



**Universidad Carlos III de Madrid**

**Detección de fisuras en placas de  
Aluminio mediante ultrasonidos  
utilizando ondas Lamb.**

Eva María Muñoz Marcos



## **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO PRINCIPAL DEL PROYECTO**

Debido al gran crecimiento de los ultrasonidos en diferentes campos de la industria, es necesario estudiar e investigar nuevos procedimientos de inspección para detectar la presencia de discontinuidades que afectan a las propiedades de los materiales. Durante el desarrollo de este proyecto se pretende realizar un estudio mediante una técnica de ensayos no destructivos por ultrasonidos no demasiado conocida como son las ondas Lamb, que permite detectar las fisuras en las placas de Aluminio.

## **CARACTERÍSTICAS Y TÉCNICAS DE ULTRASONIDOS**

En este apartado se desarrollan una serie de términos que son necesarios que sean estudiados para poder entender el resto del proyecto, como pueden ser: qué son los ensayos no destructivos y en qué consisten, y hacer énfasis en lo que a los ultrasonidos se refiere, así como presentar las diferentes ventajas que posee este método respecto a los demás. También se definen dos grandes conceptos en ultrasonidos como son sensibilidad y resolución.

Existe una sección de gran interés para el desarrollo del proyecto, la cual se denomina discontinuidad crítica. La longitud de onda del ultrasonido tiene un papel muy importante en la probabilidad de detección de grietas. A menor longitud de onda se produce un aumento en la frecuencia lo cual mejora la detección de pequeñas discontinuidades, debido a que la discontinuidad debe ser mayor que la mitad de la longitud de onda para ser capaz de detectarla.

También se describen los tipos de ondas existentes y las características necesarias para estudiar las ondas, en mayor precisión las ondas Lamb que son las utilizadas en el desarrollo de este proyecto. Además existe un apartado basado en el estudio de los transductores, así como los tipos de transductores, y se hace mayor insistencia en los transductores usados en esta tesis, los cuales son transductores PZT. Igualmente existe otra sección para definir los tipos de métodos existentes para realizar los ensayos de ultrasonidos ya que para cada experimento concreto se manejan métodos diferentes, como pueden ser pulso-eco o método del emisor-receptor.



Por último se realiza un estudio sobre la manera de presentar los datos y se analizan las diferentes formas que existen de mostrarlos, como son. A-scan, B-scan o C-scan.

## **PRIMER EXPERIMENTO**

### **OBJETIVO:**

El primer experimento consiste en calcular las velocidades para las diferentes frecuencias de excitación (desde 100kHz hasta los 500kHz, cada 50kHz), y con ellas obtener la curvas de dispersión para los modos de Lamb en una placa isotrópica de Aluminio de tamaño 50\*60 cm<sup>2</sup> y espesor 1mm. La configuración utilizada es mediante emisor-receptor.

### **RECOPIACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS:**

Los dos transductores están separados una distancia de 220mm y se mantienen fijos en la placa gracias a una resina epoxi que se les aplica. Los parámetros usados en el programa son los siguientes:

- Número de periodos en el paquete: 3
- Ganancia de salida: 1/2
- Ganancia de entrada: 1/80
- Ventana de modulación del tipo hanning.

Con estos parámetros se extrae el tiempo de vuelo (TOF) a través de dos formas posibles: transformada de Hilbert o transformada de Wavelet. Una vez obtenido el TOF, se introduce la distancia entre los dos transductores y el mismo programa muestra los resultados de la velocidad. Con ello se obtienen los siguientes resultados:

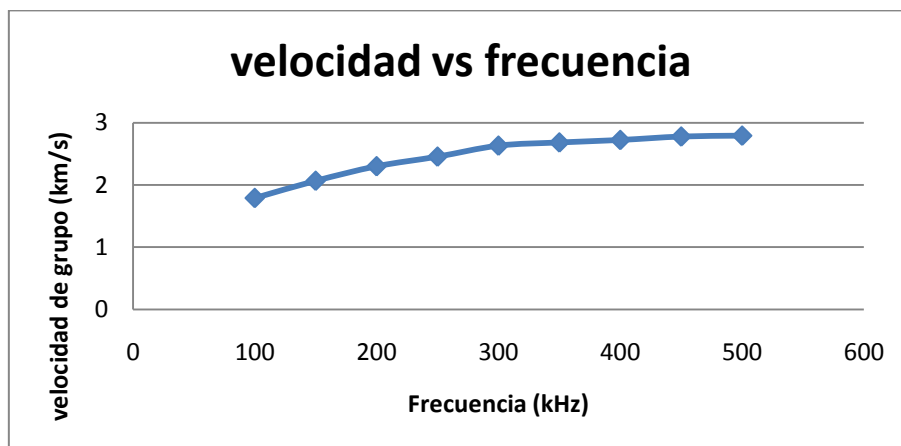


Frecuencia de excitación (kHz)	Distancia (mm)	TOF(s)	Velocidad (km/s)
100	220	0.0001228	1.79153
150	220	0.0001064	2.06767
200	220	9.56e-005	2.30126
250	220	8.96e-005	2.45536
300	220	8.36e-005	2.63158
350	220	8.2e-005	2.68293
400	220	8.08e-005	2.72277
450	220	7.92e-005	2.77778
500	220	7.88e-005	2.79188

