



**INSTITUTO DE
TECNOLOGIA**

PROF. JORGE A. SABATO

**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN
COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA**

**MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES**

ESTUDIO Y APLICACIÓN DE ONDAS GUIADAS ULTRASÓNICAS EN END

Rudy René Carías

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
“Prof. Jorge A. Sábato”**

Estudio y Aplicación de Ondas Guiadas Ultrasónicas en END^(*)

Por Ing. Rudy R. Carías

**Directores
Ing. Carlos Desimone
Ing. Pablo Katchadjian**



^(*) Tesis para optar el título de Magíster en Ciencia y Tecnología de Materiales

**República de Argentina
2011**

Resumen.

En la actualidad existen diversas técnicas para la inspección de estructuras, pero consumen mucho tiempo. Una alternativa son las técnicas de detección de defectos mediante ondas de Lamb. El uso es de interés en estructuras tipo chapas y en su propagación, las ondas de Lamb lo pueden hacer a largas distancias. En la generación de estas ondas de Lamb se diseñaron y se hicieron transductores de ángulo variable de contacto (zapatas de Rexolite) y de inmersión (variador de ángulo de aluminio).

En la búsqueda de modos simétricos y asimétricos se utilizaron los métodos de inspección ultrasónica pulso-eco por contacto, transmisión - recepción por contacto y pulso-eco por inmersión.

Estos métodos fueron capaces de identificar los modos existentes en diferentes espesores de chapas de aluminio y acero. Con el método pulso-eco por contacto se presentaron señales con resoluciones legibles en su interpretación lo que lo hace el método de aplicación en piezas reales.

Los resultados obtenidos en la búsqueda de los modos simétricos S_0 y asimétricos A_0 muestran que son los más susceptibles a excitar a bajas frecuencias en los métodos mencionados.

En la identificación de discontinuidades o defectos en piezas reales, se fabricaron entallas de distintas dimensiones en chapas de aluminio y acero. También se hicieron ensayos en chapas de aluminio unidas por soldadura por fricción

Los resultados obtenidos, muestran que estas ondas, son capaces de recorrer grandes distancias con pequeña atenuación, aportando información sobre la sensibilidad del método en la detección de la entalla y en la estructura de la soldadura

Abstract.

At the present, there are various techniques for the inspection of structures, but they take a lot of time. An alternative could be the techniques of detection through waves Lamb. Their use is interesting in structures like in types of plates or sheets and in their propagation, waves Lamb are able to do it at long distances. In the generation of these waves of Lamb, contact transducers of variable angle (base of Rexolite) and of immersion (aluminum angle drive) were designed.

In Searching of symmetric and asymmetric modes, methods of inspection ultrasonic eco-pulse by contact, transmission-reception by contact and eco-pulse by immersion were used.

These methods were able to identify the existed modes in different thick plates of aluminum and steel. With the method eco-pulse by contact, signals were presented with good resolutions in its interpretation what makes the method of application in real pieces.

The obtained results in the search of symmetric modes S_0 and asymmetric A_0 show that they are the most sensitive to excite to at frequencies in the mentioned methods.

In the identification of discontinuities or defects in real pieces, different dimensions notches in aluminum and steel plates were made. Tests were also made in aluminum plates joined by friction welding.

The obtained results show that these waves, are able to travel long distances with small attenuation, providing information on the sensitivity of the method in the of detection the notch and welding structure.

Agradecimientos.

Deseo hacer llegar mi agradecimiento a quienes de una u otra manera colaboraron para que se pueda realizar este trabajo.

A los integrantes del grupo ENDE y los del taller de mecanizado de Materiales:

Ing. Carlos Desimone y Ing. Pablo Katchadjian, quines aceptaron dirigir esta Tesis. Por transmitir y compartir sus conocimiento profesionales. Por su comprensión y paciencia en ayudarme a superar las dificultades en el trabajo cotidiano.

Ing. Claudio Ziobrowski, Mauricio Tacchia y Alejandro García, por ayudarme a conocer y hacer buen uso de los equipos y herramientas de ultrasonido.

Inga. Alba Obrustky, Jorge Mendez, Ing. José Scopelliti y Daniel Acosta, por su comprensión, paciencia en ayudarme en lo que fuera necesario en este trabajo.

Emilio Olivar, Javier Lafont, Emilio O. Godaz, Pablo Penas. Por su predisposición inmediata en el préstamo de las herramientas básicas para los montajes de componentes mecánicos y probetas que se usaron en esta tesis y el buen humor permanente de cada uno de ellos.

Al taller de mecanizado de Materiales por la tolerancia en cada momento que solicite ayuda para realizar la mecanización de los elementos mecánicos y de elementos de ultrasonido.

A mi esposa, Lissette T. Salazar, por su tolerancia y comprensión a la hora de tomar la decisión de viajar a la Argentina para estudiar esta Maestría y realizar esta tesis.

A mis amigos, y a todos aquellos que se han preocupado por el desarrollo de este trabajo, que me han apoyado y animado a seguir hacia adelante en los momentos difíciles.

Contenido

Resumen.....	II
Abstract.....	III
Agradecimientos.....	IV
CONTENIDO.....	V
1. Introducción.....	1
1.1 Generalidades a los ensayos no destructivos.....	1
1.2 Naturaleza de las propiedades ultrasónicas.....	1
1.2.1 Generalidades.....	1
1.2.2 Parámetros físicos de las ondas.....	3
1.2.3 Tipos de onda.....	4
1.2.3.1 Ondas longitudinales o de compresión.	4
1.2.3.2 Ondas Transversales o de corte.....	5
1.2.3.3 Ondas superficiales.....	6
1.2.3.4 Ondas de Lamb... ..	7
1.3 Métodos de ultrasonido.....	9
1.3.1 Método pulso- eco por contacto.....	9
1.3.2 Método Transmisión -.Recepción por contacto.....	11
1.3.3 Método pulso eco por inmersión.....	11
2. Ondas de Lamb.....	13
2.1 Curvas de dispersión.....	15
2.2 Modos de ondas de Lamb.....	17
2.3 Generación de las ondas de Lamb.....	19
3. Material y equipo.....	23
3.1 Materiales piezoeléctricos.....	23
3.1.1 Efecto piezoeléctrico.....	23
3.2 Transductores.....	25

3.2.1 Transductores de contacto.....	25
3.2.1.1 Transductores de incidencia normal.....	25
3.2.1.2 Transductores de incidencia angular.....	26
3.2.1.3 Transductores de doble cristal.....	26
3.2.2. Transductores de inmersión.....	27
3.2.3 Transductores de ángulo variable.....	27
3.2.3.1 Verificación del ángulo del haz ultrasónico.....	32
3.2.3.1.1 Primer ángulo crítico.....	32
3.2.3.1.2 Segundo ángulo crítico.....	33
3.3 Equipo ultrasónico.....	34
3.3.1 Fuente de alimentación.....	35
3.3.2 Circuito de Reloj o sincronizador (Timer).....	35
3.3.3 Base tiempo (Generador de barrido).....	36
3.3.4 Pulsador (Pulser).....	36
3.3.5 Amplificador.....	36
3.2.6 Pantalla.....	37
3.4 Bloque de patrón	38
3.4.1 Bloque de calibración V1.....	38
3.5 Acoplante.....	38
3.6 Sistema de inmersión.....	38
3.7 Probetas.....	42
4. Desarrollo experimental de Selección de modos.....	44
4.1 Selección de modo pulso-eco por contacto.....	44
4.1.1 Excitación de los modos simétricos y asimétricos en chapas de aluminio.....	46
4.1.1.1 Excitación del modo asimétrico A, a 1 MHZ.....	46
4.1.1.2 Excitación del modo Simétrico S, a 1MHZ.....	48

4.1.1.3	Excitación del modo Asimétricos A_0 a 2.25MHZ.....	50
4.1.1.4	Excitación del modo Simétrico S a 2.25MHZ.....	52
4.1.1.5	Excitación del modo Asimétrico A a 5MHZ.....	54
4.1.1.6	Excitación del modo simétrico S. a 5 MHZ.....	54
4.1.2	Excitación de los modos simétricos y asimétricos en chapa de acero.....	59
4.1.2.1	Excitación del modo asimétrico A. a 1MHZ	59
4.1.2.2	Excitación del modo asimétrico A. a 2.25MHZ.....	61
4.1.2.3	Excitación del modo simétrico S. a 1MHZ.....	63
4.1.2.4	Excitación del modo simétrico S. a 2.25MHZ.....	65
4.1.2.5	Excitación del modo asimétrico A.a 5MHZ.....	66
4.1.2.6	Excitación del modo Simétrico S. a 5MHZ.....	66
4.2	Selección de modo pulso-eco por inmersión.....	71
4.2.1	Excitación de los modos simétricos y asimétricos en chapas de aluminio.....	74
4.2.1.1	Excitación de los modos asimétricos A a 2.25 MHZ.....	75
4.2.1.2	Excitación de los modos simétricos S a 2.25 MHZ.....	75
4.2.2	Excitación de los modos simétricos y asimétricos en chapas de acero.....	80
4.2.2.1	Excitación de los modos asimétrico A a 2.25MHZ.....	80
4.2.2.2	Excitación de los modos simétrico S a 2.25MHZ.	82
4.3	Selección de los modos Transición – recepción.....	88
4.3.1	Excitación de los modos asimétricos y simétricos en chapas de aluminio.....	89
4.3.1.1	Excitación del modos simétricos S a 2.25 MHZ.....	89
4.3.1.2	Excitación del modos simétricos S a 2.25 MHZ.....	91

4.4	Resultados de los modos simétricos S y A asimétricos.....	96
4.4.1	Modos en chapas de aluminio pulso-eco por contacto.....	96
4.4.2	Modos en chapas de acero pulso-eco por contacto.....	97
4.4.3	Modos en chapas de aluminio pulso-eco por inmersión.....	98
4.4.4	Modos en chapas de acero pulso-eco inmersión.....	98
4.4.5	Modos en chapas de aluminio Transmisión y recepción.....	99
5.	Interacción de los modos de onda de Lamb con los defectos en piezas reales.....	106
5.1	Chapa de aluminio de 3mm. Método pulso-eco por contacto.....	106
5.2	Chapa de aluminio de 1mm. Método pulso-eco por contacto.....	109
5.3	Chapa de acero de 1mm. Método pulso-eco por contacto	113
5.4	Unión de chapa de aluminio por soldadura a fricción por el método pulso-eco por contacto.....	116
5.5	Resultados Obtenidos.....	122
6.	Conclusiones.....	123
7.	Desarrollos futuros.....	125
8.	Bibliografía.....	126

1. Introducción.

1.1 Generalidades a los ensayos no destructivos.

Los ensayos no destructivos (END), se han convertido en un elemento de uso común en muchos campos científicos e industriales como herramienta fundamental en el desarrollo de tareas de mantenimiento, comprobación de la integridad estructural, control de la calidad en la producción e inspección permanente durante la vida útil de muchos productos y estructuras. La combinación de factores tales como el aumento continuo de los costes de fabricación, las condiciones de servicios cada vez más extremos para los componentes estructurales y la tendencia en el diseño hacia un ajuste más estrecho de los márgenes de seguridad, han impulsado una constante evolución y avance en los métodos de END. El desarrollo de nuevas técnicas proporciona, entre otros muchos beneficios, un aumento de la calidad de los productos para el consumidor, una mejora de seguridad pública (en el caso de inspecciones de centrales nucleares y de aviones por ejemplo) y una reducción global de costes a la industria y a los usuarios al conseguir la detección de discontinuidades, previo a fallos mecánicos que podrían suponer grandes pérdidas materiales y humanas. Entre los campos de actividad que utilizan estas técnicas se encuentran la generación de energía, transformación petroquímica, transporte de gases y líquidos, estructuras aerodinámicas y aeroespaciales, etc. A partir del dictamen de los ensayos no destructivos de un elemento se puede evaluar la seguridad frente un posible fallo, realizar predicciones de la vida útil restante, resultante y establecer programas de mantenimiento y reparación. Este proceso se encuadra dentro de una filosofía de tolerancia al daño basado en que la presencia del defecto en un componente, no significa necesariamente que dicho elemento este en el final de su vida útil de servicio, o ni tan siquiera cerca de él.

1.2 Naturaleza y propiedades de las ondas ultrasónicas.

1.2.1 Generalidades.

El sonido se transmite por medio de ondas a través de un medio elástico. En un espacio vacío la propagación del sonido no es posible, ya que no existen partículas de materia que puedan vibrar. En el aire, por ejemplo, una onda sonora desplaza un volumen discreto de aire hacia delante y hacia detrás alrededor de su posición neutra. Estos movimientos mecánicos en la materia, repetidos de forma periódica y durante un

cierto tiempo, se caracterizan según el número de oscilaciones de una partícula dada de dicho material por segundo, es decir, su frecuencia (en ciclos/ segundo o Herzios).

Pero no todas las ondas pueden ser apreciadas por el oído humano. Cuando la frecuencia es superior a 20 KHZ las ondas se denominan ultrasónicas y no son audibles por las personas.

Así pues, los ultrasonidos son ondas de la misma naturaleza que las ondas sónicas, transmitiéndose por tanto a la misma velocidad en el mismo medio, pero que tienen una frecuencia mayor, por lo que resultan no audibles. La banda de frecuencias utilizada en control de calidad de materiales se extiende entre 0,2 y 25 MHZ, aunque la mayoría de los ensayos se hacen entre 2 y 5 MHZ.

Si un cuerpo elástico, cuyas partículas individuales se mantienen en su posición de equilibrio mediante fuerzas elásticas, se somete a esfuerzos de compresión o de tracción por debajo de su límite elástico, se comportará como un péndulo. Si se excitan colectivamente todas las partículas de un extremo de dicho cuerpo con una fuerza sinusoidal, de manera que todas las partículas del primer plano oscilen con la misma amplitud (longitud de oscilación) y frecuencia (número de oscilaciones por segundo), las fuerzas elásticas transmitirán las oscilaciones a las partículas del segundo plano. Éstas, a su vez, transmitirán el movimiento oscilatorio al tercer plano y así sucesivamente, de modo que se genera un movimiento de propagación de una onda.

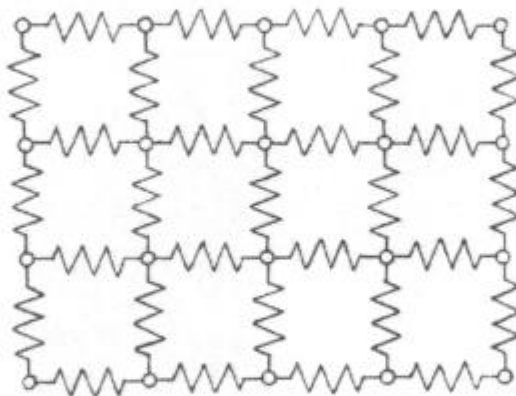


Figura 1.1 Modelo de un cuerpo elástico

Cada partícula oscila sólo alrededor de su posición neutra en una cierta cantidad. Es decir, meramente la condición de oscilación se propaga a lo largo de la dirección de propagación de la onda. Sólo la energía, y no el cuerpo que vibra se transporta.

Si todos los puntos estuvieran conectados rígidamente, iniciarían su movimiento al mismo tiempo y permanecerían siempre en un estado de movimiento coincidente. En el caso del material elástico, el movimiento requiere un cierto tiempo para ser transmitido y los planos sucesivos alcanzan sus posiciones con un retardo de fase en relación con los anteriores. El cambio de fase va creando zonas donde las partículas se aproximan entre sí, de forma particularmente densa, alternándose con zonas menos densas.

1.2.2 Parámetros físicos de las ondas.

Definiremos algunos parámetros de las ondas:

- Frecuencia (f): número de oscilaciones de una partícula dada por segundo. Dentro de una misma onda, es la misma para todas las partículas. Se mide en c/s o Hz.
- Longitud de onda (λ): es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento. Se mide en m.
- Velocidad acústica (C): es la velocidad de propagación de la onda para una condición dada. Esta velocidad es una característica del material y, en general, es constante para un material dado, para cualquier frecuencia y cualquier longitud de onda. Se mide en m/s.

Las tres magnitudes antes mencionadas se relacionan entre sí mediante la expresión:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Dado que la velocidad acústica es una constante característica del medio donde se transmite la onda, la frecuencia y la longitud de onda se comportan de manera inversa.

- Amplitud de oscilación (**A**): es el desplazamiento máximo de una partícula de su posición cero. Se mide en m.
- Presión acústica (**P**): indica la densidad de partículas. En los puntos de gran densidad de partículas la presión es mayor que la presión normal (sin onda acústica), mientras que en las zonas dilatadas es menor. La desviación máxima en relación con la presión normal se denomina amplitud de la presión acústica (**P**). Se mide en N/m².
- Impedancia acústica (**Z**): resistencia que el material opone a la vibración. Si un medio posee una impedancia baja, sus elementos de masa vibrarán a gran velocidad. La impedancia se mide en Kg/ m²s y viene dada por:

$$Z = \rho \times C$$

Donde ρ es la densidad del material medida en Kg/m³ y C la velocidad acústica definida anteriormente. Esto indica que Z es una constante del material. La impedancia en los cuerpos sólidos es en general mayor que en los líquidos y, en éstos, mayor que en los gases.

- Intensidad acústica (**I**): es la cantidad de energía transmitida por unidad de superficie y de tiempo. Se mide en W/ m². Su relación con la presión acústica viene dada por:

$$I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{Z}$$

1.2.3 Tipos de ondas.

Las ondas ultrasónicas que se propagan a través de un cuerpo elástico pueden ser de los siguientes tipos:

1.2.3.1 Ondas longitudinales o de compresión.

En este tipo de ondas, las partículas oscilan en dirección paralela a la propagación de la onda. Todas las moléculas que están situadas a la misma distancia del

extremo al que se le ha aplicado la vibración se moverán al unísono, alejándose y acercándose al mismo. Sin embargo, la compresión y la expansión de cada fila se irá alejando de dicho extremo. De este modo, se generan zonas con una distancia entre partículas más pequeñas y zonas con una distancia mayor.

La distancia entre dos estados similares de compresión o de expansión es la longitud de onda (λ).

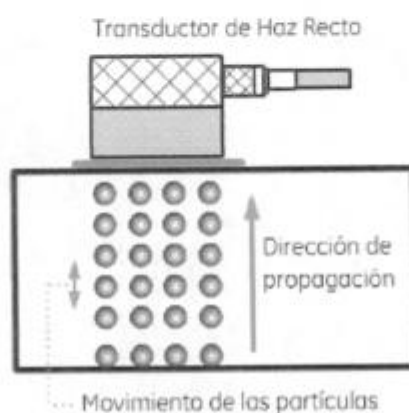


Figura 1.2 Haz Recto – onda longitudinal

La velocidad con que se mueven las compresiones y dilataciones en la dirección de la propagación de la onda longitudinal es la velocidad del sonido (C_L).

1.2.3.2 Onda transversal o de corte.

En este caso las moléculas vibran transversalmente a la dirección de propagación de la onda. Aunque la onda se transmite longitudinalmente alejándose del extremo sometido a vibración, las moléculas vibran transversalmente. La longitud de onda también queda determinada por la distancia entre dos planos en los que las partículas están en similar estado.

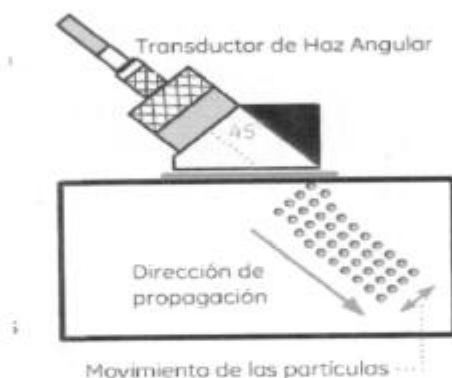


Figura 1.3 Haz angular – onda corte

Este tipo de onda sólo puede propagarse en la materia sólida. Esto es debido a que en la materia sólida la densidad es muy alta comparada con los líquidos y los gases, es decir, la distancia entre los átomos o moléculas es muy pequeña. Además, están dispuestos en una estructura reticular cristalina y las fuerzas elásticas entre ellos son especialmente fuertes.

Si comparamos los dos tipos de ondas explicados anteriormente, la transmisión de energía de las ondas transversales es inferior a la de las ondas longitudinales debido a la oscilación transversal de los átomos. Igualmente, la velocidad de propagación de las ondas transversales (C_T) es inferior a la de las ondas longitudinales (C_L).

1.2.3.3 Ondas superficiales.

Las ondas de superficie o de Rayleigh son ondas transversales que se producen solamente en la superficie del cuerpo elástico. Son paralelas a dicha superficie. Tienen una cierta profundidad de penetración, que está en el orden de una longitud de onda. La velocidad de las ondas superficiales, C_s , es menor que la velocidad de las ondas transversales en el mismo medio ($C_s = 0,9 C_T$).

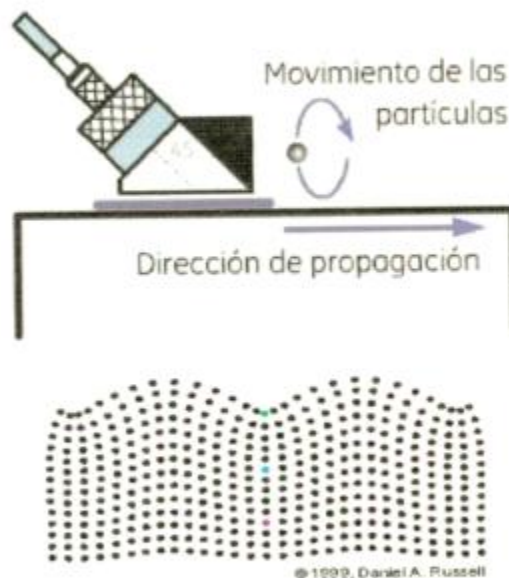


Figura 1.4 onda superficial.

1.2.3.4 Ondas de Lamb.

Las ondas de Lamb son un tipo de perturbación elástica capaz de propagarse en una placa sólida con condiciones de contorno libres (Viktorov, 1967). La teoría de este tipo de fenómeno de onda fue descrita por primera vez por Horacio Lamb en 1917, aunque nunca llegó a generarlas. Quizás fue Worlton en 1960 (General Electric Company) el primero en darse cuenta de las ventajas de la utilización de ondas de Lamb para la detección de defectos en placas. Calculó las curvas de dispersión del aluminio y el circonio para describir analíticamente las características de varios modos que permitirían su uso para aplicaciones en Ensayos No destructivos. También estudió el movimiento de las partículas con el desplazamiento y las velocidades de propagación, y analizó el efecto que producían los huecos y las diferencias de espesor.

Dentro el campo de los END, las ondas ultrasónicas de Lamb constituyen un área de gran interés hoy en día. Estas ondas se producen en chapas, placas, tuberías y barras, en los cuales la geometría finita construye la propagación de las ondas elásticas. De esta forma, la atenuación por radiación (geométrica) se reduce e incluso desaparece, quedando como únicos mecanismos de atenuación la difracción por obstáculos y disipación de energía debido a la naturaleza dispersiva del medio. Como resultado, dichas ondas tienen la capacidad de recorrer grandes distancias, lo que permite realizar la inspección de un área amplia desde una posición fija, sin necesidad de desplazar el

transductor como en una técnica clásica (ondas transversales y longitudinales). Además, es posible emplearla para inspeccionar zonas ocultas o de difícil acceso como por ejemplo, estructuras parcialmente enterradas, recubiertas de un material protector o aislante, o escondidas tras otro elemento.

Las ondas guiadas permiten evaluar la presencia de defectos en la sección transversal completa del elemento, puesto que su propagación provoca su deformación de todos sus puntos.

La existencia de multitud de modos para cada frecuencia y espesor aporta flexibilidad a la hora de seleccionar el punto de trabajo que proporcione una mayor sensibilidad, sin embargo, para poder realizar esta selección de forma adecuada es necesario conocer la interacción de las ondas guiadas con los defectos.

En la siguiente década las ondas de Lamb fueron estudiadas por muchos investigadores. Demer y Fentnor (Hughes Aircraft Company, 1969) pusieron en práctica la primera aplicación aeroespacial. En su trabajo consideraron a los métodos de análisis por ondas como uno de las más fiables aplicaciones de Ensayos No Destructivos, y a las ondas de Lamb como una de las mejores maneras de obtener información sobre la densidad, propiedades elásticas y espesor del medio. Sus estudios se centraron en la propagación de ondas de Lamb en delgadas láminas metálicas y formas cilíndricas. Las grietas por fatiga se localizaban en barras de acero inoxidable y aluminio midiendo el tiempo de vuelo y la atenuación en amplitud de la señal ultrasónica recibida.

Auld (1973) estudió la ortogonalidad de los modos de Lamb y presentó un algoritmo para el cálculo de la amplitud de cada modo.

Mansfield (1975), y Ball y Shewring (1973) investigaron el uso de las ondas guiadas en diferentes placas y tiras de aluminio.

Lowe *et al.* (1994) estudiaron la aplicación de las técnicas de ondas de placa (ondas de Lamb) para la inspección del grado de adhesión y difusión de juntas, encontrando que éstas son sensibles tanto a las propiedades del material como al espesor de la capa de pegado.

Rose (1995) empleó ondas guiadas para la inspección ultrasónica de uniones de estructuras, desarrollando un transductor específico (DHSP) para emitir y recibir ondas de Lamb. Utilizó este método para inspeccionar zonas de unión mediante remaches de un Boeing 737-222. Los resultados preliminares mostraron la capacidad del sistema diseñado para detectar grietas y corrosiones severas.

Díaz Valdés *et al.* (2000a, 2000b, 2001), focalizaron su trabajo en la colocación de los sensores y en temas de tratamiento de señal. Utilizaron emisores y receptores de titanato zirconato de plomo (PZT) ya que estos requieren un voltaje de excitación diez veces menor que los PVDF para generar ondas de Lamb.

Cada vez está cobrando más importancia la inspección ultrasónica de uniones entre estructuras empleando ondas guiadas, sobre todo en aplicaciones aeroespaciales y en automoción. En la inspección de este tipo de uniones son particularmente interesantes las ondas de Lamb. Los métodos de inspección mediante este tipo de ondas tienen un potencial considerable debido a dos razones fundamentales: no requieren acceso directo a la región de unión, y son más adecuadas para una inspección rápida que las técnicas por ondas de volumen. Las ondas de Lamb pueden ser excitadas en una de las placas de la unión, propagándose a lo largo de la unión y recibándose en la segunda placa del conjunto.

La detección del daño producido en la unión resultaría de la diferencia entre las señales recibidas en un lado de la unión con respecto a las transmitidas en el lado opuesto.

1.3 Métodos de ultrasonido.

1.3.1 Pulso-eco por contacto.

En los END convencionales el método pulso-eco por contacto se ha usado tradicionalmente para la inspección a través del espesor. En estructuras de grandes dimensiones esta inspección requiere movimiento del transductor, ya sea manual o mecánico, a lo largo de la toda la superficie de interés, lo que supone una labor intensiva y que consume mucho tiempo.

Es evidente que las medidas pulso-eco mediante ondas guiadas resultan más apropiadas para la inspección de grandes estructuras, ya que con ellas se puede conseguir una cobertura más amplia desde una única localización.

El uso de ondas guiadas para la detección de discontinuidades o defectos ha encontrado una aplicación inmediata en estructuras simples de grandes dimensiones, como tuberías, turbinas de centrales eléctricas y cables. La ventaja de emplear ondas guiadas es evidente.

Los métodos de inspección convencionales de una tubería de grandes dimensiones requieren de un barrido minucioso para ser inspeccionada convenientemente.

Alleyne et al. (2001), desarrollo un prototipo de array anular que rodea la tubería. Rose et al (1994), estudiaron el uso de las ondas guiadas para la inspección de turbinas de un generador nuclear, obteniendo reflexiones para grietas circulares. Alleyne et, al. (2001), utilizaron ondas guiadas para detectar fisuras circulares y daño por corrosión en tubería de aceros empleando modos simétricos y asimétricos.

Para la generación de ondas guiadas en nuestra tesis se utilizó un transductor piezoeléctrico de ángulo variable con zapata de Rexolite, acoplado a la estructura actual en zonas determinadas de la placa, funcionando como transmisor y receptor de las ondas de Lamb. La onda enviada por el transductor se refleja parcialmente por la discontinuidad o defecto y el eco es capturado por el mismo transductor, que actúa como receptor (figura 1). Para asegurar una correcta detección del defecto, es importante utilizar un modo de onda determinado, como por ejemplo el modo de Lamb simétrico, que se consigue a través de la variación del ángulo en función de la frecuencia y espesor de la chapa.

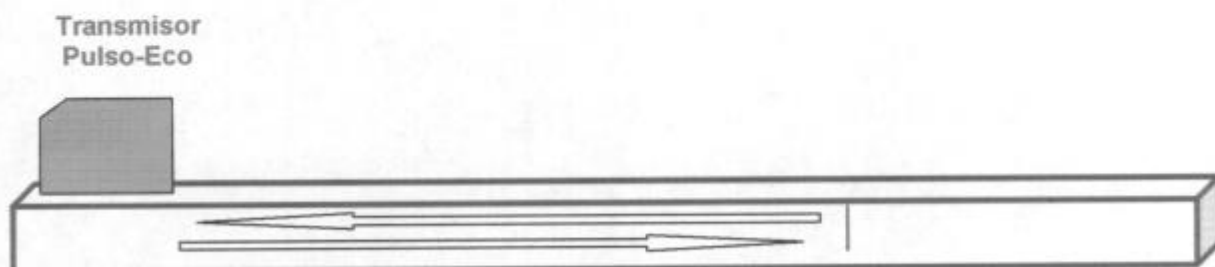


Figura 1.1 Esquema del principio de medida de pulso-eco y propagación de onda Lamb en chapa (aluminio o acero).

1.3.2 Transmisión – recepción por contacto.

Las medidas por emisión-recepción mediante transductores basan la detección de discontinuidades o defectos que se producen en las ondas de Lamb a medida que se propagan a través de una región dañada de la estructura.

Este método utiliza pares de transductores ver figura (1.2). Estos transductores pueden estar adheridos permanentemente a la estructura o insertados entre las capas del material compuesto. El propósito de la técnica de inspeccionar mediante el método de Transmisión – recepción con traductores de titanato zirconato de plomo (PZT) de ángulo variable de (Rexolite), es detectar indicaciones o defectos usando ondas de Lamb, estas ondas se transmiten desde el punto de la chapa a inspeccionar y se reciben en otro punto distinto. El análisis del cambio de la forma, fase y amplitud de las ondas guiadas debe indicar la presencia y la magnitud del defecto.



Figura 1.2 Esquema del principio de medida de Transmisión y recepción y Propagación de onda Lamb en chapa (aluminio o acero).

1.3.3 Pulso – eco por inmersión.

La medida por la técnica de inmersión pulso - eco mediante transductores de inmersión de PZT, se basa en la detección de discontinuidades o defectos en la propagación de ondas de Lamb. Este método utiliza transductores de inmersión de titanato zirconato de plomo (PZT), estos estarán a una distancia determinada con un ángulo que dependerá del modo de onda de Lamb. La chapa esta sumergida en agua que se utiliza como medio de acoplamiento, a diferencia de ensayos convenciones este ensayo no requiere barrido del transductor si no que una variación del ángulo que genera el modo de onda de Lamb. Por ejemplo este método fue usado por primera vez por

Worlton en 1960 (General Electric Company), utilizando transductores y una chapa de aluminio sumergida en agua haciéndole incidir un haz ultrasónico con un ángulo con relación a la chapa, generando la onda de Lamb esta a su vez recorre por la superficie de la chapa obteniendo información de la estructura de la chapa ver figura (1. 3).

Nivel de agua

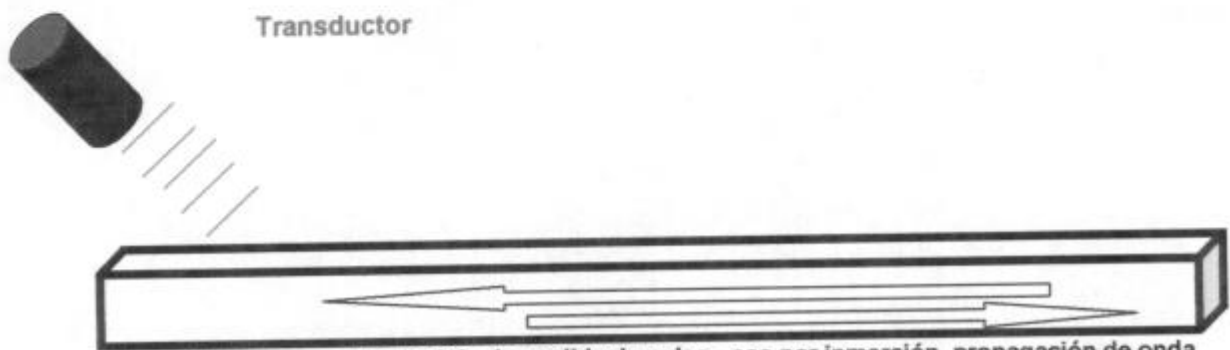


Figura 1.3 Esquema del principio de medida de pulso - eco por inmersión propagación de onda Lamb en chapa (aluminio o acero).

2. Ondas de Lamb.

Las ondas de Lamb son ondas que se propagan en estructuras sólidas con geometría tipo placa delgada. Estas ondas han sido ampliamente estudiadas en el campo de los Ensayos No Destructivos (END) especialmente en las pasadas dos décadas, debido a su capacidad para propagarse a lo largo de grandes distancias con baja atenuación.

Los primeros estudios de propagación de ondas en placas fueron llevados a cabo por Lamb (1917) y Rayleigh (1945). La teoría de Rayleigh-Lamb está enfocada a la propagación de ondas con componente perpendicular a la dirección de desplazamiento en placas infinitas con superficies libres. Las ecuaciones de frecuencia de Rayleigh-Lamb dan la relación entre la frecuencia y el número de onda de cada modo. Las funciones de distribución de desplazamiento y tensiones pueden obtenerse a partir de las soluciones de las ecuaciones de frecuencia de Rayleigh-Lamb

Es necesario definir algunas propiedades importantes de las ondas de Lamb para la conformación de la imagen acústica. La velocidad de fase es la característica fundamental que se necesita conocer. La velocidad de grupo, puede obtenerse de la de fase, con la relación:

$$V_g = V - \lambda \frac{dV}{d\lambda} \quad (1)$$

Donde V_g es la velocidad de grupo, V es la velocidad de fase y λ es la longitud de onda de la onda de Lamb. Al transmitirse las ondas de Lamb a través del material, las partículas del mismo se desplazan de dos maneras diferentes. Ondas simétricas de Lamb ($S_0, S_1, S_2, \dots$) y ondas asimétricas de Lamb ($A_0, A_1, A_2, \dots$). Los distintos modos simétricos y antisimétricos de Lamb tienen diferentes velocidades de fase y grupo, así como la distribución del desplazamiento de las partículas y tensiones a lo largo del espesor de la placa.

Las ondas de Lamb son dispersivas, lo que significa que sus velocidades de fase y de grupo varían con la frecuencia. Las curvas de dispersión de las velocidades de fase (Figura 2.1) y grupo (Figura 2.2) pueden representarse en función de la frecuencia y

espesor. Debido a que pueden existir múltiples modos para una frecuencia dada, se obtiene una familia de curvas de dispersión.

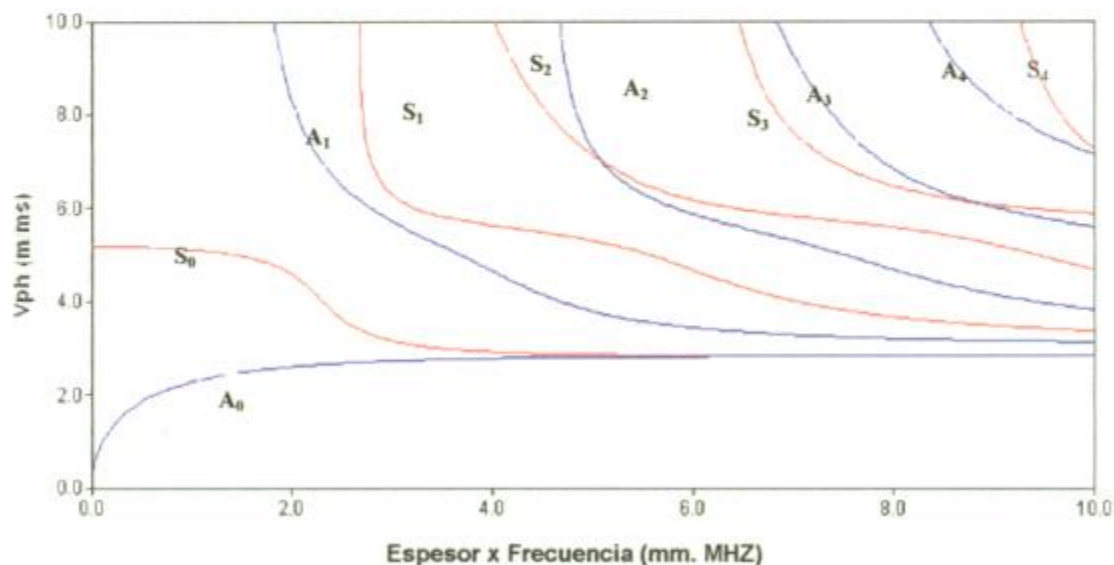


Figura 2.1 Velocidad de Fase. Curva de dispersión para una chapa de Magnesio.

