su naturaleza (poros, fracturas, etc.) para así poder predecir su comportamiento. Existen diferentes técnicas de caracterización y, en general, buscan obtener información acerca del material a partir de su respuesta ante ciertos estímulos. Este tipo de estudios suele requerir técnicas de evaluación no destructivas que permiten obtener información acerca de una pieza o muestra sin afectar su integridad. La técnica no destructiva por excelencia, debido a su amplia utilización y a los costos relativamente bajos que conlleva, entre otras ventajas, es la evaluación con ondas ultrasónicas. Las ondas de ultrasonido son no invasivas y no ionizantes y su propagación por un medio está gobernada por leyes mecánicas. En esta tesis se presenta una metodología para identificar propiedades mecánicas de un material compuesto por capas a partir de la información obtenida de ensayos de ultrasonido. El marco para llevar a cabo esta identificación es brindado por la teoría de los Problemas Inversos (PI). En este caso particular se plantea un PI de estimación de parámetros, en el que se procura estimar las impedancias acústicas, los tiempos de tránsito y la atenuación de las capas que forman un material compuesto por capas.

Dichos parámetros están relacionados de forma directa con las propiedades que se pretende identificar. La solución del PI se halla a partir de la minimización de un funcional de costo no lineal que se plantea como el valor cuadrático medio de la diferencia entre los datos y las formas de onda simuladas a partir de un modelo que representa el problema de la propagación de una onda por un material elástico, homogéneo e isotrópico para cada capa.

Los datos con que se cuenta provienen de ensayos de transmisión de una señal de ultrasonido a través de una muestra. El modelo que se utiliza para predecir la forma de onda teórica es un modelo equivalente que representa al material mediante una línea de transmisión eléctrica, en base a la analogía entre cantidades eléctricas (tensión eléctrica, corriente) y sus respectivas cantidades mecánicas (tensión mecánica, velocidad de las partículas). Este modelo equivalente tiene la característica de representar la propagación de ondas longitudinales o primarias (tipo P) y se deriva a partir de la suposición de que la onda que se propaga por el medio es longitudinal. Esta situación, que queda representada matemáticamente por la ecuación de onda unidimensional, es una idealización que en determinadas circunstancias puede ser una muy buena aproximación de un problema real. Es

fundamental destacar que el uso de dicho modelo ofrece una importante ventaja al momento de valorar la eficiencia computacional si se lo compara con los métodos numéricos basados en la solución discreta de ecuaciones diferenciales.

El análisis del problema se dividió en etapas fundamentales:

- Estudio del Problema Directo (PD). Se evaluó la precisión del modelo equivalente para representar al problema físico planteado, comparando las simulaciones realizadas a partir de dicho modelo con las obtenidas aplicando el método de los elementos finitos. Este último método es ampliamente utilizado y su eficacia ha sido repetidamente probada para todo tipo de simulaciones que implique el cálculo de alguna cantidad física en las más diversas geometrías.
- Estudio de las características del PI. Se analizaron la existencia y la unicidad de la solución del PI así como también su estabilidad. En esta instancia se resolvió el PI a partir de datos obtenidos de experimentos simulados, procurándose la identificación de propiedades de materiales de prueba. Como resultado del estudio de existencia y unicidad se concluyó que el problema tiene solución única pero presenta una importante cantidad de mínimos locales. En cuanto a la estabilidad, se encontró que el incremento en el nivel de error en los datos produce un incremento del mismo orden en el error de la solución. Para llevar a cabo el estudio de estabilidad se simuló casos con error en las mediciones. También se evaluó la influencia que determinados errores de modelado tendrían en las estimaciones de los parámetros buscados.
- Desarrollo de una metodología de solución. Se diseñó una estrategia que permite encontrar la solución que converge al mínimo global, basada en la selección de los valores iniciales de los parámetros y considerando el rango de frecuencias utilizado para hacer los cálculos.
- Adecuación del modelo equivalente. Debido a que la mayoría de los materiales reales provocan la atenuación de la onda y como el modelo equivalente, en principio, no tiene en cuenta este efecto, fue necesario incluir el fenómeno de la atenuación en las ecuaciones. Para esto se efectuó nuevamente el Estudio del PD con el modelo que incluye la atenuación, proponiendo para la misma una relación con la frecuencia que sigue una ley de potencia. Posteriormente se evaluó que el PI resuelto a partir del modelo ampliado tuviese características similares a las del modelo para el material no atenuador, siendo posible aplicar la metodología desarrollada también a materiales atenuadores, en cuyo caso el número de parámetros a estimar es mayor.
- Validación del modelo equivalente y de la metodología desarrollada. La etapa final del estudio consiste en obtener propiedades de distintos materiales a partir de experimentos reales. Se utilizaron dos configuraciones de medición diferentes: una con las muestras inmersas en un tanque con agua, colocadas a mitad de camino entre el transductor emisor y el receptor, y la otra con los transductores en contacto con la muestra, acoplados mediante un gel.