Se conoce que la relación entre la longitud de onda y la velocidad es la siguiente:  $\lambda = \frac{v}{f}$ , pero en el caso de las ondas Lamb existe una pequeña diferencia, porque este tipo de ondas es dispersiva, lo cual significa que la longitud de onda y la velocidad varían con la frecuencia, esta es la razón por la cual la ecuación se modifica y se convierte en la siguiente:

$$\lambda(\text{frecuencia}) = \frac{v(\text{frecuencia})}{f}$$

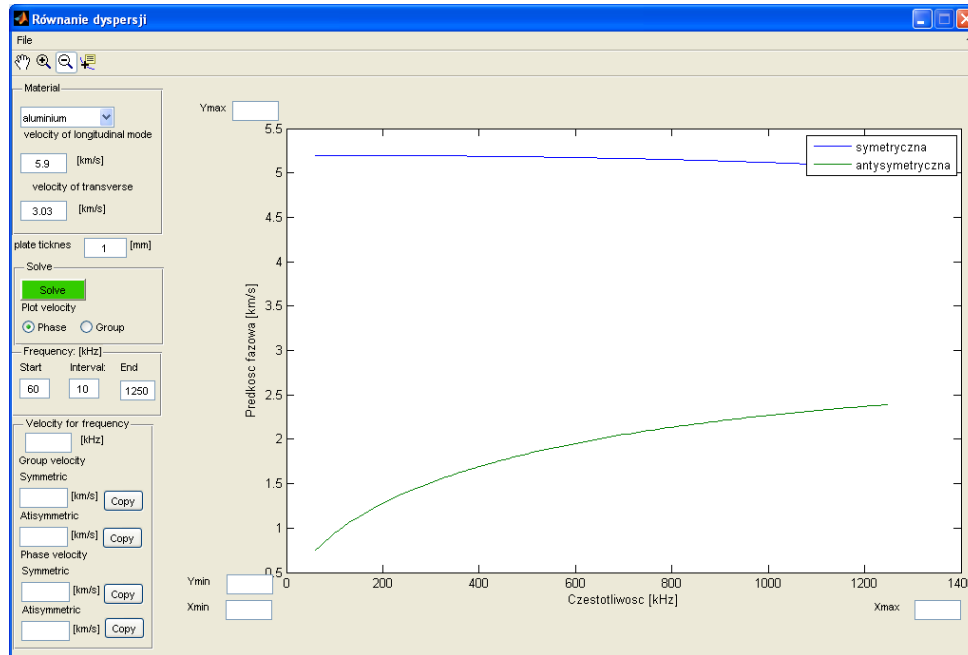
Representando los resultados obtenidos se encuentra la gráfica de la velocidad de grupo:



El programa nos muestra la gráfica de la velocidad de fase:

Detección de fisuras en placas de Aluminio mediante ultrasonidos utilizando ondas Lamb

EVA MARÍA MUÑOZ MARCOS



## CONCLUSIÓN:

En el gráfico de curvas de dispersión que se obtiene por Excel para la velocidad de grupo se puede ver claramente como la curva de dispersión dibujado corresponde al modo antisimétrico ( $A_0$ ). En el gráfico de curvas de dispersión que se obtiene de Matlab para la velocidad de fase, se observa como la curva de dispersión dibujada corresponde al modo antisimétrico  $A_0$  para pequeñas velocidades de fase y el modo simétrico  $S_0$  para altas.

El modo  $S_0$  presenta una sensibilidad razonable a los defectos en cualquier parte del espesor, mientras que el modo  $A_0$  es más sensible a la corrosión o grietas en la superficie

## SEGUNDO EXPERIMENTO

### OBJETIVO:

El segundo experimento consiste en la detección de defectos en la misma placa de Aluminio del primer experimento, con la diferencia de que en este caso la configuración utilizada es pulso-eco.