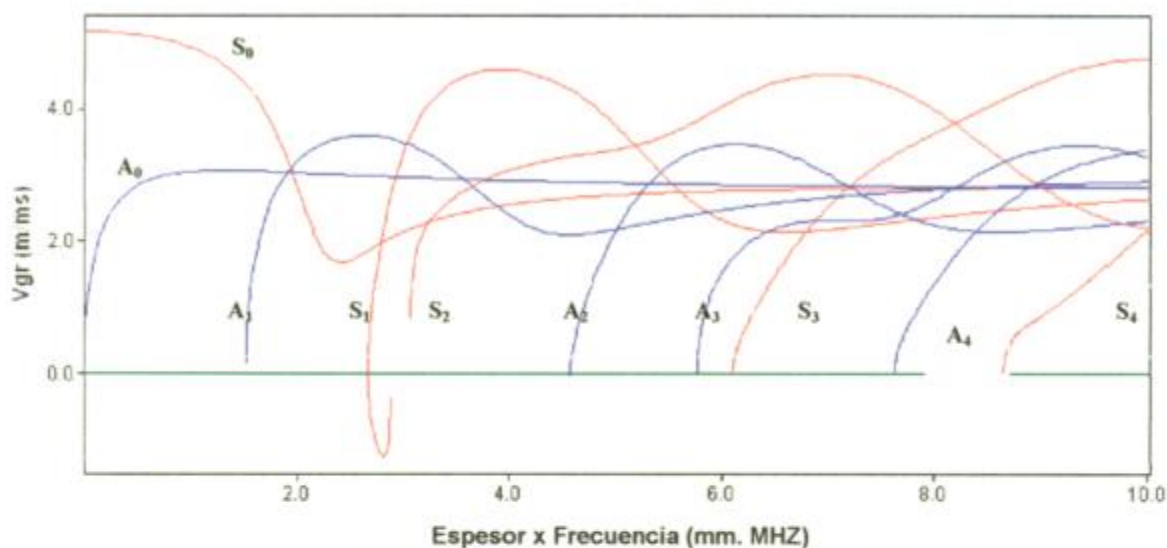


Figura. 2.2 Velocidad de grupo. Curva de dispersión para una chapa de Magnesio.

2.1 Curvas de dispersión.

Lamb analizo el comportamiento de ondas de tensión en dos dimensiones en placas infinitas cuyas superficies están libres de tensión. La piedra angular de su teoría cae sobre dos ecuaciones (publicación de Wolrton, D.C.), las cuales se expresan:

$$\frac{\tanh \beta d}{\tanh \alpha d} = \frac{4\xi^2 \alpha \beta}{(\xi^2 + \beta^2)^2} \quad (1a)$$

$$\frac{\tanh \beta d}{\tanh \alpha d} = \frac{(\xi^2 + \beta^2)^2}{4\xi^2 \alpha \beta} \quad (1b)$$

Donde ξ es la constante del número de onda K , siendo $K=2\pi/\lambda$, d es el semiespesor de la placa, y α , β están definidos en términos de las propiedades elásticas del material de la placa, estas definidas como:

$$\alpha^2 = \frac{\omega^2}{V_l^2} - \frac{\omega^2}{V^2} \quad (1c)$$

$$\beta^2 = \frac{\omega^2}{V_t^2} - \frac{\omega^2}{V^2} \quad (1d)$$

La ecuación (1a), se refieren a la ondas simétricas, y la ecuación (1b), se refiere a las ondas Asimétricas. Estas ecuaciones se pueden escribir de una forma más apropiada para nuestro propósito haciendo las sustituciones.

$$\beta = \xi [1 - (V^2 / V_s^2)]^{1/2} = \xi R_s \quad (2a)$$

$$\alpha = \xi [1 - (V^2 / V_L^2)]^{1/2} = \xi R_L \quad (2b)$$

ξ es igual a $2\pi f / V$, donde f es la frecuencia, y V la velocidad de fase. V_L y V_s representan la velocidad de la onda longitudinal y transversal. R_s es adimensional y es una expresión imaginaria para valores de V más grandes que V_s y R_L también es una expresión imaginaria cuando V a excede a V_L . Escribiendo:

$$R_s = i r_s \quad \text{cuando } V_s < V < V_L \quad (3a)$$

$$R_L = i r_L \quad \text{cuando } V_s < V_L < V \quad (3b)$$

Las ecuaciones (1a) y (1b) pueden expresarse de una manera más utilizable para todos los valores de V .

Luego queda

$$\frac{\tanh \pi f D (R_s / V)}{\tanh \pi f D (R_L / V)} = \frac{4 R_L R_s}{(1 + R_s^2)^2} \quad \text{Simétrica (4a)}$$

$$\frac{\tanh \pi f D (R_s / V)}{\tanh \pi f D (R_L / V)} = \frac{(1 + R_s^2)^2}{4 R_L R_s} \quad \text{Asimétrica (4b)}$$

Donde D es el espesor de la placa y f la frecuencia.

Las expresiones son mas fácilmente manejables numéricamente (y visualizadas físicamente), si la frecuencia y el espesor son considerados como un solo factor entonces, es conveniente ver las ecuaciones relacionando Velocidad de fase V y el espesor D por la frecuencia f ($f \times D$).

2.2 Modos de onda de Lamb.

Las ondas de Lamb están presentes en placas con superficies libres de fuerzas, siendo el espesor de las mismas menor que la longitud de onda. Ahora si consideramos la importancia física de las ondas simétrica y asimétrica. La distinción entre los dos modos esta relacionado con el desplazamiento que cada onda ejerce sobre las partículas dentro la placa. El desplazamiento de las partículas esta dado por:

$$u = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \quad (5a)$$

$$v = \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \quad (5b)$$

Donde u es tomado paralelo a la superficie de la placa en (dirección X) y v es perpendicular a esta (en dirección y). Las ecuaciones de las ondas de Lamb y las condiciones limites, serán satisfechas con las funciones potenciales (ϕ) (ψ) tomando los siguientes valores:

$$\phi = [A \cosh(R_L \omega / V)] e^{i\xi x} \quad (6a)$$

$$\psi = [B \sinh(R_s \omega / V)] e^{i\xi x} \quad (6b)$$

$$\phi = [A \sinh(R_L \omega / V)] e^{i\xi x} \quad (7a)$$

$$\psi = [B \cosh(R_s \omega / V)] e^{i\xi x} \quad (7b)$$

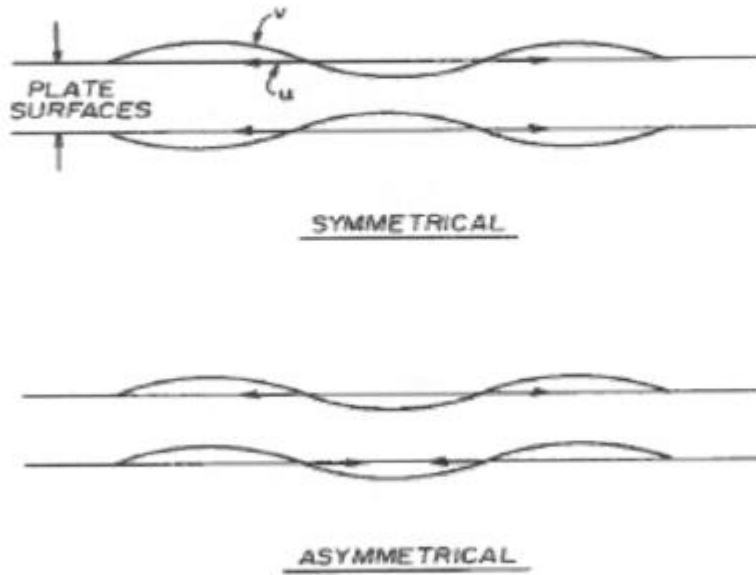


Figura 2.3 Desplazamiento de la onda simétrica y asimétrica

Donde A y B son las constantes de las condiciones límites de superficie, $\omega = 2\pi$ por la frecuencia. El comportamiento de las partículas situadas en la superficie de la placa se obtiene sustituyendo en las ecuaciones (5 a) y (5 b) las ecuaciones de (6a) , (6b) , (7a) y (7b) e igualando y a $D/2$ obtenemos.

$$u_s = \left[\frac{B_\omega R_S}{V} \left(\frac{R_{S^2} - 1}{R_{S^2} + 1} \right) \cosh \left(\frac{\pi f D R_S}{V} \right) \right] e^{i \frac{\pi}{2} x} \quad (8a)$$

$$v_s = \left[\frac{i B \omega}{V} \left(\frac{R_{S^2} - 1}{2} \right) \sinh \left(\frac{\pi f D R_S}{V} \right) \right] e^{i \frac{\pi}{2} x} \quad (8b)$$

$$u_s = \left[\frac{B_\omega R_S}{V} \left(\frac{R_{S^2} - 1}{R_{S^2} + 1} \right) \sinh \left(\frac{\pi f D R_S}{V} \right) \right] e^{i \frac{\pi}{2} x} \quad (9a)$$

$$v_s = \left[\frac{i B_\omega}{V} \left(\frac{R_{S^2} - 1}{R_{S^2} + 1} \right) \cosh \left(\frac{\pi f D R_S}{V} \right) \right] e^{i \frac{\pi}{2} x} \quad (9b)$$

u_s y v_s son los desplazamientos de las partículas situadas en la superficie de las placas. Las ecuaciones (8a) y (8b), definen el movimiento simétrico y las ecuaciones (9a), (9b) el movimiento Asimétrico.

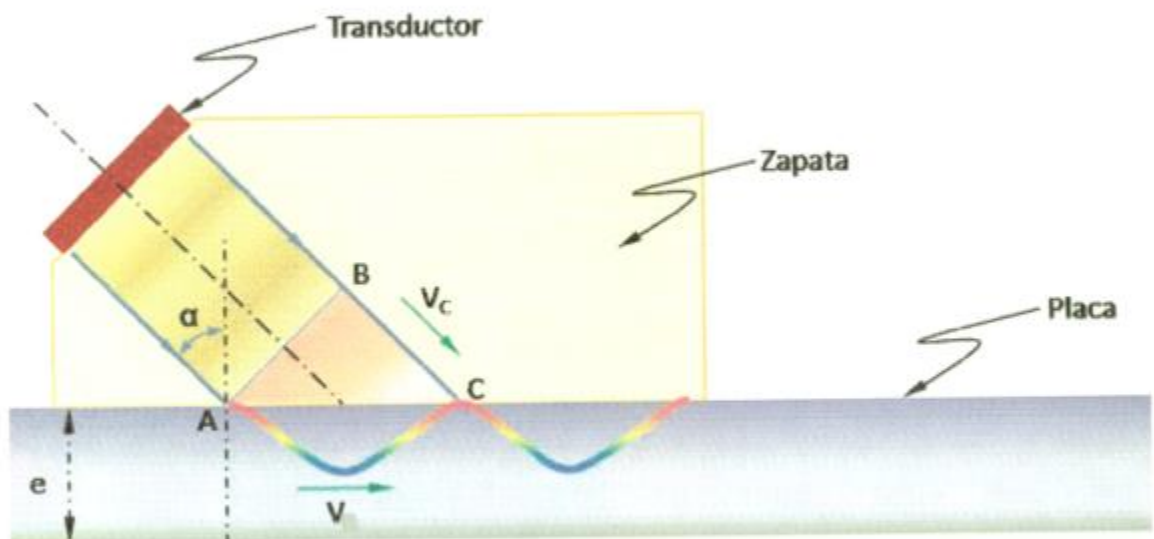
2.3 Generación de las ondas de Lamb.

Las ondas de Lamb se pueden generar con un transductor de ángulo variable.

Para un modo en particular de ondas de Lamb a producirse en una placa y una frecuencia dada, La onda longitudinal generada por el transductor de ángulo variable deberá incidir con un ángulo α respecto a la normal a la chapa, estando relacionado con la velocidad de fase de la onda de Lamb producida según la ecuación:

$$\text{sen}\alpha = \frac{V_c}{V} \quad (10)$$

Donde α ángulo de incidencia de la onda longitudinal, (V_c) velocidad de la onda longitudinal en la zapata y V velocidad de fase de la onda de Lamb. En la figura 2.4 se muestra como se genera la onda de Lamb en la chapa para una dada frecuencia.



Fura 2.4. Generación de onda de Lamb.

Para mantener el movimiento es necesario que el haz ultrasónico llegue a **C** en fase con la onda de Lamb creada en **A**, lo que implica que el tiempo para recorrer **BC** a la velocidad V_c , debe ser el mismo que el necesario para que la onda de Lamb recorra **AC** en la placa.

La onda de Lamb creada en **A** llega a **C** en un tiempo t , que es igual al cociente entre la distancia recorrida y la velocidad de fase V .

$$t = \frac{AC}{V} \quad (11)$$

El tiempo para recorrer **BC** será igual al cociente entre la distancia recorrida y la velocidad longitudinal en la zapata.

$$t = \frac{BC}{V_c} \quad (12)$$

Por lo tanto:

$$t = \frac{AC}{V} = \frac{BC}{V_c} \quad (13)$$

Donde:

$$\frac{V_c}{V} = \frac{BC}{AC} = \text{sen } \alpha \quad (14)$$

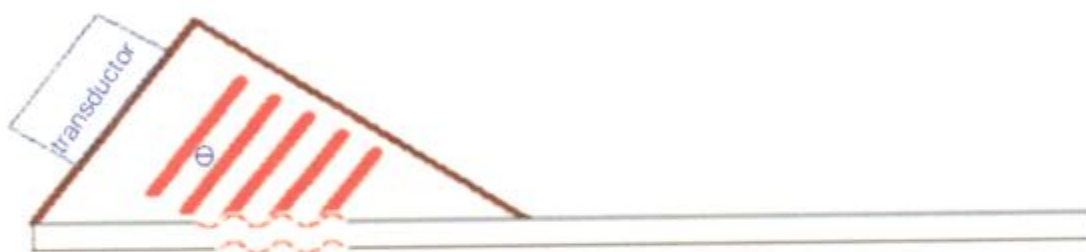


Figura. 2.5 Generación de una ráfaga de ondas de Lamb. El grosor del espécimen es comparable a la longitud de onda

Movimiento de las ondas Lamb Simétrico y Asimétrico en chapa de magnesio.

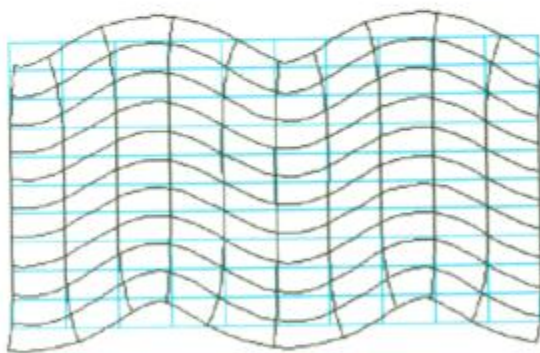


Figura. 2.5a. A_0 , chapa de magnesio
Frecuencia x espesor. 2.5mm.MHZ.
Velocidad. 2,68m/ms.

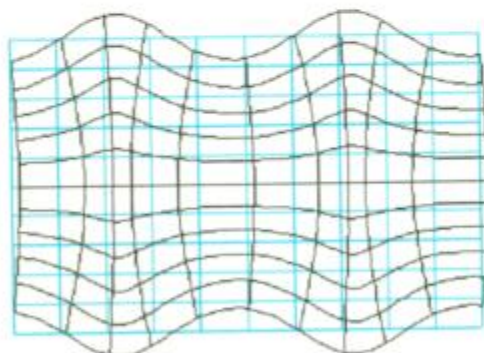


Figura. 2.5b. S_0 , chapa de magnesio
frecuencia x espesor. 2.5mm.MHZ.
Velocidad. 4.5m/ms.

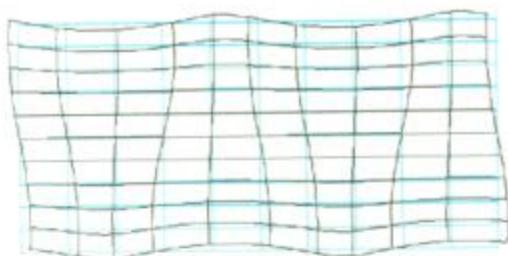


Figura. 2.5c. A_1 , chapa de magnesio
frecuencia x espesor . 2.5mm.MHZ.
Velocidad. 6.1m/ms.

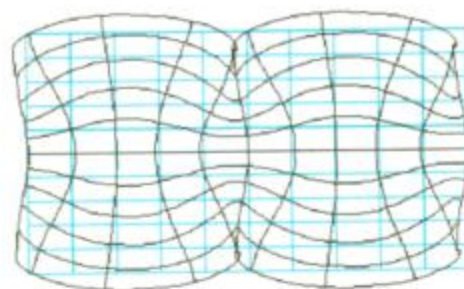


Figura. 2.5 d. S_1 , chapa de magnesio
frecuencia x espesor. 2.9mm.MHZ.
Velocidad. 6.4m/ms.

3. Equipo y Material.

3.1 Materiales Piezoeléctricos.

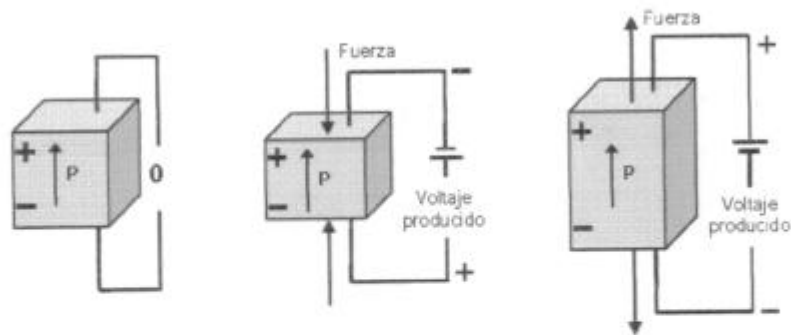
Para la generación de ondas ultrasónicas es necesario desarrollar sistemas capaces de producir vibraciones mecánicas que permitan la generación de energía acústica que se propague con una frecuencia comprendida dentro del espectro ultrasónico. Estos sistemas se denominan transductores. De una manera general un transductor es un dispositivo capaz de convertir una energía en otra: mecánica en eléctrica (piezoelectricidad), térmica en eléctrica (piroelectricidad), etc.

Existen muchos tipos de transductores ultrasónicos. Los más comunes son los que se basan en materiales magnetostrictivos y piezoeléctricos. A lo largo de esta tesis la palabra transductor se referirá exclusivamente a transductores piezoeléctricos basados en resonadores piezocerámicos que convierten la energía eléctrica en mecánica y viceversa.

3.1.1 El efecto piezoeléctrico.

El prefijo piezo deriva de la palabra griega 'piezein' que significa presionar. Conviene distinguir dos efectos piezoeléctricos a fin de comprender como un mismo material puede servir para la emisión y detección de ondas ultrasónicas.

En 1880 Pierre y Marie Curie descubrieron que al aplicar presión a un cristal de cuarzo se establecían cargas eléctricas en éste; a este fenómeno lo llamaron "el efecto piezoeléctrico" o efecto piezoeléctrico directo. Esto es, la aparición de un campo eléctrico entre las caras opuestas del cristal al aplicar un esfuerzo mecánico. Este efecto permite por lo tanto la detección de ondas de presión ultrasónicas. La figura 3.1 (a) muestra el cristal bajo condiciones de esfuerzo nulo. Si una fuerza externa produce deformación por compresión o estiramiento en el material, el cambio resultante en el momento dipolar origina la presencia de un voltaje no nulo entre los extremos. Si el cristal se comprime, el voltaje tendrá la misma polaridad que el voltaje de polarización (P) (Figura 3.1 (b)). El efecto neto es el de aumentar la polarización debido a la reducción relativa del volumen ocupado por los dipolos eléctricos individuales. Si el cristal se estira, el voltaje a través de los electrodos tendrá polaridad opuesta al voltaje de polarización (Figura 3.1 (c)), debido al aumento relativo del volumen de los dipolos y, por tanto, disminución de la polarización.



(a) Cristal en ausencia de fuerzas. estiramiento

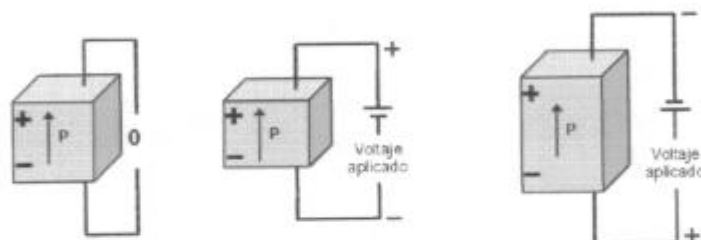
(b) Cristal sometido a un esfuerzo de compresión

(c) Cristal sometido a un

Figura de 3.1 Ejemplo de piezoeléctrico directo.

El "efecto piezoeléctrico inverso" fue descubierto por Lippman en el mismo año. Verificó que un campo eléctrico aplicado sobre las dos caras opuestas del cristal originaba una deformación en el material. Esto permite por lo tanto la generación de ondas ultrasónicas si se aplica un campo eléctrico variable de frecuencia ultrasónica.

Aplicado tiene la misma polaridad que el campo de polarización, el cristal se contrae (Figura 3.2 (b)). El cristal se dilata si un campo de polaridad opuesta al campo de polarización se aplica a los electrodos (Figura 3.2 (c)).



(a) Cristal en ausencias de Cargas

b) Cristal sometido a un voltaje de igual al de polarización.

c) Voltaje sometido polaridad Opuesta al de polarización

Figura de 3.2 Ejemplo de piezoeléctrico directo

3.2 Transductores.

Es un dispositivo que se construye utilizando como base un transductor piezoeléctrico, que es un convertidor de energía eléctrica en energía acústica o viceversa. Si la conversión de energía es en sentido eléctrico-acústico, recibe el nombre de emisor; si la conversión es en sentido opuesto, se le denomina receptor

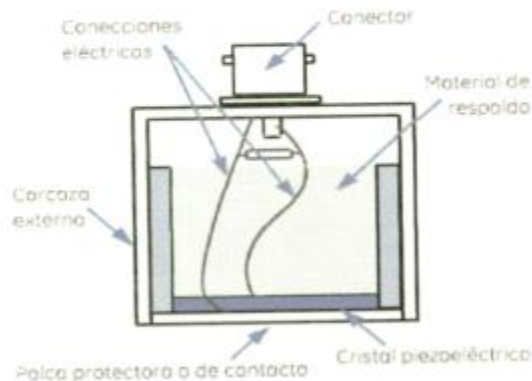


Figura 3.3 componentes de transductor.

3.2.1 Transductores de Contacto.

Se aplican directamente a la superficie de la muestra, con una cierta presión, e intercalando un medio de acoplamiento. Se suelen emplear en ensayos manuales. Estos transductores se clasifican en:

3.2.1.1 Transductor de incidencia normal.

Se caracteriza por emitir ondas longitudinales perpendiculares a la superficie de la pieza a inspeccionar. Las ondas se propagan por el interior de la pieza hasta encontrar una heterogeneidad, siendo nuevamente reflejadas hacia el cristal. Se usa para la detección de heterogeneidades paralelas a la superficie de entrada.



Figura 3.4 Transductores normales.

3.2.1.2 Transductor de incidencia angular.

Se caracteriza por emitir haces de ondas longitudinales formando un ángulo distinto del recto con la superficie a inspeccionar. En estas circunstancias, el haz emitido sufre un cambio de modo, dando origen a un haz de ondas transversales. Este tipo de transductor se utiliza para la inspección de materiales cuyos defectos inherentes son de orientación inclinada.



Figura 3.5 Transductores angulares.

3.2.1.3 Transductores doble cristal.

Se caracteriza por poseer dos transductores separados eléctrica y acústicamente, de forma que uno actúa como emisor y el otro como receptor. Los dos cristales tienen una pequeña inclinación, de manera que se consigue un efecto focalizado que proporciona una máxima sensibilidad en las proximidades de la superficie a inspeccionar. Este tipo de transductor se utiliza también para la medida de espesores muy pequeños.

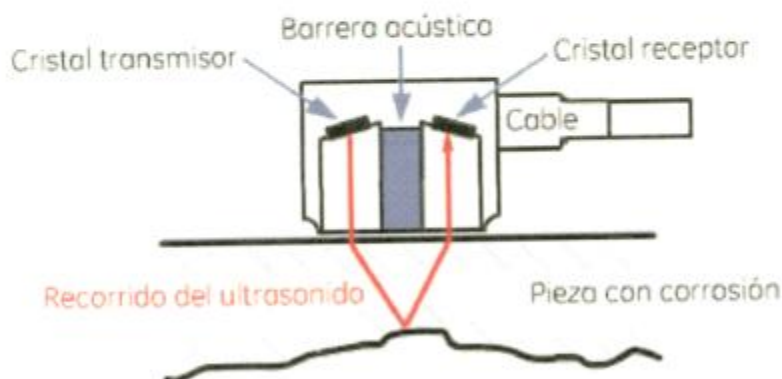


Figura 3.6 Transductores doble cristal.

3.2.1 Transductores de Inmersión.

Este tipo de transductores se utilizan en el método de inspección por inmersión. Estos ensayos, bien sumergiendo la muestra en un tanque o mediante inmersión local, son particularmente indicados para inspecciones automáticas. La transmisión de los ultrasonidos entre los transductores y la muestra se efectúa a través de una columna de líquido, es decir, sin contacto directo. El diseño de un transductores de inmersión es similar a transductores normales de contacto directo, diferenciándose en que los transductores de inmersión han de ser estancos al líquido que se va a utilizar en la técnica de inmersión, incluyendo sus conexiones de cableado.

Estos transductores están montados sobre un soporte de modo que se orientan hacia la superficie de la pieza según el ángulo de incidencia deseado.



Figura 3.7 Transductores de inmersión.

3.2.2 Transductores de ángulo variable.

Como se pudo mencionar en párrafos anteriores se describió los transductores angulares cuyo ángulo de incidencia es fijo. Para ciertos ensayos interesa ajustar el ángulo con una cierta precisión, para la cual se han desarrollado los transductores de ángulo variable. Se pueden utilizar en la generación de ondas de Lamb en chapas, barras, tubos de pared delgada, varillas es decir muestras con superficie paralelas, cilíndricas prismáticas de espesor fino. Cuando se logra excitar una onda de Lamb, todo el espesor de la muestra participa en la vibración según un estado de resonancia y se propaga con una velocidad que es función del espesor y de la naturaleza del material, de la frecuencia y del modo o tipo de onda.

Si el ángulo de incidencia del transductor se ajusta para que la velocidad de propagación de la onda longitudinal incidente sea igual a la velocidad de fase de un tipo de onda de Lamb en la muestra, se producirá dicho estado de resonancia. Cuando esto ocurre, el impulso puede propagarse distancias muy grandes, lo que significa grandes ahorros de tiempos de inspección, teóricamente es posible inspeccionar toda la anchura de la chapa con un único transductor.

Como parte de esta tesis se diseñó un transductor de ángulo variable. El material que se utilizó para la zapata del mismo fue Rexolite, con geometría semicircular para la zapata y que guía el desplazamiento del transductor para ajustar el ángulo que generara el modo de onda de Lamb deseado. Ver figura (3.8).

El Rexolite es un polímero termoestable, rígido y transparente, fabricado con poliestireno reticulado con divinilbenceno. El Rexolite posee una Impedancia acústica de 1.1 Mrayls, una velocidad de 2.340 m/s y muy baja atenuación a frecuencias elevadas, lo que lo hace muy útil para esta aplicación. Se realizaron dos diseños, donde el primer diseño cuenta con las siguientes medidas: 75mm de largo, 53mm de altura y 34.75mm de ancho.

El dispositivo cuenta con un medidor de ángulo, con un radio de 50mm y dos bandas elásticas que permiten el desplazamiento entre la zapata y el transductor. Ver figura 3.8 y 3.8a.

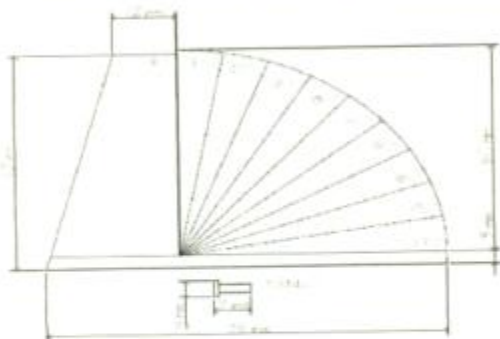
El segundo diseño cuenta con las siguientes medidas: 75mm de largo, 50mm de alto y 43.75mm de ancho. .

En ambos casos para reducir las reflexiones ocasionados por el haz ultrasónico, se le efectuaron ranuras a 45° en el frente de la zapata. Ver figura 3.8b y 3.8c.

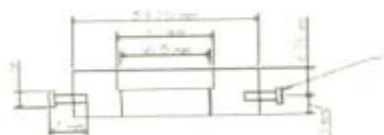
		REXOLITE 1422	REXOLITE 2200
Eléctrica			
	Factor de disipación típica en: 1MHz	.00012	.0004
	Factor de disipación típica en: 10MHz	.00025	.0005
	Factor de disipación típica en: 10GHz	66	.0014
	Resistividad de volumen (Ohm-cm)	> 10 ~ 16	5 x 10 ~ 13
	Resistividad de la superficie (Ohm)	> 10 ~ 14	5 x 10 ~ 12
	Rigidez dieléctrica – paso a paso (V / Mil)	500	500
Física			
	Densidad (lb/in ³), (G/m ³)	0.038	0.042
		1.05	1.11
	Peso específico	1.05	1.11
	Resistencia a la tracción (psi)	9000	9500
	Resistencia a la flexión (PSI)	11500	10500
	Fuerza de impacto – La temperatura ambiente a -75 ° C (pies lb / A de la muesca.)	0.3	0.75
	Coefficiente de expansión térmica (1 ° C)	7.0 x 10 ~ 5	5,7 x 10 ~ 5
	De conductividad térmica – Col / seg / cm ° C / cm	3,5 x 10 ~ 4	5,0 x 10 ~ 4
	Temperatura de funcionamiento recomendada	-60 ° a +100 ° C	-75 ° a +100 ° C
	Atenuación en función de la frecuencia 30MHZ	1.1dB/mm	
	Velocidad acústica	2,340 m/s	
Química			
	Absorción de agua	Número máximo de 0,05	Número máximo de 0,10
	Alcalis (sodio / hidróxido de potasio)	Sin efecto	Sin efecto
	Alcalis (sodio / hidróxido de potasio)	Sin efecto	Sin efecto
	Alcoholes (metanol / 1sopropanol)	Sin efecto	Sin efecto
	Hidrocarburos alifáticos (pentano, ciclohexano, n-heptano, n-hexano)	Sin efecto	Sin efecto
Óptica			
	La luz visible 1 "de espesor	87%	
	Índice de refracción 589	1.59	
	Índice de refracción 486	1.604	
	Índice de refracción 656	1.585	

Tabla 3.1 propiedades de Rexolite.

TRANSDUCTOR DE ANGULO VARIABLE



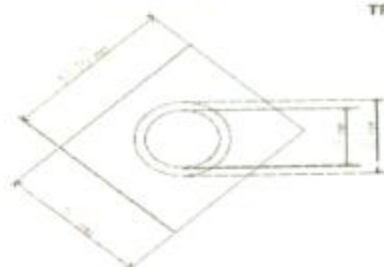
GUIA DEL TRANSDUCTOR



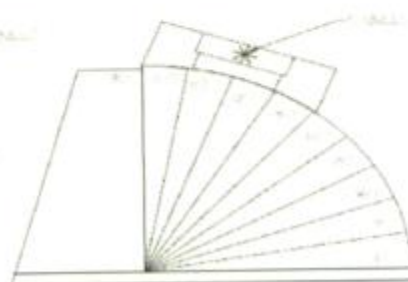
VISTA 1



VISTA 2



VISTA 3



TRANSDUCTOR DE ANGULO VARIABLE REXOLITE

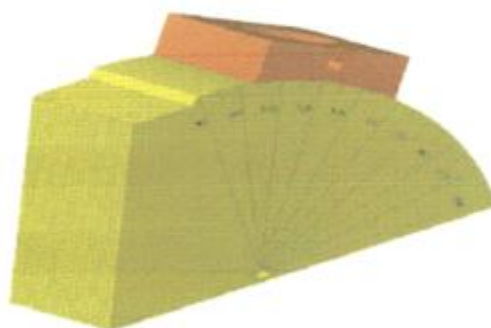


Figura 3.8 Diseño de Transductor de ángulo variable.

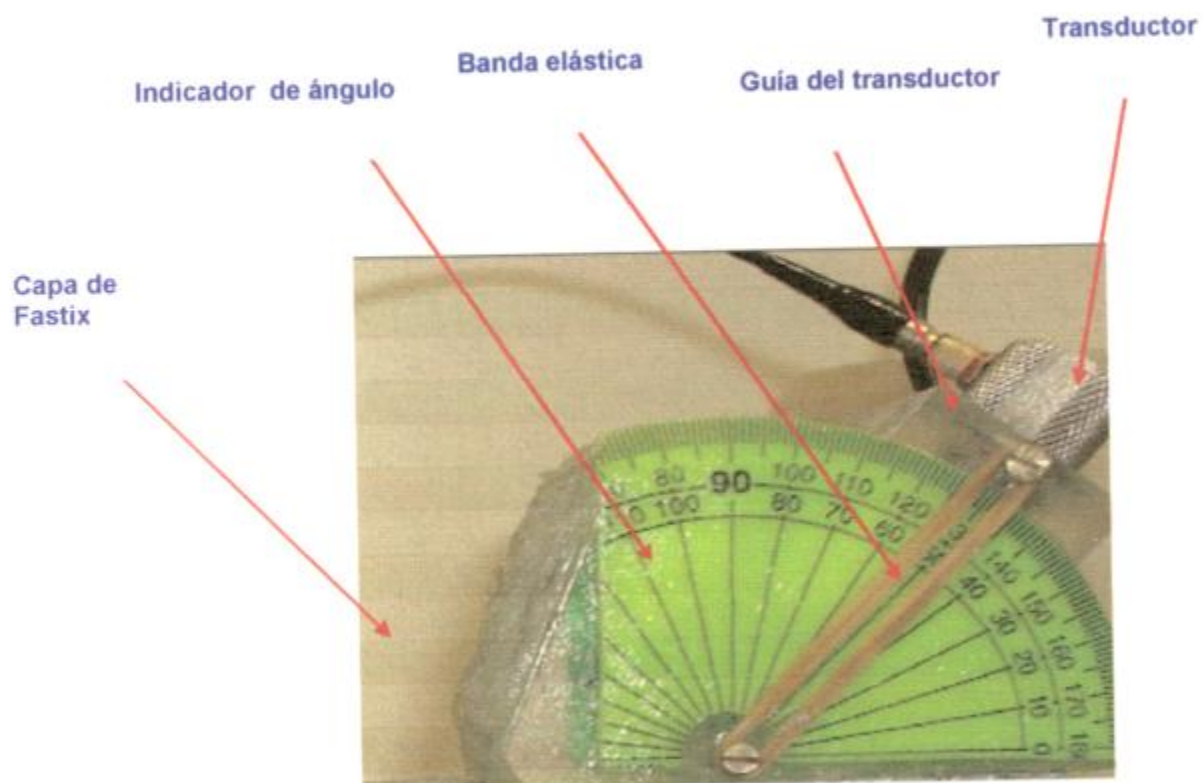


Figura: 3.8a. Primer diseño del transductor de ángulo variable.