Al resolver el problema con datos experimentales se sumaron varias fuentes de error. Por un lado ocurren los errores de medición, inevitables aunque en su mayoría poco significativos. Los más destacables son: la falta de alineación de los transductores, el error que produce la presencia del acoplante cuando se mide con los transductores en contacto con la pieza y el que introduce el aire o el agua que puede quedar atrapado entre las capas. Además, los errores en el modelo cobran aquí mayor significación, ya que se generan otros tipos de ondas además de las longitudinales y, por otro lado, en la mayoría de los casos no se cumple la hipótesis de una atenuación constante sino que la misma depende de la frecuencia, lo que hizo necesaria una posterior modificación del modelo.

Estas etapas de estudio del problema permitieron:

- Conocer las dificultades y características del problema numérico.
- Diseñar estrategias para afrontarlas.
- Proponer una metodología que permita llevar a cabo una identificación de las propiedades buscadas con un nivel de error aceptable y que sea aplicable a determinados tipos de materiales.

En cuanto a la aplicabilidad de la metodología puede decirse que el nivel de error en la estimación es mayor a medida que aumenta el número de capas, como era presumible. A partir de los datos experimentales se han obtenido estimaciones de los parámetros con alto grado de precisión para materiales de hasta tres capas. Sin embargo, el método puede ser aplicado a materiales compuestos por más capas. En los materiales reales, debido a que las interfases no siempre son planas y paralelas, ocurre cierta dispersión de la onda emitida, es decir, ésta se propaga en ángulos diferentes al ángulo de emisión del rayo. Como consecuencia de esta dispersión, la incidencia de la onda en los bordes no es normal y ocurre la denominada conversión de modo, que consiste en la conversión de ondas longitudinales en ondas transversales, y a la inversa. La velocidad de las ondas transversales es de alrededor de la mitad de la de las ondas longitudinales y al utilizar la metodología basada en el modelo equivalente se espera que esas ondas no estén presentes. Pero cuando las dimensiones de la muestra en el sentido perpendicular a la propagación de la onda son pequeñas comparadas con la longitud de onda y el material no es muy atenuador, las ondas de corte generadas por la conversión de modo no llegan a atenuarse antes de alcanzar el extremo de la muestra cercano al receptor. Dado que el modelo predice únicamente la presencia de ondas longitudinales se incurre en mayor error cuando se estudian materiales con baja atenuación o alta velocidad de propagación.

Si tenemos que evaluar las dimensiones de los materiales que pueden estudiarse con el método propuesto en esta tesis debemos decir que existen relaciones de compromiso que condicionan el uso del mismo. Por un lado podemos preguntarnos cuál es el mínimo espesor que puede inspeccionarse, y en este caso es necesario considerar la longitud de la onda, que relaciona la frecuencia con la velocidad de propagación de la onda en el material. Como norma general se sabe que, para tener una buena resolución en la señal temporal, a menores espesores se requieren transductores de mayor frecuencia central y mayor ancho de banda. En cuanto al máximo espesor posible, depende de cuán atenuador sea el material, hecho que condiciona la detectabilidad de la onda propagada. En algunos casos esto puede solucionarse amplificando la potencia de la onda transmitida, aunque manteniéndose dentro del rango de linealidad del problema.

La metodología propuesta permite la caracterización de materiales compuestos por capas mediante la identificación de los parámetros acústicos del modelo: impedancia acústica y tiempo de tránsito. Éstos están relacionados con propiedades físicas y mecánicas tales como velocidad de propagación, densidad y módulo de onda longitudinal, lo que completa la caracterización del material. Se ha podido probar que la metodología permite caracterizar con precisión aceptable materiales en capas, incrementándose el error al aumentar el número de las mismas. En los materiales homogéneos, además, se ha logrado hacer una identificación de la relación de la atenuación con la frecuencia.