Detección de fisuras en placas de Aluminio mediante ultrasonidos utilizando ondas Lamb

EVA MARÍA MUÑOZ MARCOS



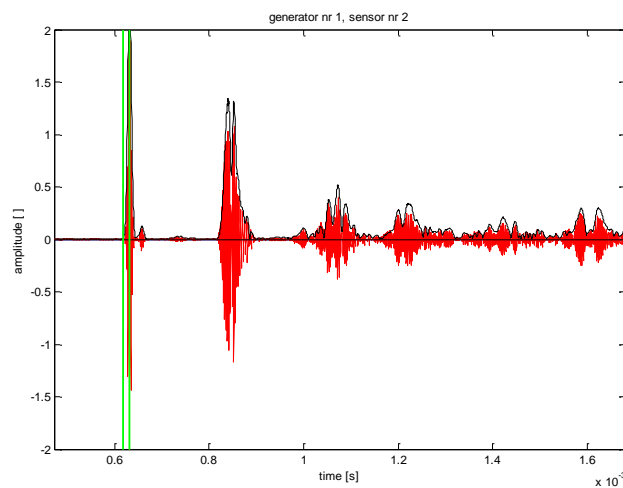
## RECOPIACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS:

El actuador es excitado a una frecuencia de 300kHz, debido a que a frecuencias menores no se pudo encontrar los defectos. El programa muestra un gráfico el cual es necesario estudiar con detalle y conocer a que es debido cada pico de amplitud, ya que puede ser debido a la reflexión del límite de la placa o bien el defecto que es lo que se pretende encontrar.

Los parámetros utilizados en este caso son los siguientes:

- Número de periodos en el paquete: 3
- Ganancia de salida: 1/8
- Ganancia de entrada: 1/80
- Ventana de modulación del tipo hanning.

El gráfico mostrado por el programa es el siguiente:



Los resultados obtenidos se representan a continuación:

Puntos	Frecuencia (kHz)	Velocidad (Km/s)	Distance obtenida por el programa (mm)	Distancia experimental (mm)	Distancia real (mm)	Límite o daño
1	300	2.63158	560.736	280.368	275	Edge
2	300	2.63158	582.808	291.404	295	Edge
3	300	2.63158	300.872	150.436	143.3	D1
4	300	2.63158	390.15	195.075	190	D2

Detección de fisuras en placas de Aluminio mediante ultrasonidos utilizando ondas Lamb

EVA MARÍA MUÑOZ MARCOS



## **CONCLUSIÓN:**

A una frecuencia relativamente baja aparece la presencia de únicamente dos de los modos fundamentales: el modo antisimétrico ( $A_0$ ) y el modo simétrico ( $S_0$ ). También se ha encontrado que el modo  $S_0$  vibra sobre todo en el plano, mientras que el modo  $A_0$  vibra fuera del plano, lo cual significa que el modo  $A_0$  posee un desplazamiento lateral por lo que es más sensible al daño pequeño debido a su longitud de onda más corta que la del modo  $S_0$  para la misma frecuencia, pero también muestra una dispersión más severa en las frecuencias bajas.

Mediante los resultados obtenidos se puede concluir que los ultrasonidos mediante ondas Lamb son un buen método de detectar defectos

## **TERCER EXPERIMENTO**

### **OBJETIVO:**

El principal objetivo de este experimento consiste en detectar la grieta y en obtener su localización exacta mediante la creación de un programa en Matlab basado en una de las principales propiedades de las elipses, la cual se define como: "cualquier punto de la elipse (en este caso el defecto) satisface que la suma de las distancias a dos puntos fijos llamados focos (en este caso son dos transductores) es constante".

### **RECOPIACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS:**

En primer lugar la onda excitada es producida por el transductor número 1, el cual actúa como transmisor o generador, mientras que los otros tres transductores actúan como receptores o sensores, capturando la señal, creándose de esta forma tres elipses diferentes, cada una para cada uno de los tres receptores. El objetivo principal de este experimento consiste en encontrar el punto de intersección de estas tres elipses superpuestas, porque este punto será donde se encuentre situado el defecto.

Para realizar este experimento es necesaria la creación de un programa en Matlab, que muestre las tres elipses superpuestas en el mismo gráfico para poder encontrar el punto de intersección de las mismas. El programa necesita varios



argumentos de entrada los cuales son: la velocidad de la onda, el tiempo de vuelo (TOF) de cada receptor, la localización de cada transductor y el número de pasos para pintar la elipse punto a punto. El resultado proporcionado por el programa es una gráfica con las tres elipses dibujadas y el punto de intersección.