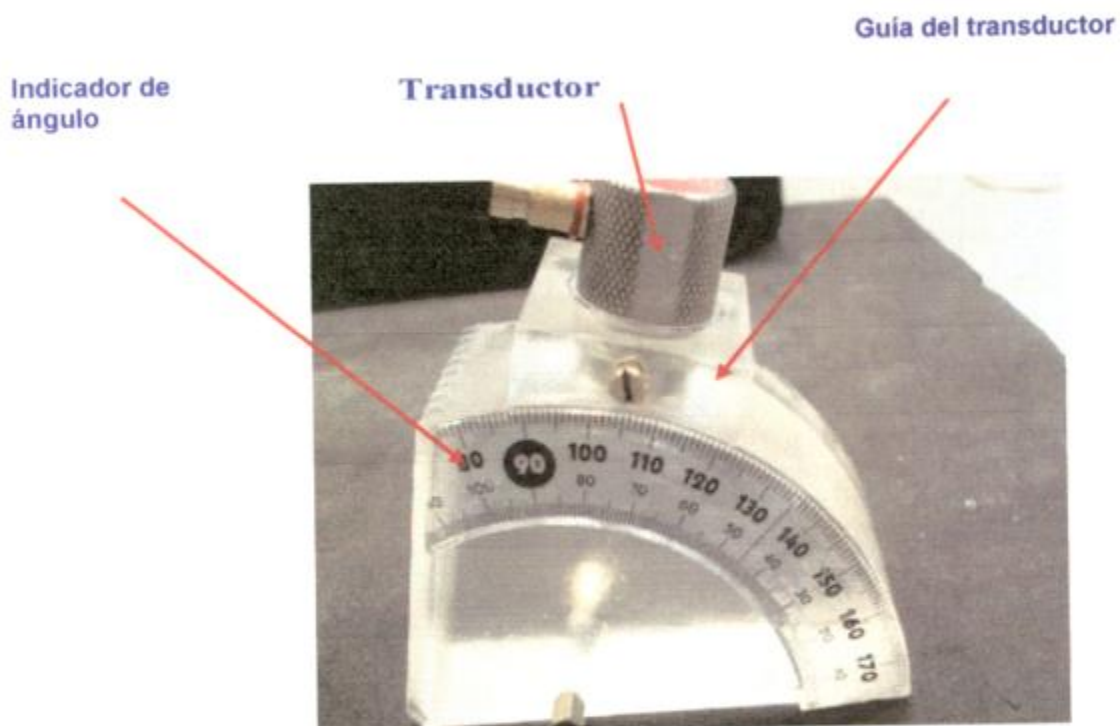


Figura: 3.8b. Segundo diseño del transductor de ángulo variable.

Forma estriada a 45°

Banda elástica

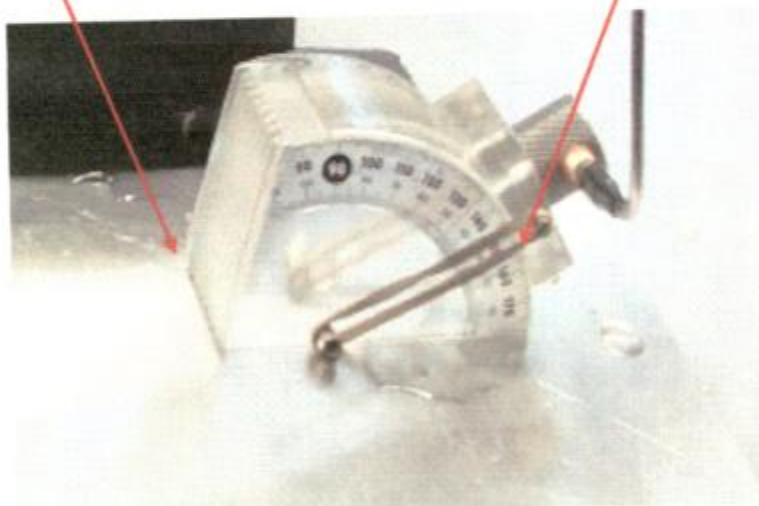


Figura: 3.8c. Segundo diseño del transductor de ángulo variable.

3.2.3.1 Verificación del ángulo del haz ultrasónico.

Para verificar los ángulos del transductor se realizaron las siguientes comprobaciones.

3.2.3.1.1 Primer ángulo crítico.

La onda longitudinal refracta con un ángulo de 90° . Utilizando la velocidad de los materiales del acero del patrón V1 y la velocidad del Rexolite se obtiene:

θ : ángulo de incidencia del Rexolite.

α : ángulo de refracción del acero (90°).

V_R : 2340 m/s.

V_{la} : 5920 m/s.

$$\frac{\sin \theta}{V_{\text{Rexolite}}} = \frac{\sin \alpha}{V_{\text{acero}}}$$

$$\sin^{-1} \theta = \frac{2340 \text{ m/s}}{5920 \text{ m/s}} = 23,28^{\circ}$$

En la figura 3.9 se observan los ecos previos al primer ángulo crítico.

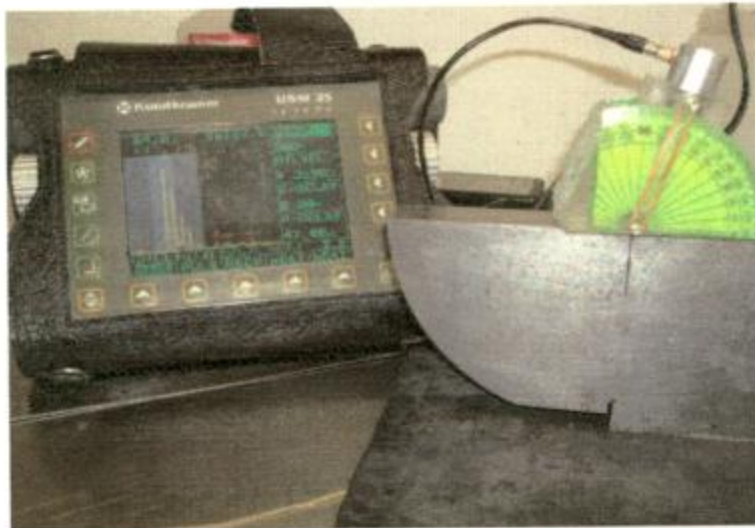


Figura 3.9 onda longitudinal y transversal previos al primer ángulo crítico.

3.2.3.1.2 Segundo ángulo crítico.

La onda transversal refracta con un ángulo de 90° . Utilizando la velocidad de los materiales del acero del patrón V1 y la velocidad del Rexolite.

θ : ángulo de incidencia del Rexolite.

α : ángulo de refracción del acero (90°) .

V_R : 2340 m/s.

V_{ta} : 3230 m/s.

$$\frac{\sin \theta}{V_{\text{Rexolite}}} = \frac{\sin \alpha}{V_{\text{acero}}}$$

$$\sin^{-1} \theta = \frac{2340 \text{ m/s}}{3230 \text{ m/s}} = 46,43^\circ$$

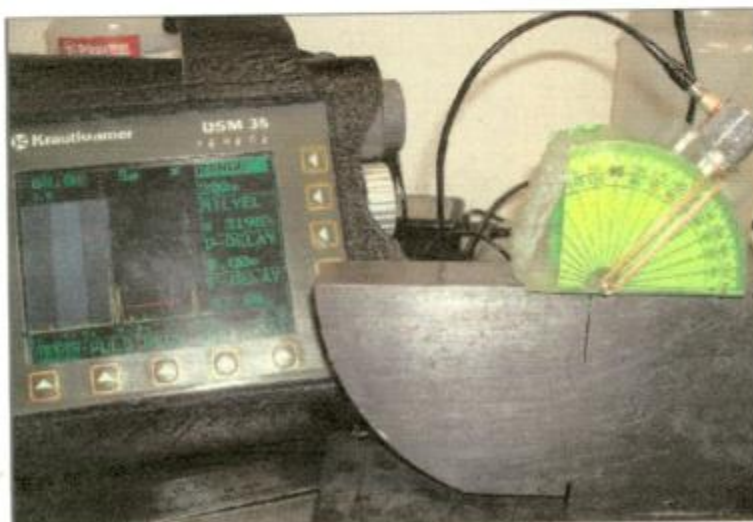


Figura 3.10 Verificación del segundo ángulo crítico.

3.3 Equipo Ultrasónico.

Se utilizó un equipo Krautkramer, modelo USM 35X. Este posee un rango de frecuencia entre 0,2 y 20 MHz y un rango máximo de calibración de 10 m (en acero).

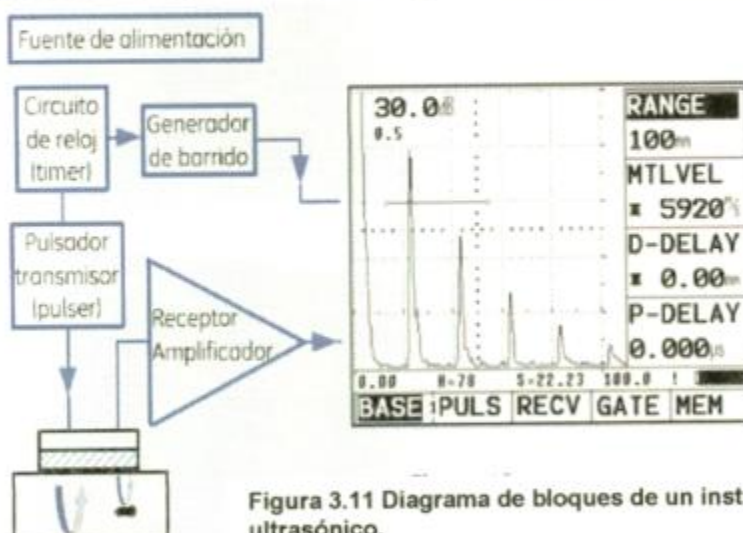


Figura 3.11 Diagrama de bloques de un instrumento ultrasónico.

3.3.1 Fuente de alimentación.

La fuente de alimentación proporciona el voltaje necesario a otros circuitos dentro del instrumento. Convierte el voltaje de corriente alterna (C. A.) a voltajes menores de corriente continua (CC) usados en la mayoría de los circuitos del instrumento. La fuente de alimentación puede incluir baterías y cargador/adaptador.

3.3.2 Circuito reloj o sincronizador (timer).

Este circuito inicia una cadena de eventos en un ciclo completo, dentro de la inspección ultrasónica, envía una señal a intervalos regulares, por un lado al circuito generador de barrido o base de tiempo, y por otro lado al pulsador. Esta señal es repetida a una frecuencia dada y, en ciertos instrumentos, el control es llamado "control de la frecuencia de repetición de pulsos" (pulse repetition frequency) por cierto, en algunos instrumentos esta función es controlada externamente y en algunos otros el instrumento lo hace automáticamente.

El control de repetición de pulsos establece el número de pulsos generados por segundo. También se conoce como "rep rate" (por su nombre en inglés).

3.3.3 Base de tiempo (Generador de barrido).

La función de la base de tiempo, también llamado "generador de barrido", es la de establecer en la pantalla del instrumento el viaje del ultrasonido sobre la escala horizontal, y que este pueda ser "leído". El control de "rango" ajusta esta escala en función del espesor inspeccionado. El valor de la escala horizontal es dado para el material calibrado, que es también solo para el modo de vibración en particular. Esta escala es ajustada para materiales con velocidades diferentes usando el control de "velocidad", también llamado "control de rango fino" (o longitud de barrido fino).

3.3.4 Pulsador (pulser).

Esta unidad genera impulsos eléctricos con el fin de que el transductor los transforme en impulsos ultrasónicos. Al mismo tiempo que envía el impulso eléctrico al transductor, envía al amplificador una pequeña fracción de la energía de ese impulso

eléctrico. De esta forma, se produce la señal de emisión en la pantalla, que marca el momento en el que el cristal emisor recibe el impulso eléctrico (cero eléctrico).

La señal de emisión termina a la derecha del cero de la escala, es decir, dentro del material. Esa zona, en la que no es posible detectar ecos debido a que está ocupada por la señal inicial, se llama zona muerta. La zona muerta es consecuencia de la duración del impulso emitido por el transductor.

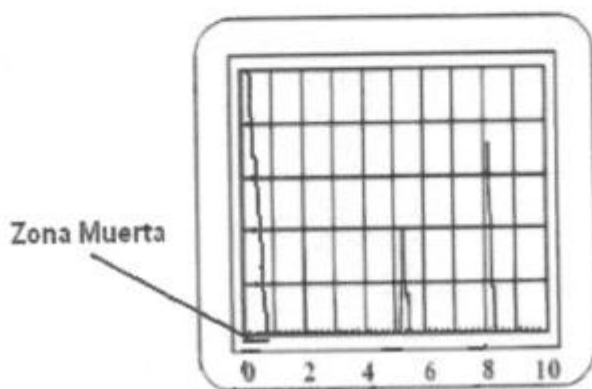


Figura 3.12 Señal de emisión y zona muerta

3.3.5 Amplificador.

Los impulsos acústicos llegan al receptor después de recorrer el material, generando impulsos eléctricos.

El amplificador permite variar las amplitudes de los ecos en la pantalla. Es de tipo lineal, es decir, todas las señales se multiplican por el mismo factor, que se puede variar con el mando o control de ganancia. El equipo dispone de dos controles de ganancia: uno para ajustes de grandes variaciones de ganancias, es decir, en pasos de 20 dB, y otro para ajustes de pasos de ganancia más pequeños, pasos de uno o dos dB.

3.3.6 Pantalla.

Pantalla (pantalla de cristal líquido (LCD), pantalla de video, pantalla electroluminiscente, o tubo de rayos catódicos, TRC o CRT).

La pantalla permite observar la información de la inspección. Los tubos de rayos catódicos fueron los más usados hace algunos años, estos utilizan un haz de electrones controlado por placas de deflexión sobre una pantalla fosforescente. Hoy en día se utilizan en forma generalizada las pantallas de cristal líquido (LCD), una de las razones por la que se ha permitido reducir el tamaño de los detectores de fallas ultrasónicas.

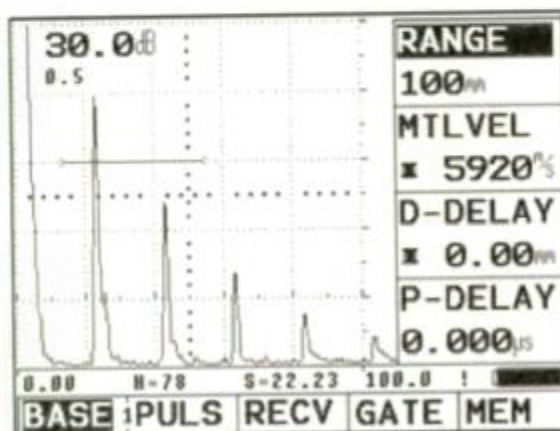


Figura 3.13 Representación A-scan.

El equipo consta de un aparato compacto en cuyo frente se sitúan la pantalla del monitor, los mandos de alimentación y de ajuste y las tomas para conexiones de alimentación y transductores.



Figura 3.14 Equipo USM 35

3.4 Bloque de calibración y referencia.

3.4.1 Bloque de calibración V1.

Con este bloque se hace la comprobación del ángulo real y punto de salida del transductor de ángulo variable y ajustes en distancias acuerdo con la norma DIN 54,120.

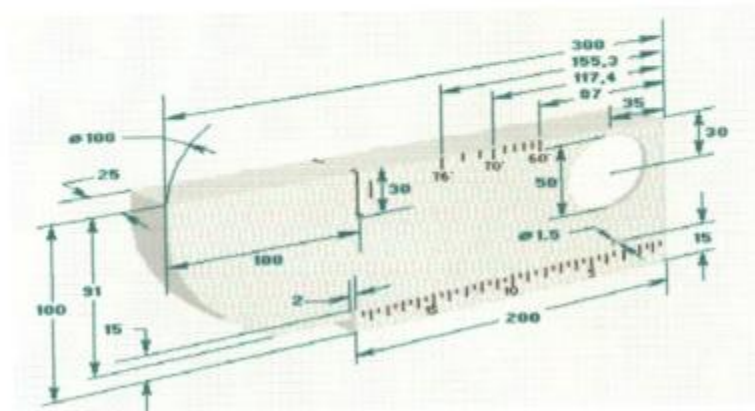


Figura 3.15 Bloque V1

3.5 Acoplante.

Es una sustancia que se utiliza para hacer posible la transmisión de las ondas ultrasónicas producidas por el cristal piezoeléctrico en el interior del material a inspeccionar. Su finalidad es eliminar la delgada lámina de aire entre el transductor y el material a ensayar, en la cual sería imposible la transmisión del haz ultrasónico debido a la gran diferencia de impedancias acústicas entre el aire y el material.

El acoplante utilizado en nuestro caso es aceite y vaselina.

3.6 Sistema de inmersión.

Este sistema está compuesto por un mecanismo manual que permite el movimiento transversal de 321mm y longitudinal de 447mm, lo que nos restringe hacer pruebas a probetas de mayor medidas a sus desplazamientos.

Una cuba de 700mm de largo, 400mm de ancho y 210mm de profundidad que estará parcialmente ocupada por agua durante el ensayo.

Se diseñó e implementó el indicador ángulos, en donde se le colocó un medidor milimetrado, el soporte del transductor, como también el variador de ángulo, utilizando material de aluminio figura 3.16 y 3.17.

Las probetas de acero o aluminio al ser inspeccionadas se colocan en una plataforma de acero inoxidable, con 4 apoyos cilíndricos de polietileno entre la probeta y la plataforma de acero inoxidable.

Se utilizaron transductores de inmersión de titanato zirconato de plomo (PZT) de Sonatest, de 5 MHZ, Krautkramer SNB de 4 MHZ Y DAPCO de 2.5 MHZ.

La figura 3.18 muestra el sistema de inmersión completo.

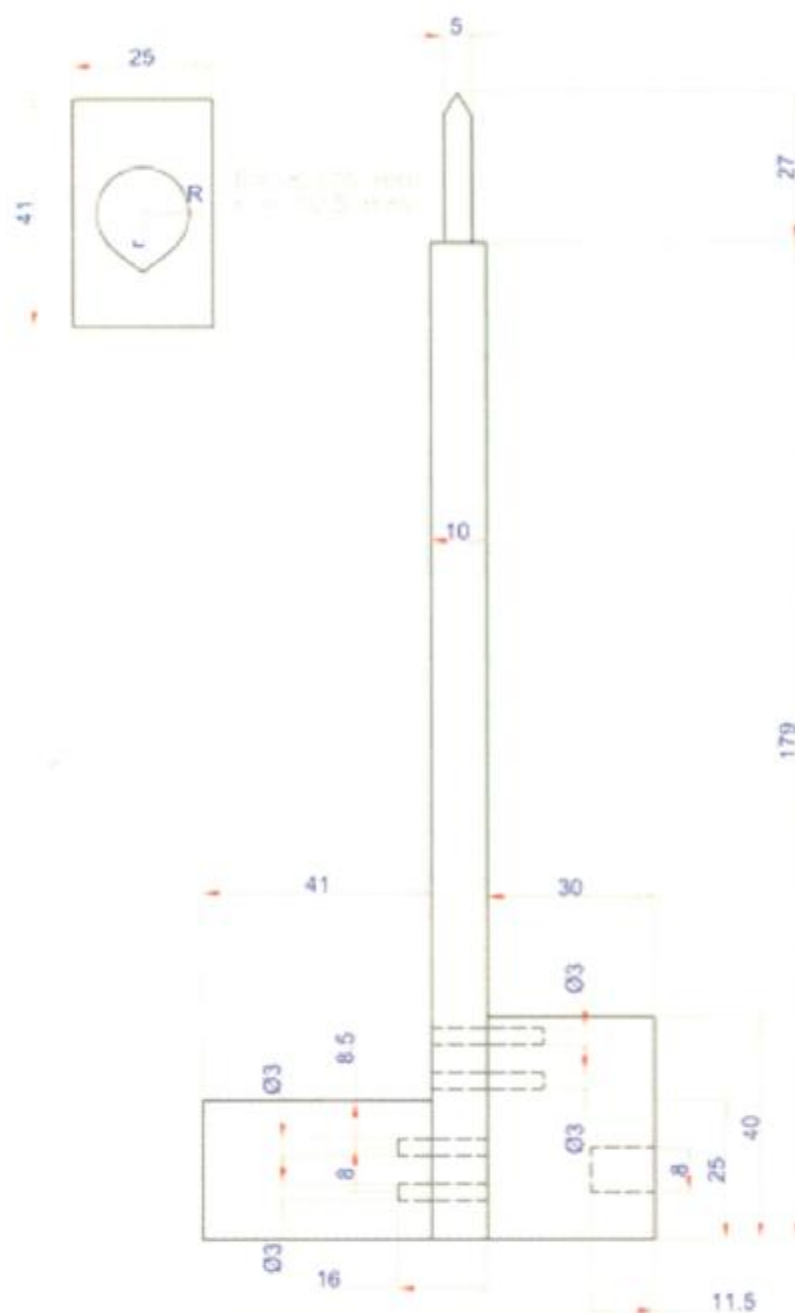


Figura 3.16 Diseño de variador de ángulo.



Figura 3.17 Variador de ángulo.

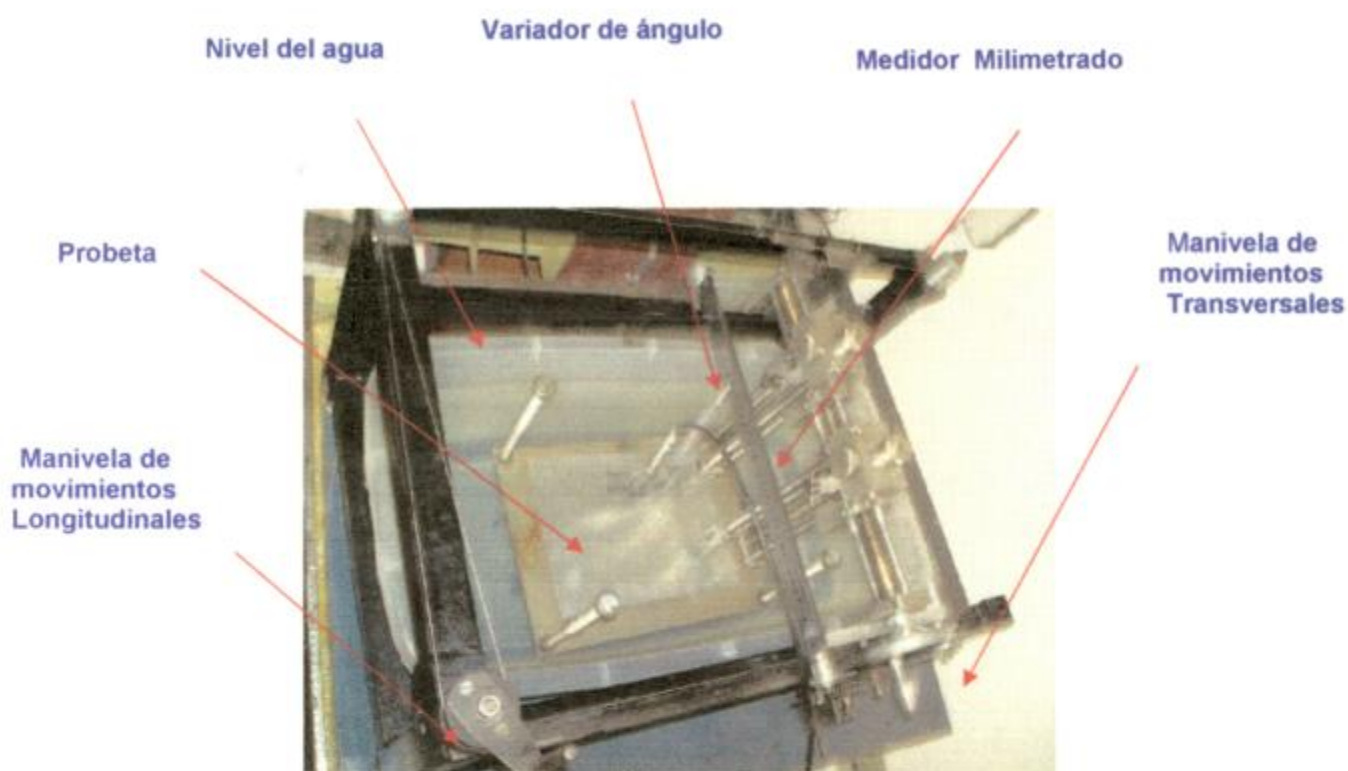


Figura 3.18 Sistema de inmersión.

3.7 Probetas.

Probetas de aluminio					
Largo	Ancho	Espesor	Método de inspección		
mm.	mm.	mm.			
247	130	3	contacto / pulso- eco	contacto Transmisor- Recepción	Inmersión pulso-eco
257	250	2			
247	200	1			
255	200	1,5			

Tabla3.2 Probetas de aluminio.

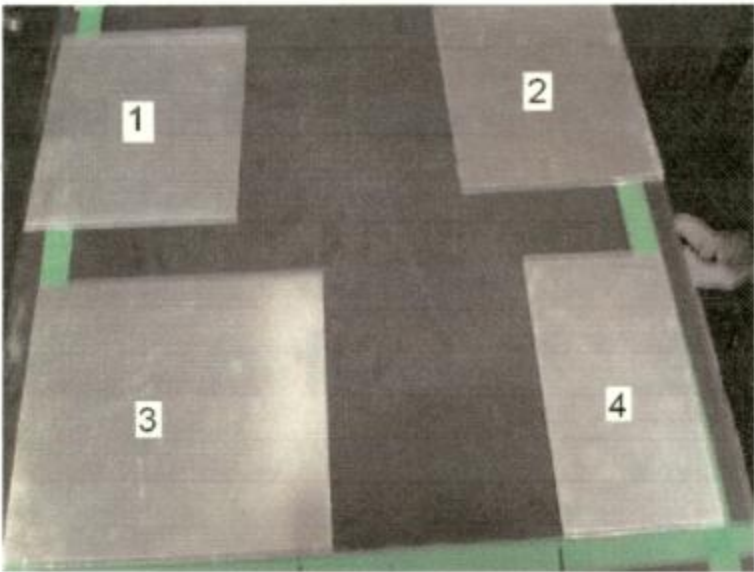


Figura 3.19 Probetas de aluminio , 1) 1mm, 2) 1.5mm, 3) 2mm 4) 3mm.

Probetas de acero					
Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Método de inspección		
210	95	3,75	contacto / pulso- eco		Inmersión / pulso-eco
310	174	2,20			
245	220	1,25			

Tabla 1.3 probetas de acero.

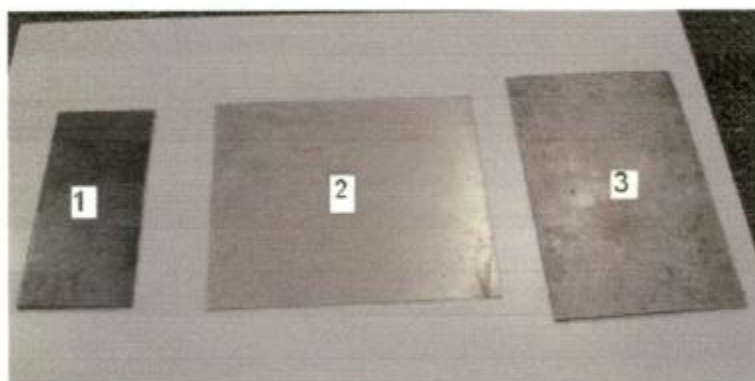


Figura 3.20 Probetas de acero, 1) 3.75mm, 2) 1mm, 3) 2.2mm.

4. Desarrollo experimentales de selección de modos.

La figura 4.1 muestra la forma de propagación de los modos simétricos y asimétricos a lo largo de la placa. Fijándonos en la zona rectangular en rojo de la figura podemos observar que para el modo asimétrico la parte superior se contrae mientras que la inferior se expande (desplazamiento asimétrico con respecto al plano medio de la placa) mientras que para el modo simétrico la onda se expande tanto en la parte superior de la placa así como en la parte inferior (desplazamiento simétrico con respecto al plano medio de la placa).

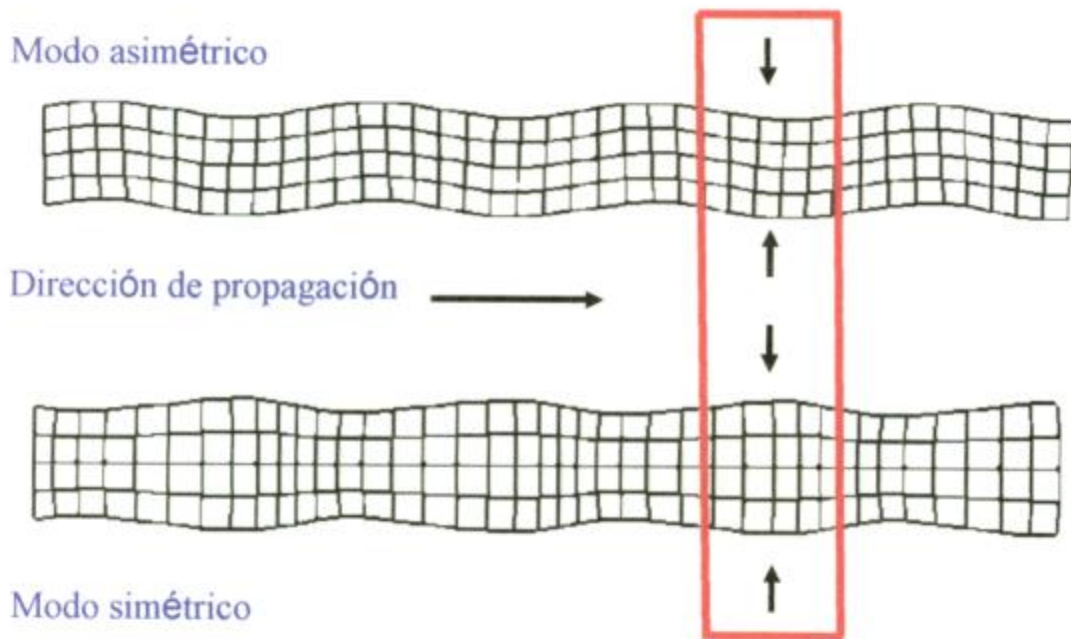


Figura 4.1 Deformación de la placa según los modos de propagación simétrico y asimétrico.

4.1 Selección de modo pulso-eco por contacto.

Los modos de onda de Lamb tanto simétrico como asimétrico pueden ser generadas en chapas con transductores de ángulo variable (zapata de Rexolite) como se menciona en el capítulo 1.3. El método pulso-eco por contacto esta compuesto por un transductor que se puede mover sobre una zapata, de forma de variar el ángulo del haz incidente que intercepta la superficie de la chapa de aluminio o acero Figura 4.2. Este ángulo se ajustará en función de la velocidad de propagación en el material de la zapata

(Rexolite, $V_c = 2.340 \text{ m/s}$) y la velocidad de fase V de un modo de onda de Lamb, en particular según la ecuación $V = 2340 / \sin \alpha$

En la selección de modos Simétricos y asimétricos se utilizarán las curvas teóricas de dispersión de las figuras 4.22a, 4.22b, 4.35a y 4.35b (apuntes de nivel III en Frances END), estas curvas nos darán la información de la ubicación y propagación de los modos de onda de Lamb en particular.

Se utilizaron chapas con espesor de 1mm, 1.5mm, 2mm y 3mm de aluminio y 1.2mm, 2.2mm, 3.75mm de acero con frecuencias de 1 MHz, 2,25 MHz Y 5 MHz.

Los resultados para los modos simétricos y asimétricos de onda de Lamb pueden observarse en las siguientes figuras Amplitud – tiempo.

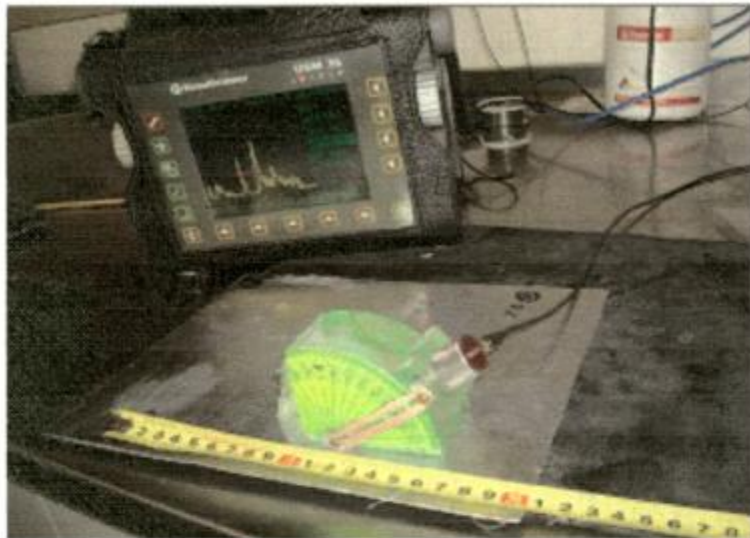


Figura 4.2 método pulso eco.

4.1.1 Excitación de los modos simétricos y asimétricos en chapa de aluminio.

4.1.1.1 Excitación del modo asimétrico A₁ a 1 MHz.

La figura 4.3 representa la respuesta del modo A₀ en una chapa de aluminio de 1mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia de 73° y una velocidad de fase (V) de 2447 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo, muestra una sensibilidad 71 dB a un 80 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido y un nivel de ruido 10 % ATP.

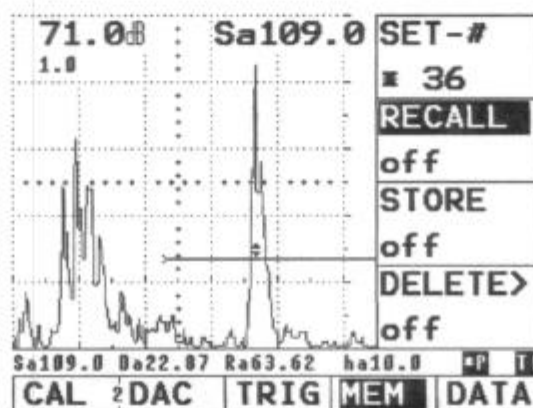


Figura 4.3. Modo A₀ chapa aluminio 1mm

La figura 4.4 representa la respuesta del modo A₀ en una chapa de aluminio de 1.5mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia de 69° y una velocidad de fase (V) de 2506m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo, muestra una sensibilidad 64dB a un 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido y un nivel de ruido 5 % de ATP

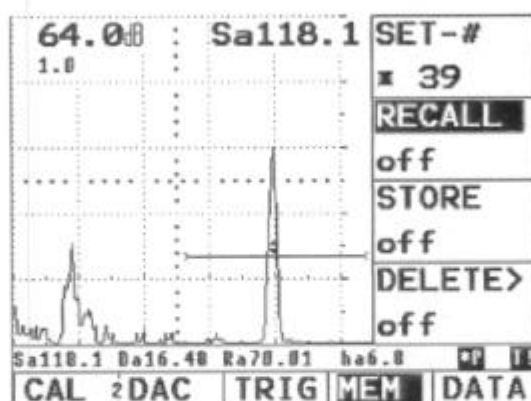


Figura 4.4. Modo A_0 chapa aluminio 1.5mm

La figura 4.5. representa la respuesta del modo A_0 en muestra de una chapa de aluminio de 2mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia de 65° y una velocidad de fase (V) de 2581 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo, muestra una sensibilidad 63 dB a un 55 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido.

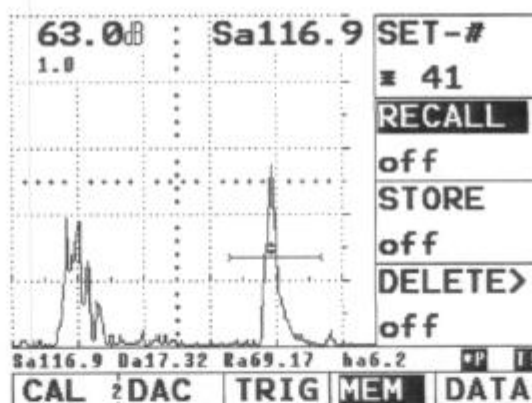


Figura 4.5. Modo A_0 chapa aluminio 2mm

La figura 4.6 representa la respuesta del modo A_0 en muestra de una chapa de aluminio de 3mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia de 56° y una velocidad de fase (V) de 2822 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo, muestra una sensibilidad 65 dB a un 55 % de altura total de pantalla (ATP). Mostrando un pico bien definido.

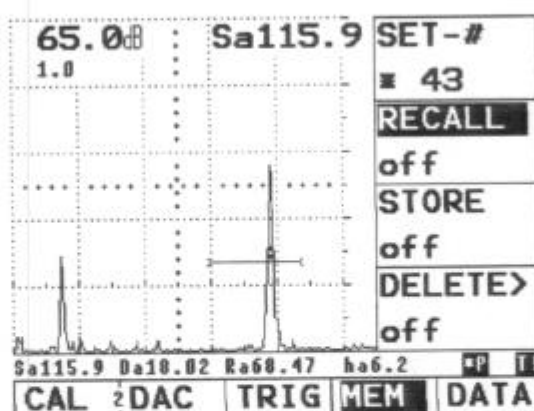


Fig 4.6. Modo A_0 chapa aluminio 3mm.

4.1.1.2 Excitación del modo Simétrico S_0 a 1MHZ.

La figura 4.7. representa la respuesta del modo S_0 en una chapa de aluminio de 1mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia de 30° y una velocidad de fase (V) de 4680 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 71 dB a un 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido y un nivel de ruido 20 % ATP.

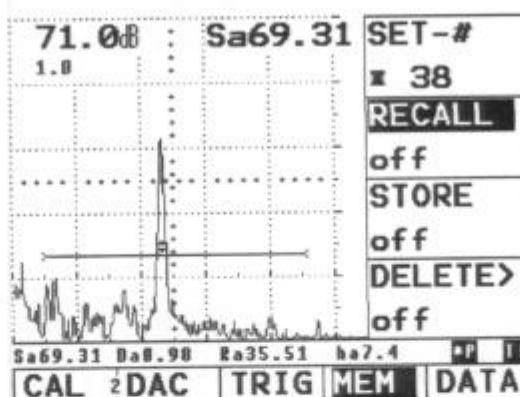


Figura 4.7. Modo S_0 chapa aluminio 1mm.

La figura 4.8. representa la respuesta del modo S_1 en una chapa de aluminio de 1,5mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia de 23° y una velocidad de fase (V) de 5753 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 75 dB a un 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel de ruido 22 % ATP.

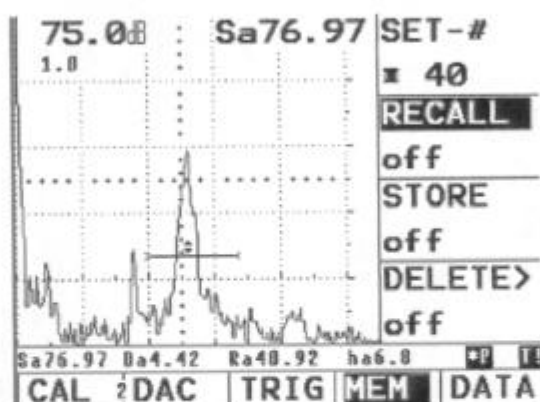


Figura 4.8. Modo S_1 chapa aluminio 1.5mm.

La figura 4.9. representa la respuesta del modo S_0 en una chapa de aluminio de 2mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia de 28° y una velocidad de fase (V) de 4880 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 69 dB a un 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel ruido a un 20 % ATP.

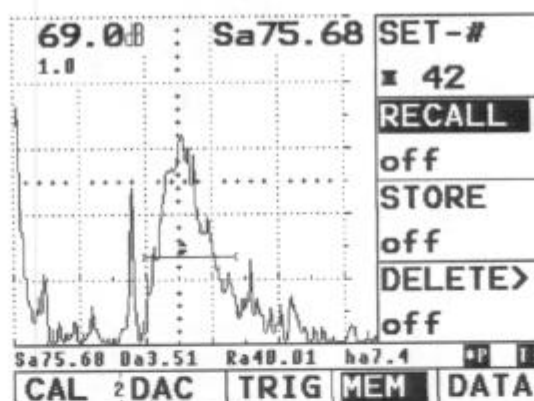


Figura 4.9. Modo S_0 chapa aluminio 2mm.

La figura 4.10. representa la respuesta del modo S_0 de la muestra de una chapa de aluminio de 3mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia de 34° y una velocidad de fase (V) de 4184m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 65 dB a un 40 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel de ruido a un 35% ATP.

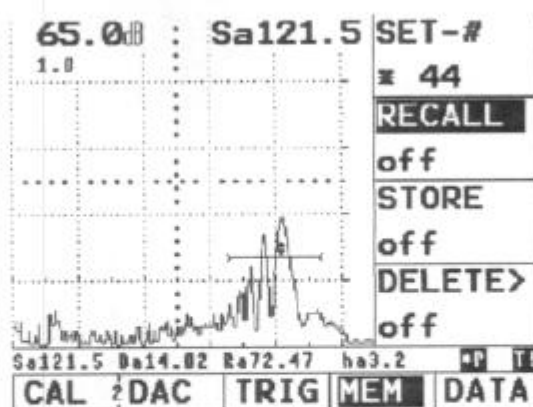


Figura 4.10. Modo S_0 chapa aluminio 3mm.

La figura 4.11 representa la respuesta del modo S_1 en una chapa de aluminio de 3mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia de 24° y una velocidad de fase (V) de 6247 m/s. El eco presenta en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 65 dB a un 40 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel ruido a un 20 % ATP.

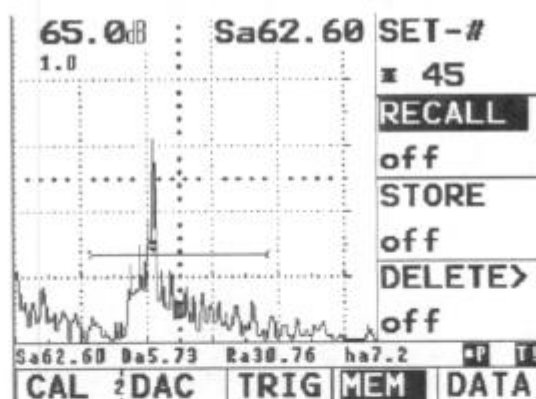


Figura 4.11. Modo S_1 chapa aluminio 3mm.

4.1.1.3 Excitación del modo Asimétricos A_0 a 2.25MHZ.

La figura 4.12. representa la respuesta del modo A_0 en una chapa de aluminio de 1mm de espesor con un transductor de 2.25 MHz, con un ángulo de incidencia de 67° y una velocidad de fase (V) de 2542 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo

muestra una sensibilidad 68 dB a un 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido y un nivel de ruido 10 % ATP.

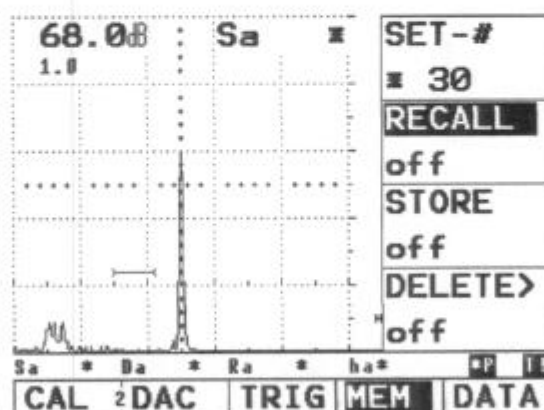


Figura 4.12. Modo A₀ chapa aluminio 1mm.

Las figura 4.13. representa la respuesta del modo A₀ en una chapa de aluminio de 1.5mm de espesor con un transductor de 2,25 MHZ, con un ángulo de incidencia de 60°, y una velocidad de fase (V) de 2701 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 77dB a un 55 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido y un nivel de ruido a un 10 % ATP.

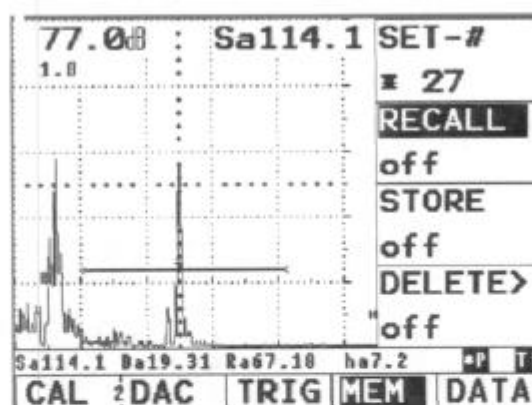


Figura 4.13. Modo A₀ chapa aluminio1.5mm.

La figura 4.14 representa la respuesta del modo A₀ en una chapa de aluminio de 2mm de espesor con un transductor de 2.25 MHZ, con un ángulo de incidencia 56° y una velocidad de fase (V) de 2857 m/s. EL eco tiene una la resolución con 72dB a un 55 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido.

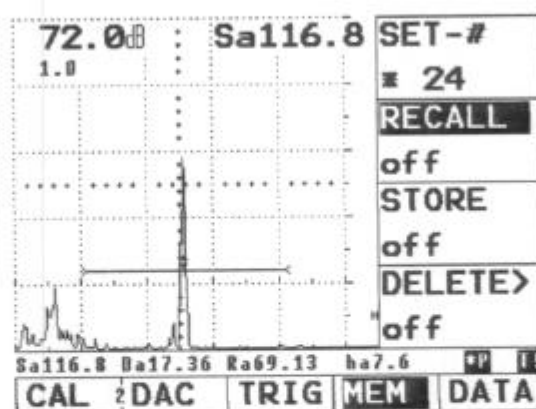


Fig 4.14 modo A_0 chapa aluminio 2mm.

4.1.1.4 Excitación del modo Simétrico S_0 a 2.25MHZ.

La figura 4.15 representa la respuesta del modo S_0 en una chapa de aluminio de 1mm de espesor con un transductor de 2,25 MHZ, con un ángulo de incidencia de 30° y una velocidad de fase (V) de 4680 m/s. EL eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 68dB a un 43 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho.

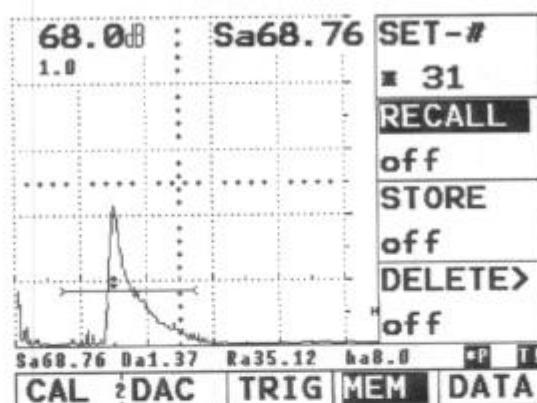


Figura 4.15. Modo S_0 chapa aluminio 1mm.

Las figura 4.16 representa la respuesta del modo S_0 en una chapa de aluminio de 3mm de espesor con un transductor de 2,25 MHZ, con un ángulo de incidencia de 51° y una velocidad de fase (V) de 3011 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 75dB a un 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho.

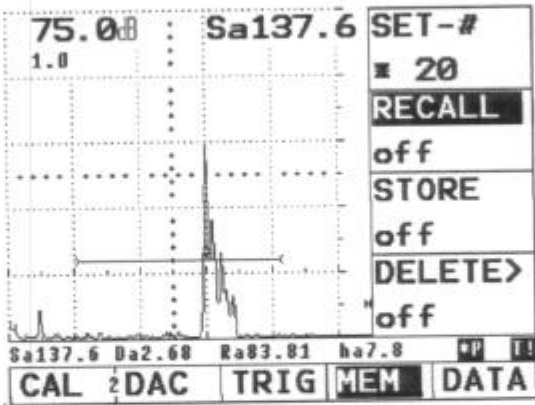


Figura 4.16. Modo S_0 chapa aluminio 3mm

La figura 4.17 representa la respuesta del modo S_1 en una chapa de aluminio de 3mm de espesor con un transductor de 2,25 MHz, con un ángulo de incidencia de 28° y una velocidad de fase (V) de 4984 m/s. El eco presenta en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 79dB a un 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho.

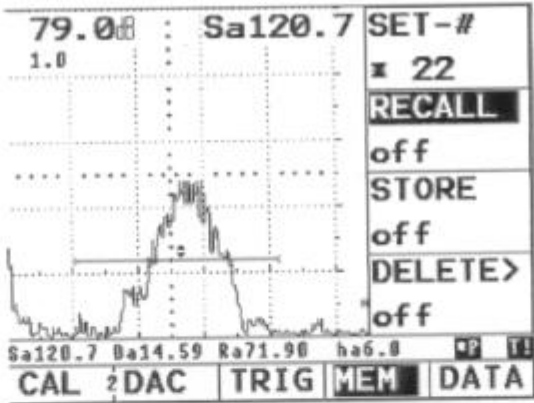


Figura 4.17. Modo S_1 chapa aluminio 3mm.

Las figura 4.18 representa la respuesta del modo S_2 en una chapa de aluminio de 3mm de espesor con un transductor de 2,25 MHz, con un ángulo de incidencia de 18° y una velocidad de fase (V) de 7572 m/s. El eco presenta en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 82dB a un 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel de ruido a un 20% ATP.

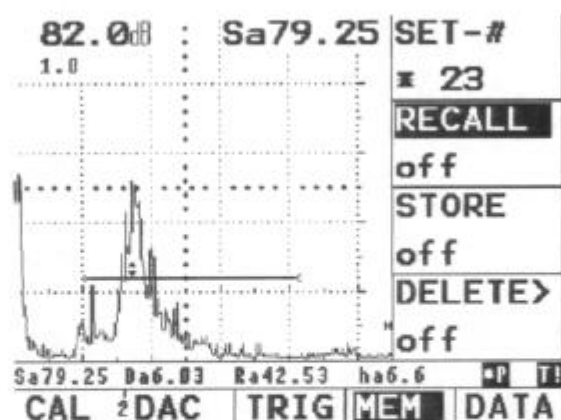


Figura 4.18. Modo S_2 chapa aluminio 3mm.

4.1.1.5 Excitación del modo Asimétrico A. a 5MHZ.

La figura 4.19. representa la respuesta del modo A_0 en una chapa de aluminio de 1mm de espesor con un transductor de 5 MHZ, con un ángulo de incidencia 68° y una velocidad de fase (V) de 2523 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 93dB a un 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido con ruido 10 % ATP.

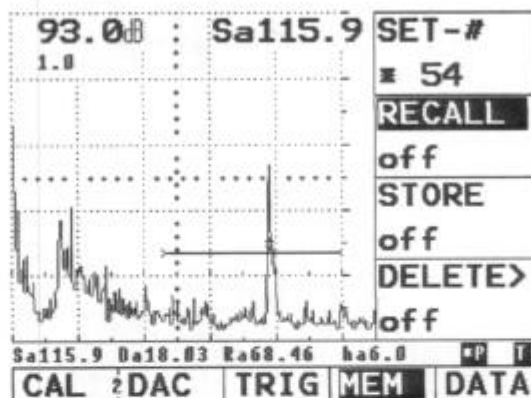


Figura 4.19. Modo A_0 chapa aluminio 1mm.

4.1.1.6 Excitación del modo simétrico S. a 5 MHZ.

Las figura 4.20. representa la respuesta del modo S_0 en una chapa de aluminio de 1mm de espesor con un transductor de 5 MHZ, con un ángulo de incidencia de 54° y una velocidad de fase (V) de 2892 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo

muestra una sensibilidad 80dB a un 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido.

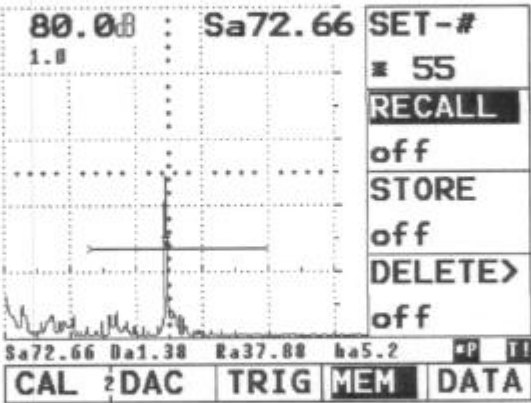


Figura 4.21. Modo S₀ chapa aluminio 1mm.

La figura 4.22. representa la respuesta del modo S₁ en una chapa de aluminio de 1mm de espesor con un transductor de 5 MHZ, con un ángulo de incidencia 24° y una velocidad de fase (V) de 5753 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 85dB a un 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho.

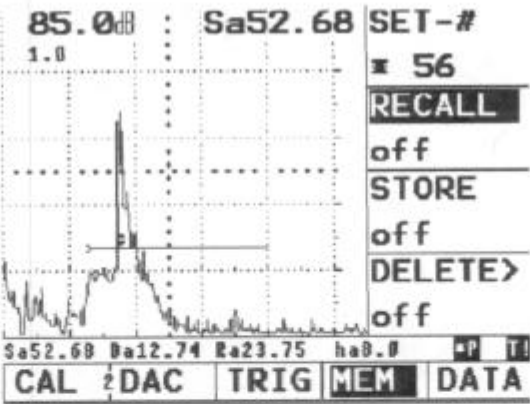


Figura 4.22. Modo S₁ chapa aluminio 1mm.

Modos A y S de ondas de Lamb en chapa de aluminio. Pulso – eco por contacto.

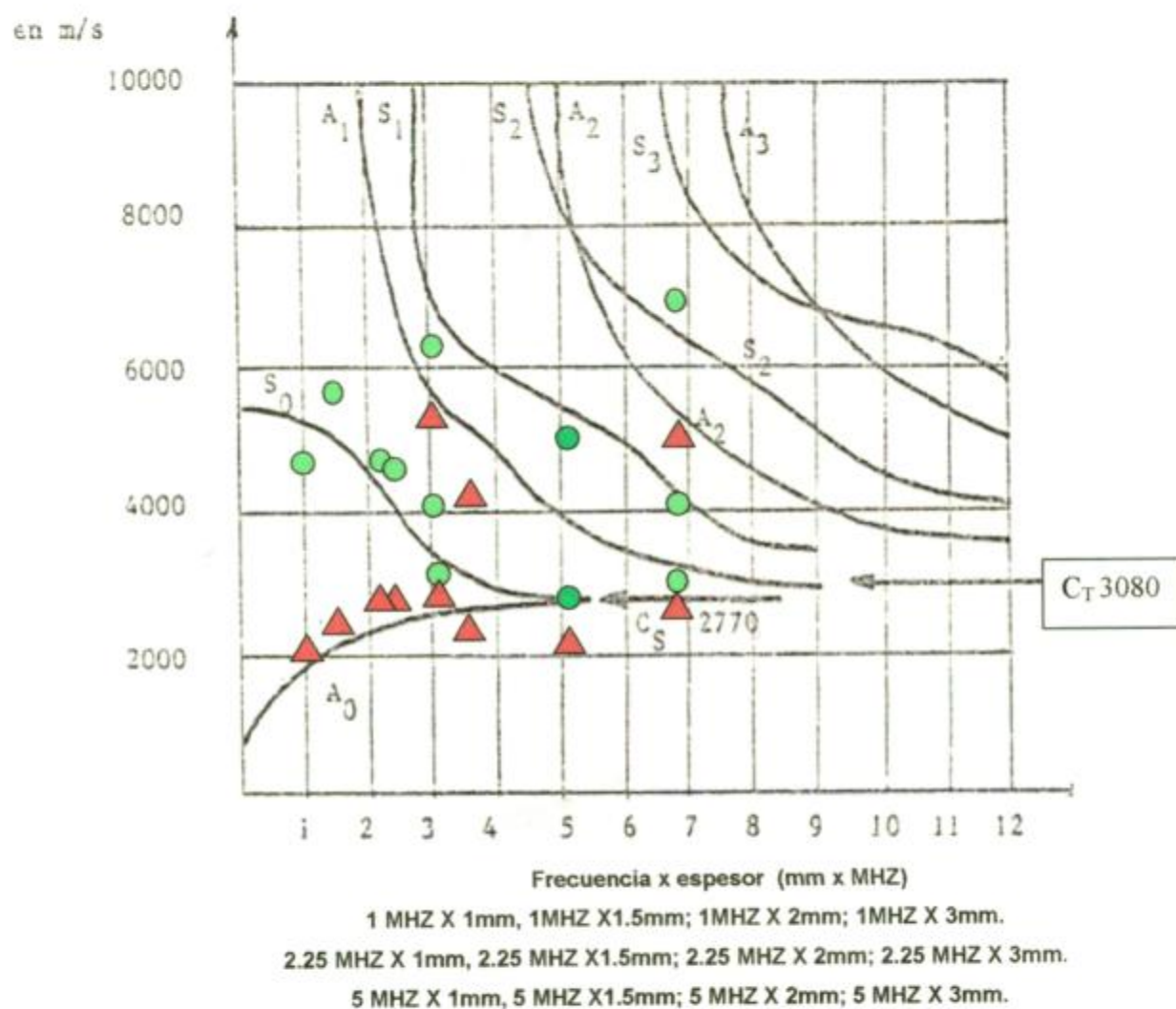


Figura 22a. Curva de dispersión de aluminio.

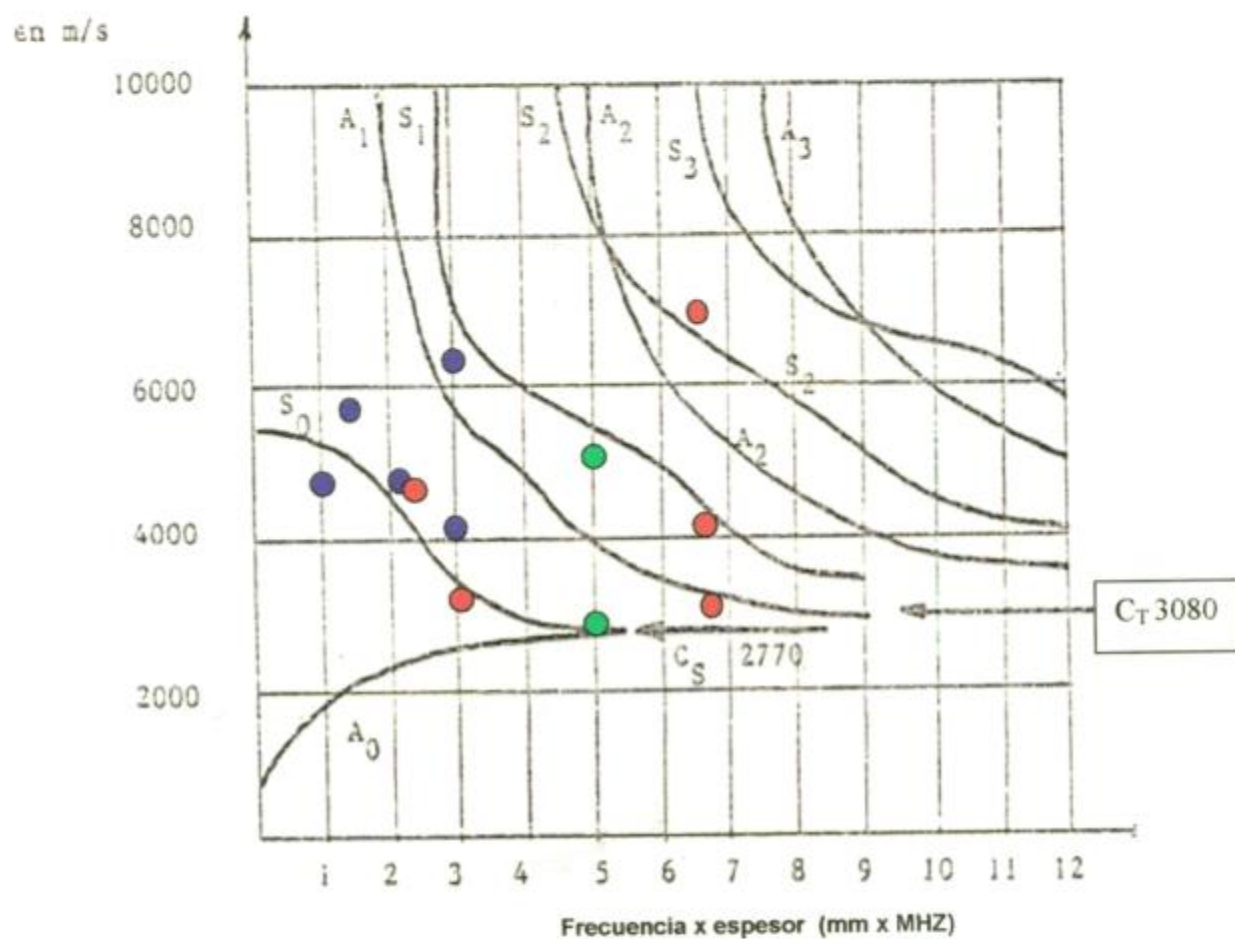
Frecuencia 1MHZ.

Frecuencia 2.25 MHZ.

Frecuencia 5 MHZ.

- Modos Simétricos.
- ▲ Modos Asimétricos.

Modos S de ondas de Lamb en chapa de aluminio.

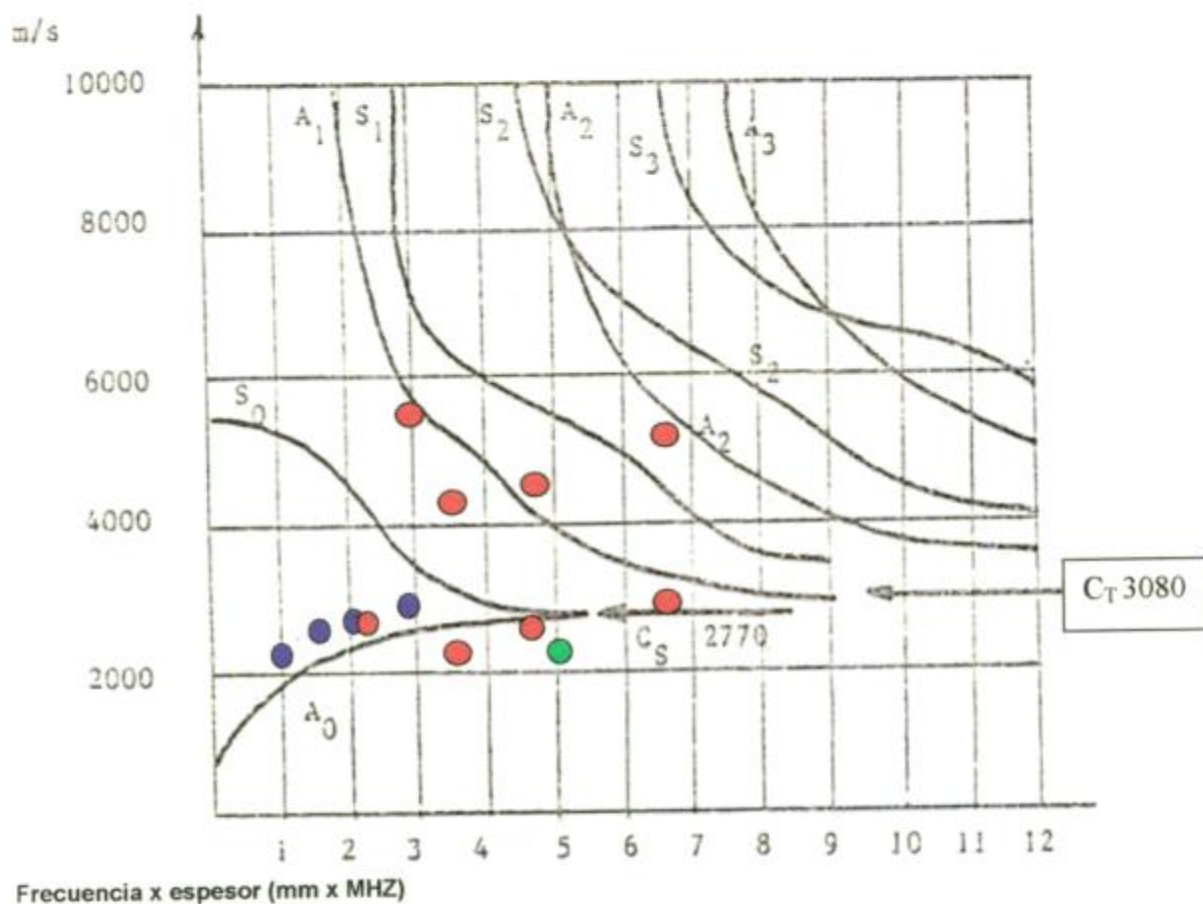


1 MHz X 1mm, 1MHz X1.5mm; 1MHz X 2mm; 1MHz X 3mm.
 2.25 MHz X 1mm, 2.25 MHz X1.5mm; 2.25 MHz X 2mm; 2.25 MHz X 3mm.
 5 MHz X 1mm, 5 MHz X1.5mm; 5 MHz X 2mm; 5 MHz X 3mm.

Figura 22b. Curva de dispersión de aluminio: Modos simétricos.

- Frecuencia 1MHz.
- Frecuencia 2.25 MHz.
- Frecuencia 5 MHz.

Modos A de ondas de Lamb en chapa de aluminio.



1 MHz X 1mm, 1MHz X1.5mm; 1MHz X 2mm; 1MHz X 3mm.
 2.25 MHz X 1mm, 2.25 MHz X1.5mm; 2.25 MHz X 2mm; 2.25 MHz X 3mm.
 5 MHz X 1mm, 5 MHz X1.5mm; 5 MHz X 2mm; 5 MHz X 3mm.

Figura 22c. Curva de dispersión de aluminio: modos Asimétricos.

- Frecuencia 1MHz.
- Frecuencia 2.25 MHz.
- Frecuencia 5 MHz.

4.1.2 Excitación de los modos simétricos y asimétricos en chapas de acero.

4.1 2.1 Excitación del modo asimétrico A. a 1 MHZ

La figura 4.23. representa la respuesta del modo A_0 en una chapa de acero de 1,25mm de espesor con un transductor de 1 MHZ, con un ángulo de incidencia de 74° y una velocidad de fase (V) de 2434 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 70dB a un 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido y un nivel de ruido a un 5 % ATP.

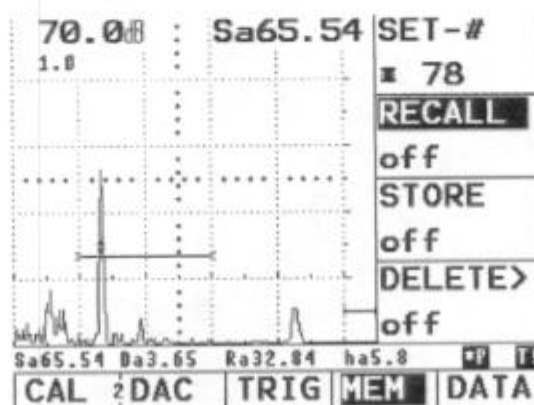


Figura 4.23. Modo A_0 chapa acero 1,25mm.

La figura 4.24. representa la respuesta del modo A_0 en una chapa de acero de 2,2mm de espesor con un transductor de 1 MHZ, con un ángulo de incidencia de 65° y una velocidad de fase (V) de 2582 m/s. El presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 65dB a un 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico definido y un nivel de ruido a un 35 % ATP.

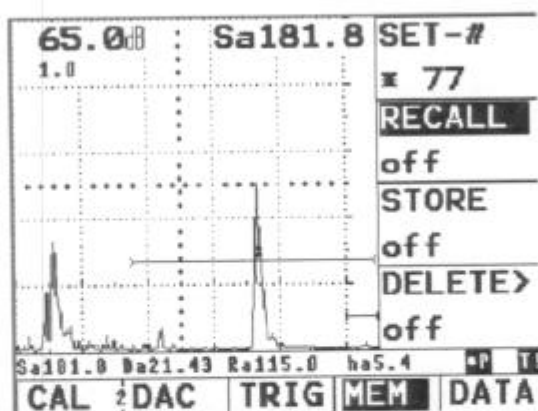


Figura 4.24 modo A_0 chapa acero 2,2mm.

La figura 4.25 representa la respuesta del modo A_0 en una chapa de acero de 3,75mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia a 60° y una velocidad de fase (V) de 2702 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 75dB a un 63 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico definido y un nivel de ruido 45 % ATP.

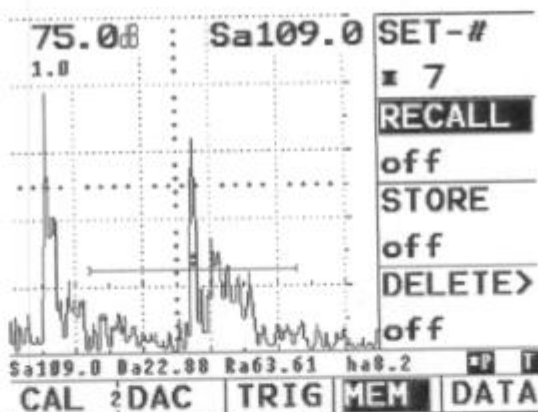


Figura 4.25 modo A_0 chapa acero 3,75mm

4.1.2.2 Excitación del modo asimétrico A. a 2.25 MHZ.

Figura 4.26. representa la respuesta del modo A_0 en una chapa de acero de 1,25mm de espesor con un transductor de 2,25 MHZ, con un ángulo de incidencia de 65° y una velocidad de fase (V) de 2582 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 64dB a un 55 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido angosto.

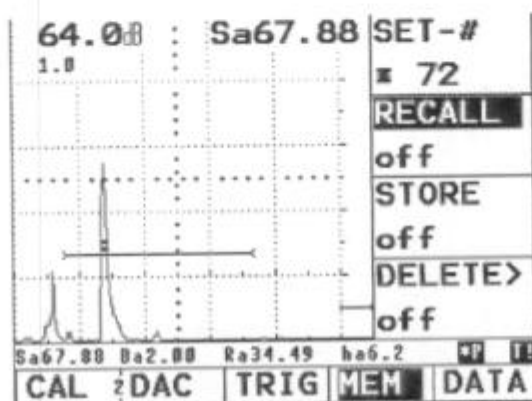


Figura 4.26. Modo A_0 chapa acero 1,25mm.

La figura 4.26. representa la respuesta del modo A_0 en una chapa de acero de 2,2mm de espesor con un transductor de 2,25 MHZ, con un ángulo de incidencia de 57° y una velocidad de fase (V) de 2893 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 64dB a un 55 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico definido.

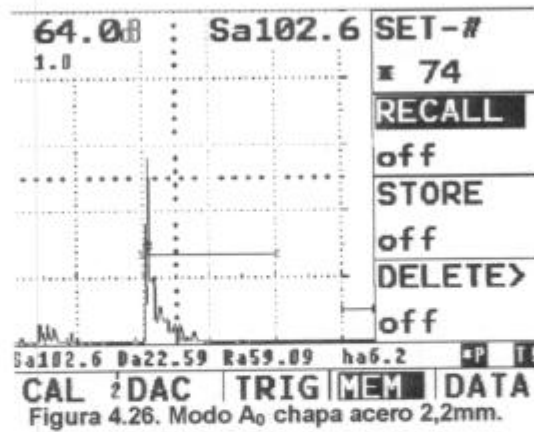


Figura 4.26. Modo A₀ chapa acero 2,2mm.

La figura 4.27 representa la respuesta del modo A₁ en una chapa de acero de 3,75mm de espesor con un transductor de 2,25 MHz, con un ángulo de incidencia de 45° y una velocidad de fase (V) de 3309 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 77dB a un 52 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico definido y un nivel de ruido 45 % ATP.

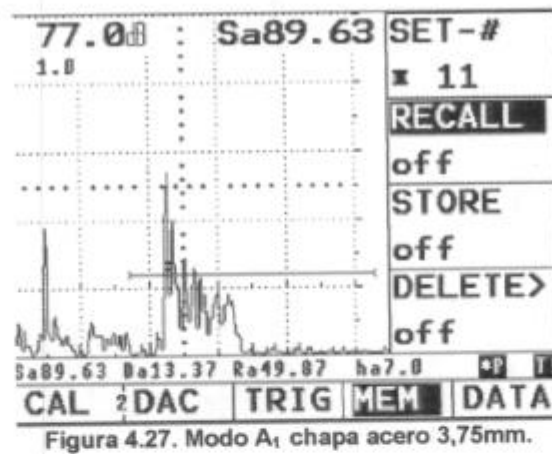


Figura 4.27. Modo A₁ chapa acero 3,75mm.

La figura 4.28 representa la respuesta del modo A₂ de la muestra de una chapa de acero de 3,75mm de espesor con un transductor de 2,25 MHz, con un ángulo de incidencia de 35° y una velocidad de fase (V) de 4080 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 92dB a un 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho, y un nivel de ruido 10 % ATP.

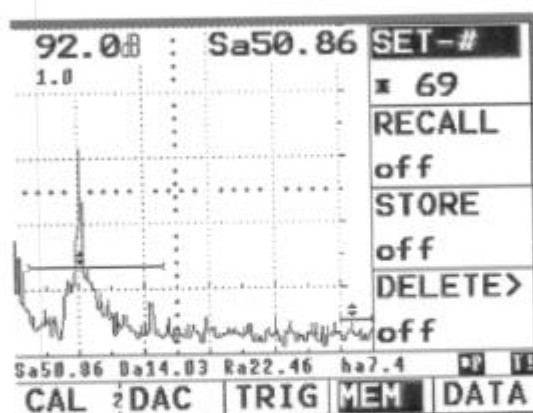


Figura 4.28. Modo A₂ chapa acero 3,75mm.