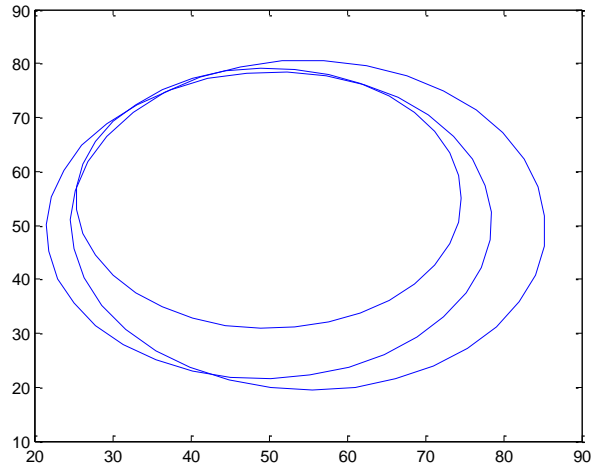
En este caso, la placa de Aluminio es de 1m\*1m con un espesor de de 2mm. El transductor que actúa de emisor es excitado con una frecuencia de 100 kHz y el modo de excitación es  $A_0$ .

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

<b>Generador-sensor</b>	<b>Velocidad (km/s)</b>	<b>Distancia (mm)</b>	<b>TOF (s)</b>	<b>¿DEFECTO?</b>
<b>1-2</b>	2.13675	100	4.68e-005	No
<b>1-2</b>	2.13675	235.897	0.0001104	No
<b>1-2</b>	2.13675	493.162	0.0002308	DEFECTO
<b>1-3</b>	2.13675	139.316	6.52e-005	No
<b>1-3</b>	2.13675	570.085	0.0002668	DEFECTO
<b>1-4</b>	2.13675	104.273	4.88e-005	No
<b>1-4</b>	2.13675	234.188	0.0001096	No
<b>1-4</b>	2.13675	529.914	0.000248	DEFECTO

Y el gráfico que Matlab muestra por pantalla es el siguiente:





Si se modifica el transductor que actúa como generador, los resultados obtenidos son los mismos.

## CONCLUSIÓN:

Es posible determinar de forma precisa la localización del defecto, pero no es exacta debido a que se encuentran unas pequeñas variaciones. Aunque si se comparan las dimensiones de dichas variaciones con las de la placa a inspeccionar se concluye que el programa creado proporciona muy buenos resultados, ya que las variaciones son del orden de dos centímetros a lo sumo en comparación con dimensiones de placas de metros.

## CONCLUSIONES

Por encontrarse placas de Aluminio en prácticamente todas las aplicaciones industriales, se encuentra de gran interés el estudio del mantenimiento de dichas placas. La gran mayoría de las estructuras que poseen estas placas están obligadas a tener una vida significativa, lo que requiere un mantenimiento frecuente e inspección de las áreas críticas, lo cual ha provocado el desarrollo de métodos para evaluar el estado de una estructura o material sin afectar su funcionalidad, como son los ultrasonidos.

Una solución más innovadora es la técnica de detección de defectos por ultrasonidos mediante ondas Lamb. Esta técnica permite la monitorización continua de la condición de la estructura, lo cual permite la realización de un registro de las áreas

Detección de fisuras en placas de Aluminio mediante ultrasonidos utilizando ondas Lamb



críticas de la estructura que requieren un mantenimiento constante. Para la generación de estas ondas se han utilizado transductores piezocomposites debido a su bajo coste, peso y volumen, que son características que los hacen extraordinariamente útiles.

Uno de los objetivos principales de este proyecto de fin de carrera consiste en el apredizaje, estudio y análisis de las ondas Lamb, y de las características que dichas ondas poseen, como por ejemplo las curvas de dispersión en función del modo de excitación. Además de poner en práctica el estudio de estas ondas para detectar fallos en la placa.

Debido a que para una determinada frecuencia existen múltiples modos de propagación, se procedió a seleccionar e identificar mediante un método simple los modos de Lamb, centrándose únicamente en la propagación del modo antisimétrico  $A_0$ . Resulta prácticamente imposible aislar un único modo, por esta razón se eligen los transductores PZT, los cuales minimizan el modo simétrico  $S_0$ .

El presente proyecto cumple con otro de los propósitos fundamentales: la creación de un programa en Matlab basado en las propiedades de las elipses el cual encuentre la localización del defecto. Aunque los resultados no son exactos, el programa ofrece resultados fiables y precisos. Futuros experimentos pueden mejorar este programa para ofrecer mayor precisión en la localización del defecto, ya que el programa creado es preciso pero no exacto, ya que el defecto se encuentra en un rango de  $\pm 1\text{cm}$ . Sin embargo, para grandes placas es bastante preciso ya que provocaría el ahorro de inspeccionar toda la placa.

Este programa sirve como medida preventiva y de mantenimiento de las estructuras en la detección de grietas, gracias a esto, se puede hacer un archivo del comportamiento mecánico periódicamente, pero lo más importante de estas inspecciones es que proporciona una gran disminución del coste.

Por último es importante mencionar que la presencia de ruido ha hecho difícil el análisis de la onda obtenida, por lo que en el futuro se podría tratar de filtrar este ruido y eliminarlo total o parcialmente para facilitar el análisis de la onda resultante.