4.1.2.3 Excitación del modo simétrico S. a 1 MHz .

La figura 4.29. representa la respuesta del modo S₀ en una chapa de acero de 1,25mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia de 30° y una velocidad de fase (V) de 4680 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 81dB a un 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico con baja relación señal ruido y un nivel de ruido 25% ATP.

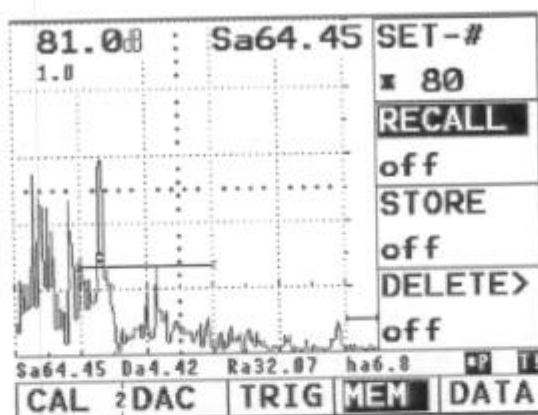


Figura 4.29. Modo S₀ chapa acero 1,25mm.

La figura 4.30 representa la respuesta del modo S₀ en una chapa de acero de 2,2mm de espesor con un transductor de 1MHz, con un ángulo de incidencia 26° y una velocidad de fase (V) de 5338 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 70dB a un 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido y un nivel de ruido 8% ATAP.

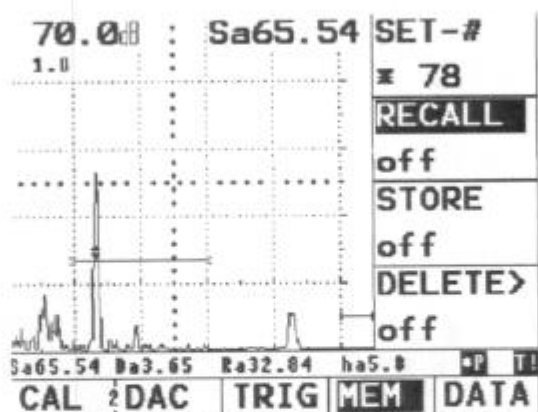


Figura 4.30. Modo S_0 chapa acero 2,2mm.

La figura 4.31 representa la respuesta del modo S_0 en una chapa de acero de 3,75mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia de 45° y una velocidad de fase (V) de 3309 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 75dB a un 40 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel de ruido 23 % ATP.

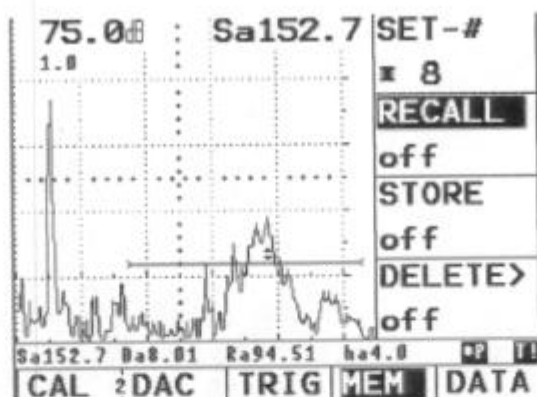


Figura 4.31. Modo S_0 chapa acero 3,75mm.

La figura 4.32. representa la respuesta del modo S_1 en una chapa de acero de 3,75mm de espesor con un transductor de 1 MHz, con un ángulo de incidencia de 23° y una velocidad de fase (V) de 5988.7m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 80dB a un 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel de ruido 35 % ATP.

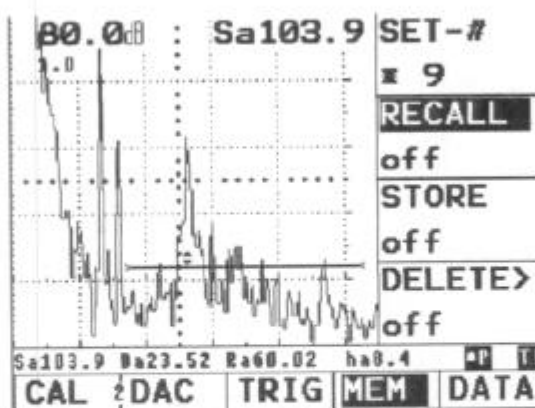


Figura 4.32. Modo S_1 chapa acero 3,75mm.

4.1.2.4 Excitación del modo simétrico S_0 a 2.25 MHZ.

La figura 4.33 representa la respuesta del modo S_0 en una chapa de acero de 1,25mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 23° y una velocidad de fase (V) de 5988.8 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 72dB a un 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico definido y un nivel de ruido 5 % ATP.

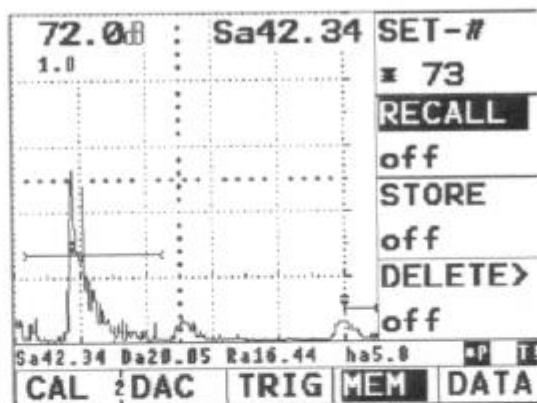


Figura 4.33. Modo S_0 chapa acero 1.25mm.

La figura 4.34. representa la respuesta del modo S_0 en una chapa de acero de 2,2mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 54° con velocidad de fase (V) de 2892 m/s. La señal que el eco presenta en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 64dB a un 55 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico angosto.

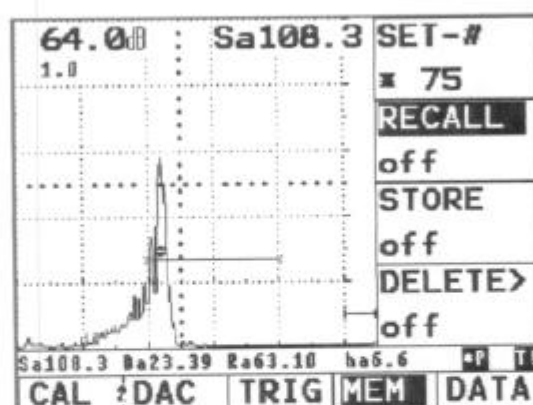


Figura 4.34. Modo S_0 chapa acero 2,2mm.

4.1.2.5 Excitación del modo asimétrico A_0 a 5 MHz .

La figura 4.35. representa la respuesta del modo A_0 en una chapa de acero de 1,25mm de espesor con un transductor de 5MHZ, con un ángulo de incidencia 55° y una velocidad de fase (V) de 2856 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 92dB a un 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido.

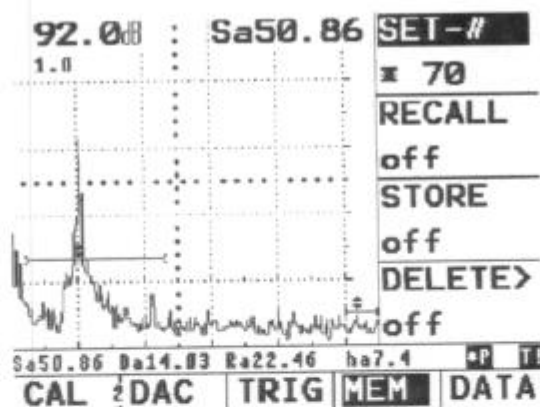


Figura 4.35. Modo A_0 chapa acero 1,25mm.

4.1.2.6 Excitación del modo Simétrico S_2 a 5MHZ.

Figura 4.36. representa la respuesta del modo S_2 de la muestra de una chapa de acero de 1,25mm de espesor con un transductor de 5MHZ, con un ángulo de incidencia 20° y una velocidad de fase (V) de 6841 m/s. El eco presenta en la grafica amplitud

tiempo muestra una sensibilidad 92dB a un 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico definido, y un nivel de ruido 10 % ATP.

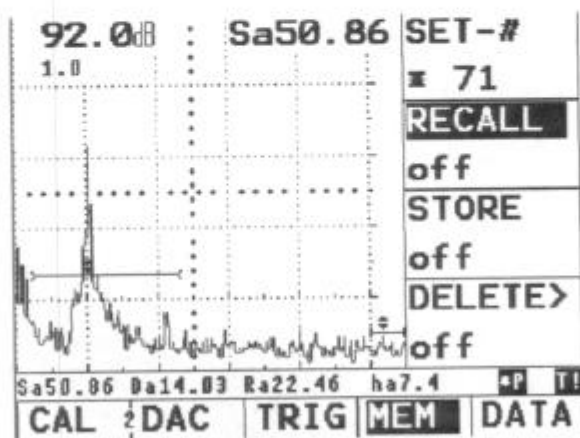


Figura 4.35. Modo S₂ chapa acero 1,25mm

Modos A y S de ondas de Lamb en chapa de acero. Pulso – eco por contacto.

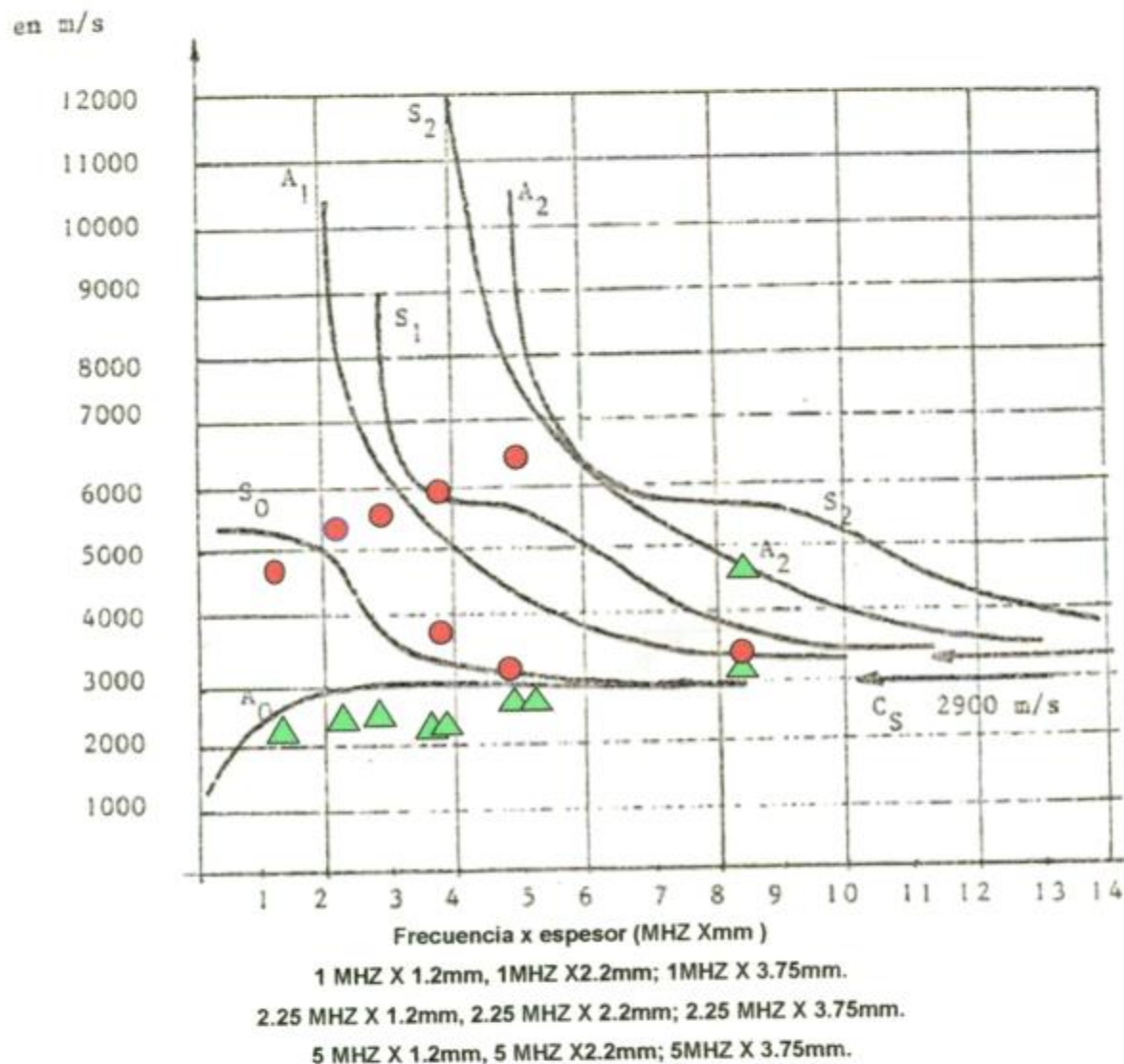


Figura 4.35a. Curva de dispersión de acero

Frecuencia 1MHZ.

Frecuencia 2.25MHZ.

Frecuencia 5MHZ.

- Modos Simétricos.
- ▲ Modos Asimétricos.

Modos A de ondas de Lamb en chapa de acero.

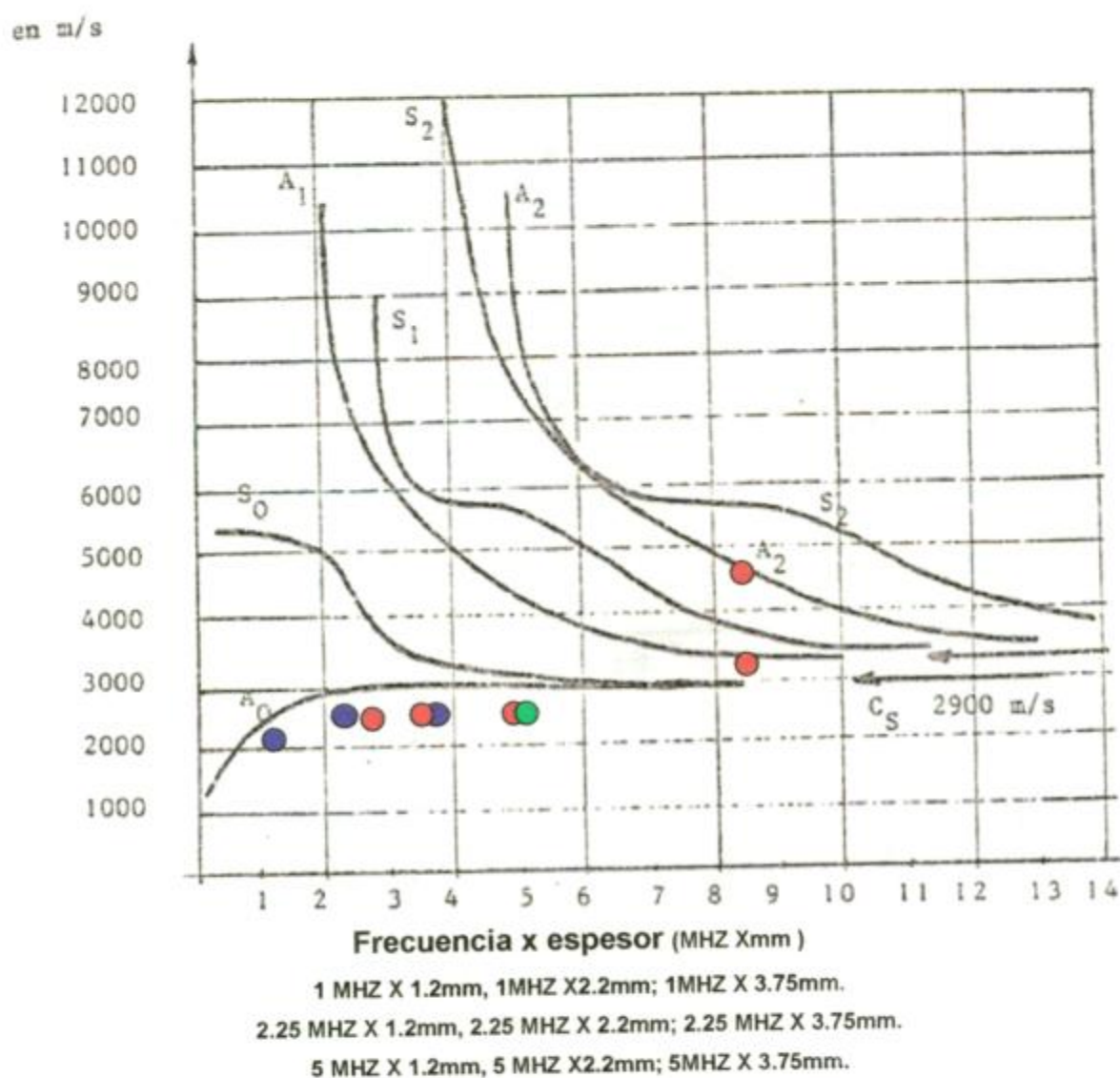


Figura 4.35b. Curva de dispersión de acero: modos asimétricos.

- Frecuencia 1MHZ.
- Frecuencia 2.25MHZ.
- Frecuencia 5MHZ.

Modos S de ondas de Lamb en chapa de acero.

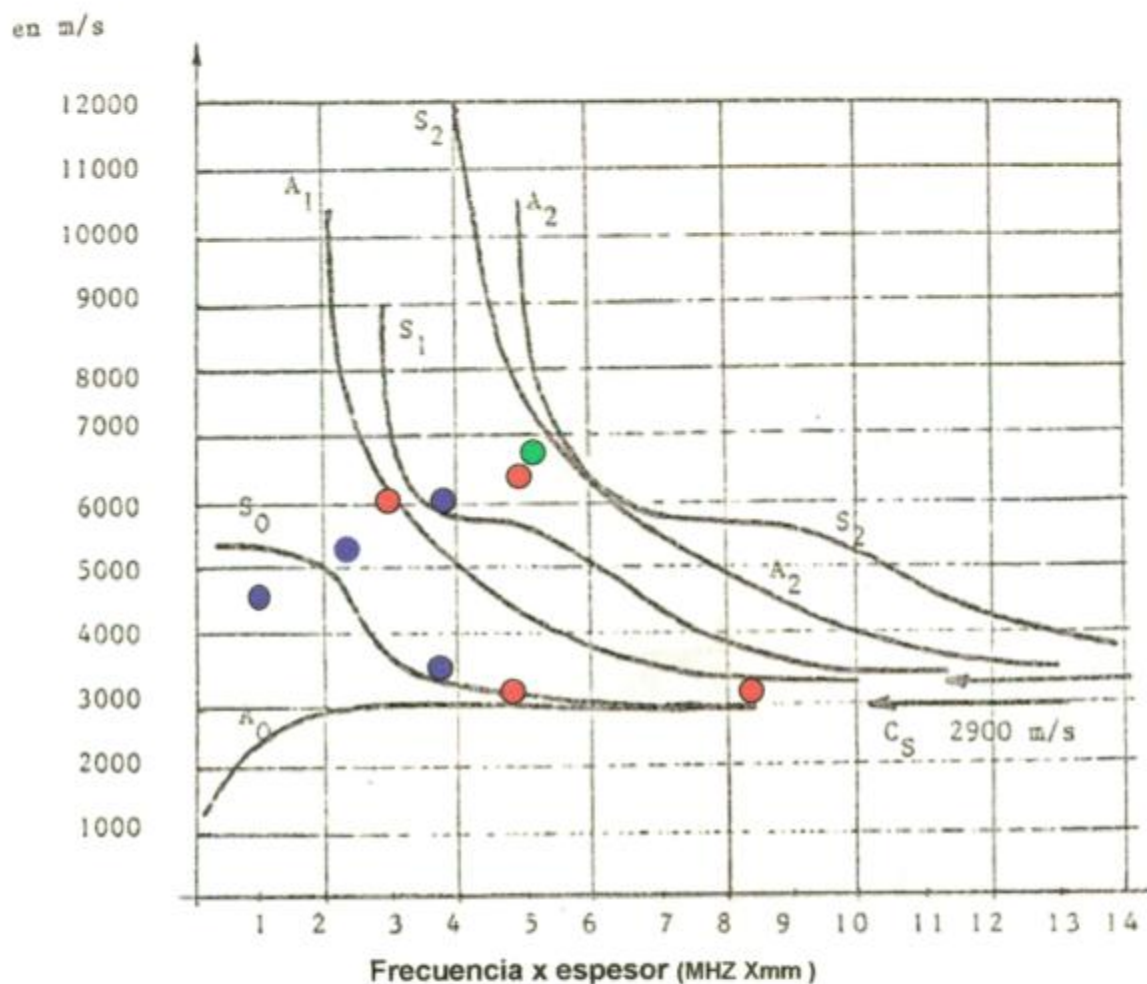


Figura 4.35c. Curva de dispersión de acero: modos simétricos.

- Frecuencia 1MHz.
- Frecuencia 2.25MHz.
- Frecuencia 5MHz.

4.2 Selección de modo pulso-eco por inmersión.

Los modos de onda de Lamb tanto simétrico como asimétrico pueden ser generados en chapas con transductores de inmersión. El método pulso-eco por inmersión esta compuesto por el transductor de emisión y recepción, emitiendo un haz ultrasónico en agua a una altura de 20mm que intercepta la superficie de la chapa de aluminio o acero. El ángulo generado por el haz incidente se ajustara manualmente por un vástago mostrado en la figura (3.17) y (4.37) de radio 198mm que se desplazara indicando la distancia recorrida en la barra milimetrada mostrada en la figura (3.18) de un radio de 198mm. Se utilizo la función trigonométrica Tangente como se observa en la tabla 4.1, para determinar el ángulo del haz incidente. Este ángulo se ajustara en función de la velocidad de propagación en el agua (V_c) 1480 m/s y la velocidad de fase V de un modo de onda de Lamb en particular, como se mostró en la ecuación 10 $V=1480/\text{sena}$

En la selección de modos simétricos y asimétricos se utilizaran las curvas teóricas de dispersión 4.41a, 4.41b, 4.49a y 4.49b (aluminio y acero), estas curvas nos darán la información de la ubicación y propagación de los modos de onda de Lamb en particular.

Se utilizaron chapas con espesor de 2mm y 3mm de aluminio y 1.2mm, 2.2mm, 3.75mm de acero con frecuencias de 2,25 MHZ Y 5 MHZ. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes figuras que represan Amplitud y tiempo, su medición se obtuvo del borde la chapa.

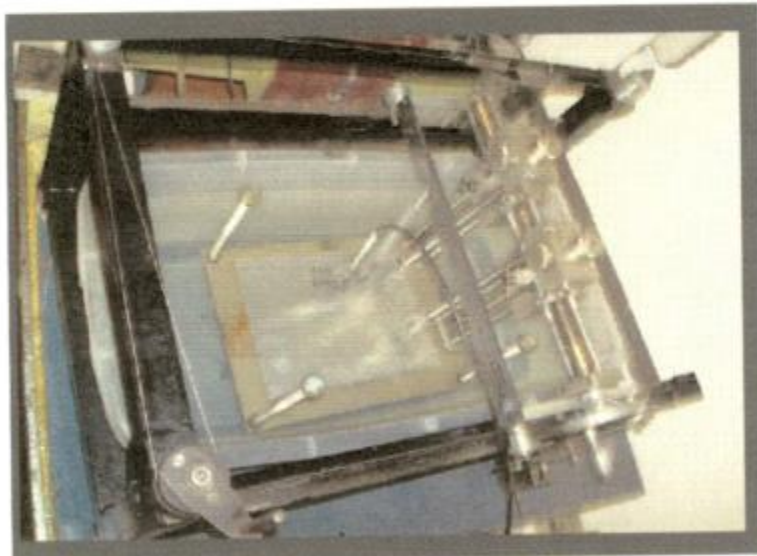


Figura 4.36. Método de inmersión

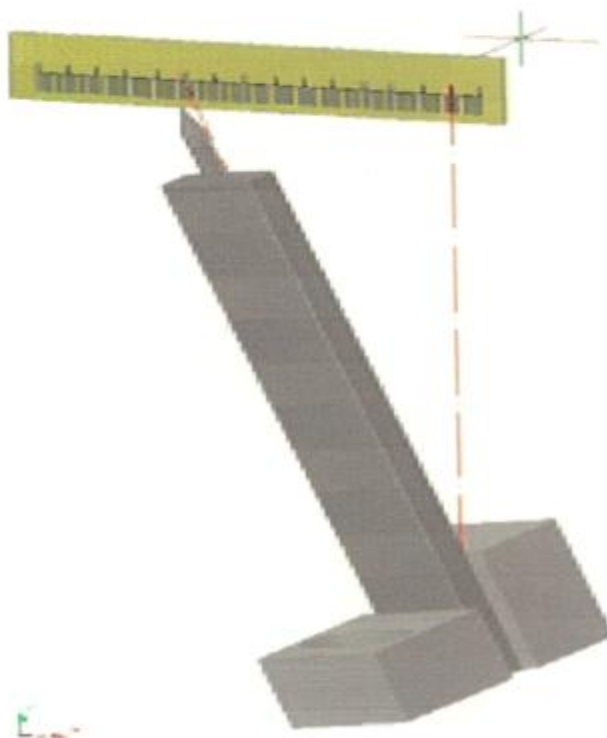


Figura 4.37. Indicador de ángulo

Angulo(Grados)	Angulo(rad)	Tg(ANG)*R (mm)	Tg(ANG)*R (cm)
1,00	0,017	3,456	0,345
2,00	0,034	6,914	0,691
3,00	0,052	10,377	1,037
4,00	0,069	13,846	1,384
5,00	0,087	17,323	1,732
6,00	0,104	20,811	2,081
7,00	0,122	24,311	2,431
8,00	0,139	27,827	2,782
9,00	0,157	31,360	3,136
10,00	0,174	34,913	3,491
11,00	0,191	38,487	3,848
12,00	0,209	42,086	4,208
13,00	0,226	45,712	4,571
14,00	0,244	49,367	4,936
15,00	0,261	53,054	5,305
16,00	0,279	56,776	5,677
17,00	0,296	60,535	6,053
18,00	0,314	64,334	6,433
19,00	0,331	68,177	6,817
20,00	0,349	72,066	7,206
21,00	0,366	76,005	7,600
22,00	0,383	79,997	7,999
23,00	0,401	84,046	8,404
24,00	0,418	88,155	8,815
25,00	0,436	92,329	9,232
26,00	0,453	96,571	9,657
27,00	0,471	100,886	10,088
28,00	0,488	105,278	10,527
29,00	0,506	109,753	10,975
30,00	0,523	114,315	11,431
31,00	0,541	118,970	11,897
32,00	0,558	123,724	12,372
33,00	0,575	128,583	12,858
34,00	0,593	133,553	13,355
35,00	0,610	138,641	13,864

Tabla 4.1. Ángulos de incidencia ultrasónica por inmersión, utilizando un radio 198mm.

4.2.1 Excitación de los modos simétricos y asimétricos en chapas de aluminio.

4.2.1.1 Excitación de los modos asimétricos A₁ a 2.25 MHZ.

La figura 4.38 representa la respuesta del modo A₁ en una chapa de aluminio de 2mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 25.5° y una velocidad de fase (V) de 3252 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 62dB a un 80% de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico no definido y un nivel de ruido 58 % ATP.

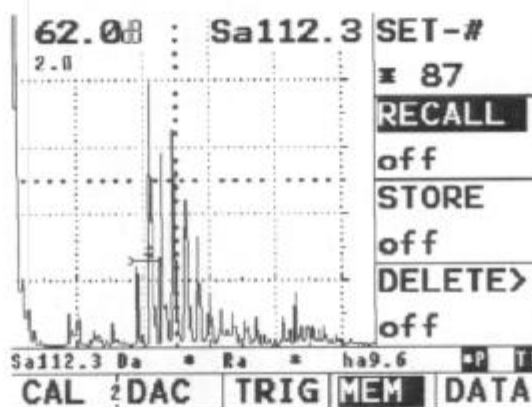


Figura 4.38. Modo A₁ chapa aluminio 2mm.

La figura 4.39 representa la respuesta del modo A₁ en una chapa de aluminio de 3mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 26° y una velocidad de fase (V) de 3193.6 m/s. EL eco presenta en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 68dB a un 96 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico definido y un nivel de ruido 80 % ATP.

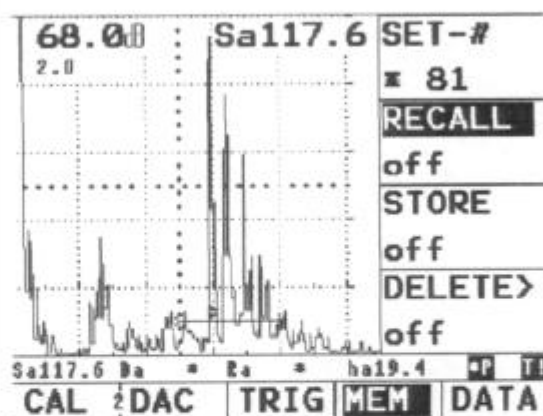


Figura 4.39. Modo A₁ chapa aluminio 3mm.

4.2.1.2 Excitación de los modos Simétricos S_a a 2.25 MHZ.

La figura 4.40 representa la respuesta del modo S₁ en una chapa de aluminio de 2mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 18° y una velocidad de fase (V) de 4530 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 82dB a un 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel de ruido 100 % ATP.

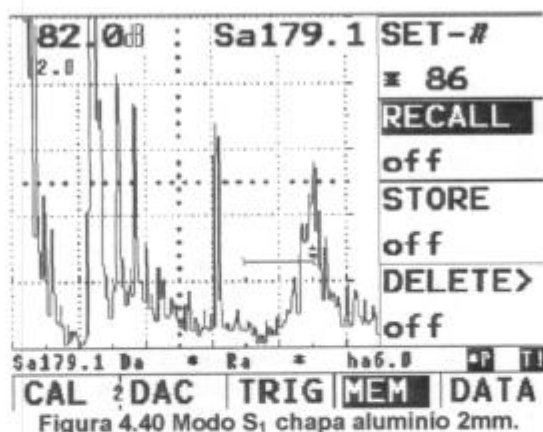


Figura 4.40 Modo S₁ chapa aluminio 2mm.

La figura 4.41 representa la respuesta del modo S₂ en una chapa de aluminio de 2mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia a13° y una velocidad de fase (V) de 6223 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 80dB a un 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico definido y un nivel de ruido 100 % ATP.

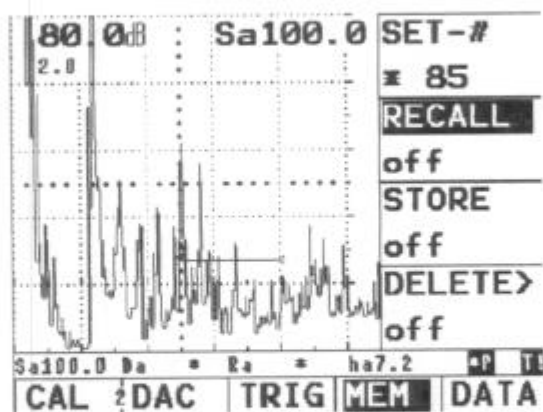


Figura 4.41 Modo S_2 chapa aluminio 2mm.

Modos S y A de ondas de Lamb en chapa de Aluminio. Pulso-eco por inmersión.

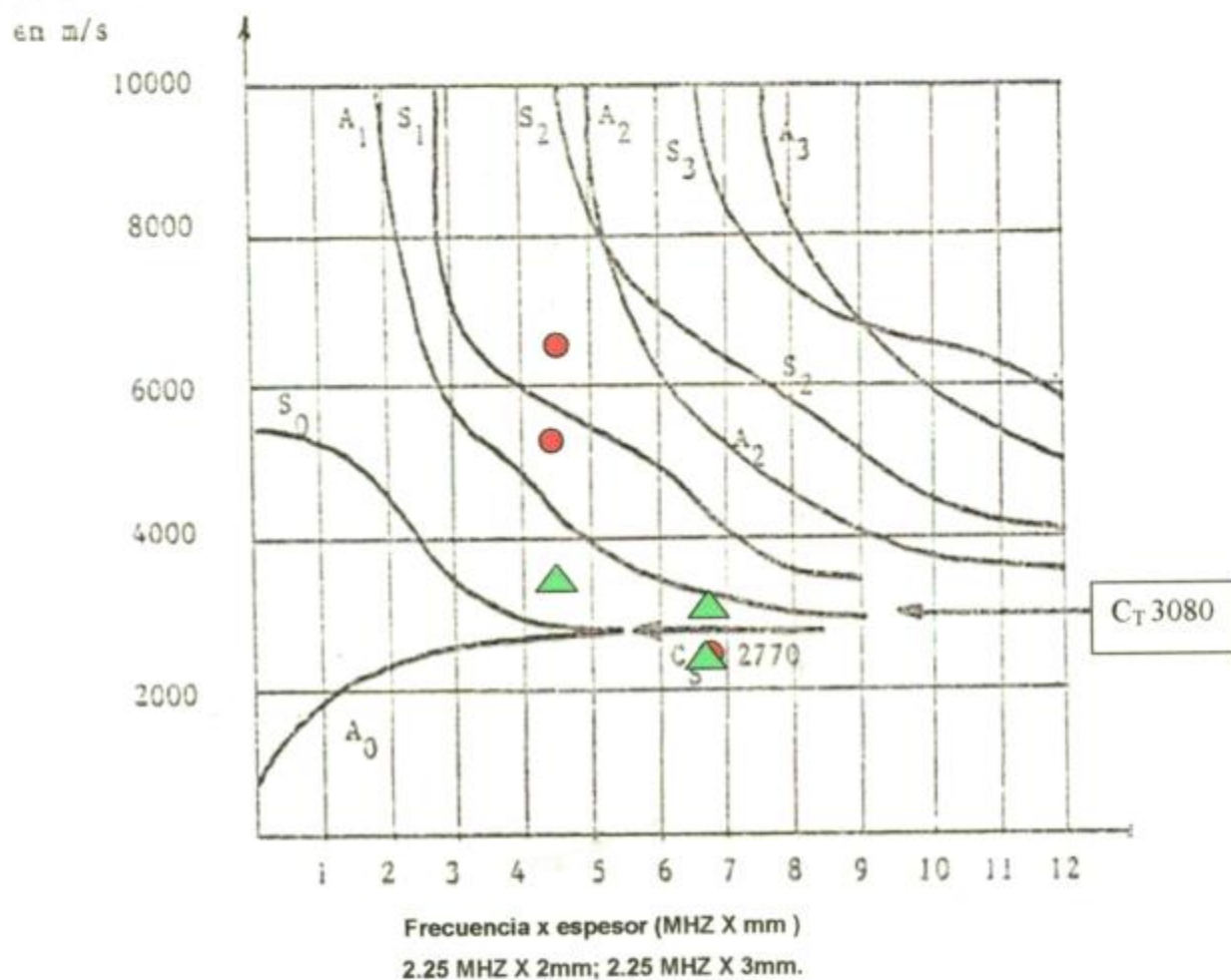


Figura 4.41a. Curva de dispersión de aluminio

Frecuencia 2.25 MHZ.

- Simétrico
- ▲ Asimétrico

Modos S de ondas de Lamb en chapa de Aluminio.

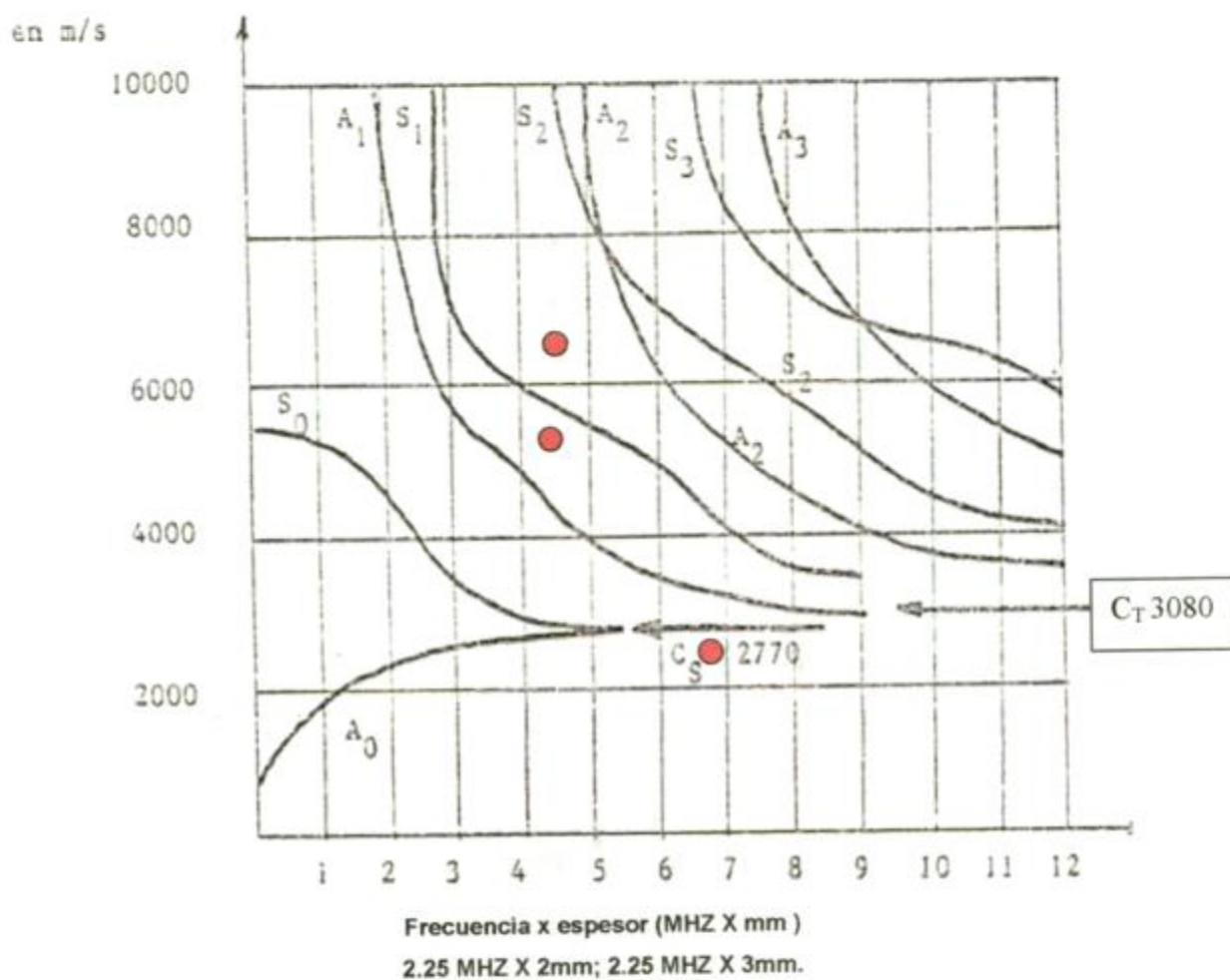


Figura 4.41b. Curva de dispersión de aluminio: Modos simetricos.

● Frecuencia 2.25 MHZ.

Modos A de ondas de Lamb en chapa de Aluminio.

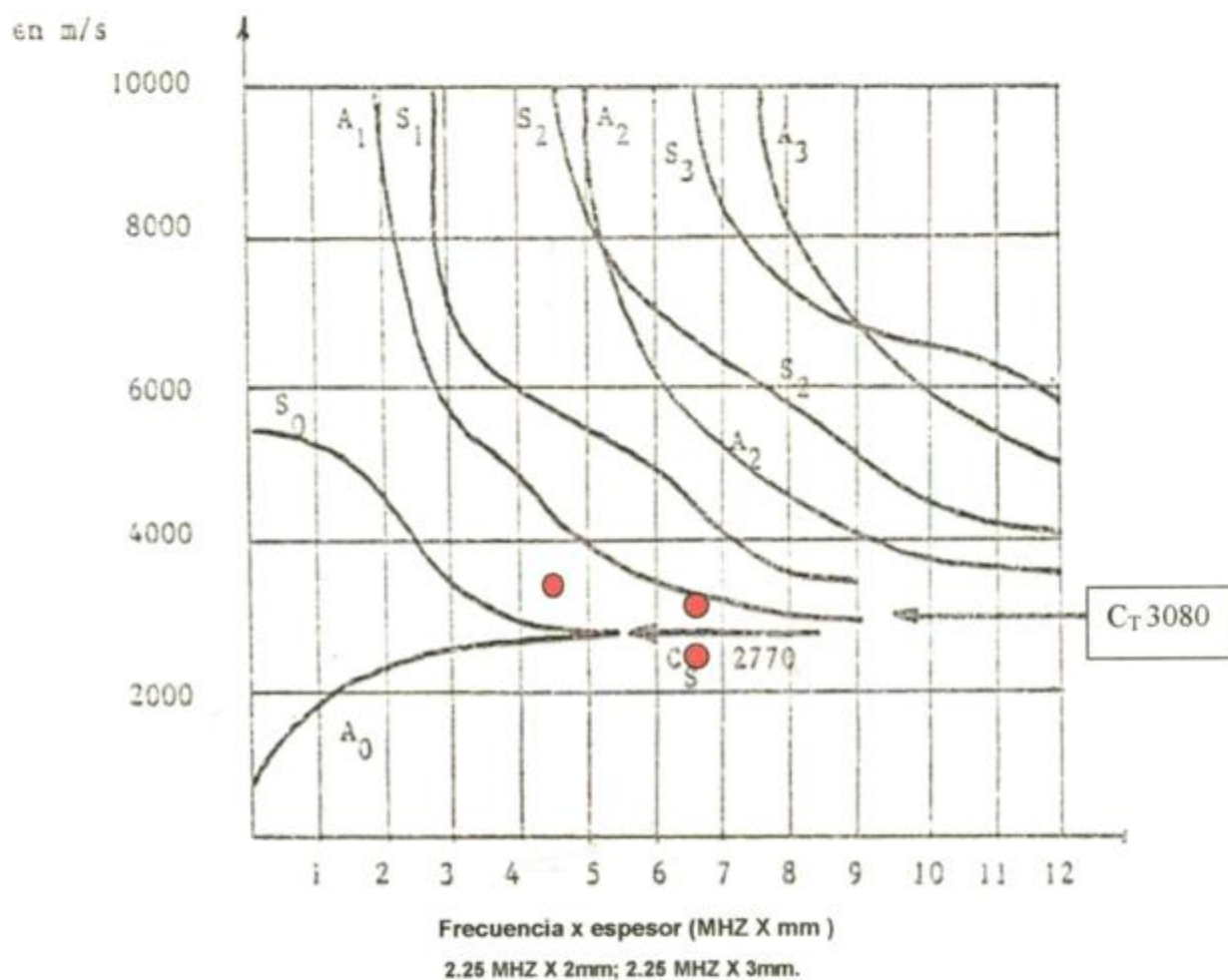


Figura 4.41c. Curva de dispersión de aluminio : Modos asimetricos.

● Frecuencia 2.25 MHZ.

4.2.2 Excitación de los modos simétricos y asimétricos en chapas de acero.

4.2.2.1 Excitación de los modos asimétrico A₀ a 2.25MHZ.

La figura 4.42 representa la respuesta del modo A₀ en una chapa de acero de 1.25mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 35.5° y una velocidad de fase (V) de 2411 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 64dB a un 62 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido y nivel de ruido 10 % de ATP.

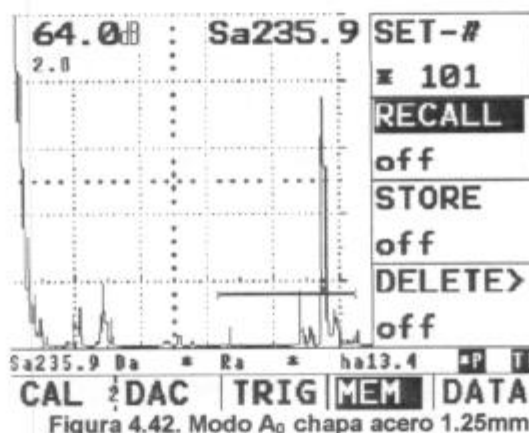


Figura 4.42. Modo A₀ chapa acero 1.25mm

La figura 4.43 representa la respuesta del modo A₀ en una chapa de acero de 2.2mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 29° y una velocidad de fase (V) de 2888 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 66dB a un 80 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido y un nivel de ruido 10 % ATP.

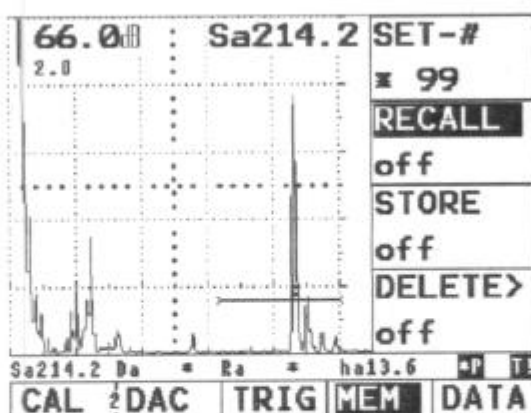


Figura 4.43. Modo A₀ chapa acero 2,2mm.

La figura 4.44 representa la respuesta del modo A₁ en una chapa de acero de 2,2mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 18° y una velocidad de fase (V) de 4530.5 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 66dB a un 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico definido y un nivel de ruido con ruido 50 % ATP.

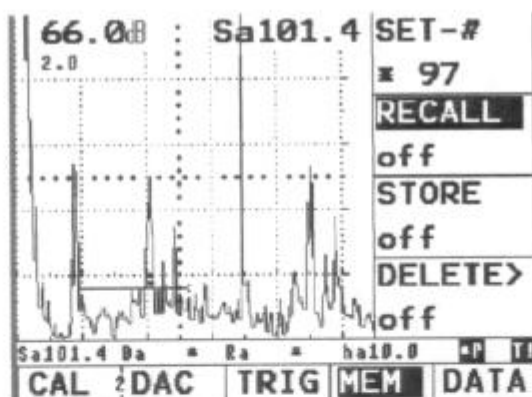


Figura 4.44. Modo A₁ chapa acero 2,2mm

La figura 4.45 representa la respuesta del modo A₁ en una chapa de acero de 3,75mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 27° y una velocidad de fase (V) de 3083.76 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 72dB con 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico definido y un nivel de ruido 100 % ATP.

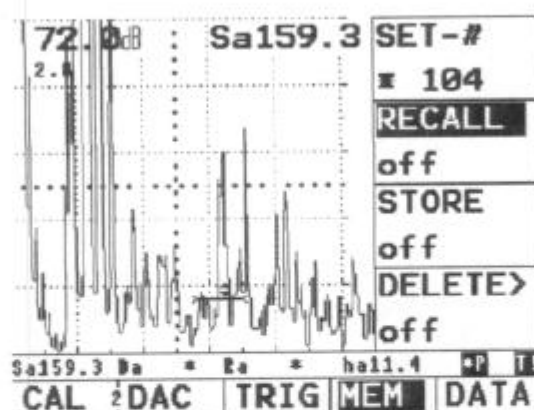


Figura 4.45. Modo A₁ chapa acero 3,75mm

4.2.2.2 Excitación de los modos simétrico S₁ a 2.25MHZ.

La figura 4.46 representa la respuesta del modo S₁ en una chapa de acero de 1,25mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia a 14° y una velocidad de fase (V) 5787 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 62dB con 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico definido y un nivel de ruido 100% ATP.

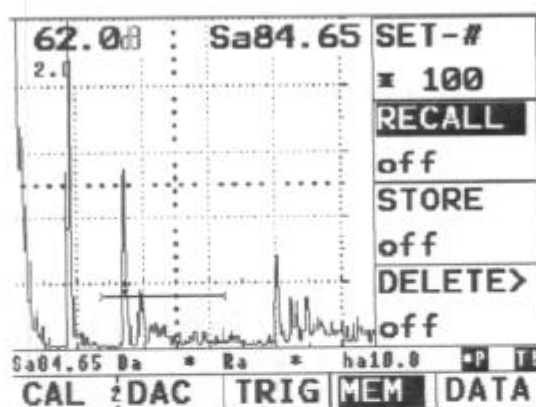


Figura 4.46. Modo S₁ chapa acero 1.25mm.

La figura 4.47 representa del modo S₁ en una chapa de acero de 2,2mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 13° y una velocidad de fase (V) de 6223 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 62dB con 60 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel de ruido 100% ATP.

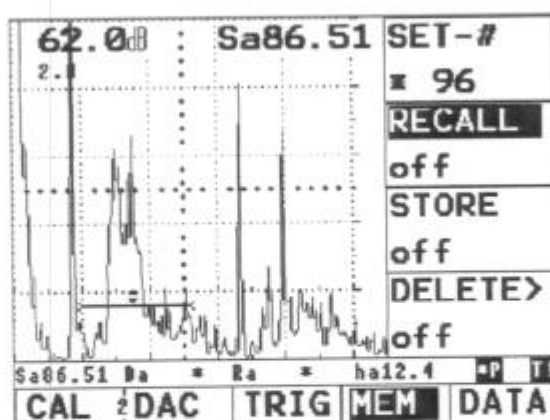


Figura 4.47. Modo S_1 chapa acero 2,2mm.

La figura 4.48. representa la respuesta del modo S_1 en una chapa de acero de 3,75mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 21° y una velocidad de fase (V) de 3907 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 62dB con 50 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancha y un nivel d ruido 20% ATP.

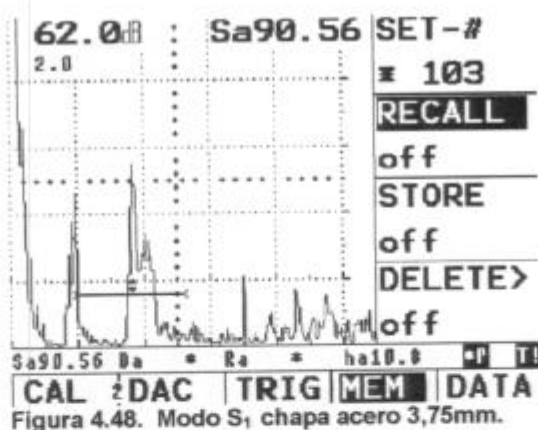


Figura 4.48. Modo S_1 chapa acero 3,75mm.

La figura 4.49 representa la respuesta del modo S_2 en una chapa de acero de 3,75mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia 12° y una velocidad de fase (V) de 6733 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 64dB con 77 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido y un nivel de ruido 20% ATP.

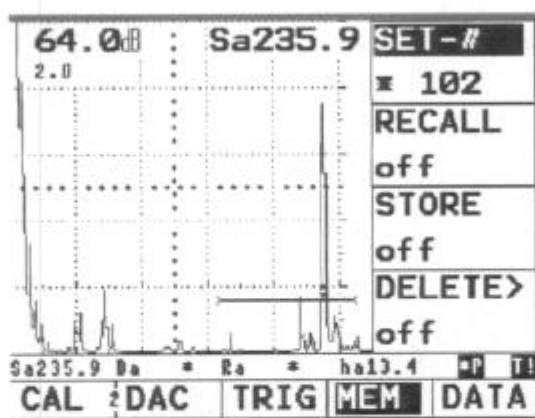
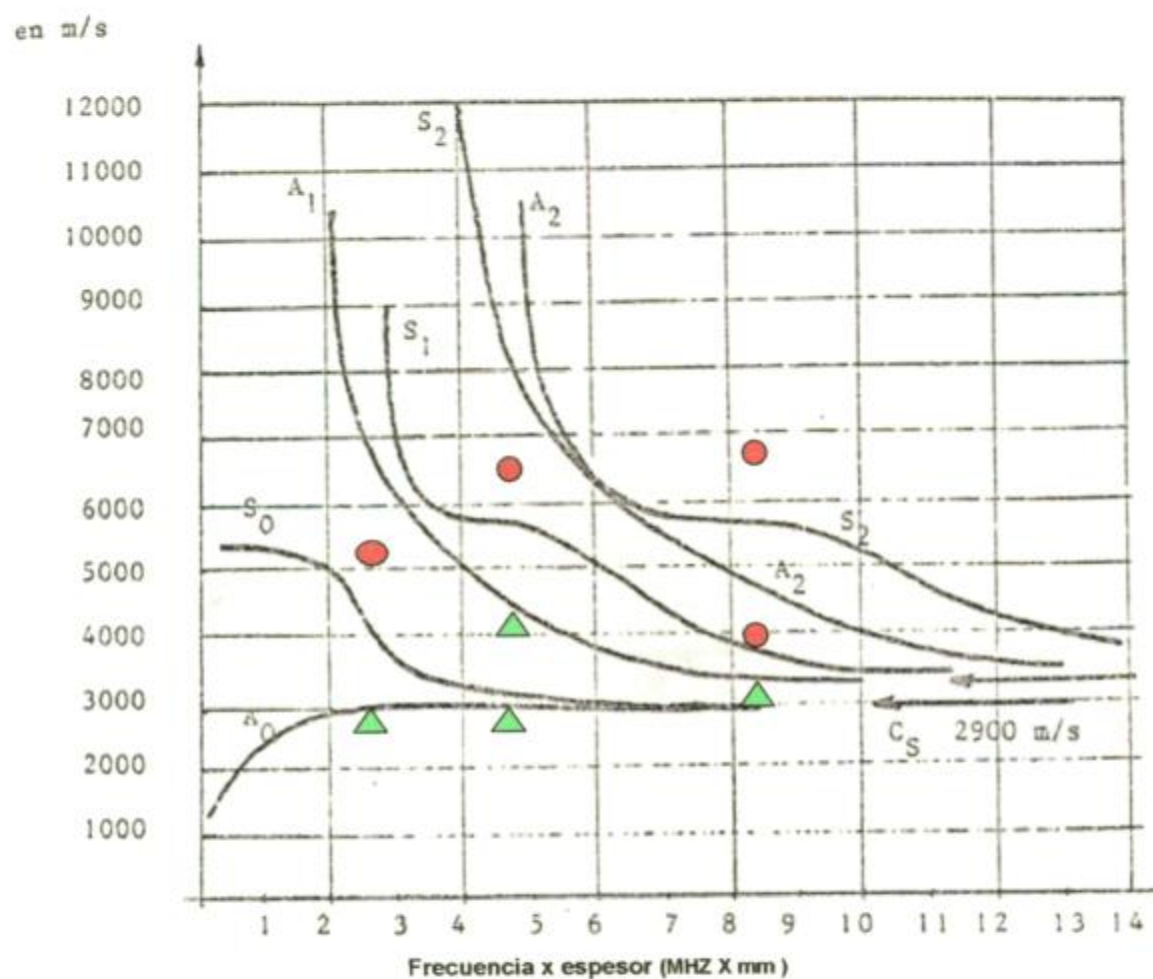


Figura 4.49. Modo S_2 chapa acero 3,75mm

Modos S y A de ondas de Lamb en chapa de acero. Pulso-eco por inmersión.



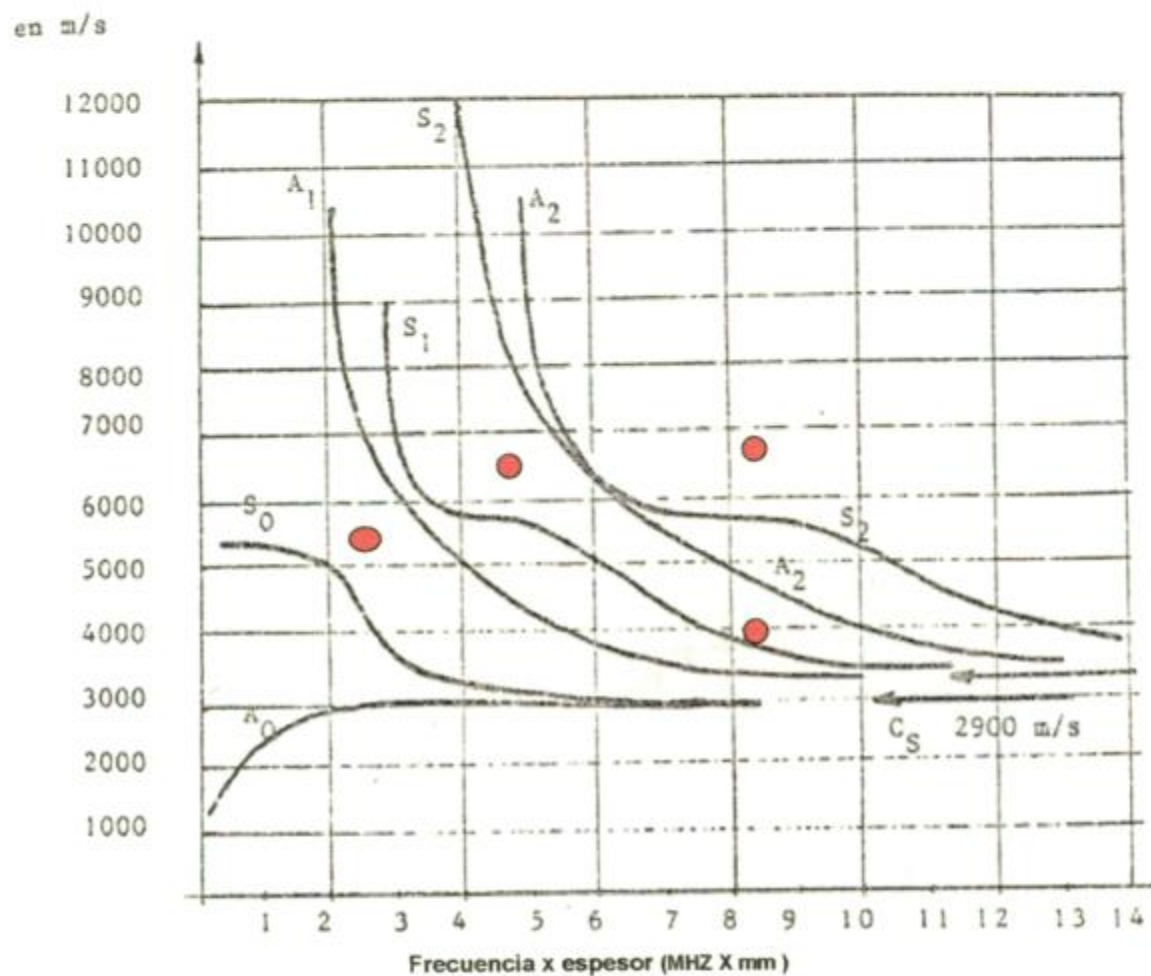
2,25MHz X 1MM; 2,25 MHz X 20mm; 2,25 MHz X 3,75mm.

Figura 4.49a. Curva de dispersión de acero.

Frecuencia 2,25 MHz.

- Simétrico
- ▲ Asimétrico

Modos simetricos de ondas de Lamb en chapa de acero.



2,25MHz X 1mm; 2,25 MHz X 20mm; 2,25 MHz X 3,75mm.

Figura 4.49b. Curva de dispersión de acero: modos simetricos.

● Frecuencia 2,25 MHz.

Modos asimetricos de ondas de Lamb en chapa de acero.

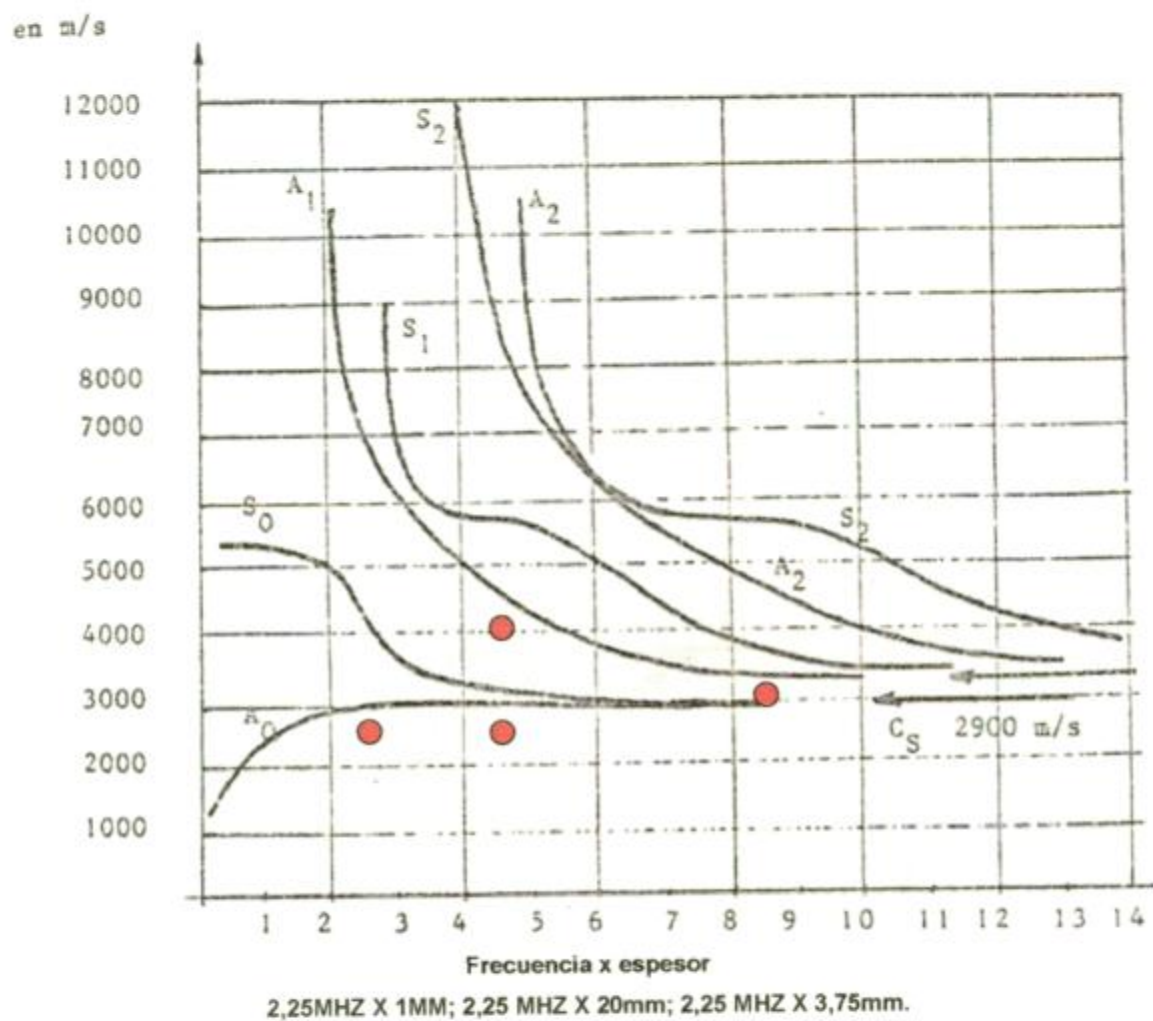


Figura 4.49c . Curva de dispersión de acero: modos asimetricos.

● Frecuencia 2,25 MHZ.

4.3 Selección de modo Transmisión – Recepción por contacto.

El principio de análisis mediante ondas de Lamb consiste en excitar un transductor piezoeléctrico en un punto de la estructura tipo placa y analizar la señal recibida en otro transductor piezoeléctrico situado en otro punto de la misma. Este punto puede estar situado a larga distancia del emisor como se muestra en la figura 4.50. En este caso la señal recibida contiene información sobre la integridad de la placa a lo largo de la distancia recorrida entre el transductor Transmisor y el Receptor. Ambos transductores se pueden mover sobre una zapata de Rexolite de forma de variar el ángulo de incidencia. Los transductores tendrán el mismo ángulo de incidencia. Ese ángulo estará en función de la velocidad propagación en el material de la zapata (Rexolite, $V_c = 2.340 \text{ m/s}$) y la velocidad de fase V de un modo de onda de Lamb en particular según la ecuación. $V = 2340 / \sin \alpha$

En la selección de modos simétricos y asimétricos se utilizaran las curvas teóricas de dispersión de las figuras 4.58a y 4.58b (aluminio y acero), estas curvas nos dará la información de la ubicación y propagación de los modos de onda de Lamb en particular.

Se utilizaron chapas con espesor de 1mm, 2mm y 3mm de aluminio transductores 2,25 MHz.

Los resultados para los modos simétricos y asimétricos de onda de Lamb pueden observarse en las siguientes figuras Amplitud – tiempo.



Figura 4.50. Método Transmisor – Receptor

4.3.1 Excitación de los modos asimétricos y simétricos en chapas de aluminio.

4.3.1.1 Excitación del modo asimétrico A₁ a 2.25MHZ.

La figura 4.51 representa la respuesta del modo A₀ en una chapa de aluminio de 1mm de espesor con un transductor de 2,25MHZ, con un ángulo de incidencia de 63° y una velocidad de fase (V) de 2626 m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 54dB con 85 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico bien definido y un nivel de 5% ATP.

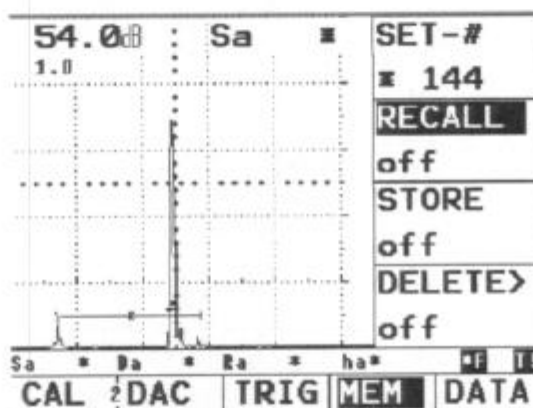


Figura 4.51 modo A₀ chapa aluminio 1mm.

La figura 4.52 representa la respuesta del modo A₁ en una chapa de aluminio de 2mm de espesor con un transductor de 2,25MHZ, con un ángulo de incidencia de 40° y una velocidad de fase (V) de 3640.m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 68dB con 63 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel de ruido 5% ATP.

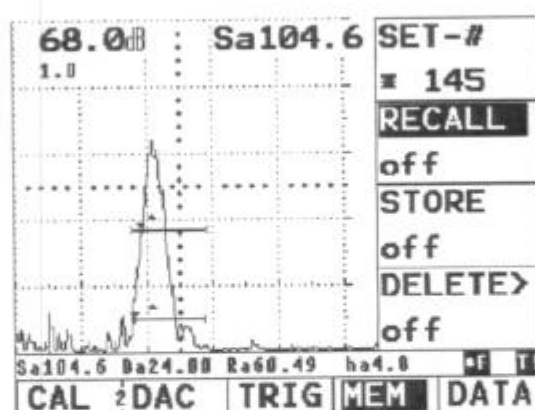


Figura 4.52. Modo A₁ chapa aluminio 2mm.

La figura 4.53 representa la respuesta del modo A₁ en una chapa de aluminio de 3mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 48° y una velocidad de fase (V) de 3149.m/s. El eco presenta en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 57dB con 80 % de altura total de altura (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel ruido 5% altura.

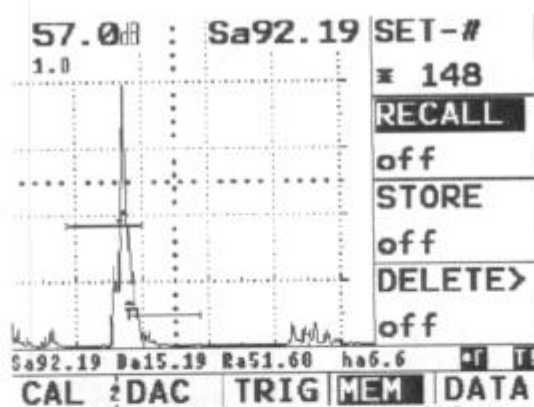


Figura 4.53. Modo A₁ chapa aluminio 3mm.

La figura 4.54 representa la respuesta del modo A₂ en una chapa de aluminio de 3mm de espesor con un transductor de 2.25MHZ, con un ángulo de incidencia de 23° y una velocidad de fase (V) de 5989.m/s. El eco presentado en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 61dB con 85 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel de ruido 5% ATP.

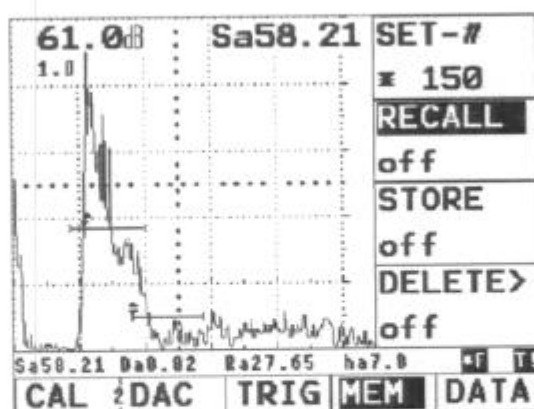


Figura 4.54 Modo A₂ chapa aluminio 3mm.

4.3.1.2 Excitación del modo simétrico S₀ a 2.25MHZ.

La figura 4.55 representa la respuesta del modo S₀ en una chapa de aluminio de 1mm de espesor con un transductor de 2,25MHZ, con un ángulo de incidencia de 37° y una velocidad de fase (V) de 3881 m/s. El eco presenta en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 63dB con 85 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico ancho y un nivel de ruido 10% ATP.

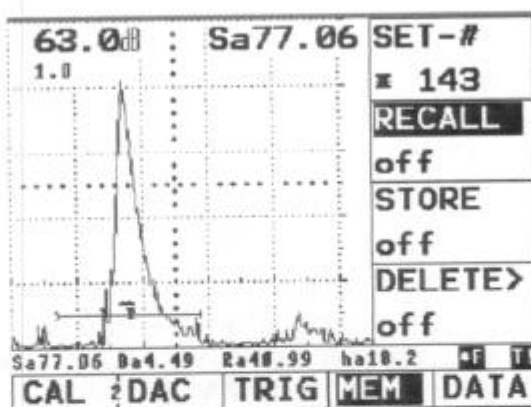


Figura 4.55. Modo S₀ chapa aluminio 1mm.

La figura 4.56 representa la respuesta del modo S₁ en una chapa de aluminio de 2mm de espesor con un transductor de 2,25MHZ, con un ángulo de incidencia de 25° y una velocidad de fase (V) de 5537 m/s. El eco presenta en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 61dB con 85 % de altura total de pantalla (APT), mostrando un pico ancho.

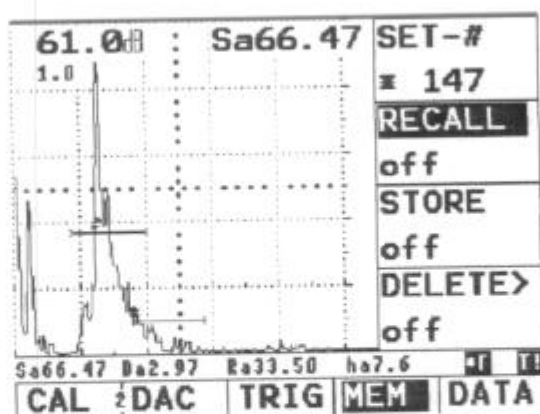


Figura 4.56. Modo S₁ chapa aluminio 2mm.

La figura 4.57 representa la respuesta del modo S₁ en una chapa de aluminio de 3mm de espesor con un transductor de 2,25MHZ, con un ángulo de incidencia de 30° y una velocidad de fase (V) de 4680 m/s. El eco presenta en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad 63dB con 85 % de altura total de pantalla (ATP), mostrando un pico definido.

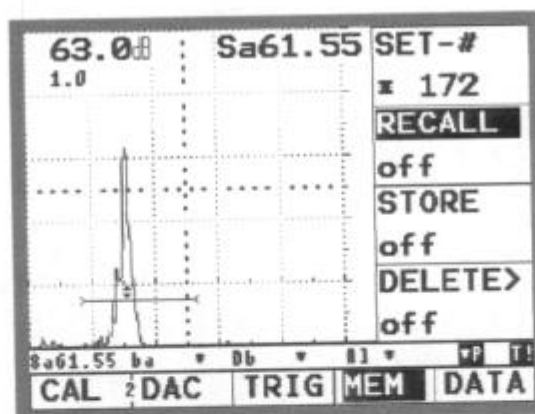


Figura 4.56 Modo S₁ chapa aluminio 3mm.

Modos S y A de ondas de Lamb en chapa de aluminio. Emisor- Receptor.

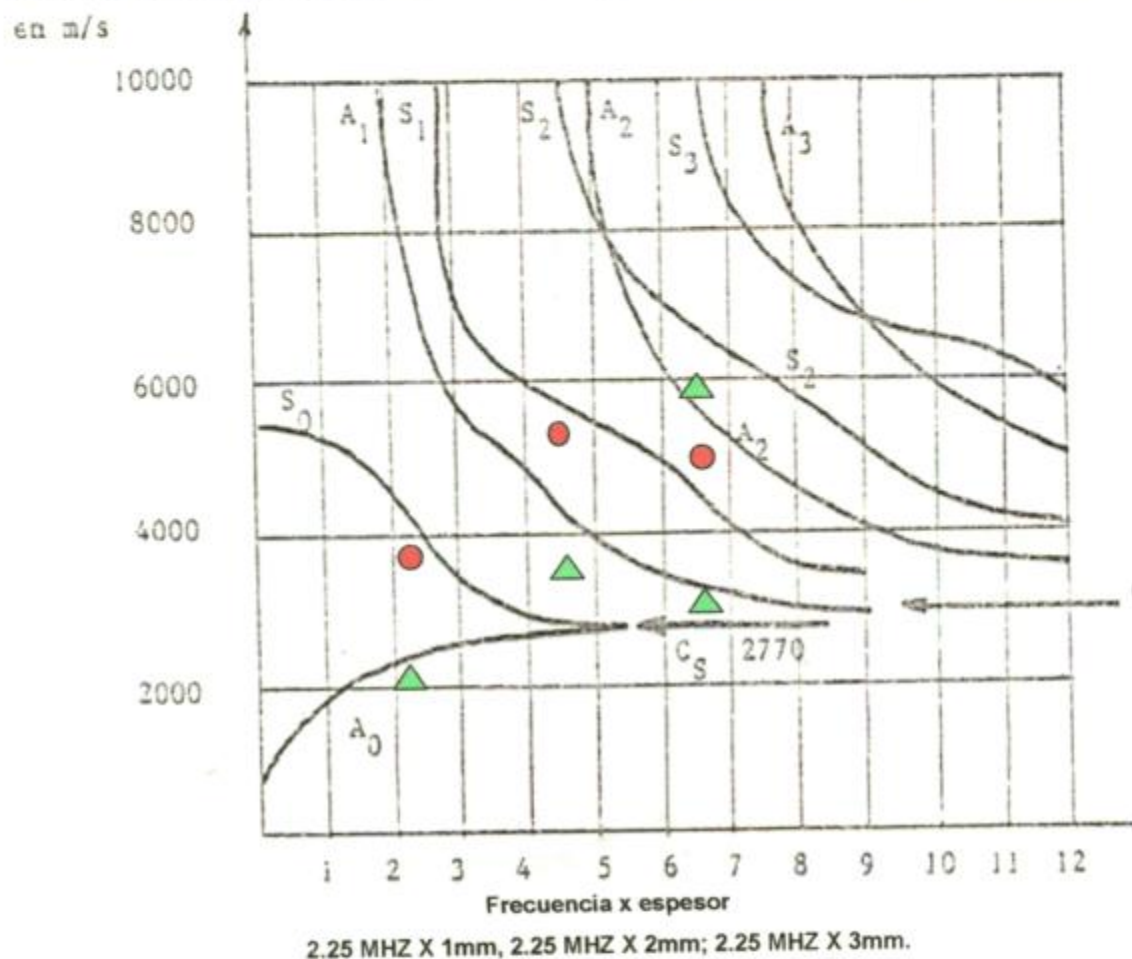


Figura 4.56a .Curva de dispersión de aluminio

Frecuencia 2.25MHZ.

- Modos Simétricos.
- ▲ Modos Asimétricos

Modos simetricos de ondas de Lamb en chapa de aluminio.

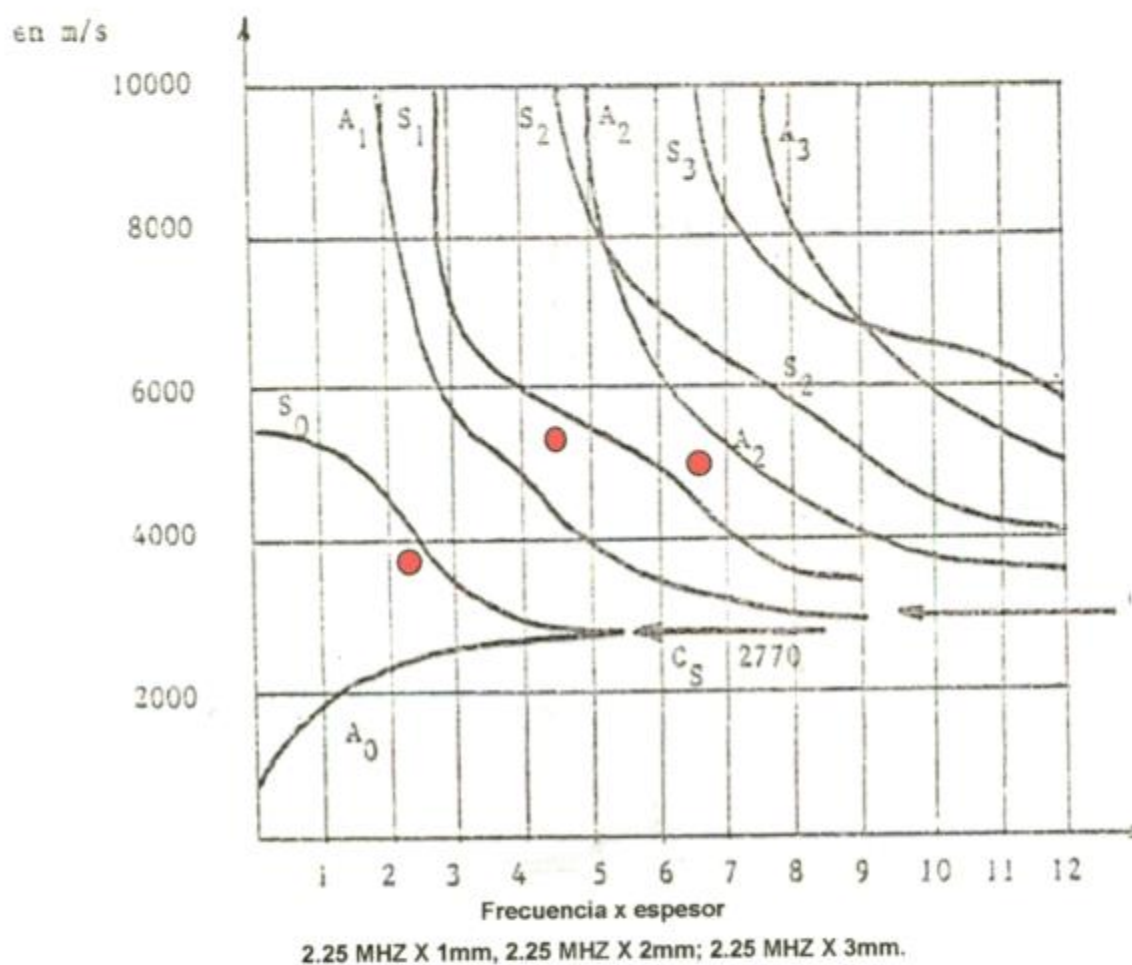


Figura 4.56B .Curva de dispersión de aluminio: modos simetricos

● Frecuencia 2.25MHZ.

Modos asimétricos de ondas de Lamb en chapa de aluminio.

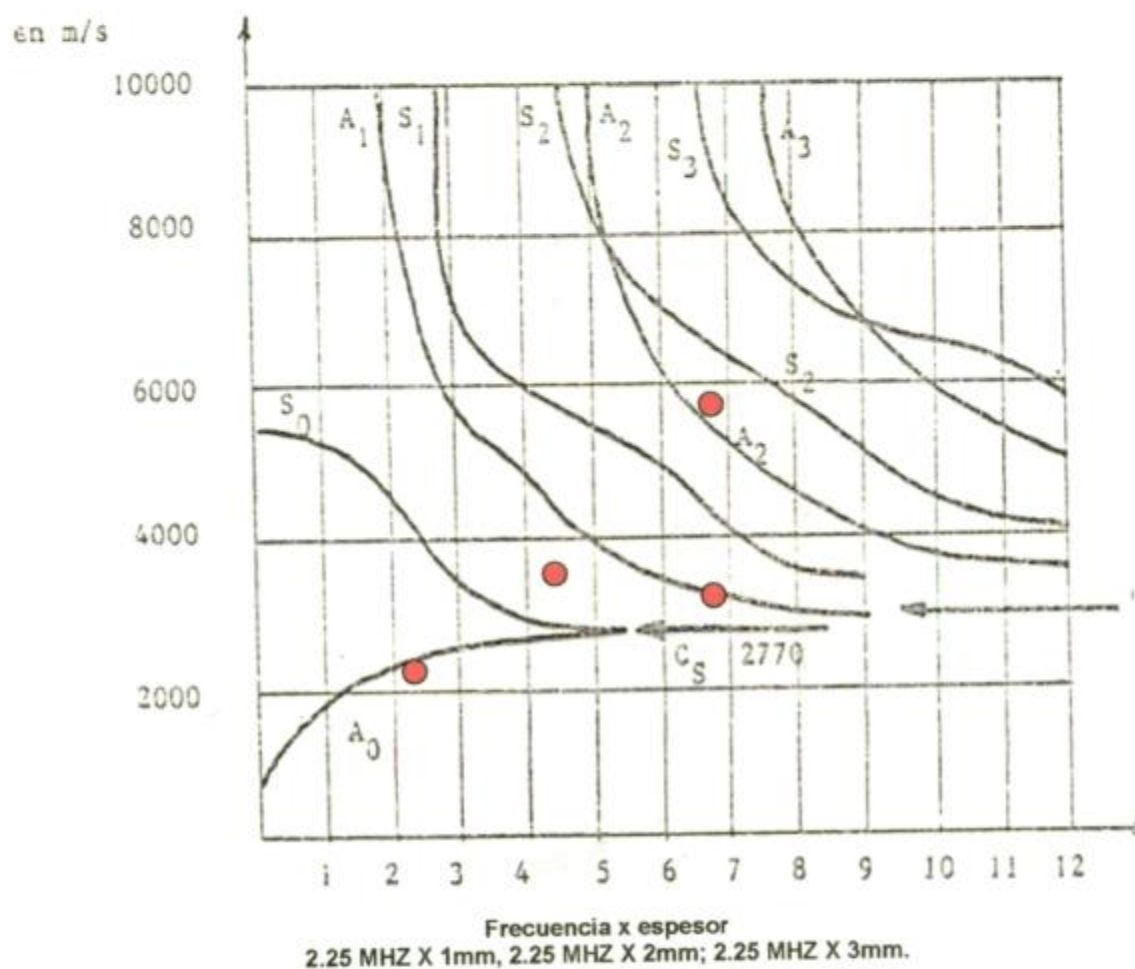


Figura 4.56 C .Curva de dispersión de aluminio: modos asimétricos.

● Frecuencia 2.25MHZ.

4.4 Resultados de los modos simétricos S y asimétricos A.

Las reflexiones que se presentaron en los modos simétricos y asimétricos se consideran en diferentes distancias de cada chapa. Las velocidades de fases de estos modos, iguales a las velocidades de onda superficial (2770m/s, en chapas de aluminio y 2900 m/s en chapas de acero), no serán estudiadas en esta tesis.

4.4.1 Modos en chapas de aluminio pulso-eco por contacto.

A frecuencia de 1 MHZ, en la chapa de 1mm de espesor, se observó que al excitar el modo A_0 y S_0 se obtiene una excelente respuesta de reflexión, lo que hace que estos modos sean fáciles de excitar y puedan ser aplicables en chapas de 1mm. El modo A_0 para los espesores 1,5mm, 2mm y 3mm también presentó buena respuesta de reflexión, y se podrán aplicar en piezas de mayor distancia.

El modo A_1 en la chapa de 3mm de espesor no se representó en las figuras amplitud y tiempo por presentar baja definición y ser difícil su interpretación. Si se lo consideró en las curvas de dispersión.

Los modos S_0 para los espesores 1.5mm, 2mm, se obtuvieron señales con buena definición, lo que hace que puedan ser aplicados distancias mayores, a diferencia del modo S_0 para 3mm que presenta baja definición.

La chapa de 3mm de espesor presenta el modo de S_1 con buena definición lo que lo hace también aplicable a este modo.

A frecuencias de 2.25 MHZ, en chapas de espesores de 1.5m y 2mm de espesor se mostró que al excitar los modos A_0 y S_0 presenta reflexión con buena definición que también lo hace que sea aplicado en piezas de mayor distancia. El modo A_2 en la chapa de 3mm espesor no se representó en las figuras amplitud y tiempo por presentar baja relación señal ruido siendo difícil su interpretación. Si se lo consideró en las curvas de dispersión.

El modo S_0 y A_0 en la chapa de 1mm presenta reflexión con buena definición lo que lo hace aplicable en piezas de mayor tamaño. Los modos S_1 y S_2 en la chapa de

3mm presentan buena definición, con un porcentaje bajo de ruido, lo que los hace también ser aplicables.

A frecuencias de 5 MHz, solo se utilizaron chapas de 1mm. Se identificaron los modos A_0 , S_0 y S_1 . Para los primeros dos modos, su velocidad de fase es cercana a la superficial. S_1 presenta buena reflexiones.

4.4.2 Modos en chapas de acero pulso-eco por contacto.

A frecuencia de 1 MHz, se encontró que al excitar los modos A_0 en chapas de 1.25mm de espesor y el modo S_0 en chapa de 2.2mm de espesor, muestran una excelente respuesta de reflexión y pueden ser aplicados en piezas de mayor tamaño. El modo A_0 para los espesores 2.2mm y 3.75mm también presentó buena respuesta de reflexión. El modo A_1 en la chapa de 3.75mm de espesor no presentó ninguna reflexión definida.

Los modos S_0 de los espesores 1.25mm, 3.75mm y el modo S_1 en chapa 3.75mm presentaron baja definición.

A frecuencias de 2.25 MHz, se ensayaron en chapas de espesores 1.25m, 2.2mm se observó que al excitar los modos A_0 y S_0 muestran una excelente respuesta de reflexión que puede ser aplicadas en chapas de mayor tamaño.

Los modos A_1 y A_2 en la chapa de 3.75mm presentan baja relación señal ruido. Los modos S_1 y S_2 no presentaron respuesta de reflexión.

La frecuencia de 5 MHz, solo se utilizo en chapas de 1,25mm de espesor se identificaron los modos A_0 , S_0 , S_1 y S_2 donde para los primeros dos modos su velocidad de fase es cercana a la velocidad superficial. S_1 y S_2 presenta buena definición por lo que también puede aplicarse.

Una de las características que se pudo notar en la propagación de los modos asimétricos, cuando se colocó acoplante (aceite o agua), en la dirección de propagación del modo no presenta atenuación. Esto sucede cuando la velocidad de fase es mayor que la velocidad superficial, en cambio sin son ondas superficiales se atenúan en su recorrido sónico.

4.4.3 Modos en chapas de aluminio pulso-eco por inmersión.

A frecuencias de 2,25 MHz y 5MHz, en la chapa de 1mm, de espesor no se pudieron observar reflexiones de onda de Lamb. Lo que sí se pudo observar fueron reflexiones del medio de inmersión como la superficie del agua en la cuba y del movimiento del agua al maniobrar el variador de ángulo que se muestra en la figura 3.17.

A frecuencias de 2,25MHz los modos A_0 , S_1 y S_2 en chapas de 2mm se obtuvieron reflexiones con baja relación señal ruido.

El modo A_1 en la chapa de 2mm, presentó reflexión con buena definición lo que hace posible su aplicación.

Para los modos A_0 y S_0 en chapas de 3mm, su velocidad de fase es parecida a la superficial. Estos modos no se mostraron en la en las figuras Amplitud vs. Tiempo, pero se consideraron en la grafica de dispersión.

4.4.4 Modos en chapas de acero pulso-eco por inmersión.

A frecuencias de 2,25 MHz, los modos A_0 en la chapa de 1,25mm y 2,20mm presentaron reflexiones con buena relación señal ruido.

Los modos S_1 en la chapa 3,75mm, y el modo S_1 en chapas de 2,20mm, obtuvieron reflexiones con baja señal ruido siendo difícil su interpretación.

Los modos S_0 en la chapa de 1mm, de espesor y el modo S_2 en la chapa de 3,75mm presentaron reflexión bien definidas, lo que hace posible su aplicación. Los modos A_2 en la chapa de 3,75mm de espesor no presento ninguna reflexión.

Este método no se aplicara en piezas reales por las limitaciones dimensionales de la cuba, como profundidad y ancho de la misma, y también por las complicaciones para obtener señales con reflexiones aceptables.

4.4.5 Modos en chapas de aluminio Transmisión – Recepción por contacto.

A frecuencias de 2.25 MHZ, se observa que al excitar los modos A_0 y S_0 en chapas de 1mm de espesor estas muestran excelente respuesta de reflexión y puedan ser aplicados en piezas de mayor tamaño. Los modos S_1 y A_1 en chapas de 2mm y los modos S_0 y A_0 en chapas 3mm de espesor mostraron señales con reflexiones aplicables pero con altura total de pantalla (ATP) no definidos. Para los S_2 en chapa de 3mm, no se pudieron identificar las señales Transmisión – Recepción

Frecuencia, 1 MHz .			
1mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	73°		
Velocidad de fase m/s	2447		
1.5mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	69°		
Velocidad de fase. m/s	2506		
2mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	65°		
Velocidad de fase. m/s	2581		
3mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	56°		
Velocidad de fase. m/s	2822		

1mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Trasmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	30°		
Velocidad de fase	4680		
1.5mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Trasmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	23°		
Velocidad de fase	5989		
2mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Trasmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	28.6°		
Velocidad de fase. m/s	4880		
3mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Trasmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	34°		
Velocidad de fase. m/s	4184		
3mm. Modo S1	Pulso-eco por contacto	Trasmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	24°		
Velocidad de fase. m/s	5753		

Estudio y Aplicación de Ondas Guiadas Ultrasónicas en END.

Frecuencia 2,25 MHZ.			
1mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	67°	63°	
Velocidad de fase. m/s	2542	2626	
1.5mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	60°		
Velocidad de fase. m/s	2701		
2mm. Modo A1	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	56°	40°	25.5°
Velocidad de fase. m/s	2857	3640	3252
3mm. Modo A1	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo		48°	26°
Velocidad de fase. m/s		3149	3194
1mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	30°	37°	
Velocidad de fase. m/s	4680	3881	
2mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo		25°	
Velocidad de fase. m/s		5537	
3mm. Modo S1	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	28°	30°	
Velocidad de fase. m/s	4984	4680	

3mm. Modo S2	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	18°		
Velocidad de fase. m/s	7592		
Frecuencia 5 MHZ.			
1mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por	Pulso-eco por

Estudio y Aplicación de Ondas Guiadas Ultrasónicas en END.

		contacto	inmersión
Angulo	68°		
Velocidad de fase. m/s	2523		
1mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	54°		
Velocidad de fase	2872		
1mm. Modo S1	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	24°		
Velocidad de fase. m/s	5753		

Tabla 4.2. Análisis de los Modos simétricos y asimétricos en chapa de aluminio por métodos Pulso-eco por contacto, Transmisión – Recepción por contacto y Pulso-eco por inmersión.

Estudio y Aplicación de Ondas Guiadas Ultrasónicas en END.

Frecuencia 1 MHZ			
1,25mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	74°		
Velocidad de fase.	2434		
2,2mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	65°		
Velocidad de fase. m/s	2582		
3,75mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	60°		
Velocidad de fase. m/s	2702		

1,25mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	30°		
Velocidad de fase	4680		
2,20mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	26°		
Velocidad de fase	5988		
3,75mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	23°		
Velocidad de fase. m/s	5753		

Frecuencia 2,25 MHZ .			
1,25mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	65°		35°
Velocidad de fase. m/s	2582		2411
2,20mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	57°		29°
Velocidad de fase. m/s	2893		2888
2,20mm. Modo A1	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión

Estudio y Aplicación de Ondas Guiadas Ultrasonicas en END.

Angulo			18°
Velocidad de fase. m/s			4530
3,75mm. Modo A1	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	45°		27°
Velocidad de fase. m/s	3309		3083,76

1,25mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	23°		14°
Velocidad de fase. m/s	5989		5787
2,20mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	54°		
Velocidad de fase. m/s	2892		
2,20mm. Modo S1	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo			13°
Velocidad de fase. m/s			6223
3,75mm. Modo S1	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo			21°
Velocidad de fase. m/s			3907
3,75mm. Modo S2	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo			12°
Velocidad de fase. m/s			6733
Frecuencia 5 MHZ.			
1,25mm. Modo S0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	23°		
Velocidad de fase. m/s	5989		
1,25mm. Modo A0	Pulso-eco por contacto	Transmisión - Recepción por contacto	Pulso-eco por inmersión
Angulo	20°		
Velocidad de fase. m/s	6841		

Tabla 4.3. Análisis de los modos simétricos y asimétricos en chapa de acero por métodos Pulso-eco por contacto, Transmisión – Recepción por contacto y Pulso-eco por inmersión.

5. Interacción de los modos de onda de Lamb con los defectos en piezas reales.

Los modos simétricos y asimétricos de onda de Lamb en el capítulo 4 fueron estudiados individualmente desde el borde de la chapa, obteniendo sensibilidad satisfactoria para su uso en la inspección de diferentes componentes reales con el fin de detectar discontinuidades o defectos en los mismos.

Los defectos en componentes reales son arbitrarios en cuanto el tamaño, orientación y posición. Sin embargo los defectos idealizados como entalla en placas de acero y aluminio serán investigados tanto como sean una idealización razonable de un tipo de defecto (grietas). También se investigará en uniones soldadas por fricción a tope en chapas de aluminio.

La formación de grietas por fatiga es una de las principales fuentes de daño en estructuras metálicas. Estas grietas se desarrollan en el material y pueden surgir en cualquier punto del mismo. En general, ocurren alrededor de alguna fuente de concentración de tensiones y en la superficie exterior donde las fluctuaciones de tensión son más elevadas. Generalmente, son finas y de difícil detección. Pueden aparecer por muchas razones: imperfecciones en la estructura microscópica del material, y ralladuras, arañazos, causados por las herramientas de fabricación o medios de manipulación.

En materiales frágiles el inicio de la grieta puede producirse por defectos del material (poros e inclusiones) y discontinuidades geométricas. La estructura continúa deteriorándose por el crecimiento de la grieta (por efecto de las cargas) hasta producirse la rotura por fatiga.

Otro tipo de aplicación que se presentará en esta tesis es la unión de chapas de aluminio por soldadura.

La soldadura supone, en principio, una heterogeneidad en contraste con el material. Su estructura es la correspondiente a su fusión y solidificación y la zona de transición o zona afectada por el calor que presenta estructuras variadas. Las discontinuidades o defectos posibles en uniones soldadas se pueden mencionar como:

Poros, grietas o fisuras, Inclusiones, fusión, falta de penetración y exceso de penetración.

5.1 Chapa de aluminio de 3mm. Método pulso-eco por contacto.

Las entallas se mecanizaron utilizando una fresa, como herramienta de corte, de 2mm de diámetro. Se realizaron entallas en varias medidas de profundidad y de longitud como se muestra en las figuras Figura 5.1.

Se utilizó el modo simétrico S_1 de Lamb para la detección puesto que, como ya se ha dicho en el apartado 4.1.1.2 del capítulo 4. y figura 4.11, dicho modo es más sensible. La frecuencia elegida fue de 1MHz.

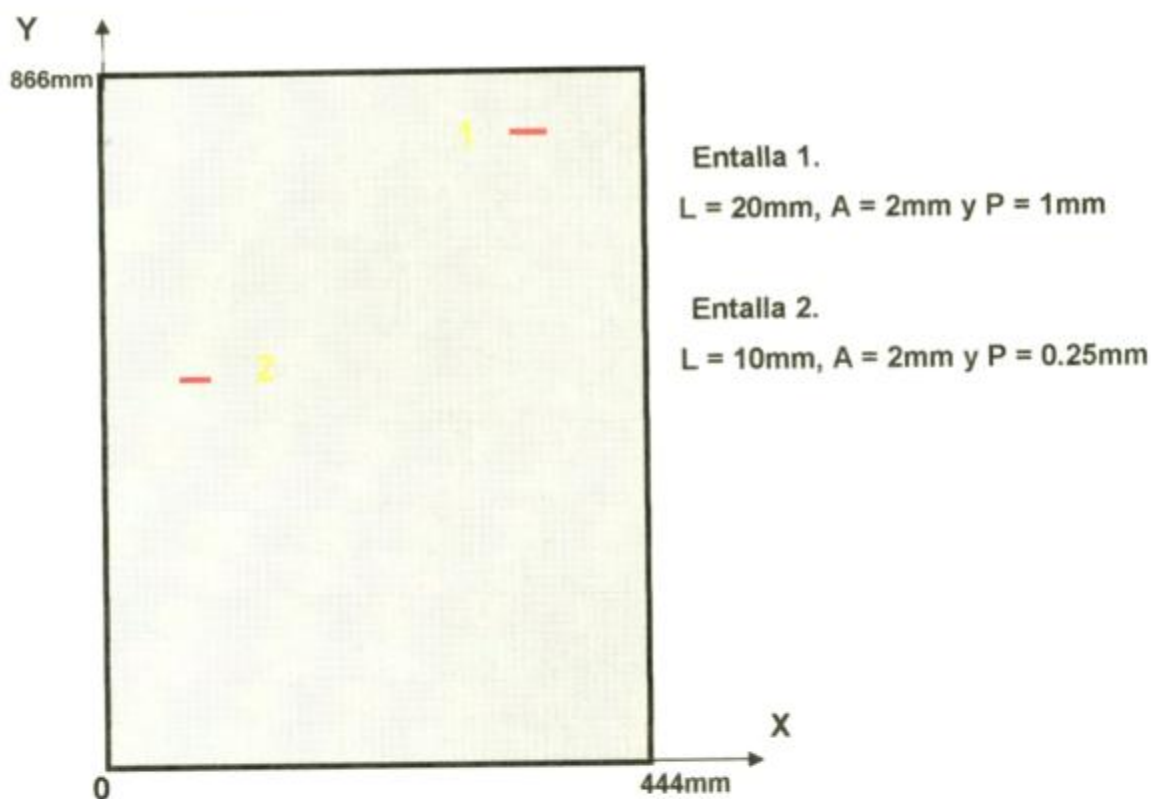


Figura 5.1 Esquema de la chapa y entallas. Las Coordenadas al centro de cada entalla ($[x, y]$).

- Entalla 1: $[350, 806]$
- Entalla 2: $[115, 421]$

Para encontrar la sensibilidad de reflexión del modo S_1 , se buscó la reflexión al borde de la chapa a una distancia de 702mm del transductor. En las Figura 5.2 y figura 5.3 se presenta el ensayo y las señales obtenidas.

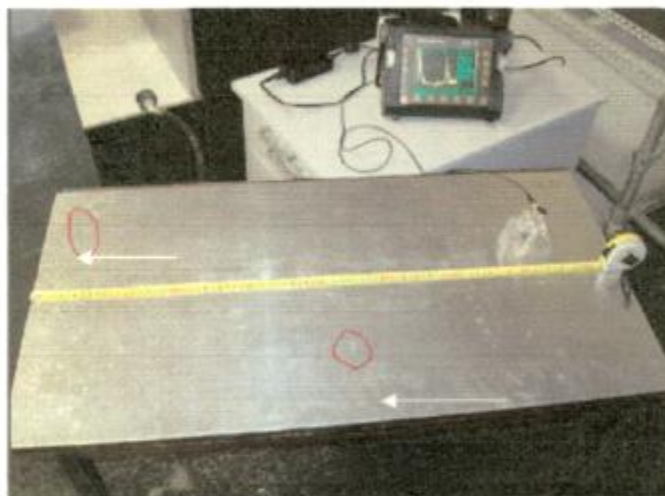


Figura 5.2. Reflexión del modo S_1 al borde de la chapa.

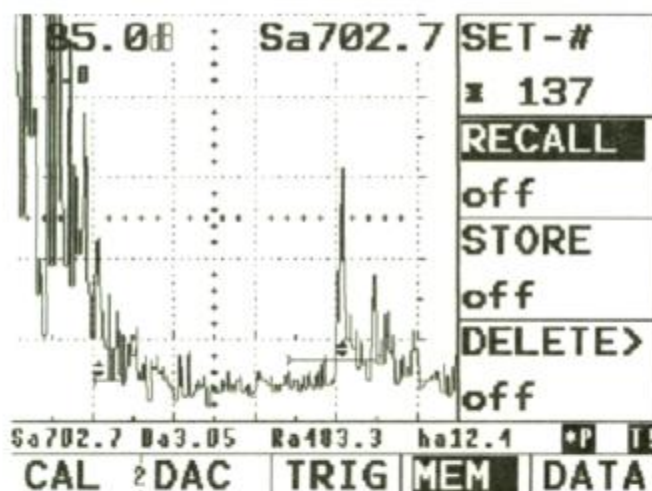


Figura 5.3. Reflexión del modo S_1 al borde de la chapa de 3mm. de aluminio.

Se inspeccionó en la entalla 1 con medidas de 20 mm de largo, 2mm de ancho y con una profundidad de 1mm. Situada [360, 816] mm del origen. La orientación de la entalla era perpendicular al transductor y por lo tanto perpendicular a la dirección de propagación de las ondas. La reflexión obtenida del recorrido sónico fue de 652,80mm.

Reflexión al borde de la chapa.

Recorrido sónico

Reflexión de la entalla 1

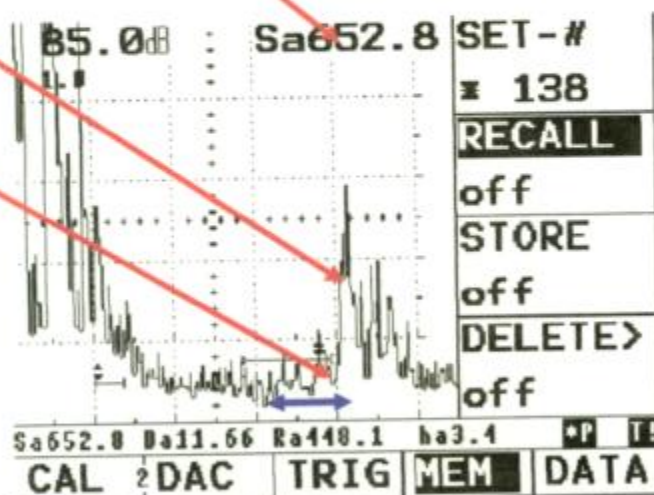


Figura 5.4. Reflexión del modo S_1 de la entalla 1 en chapa de 3mm. Aluminio.

La entalla 2 de 10mm de longitud y 2mm de ancho y 0,25mm de profundidad, situado a [115, 421] mm del origen. El transductor se ubico perpendicular a la entalla. La reflexión obtenida del recorrido sónico fue de 502.6mm, como lo muestra en figura 5.5.

Reflexión al borde de la chapa.

Recorrido sónico

Reflexión de la entalla 2.

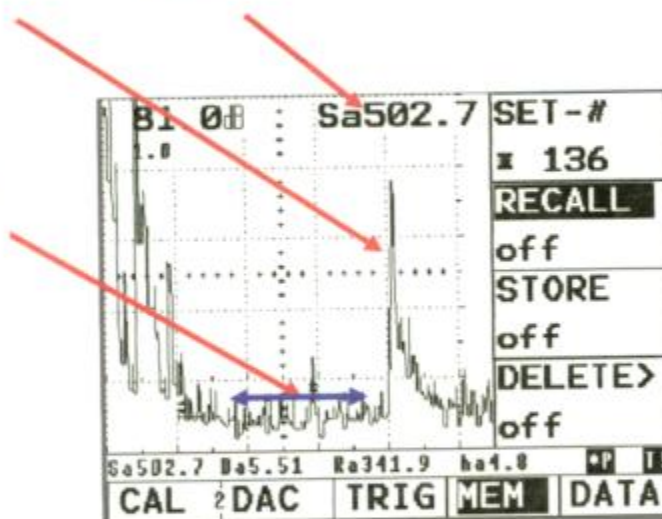


Figura 5.5. Reflexión del modo S_1 de la entalla 2 en chapa de 3mm. Aluminio.

5.2 Chapa de aluminio de 1mm. Método pulso-eco por contacto.

Las entallas se mecanizaron utilizando una fresa, como herramienta de corte, de 1.5mm de diámetro. La figura 5.6 muestra la ubicación de la entalla.

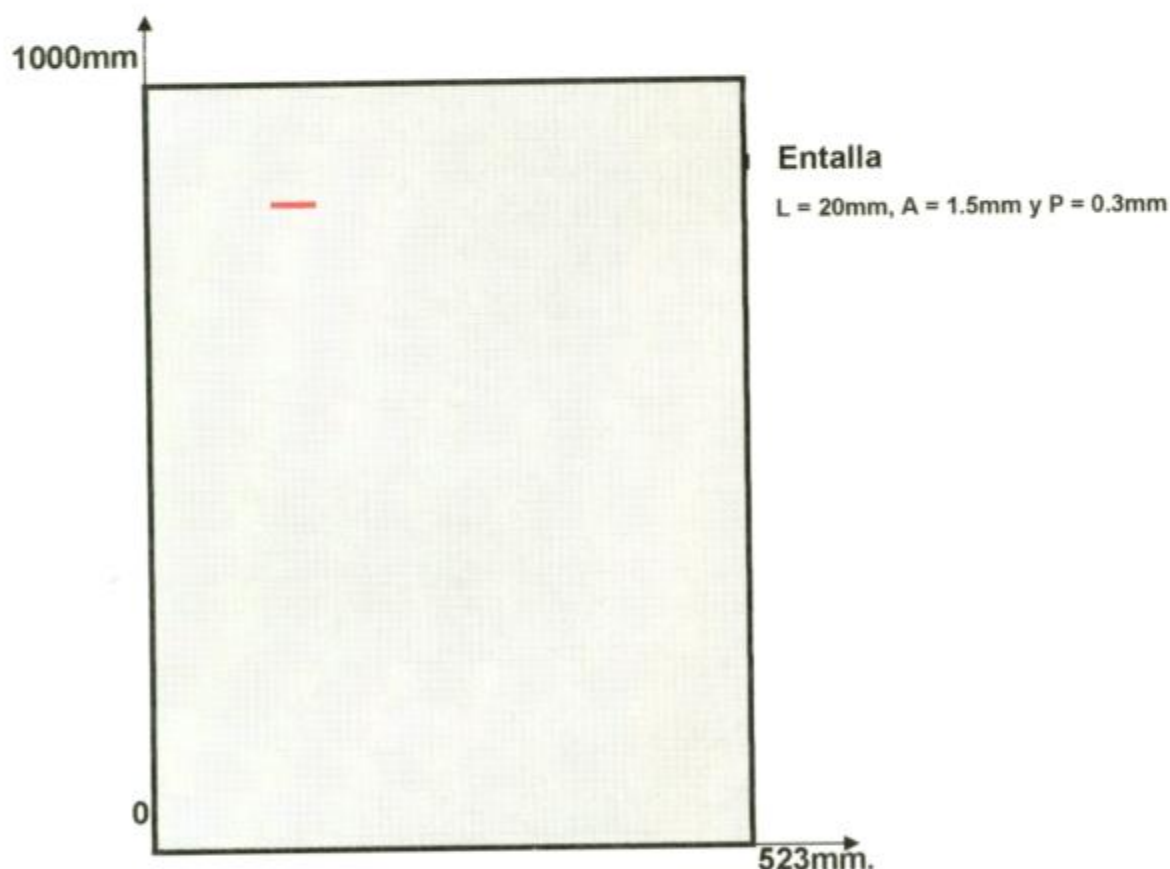


Figura 5.6 Esquema de la chapa y entallas. Las Coordenadas al centro de cada entalla $([x, y])$.

- Entalla: $[101, 820]$

Se utilizaron los modos asimétrico A_0 y simétrico S_0 de Lamb para la detección, puesto que como se ha dicho en el apartado 4.1.1.1 y 4.1.1.2 del capítulo 4, figura 4.3 y 4.7, son los más fáciles de excitar y se obtiene una excelente sensibilidad a una frecuencia de 1MHz. Como parte del procedimiento se buscó la reflexión del borde de la chapa a una distancia de 800mm del transductor. Se presenta en la figuras 5.7 y 5.8. El ensayo y las señales obtenidas.

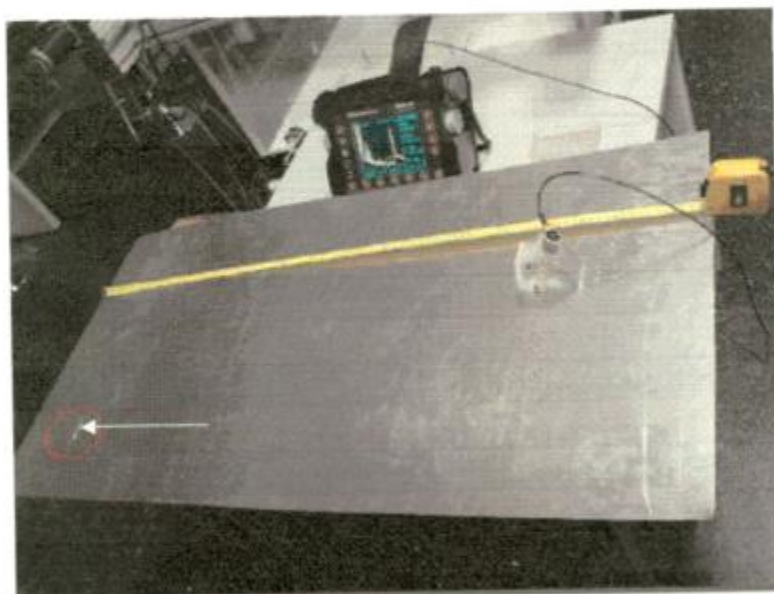


Figura 5.7. Reflexión del modo A_0 al borde de la chapa de un 1mm.

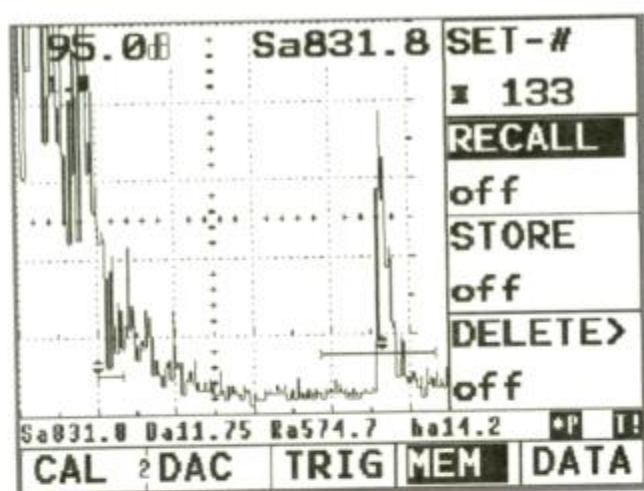


Figura 5.8. Reflexión del modo A_0 , al borde de la chapa de 1mm. Aluminio

Se inspecciono con el modo A_0 , la entalla con medidas de 20mm de largo, 1.5mm de ancho y con una profundidad de 0,3mm. Situada a [110, 867] mm del origen.

La orientación de la entalla era perpendicular al transductor y por lo tanto perpendicular a la dirección de propagación de las ondas. La reflexión obtenida por el recorrido sónico fue de 690,4mm. Se representa figura 5.9.

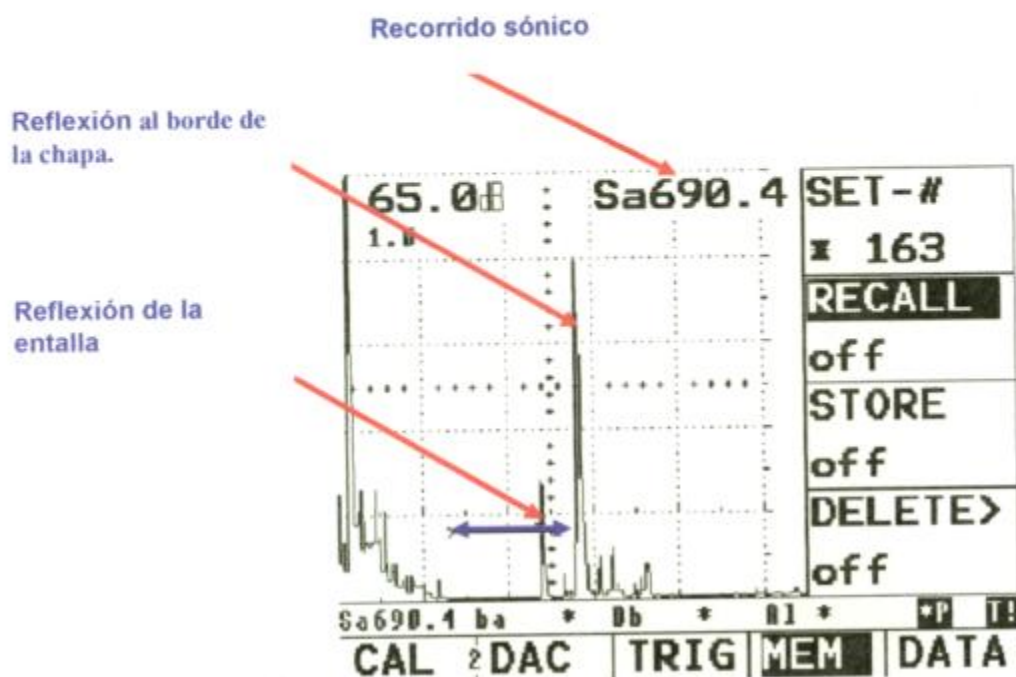


Figura 5.9. Reflexión del modo A_0 , en entalla 1, en chapa de 1mm. Aluminio.

Se hizo la segunda inspección, con el modo S_0 . Se busco la reflexión al borde de chapa como parte del procedimiento. Se puede ver la señal obtenida en la figura 5.10. Posteriormente se busco la reflexión de la entalla mencionada en la primera inspección. La orientación de la entalla es perpendicular al transductor y por lo tanto perpendicular a la dirección de propagación en las ondas. La reflexión obtenida por el recorrido sónico de 661,8mm, se representa en la figura 5.11.

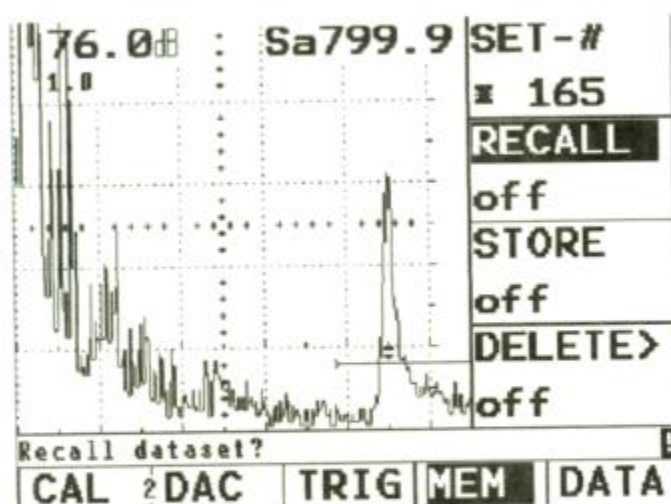


Figura 5.10. Reflexión del modo S_0 , en el borde en chapa de 1mm. Aluminio.



Figura 5.11. Reflexión del modo S_0 , en la entalla en chapa de 1mm. Aluminio

5.3 Chapa de acero de 1 mm. Método pulso-eco por contacto.

La entalla se mecanizó utilizando una fresa como herramienta corte de 1.5mm de diámetro. La figura 5.12 indica la posición de la entalla.

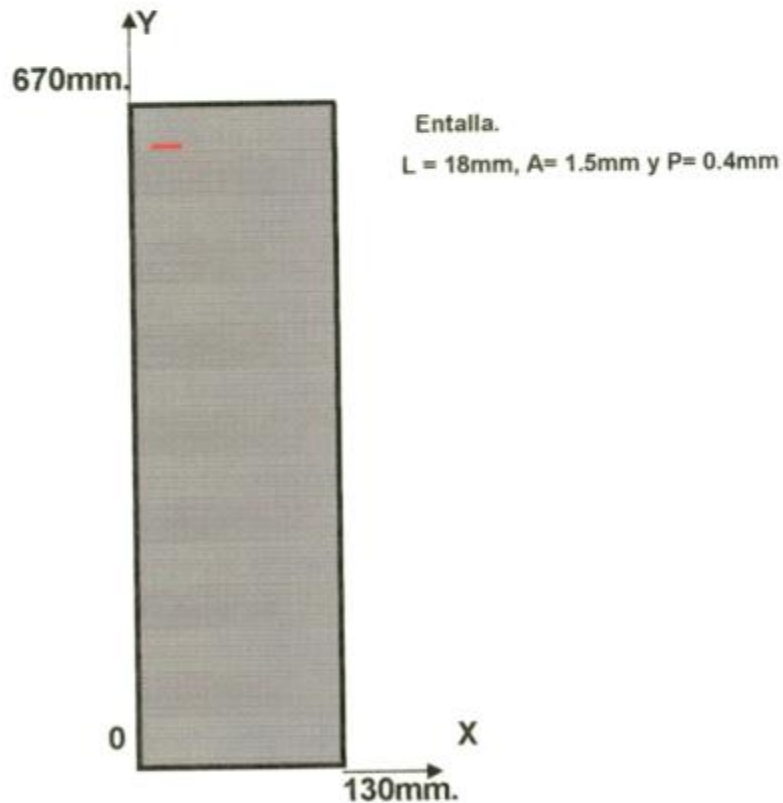


Figura 5.12. Esquema de la chapa y entallas. Las Coordenadas al centro de cada entalla $([x, y])$.
- Entalla: [45, 625]

Se utilizó el modo simétrico A_0 de Lamb para la detección puesto que, como se ha dicho en el apartado 4.1.2.1 del capítulo 4. y figura 4.23, es uno de los modos mas fáciles de excitar y se obtiene una excelente sensibilidad a una frecuencia de 1MHZ.

Como parte del procedimiento se buscó la reflexión del borde de la chapa a unas distancias de 600mm del transductor. Se presenta en la figuras 5.12 y 5.13

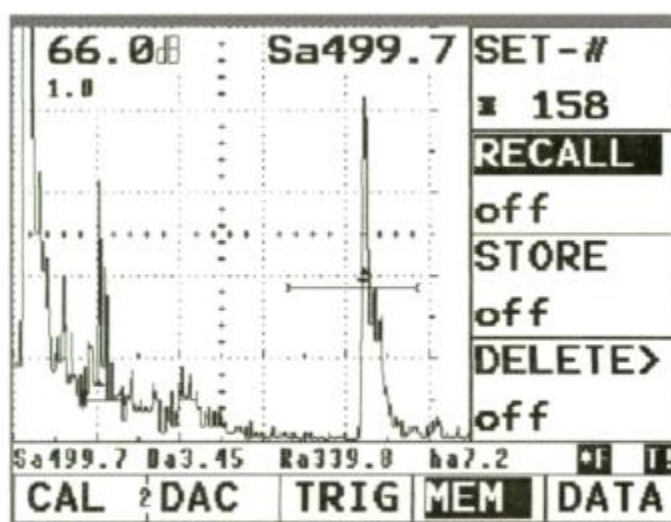


Figura 5.13. Reflexión del modo A_0 de la entalla en chapa de 1mm. Acero.

Se inspecciona con el modo A_0 , la entalla con medidas de 18mm de largo, 1.5mm de ancho y con una profundidad de 0,4mm y situada a [45, 625] mm del origen. La orientación de la entalla es perpendicular al transductor y por lo tanto perpendicular a la dirección de propagación de las ondas. La reflexión obtenida por el recorrido sónico fue de 455,3mm. Se representa figura 5.14.



Figura 5.14. Reflexión del modo A_0 de la entalla en chapa de 1mm. Acero.

Se inspeccionó la misma chapa de acero 1mm por la cara donde no posee la entalla, utilizando el modo A_1 . Situada a [80, 625] mm del origen. La orientación de la entalla es perpendicular al transductor y por lo tanto perpendicular a la dirección de propagación de las ondas. La reflexión obtenida por el recorrido sónico fue de 573mm. Se representa en las figuras 5.16 y 5.17.

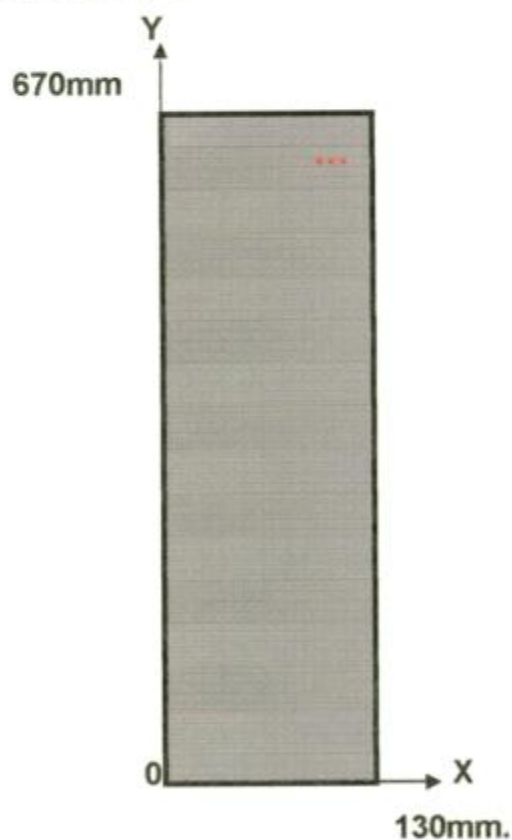


Figura 5.15. Esquema de la chapa y entallas. Las Coordenadas al centro de cada entalla $([x, y])$.

Entalla: [85, 625]



Figura 5.16. Reflexión de la entalla. Posición del transductor de la Cara de la chapa donde no esta la entalla.

Recorrido del recorrido sónico.

Reflexión al borde de la chapa
Reflexión de la entalla.

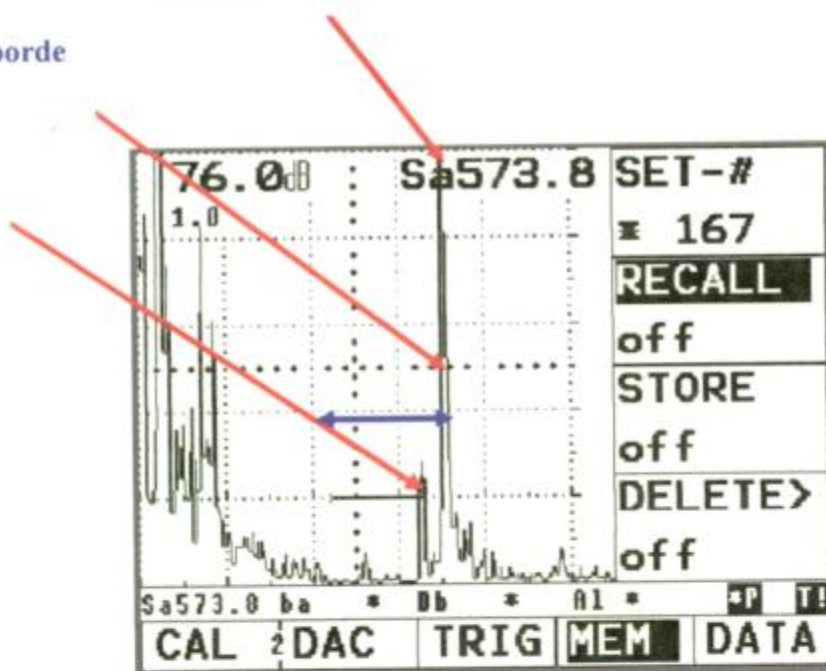


Figura 5.17 Reflexión del modo A_1 de la entalla. Chapa de acero de 1mm.

5.4 Unión de chapa de aluminio por soldadura a fricción por método pulso-eco por contacto.

Se utilizo una chapa de aluminio soldada de 6mm de espesor, 222mm de largo y 199mm ancho (figuras 5.18a y 5.18b) y una frecuencia de 1MHz. Para la identificación de discontinuidades de defectos en la soldadura se busco el modo A_1 , con la velocidad de

fase 3.368,56 m/s, con ángulo de incidencias de 44° , este modo se identificó al borde de la chapa paralela a la soldadura utilizando la gráfica de dispersión, La señal presentada en la grafica amplitud tiempo muestra una sensibilidad de 57dB con 80 % ATP, mostrando un pico ancho con ruido 50% ATP.

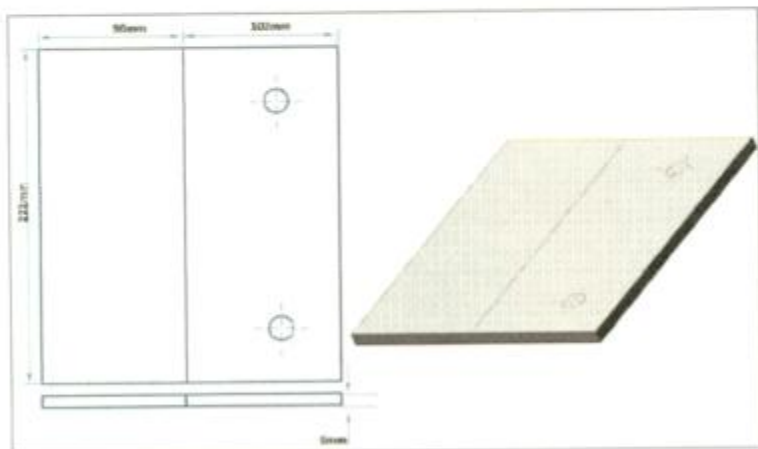


Figura 18a: Dimensiones de la chapa soldada de aluminio.

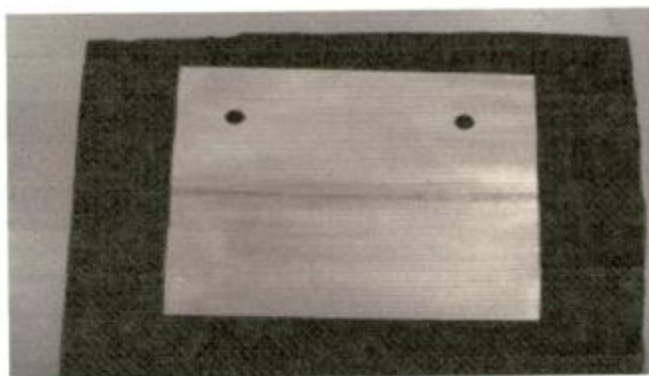


Figura 5.18b: Chapa soldada de aluminio

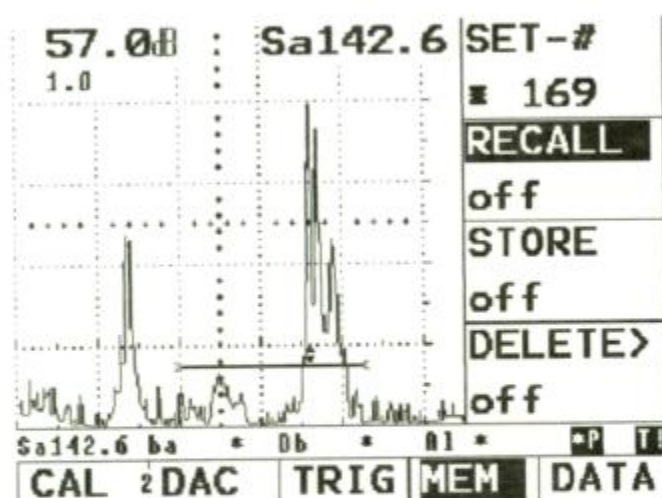


Figura 5.19 Reflexión del modo A_1 en la chapa de aluminio de 6mm.

Se inspecciona la unión soldada, colocando el transductor perpendicular a la soldadura a 37mm y se hizo un barrido del 100 % de longitud de la soldadura, obteniendo reflexiones desde 75.5mm hasta 201mm de forma continua con respecto al origen. En la gráfica 5.20 se presenta el inicio de reflexión de la discontinuidad o defecto. En la gráfica 5.21 se observa la reflexión del modo A_1 a 75,5mm del reflector y en la figura 5.22 a 201mm de éste.



Figura 5.20 Inicio de la reflexión a 75.5mm respecto del origen.

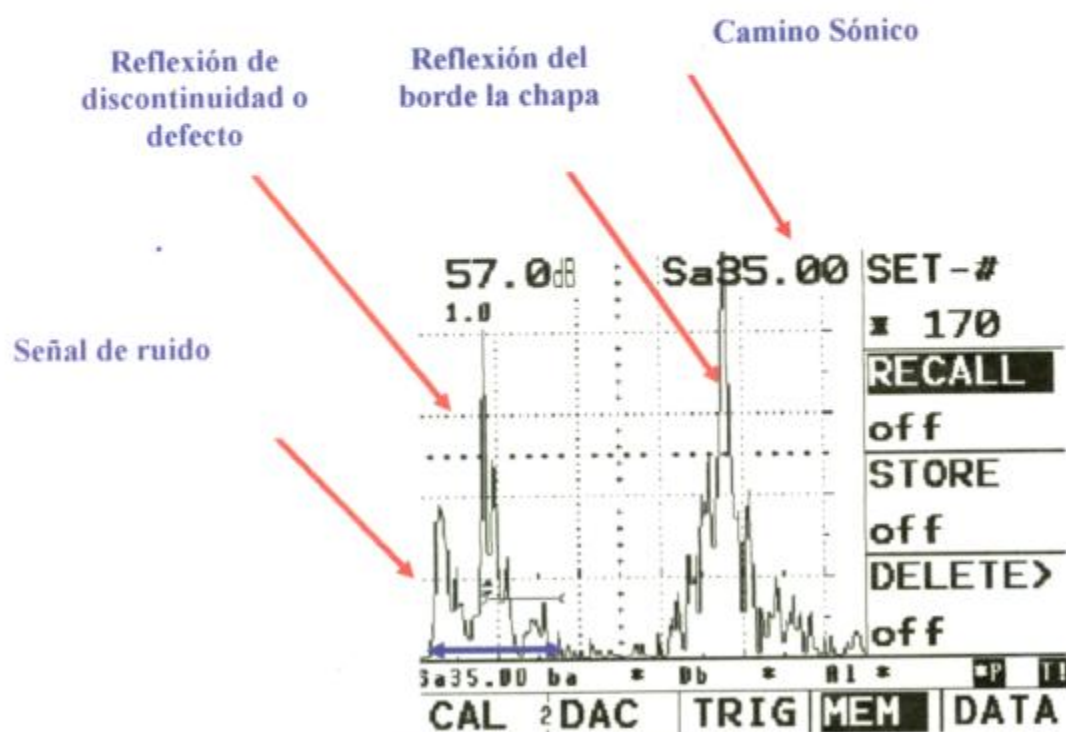


Figura 5,21. Reflexión del modo A₁ en la Chapa de aluminio de 6mm a 75,5mm.

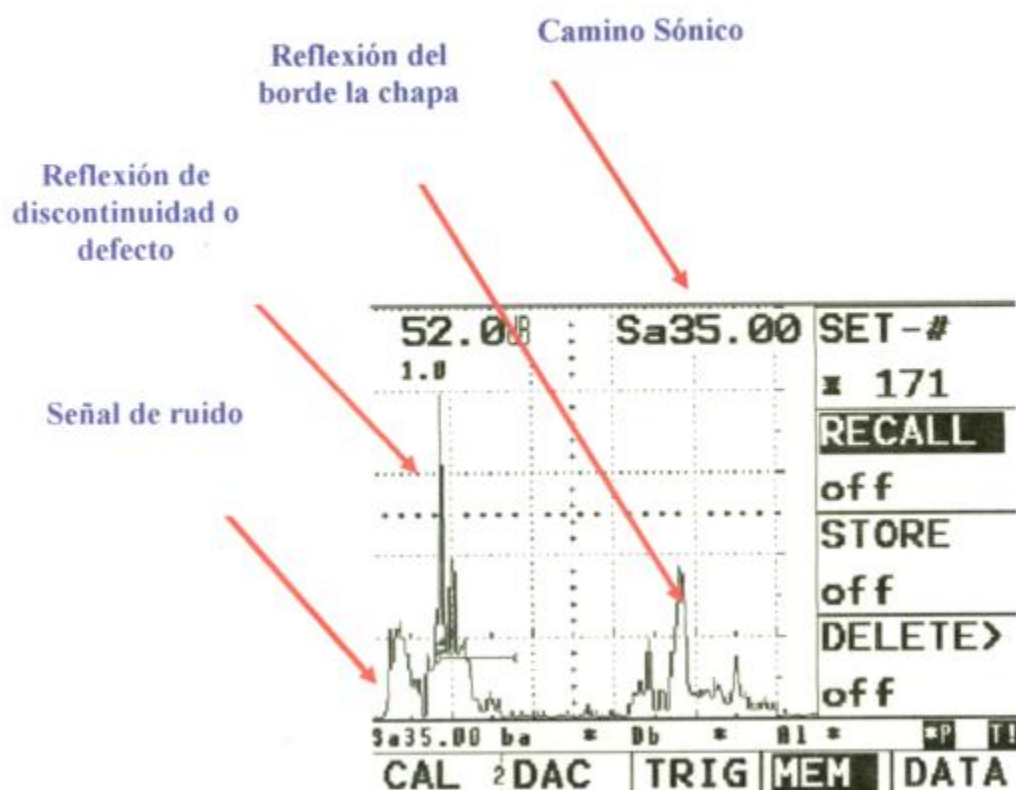


Figura 5.22. Reflexión del modo A_1 en la Chapa de aluminio de 6mm a 201mm.

Como apoyo a la técnica de ultrasonido y a las señales obtenidas en la chapa soldada se utilizó la técnica volumétrica de Radiografía que nos ayudaría a obtener resultados comparativos a las señales de las ondas de Lamb.

En la placa radiográfica de la figura 5.23, se observa la falta de penetración en la chapa soldada a fricción.

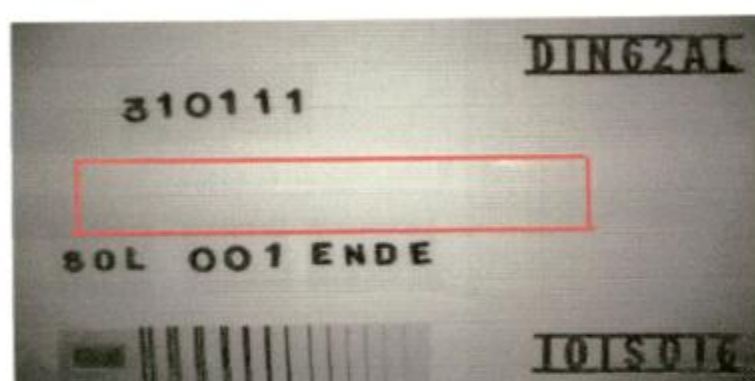


Figura 5.23. Placa radiográfica de chapa de aluminio de 6mm.

5.5 Resultados obtenidos.

En la validación del sistema de detección de defectos con el método pulso-eco, se han utilizado chapas de aluminio de 1mm y 3mm de espesor y chapa de acero de 1mm de espesor. Se han simulado varias entallas no pasantes de diferentes medidas y posiciones. Para la detección de las mismas se han utilizado los modos de propagación de Lamb (simétrico y antisimétrico) descritos en el capítulo 4 de esta tesis. Se han obtenido evidencias claras de detección de las entallas no importando la ubicación del transductor, es decir lo suficientemente alejado del transductor como para poder verificar la capacidad de las ondas de Lamb de propagarse a grandes distancias sin pérdida de amplitud. Se pudo mostrar la inspección de la cara de la chapa donde no está ubicada la entalla donde se tuvo excelente reflexión de la misma.

Se usó el método pulso-eco para la inspección de soldaduras por fricción en chapa de aluminio 6mm de espesor. En el capítulo 4, donde muestran los modos (simétricos y asimétricos), solo se usaron chapas de 1mm, 1,5mm, 2mm y 3mm.

Se utilizó el borde de la chapa paralela a la soldadura para la búsqueda de los modos, dado la complejidad de la estructura, y a la frecuencia de un 1MHZ, el modo A_1 presentó una mejor resolución que los modos S_1 , A_2 y S_2 .

Con la propagación de las ondas de Lamb se pudo observar el defecto que presentaba la chapa soldada de formar continua al hacer el barrido del transductor. En este ensayo no se pudo observar la propagación de la onda de Lamb a grandes distancias debido a la dimensiones de la estructura soldada.

Para validar los resultados obtenidos por ultrasonido se utilizó la técnica de Radiografía, los resultados obtenidos por esta técnica muestran la ubicación y la falta de penetración de la soldadura por fricción. Ambas técnicas muestran el defecto de la chapa soldada satisfactoriamente.

6. Conclusiones.

En el inicio de esta tesis se estudiaron y se analizaron múltiples sistemas clásicos de detección ultrasónica en estructuras metálicas y materiales compuestos. Una solución más novedosa son las técnicas de detección de defectos mediante ondas de Lamb. Estas técnicas permiten el seguimiento en continuo del estado de la estructura y permiten la integración de sistemas de detección en zonas críticas de la estructura que requieren de un monitoreo constante.

Se estudió y se presentó que las ondas de Lamb son dispersivas, lo que significa que su velocidad de fase y de grupo depende la frecuencia. Las curvas de dispersión de cada material en particular, dan la información de la velocidad de fase en función de la frecuencia y el espesor. Las ondas de Lamb al propagarse en el material (chapa), hace que las partículas se desplacen de dos maneras, simétricas y asimétricas.

Para la generación de las ondas de Lamb se diseñaron los transductores de ángulos variables. Se utilizaron los métodos Pulso-eco y Emisión – Recepción con la técnica de contacto y solo pulso eco- con la técnica de inmersión

En el método pulso-eco por inmersión se identificaron distintos modos simétricos y asimétricos de onda de Lamb, pero con dificultad como para ser aplicados en piezas reales debido a los múltiples ecos recibidos por los transductores, ocasionados estos por el nivel del agua y las dimensiones pequeñas de la cuba utilizada. Además la manipulación del variador de ángulo presentó ciertas dificultades.

Con el método Pulso-eco por contacto se identificaron los distintos modos simétricos y asimétricos y presentaron reflexiones con resoluciones buenas siendo los modos asimétricos A_0 y simétricos S_0 los más fáciles de excitar a frecuencias bajas (1MHZ), en los distintos materiales (aluminio y acero)

Con el método de Transmisión – Recepción por contacto se identificaron los modos simétricos y asimétricos presentando reflexiones con buena resolución, pero no se pudo identificar ninguna discontinuidad o defecto en chapas reales,

Se estudió y analizó que los modos de onda simétrica y asimétrica encontrados coinciden en los tres métodos

Se construyeron defectos (entallas), de diferentes medidas y diferentes posiciones en las chapas de aluminio y acero. Se utilizó el método pulso-eco por contacto con los modos simétricos S_0 y asimétrico A_0 donde ambos modos fueron capaces de identificar los defectos obteniendo reflexiones, no importando mucho la posición sobre la chapa del transductor 1MHZ. Y el modo S_1 fue capaz de obtener reflexiones donde identifica al defecto en chapa de 3mm a un 1 MHZ. En todos los ensayos se mostraron que el transductor y el defecto estaban suficientemente alejados como para poder verificar la capacidad de las ondas de Lamb de propagarse a grandes distancias sin apreciable pérdida de amplitud

Se mostró también que las ondas de Lamb pueden identificar defectos en chapas soldadas, existiendo la dificultad de su aplicación ya que depende del modo de onda a utilizar la respuesta de la reflexión del defecto o discontinuidad. Se necesita experiencia del operador para la interpretación de los defectos encontrados, por lo tanto en esta tesis se utilizó la técnica Radiográfica como apoyo a la identificación del defecto

En conclusión esta tesis proporcionó sobrados argumentos para inferir que las ondas de Lamb pueden ser usadas en los Ensayos No destructivo (END) de placas o en estructuras siempre y cuando se investigue y se desarrolle los modos a utilizar y su interacción con los defectos o discontinuidades para cada tipo de defecto en los componentes inspeccionados.

7 **Desarrollos futuros.**

- Estudiar y analizar el comportamiento de modos simétricos y asimétricos en distintos materiales y la interacción con los defectos.

- Detección de fisuras en chapas metálicas mediante métodos por contacto Emisión-Transmisión y pulso-eco.

- Detección despegues y de laminaciones en estructuras de material compuesto y metálicas mediante métodos por contacto Emisión-Transmisión y pulso-eco.

- Detección de defectos o discontinuidades en chapas soldadas a tope simple y biselado con el método pulso-eco por contacto.

- Calcular y comparar la velocidad de fase por el método fase y amplitud del espectro y el método $V = V_l / \sin \theta$ utilizados por Wolton en distintos materiales.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Adrian Cuc. Structural Health Monitoring of Adhesively Bonded Joints With Piezoelectric Wafer Active Sensors, pág. 85-102 (2005).
2. Alleyne N. David. The now destructive Testing of plates using ultrasonic Lamb waves. Thesis Doctor. Imperial College of science, Tecnology and medicine, University of London pág. 50-56 , 143- 154 (1999).
3. B. Boro Djordjevic Ultrasonic Characterization of Advanced Composite Materials Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering, Ljubljana, Slovenia, 47-57 (2009).
4. Brian Palakvic, Mike Lowe. Software disperse versión 20.16d (2005).
5. Desimone. C, Katchadjian. Tacchia M. Aplicación de las ondas guiadas. IV conferencia panamericano END. ENDE. (2007).
6. GE Inspection Technologies – Phased Array .
http://www.geinspectiontechnologies.com/en/products/ut/tm/phased_array.
7. Mez-Ullate Ricón, Y., Montero de Espinosa, F., Mould, J. & Reynolds, P. Selective excitation of Lamb wave modes in thin aluminium plates using bonded piezoceramics: FEM modelling and measurements. *NDT.net*. (2006).
8. Jiayong Tian, Ulrich. Gabbet, Harald Berger, Xianyu Su. Lamb Wave interaction whit delaminations in CIRP Laminales. Vol 1, pág. 327-336 (2004).
9. Krautkramer. Products Catalog, <tp://www.geinspectiontechnologies.com/solutions/TestingMachines/Ultrasonics/phasedarray.html>. (2002).
10. Krautkramer. Ultrasonic Testing of Materials 4th, fully Resised Edition, Pág 33-40.
11. Lowe, M.J.S.; Alleyne, D.N.; Cawley, P. (1998) "Defect detection in pipes using guided waves", *Ultrasonics*, Vol. 36, Pág. 147 - 154, (1998).

12. M J Santos, A R Ferreira, , N Fernandes, J Perdigão, "Detection and Classification of Defects in Thin Structures Using Lamb Waves", Acústica 2000 – II Congresso Iberoamericano de Acústica, Madrid, Espanha, 16-18 Octubre, (2000).
13. Manual de END. Instituto Nacional de Técnicas Aeroespaciales. (INTA), tercera edición Pág. 352, 3.53, 472 y 473.
14. Michel Castaings, Emmanuel Le Clezio, and Bernard Hosten Modal decomposition method for modeling the interaction of Lamb waves with cracks. Volume 112, Issue 6, pp. 2567-2582 (2002).
15. Michael D. Gilchrist. Attenuation of ultrasonic Rayleigh Lamb waves by small Horizontal defects in thin aluminium plates. International Journal of Mechanical Sciences 41 (1999) 581- 594.
16. Michael D. Seale And Eric I. Lamb Wave Evaluation of the Effects of Thermal-Mechanical Aging on Composite Stiffness. MADARAS NASA Langley Research Center Mail Stop 231 Hampton, (2000).
17. Modulo nivel III de ultrasonido, apuntes en Frances ENDE.
18. Rokhlin S.I. Lamb wave interaction with lap-shear adhesive joints: theory and experiment. *J Acoust Soc Am*, 89:2758-65. (1991).
19. Rose, J.L. A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave inspection Potential vol.124, pág 273-279. (2003).
20. Rose, J.L. Successes and Challenges for ultrasonic Testing and Shm. Materials Evaluation, Pág. 495 - 499 (2010).
21. Rose, J.L. (1999) Ultrasonic waves in solid media, Cambridge University Press, 1999.
22. Staveley NDT Technologies, <http://www.staveleyndt.com/>
23. Universidad de Vigo. Departamento de física aplicada España. <http://www.laser.uvigo.es>
24. Valle, C. Niethammer, M.; Qu, J.; Jacobs, L. J. (2001) "Crack characterization using guided circumferential waves" Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 110, No. 3, pag. 1282-1290. (2001).

25. Viktorov I.A. Rayleigh and Lamb Waves, Physical Theory and applications. *Plenum Press*, New York. (1967).
26. W.A.K. Deutsch, A. Cheng and J.D. Achenbach, Defect Detection with Rayleigh and Lamb Waves Generated by a Self-Focusing Phased Array, December 1998, Vol. 3 No. 12.
27. Worlton, D.C. Experimental Confirmation of Lamb Waves at Megacycle Frequencies. *Journal of Applied Physics*, vol. 32, 967-971. (1961).
28. Yago Gómez-Ullate Ricón: *Estudio de Sistemas Ultrasónicos Basados en Multitransductores para la Detección de Defectos en Estructuras Tipo Placa* Tesis Doctoral. Pag. 1-14 y 59 -88 (2007).
29. Yves Berthelot, Jianmin Qu. Crack detection by ultrasonic guide waves. <http://www.me.gatech.edu/diagnostics/staff.html>