

Evaluación de defectos inducidos en probetas de aluminio a través de métodos convencionales y no convencionales de inspección ultrasónica.

Edda C. Rodríguez Prato, Álvaro Martín Mesa
Universidad Simón Bolívar. Departamento de Ciencia de los Materiales.
Sartenejas-Edo. Miranda, Caracas 1080, Venezuela.
Teléfono: +58-212-9063940
Fax: +58-212-9063932
Correo electrónico: eprato@usb.ve

Resumen

El presente estudio, tiene por objeto evaluar el comportamiento de las señales ultrasónicas obtenidas en patrones de Aluminio 6063T5 a través de métodos convencionales y no convencionales de inspección ultrasónica. El aluminio representa un excelente material en ciertas aplicaciones por su excelente resistencia a la corrosión, por la posibilidad de ser tratado térmicamente y por su buen acabado superficial. Sin embargo, este material, al igual que otros, es susceptible a mecanismos de fallas por grietas formadas a consecuencia de esfuerzos solicitantes, entre los cuales se encuentran, el fallo por fatiga o por calentamiento cíclico. A fin de generar patrones de referencia que podrán ser utilizados en la evaluación de este tipo de piezas por técnicas ultrasónicas, se fabricaron probetas de aluminio 6063T5 con entallas de diversos tamaños obtenidos a través de procesos de mecanizado, que actuaron como reflectores de referencia. A través de la evaluación radiográfica se evidenció el tamaño y la forma de cada una de ellas, permitiendo así corroborar la ubicación, el tamaño y la morfología de las mismas. En la inspección ultrasónica, se utilizó el método pulso eco de contacto de haz normal y angular empleando palpadores de 5, 7.5 y 10 MHz, con un diámetro igual a 0.250 pulgadas, por medio del cual se dimensionaron las entallas tomando en cuenta su altura y las medidas desde la cara opuesta a la de inspección. Posteriormente la digitalización de las señales se realizó mediante un Osciloscopio de 60 MHz y una longitud de registro de 2.500 puntos por canal y las señales obtenidas fueron procesadas por medio de MATLAB 6.5 a través de las herramientas contenidas en dicho software, determinando así los espectros de densidad de potencia espectral, potencia total, ancho de banda así como el rango de frecuencia. En general, se hizo un análisis de las señales ultrasónicas así como de los espectros provenientes de cada uno de los reflectores, y se evaluó el comportamiento de cada una de las señales. En conclusión se determinó que los espectros de potencia muestran comportamientos muy particulares en este tipo de material y que varían de acuerdo a la frecuencia del palpador utilizado, lo que permite establecer las frecuencias recomendadas en la detección y ubicación de cada tipo de defecto en cada una de las probetas evaluadas.

1. Introducción

Los Ensayos No Destructivos (END), representan una disciplina tecnológica que agrupa una diversidad de métodos que permiten obtener una información muy amplia sobre las propiedades y características del material, así como también del dimensionamiento y ubicación de diversos tipos de defectología presente en ellos, sin alterar sus condiciones de servicio. Las técnicas de inspección volumétrica, permiten conocer la integridad de un material en su espesor así como también detectar discontinuidades internas que no son visibles en la superficie de la pieza, entre las utilizadas tenemos Radiografía (RT) y Ultrasonido (UT). Por otro lado, existen un grupo de técnicas no convencionales de ultrasonido que complementan y ofrecen otro tipo de información que resulta de interés en la caracterización y evaluación de los materiales, entre las cuales están TOFD (Time of Flight Diffraction) y la Espectroscopia Ultrasónica o Análisis Espectral ⁽¹⁾. Este último representa uno de los métodos utilizados para medir los contenidos de frecuencias de una señal detectada. De esta manera, una vez determinada la propiedad a medir del sistema se analizan los cambios en el espectro, que resultan de las interacciones de la señal ultrasónica al variar esa propiedad. Este tipo de evaluación ha sido ampliamente utilizado en las evaluaciones no destructivas de diversos materiales, entre los que se incluyen las aleaciones de aluminio ^(2,3).

H. Min, H. Kato, N. Narisawa y K. Kageyama, realizaron mediciones ultrasónicas a tiempo real en aleaciones de aluminio 2024 T3 durante ensayos de fatiga. Sus resultados mostraron un incremento en la velocidad ultrasónica debido al aumento de la deformación en el material. Por otro lado, del análisis espectral reportaron una disminución del gradiente de potencia a medida que transcurría el ensayo. Este decrecimiento fue explicado por el cambio en la densidad de dislocaciones presente en el material utilizado ⁽⁴⁾. Por su parte, H. Min y H. Kato ⁽⁵⁾, realizaron ensayos de fatiga en otras muestras de aluminio 2024 T3. Los mismos, observaron que las señales ultrasónicas obtenidas por medio del ensayo cambiaban desde la superficie hasta el fondo del material. Estos cambios se atribuyeron a efectos de elasticidad del material, dadas las deformaciones sufridas por el material que variaron en diferentes direcciones. Al analizar los espectros de frecuencia obtenidos por Fourier, observaron que los cambios de señales ultrasónicas son debido a dislocaciones y defectos puntuales originados en el material, los cuales eran activados por bajas frecuencia de cargas cíclicas en el mismo.

S. Van Landuit, P. Guillaume y G. Van Der Linden ⁽⁶⁾, desarrollaron una técnica de monitoreo de grietas generadas por fatiga en la cual se estimó el tamaño de dichas grietas. Esta técnica se logró gracias a métodos a nivel de laboratorio usando información de los espectros de frecuencia en diferentes puntos de la operación del material en estudio.

Wei ⁽⁷⁾ por su parte caracterizó defectos de punta aguda utilizando análisis espectral, sus estudios mostraron una correlación entre las discontinuidades de punta aguda con la frecuencia máxima de la señal. El observó que el pico de la señal reflejada por una discontinuidad de este tipo, utilizando la técnica pulso eco de contacto con haz normal, aumenta en la medida en que se hace más aguda la punta y explica que esta correlación se debe principalmente a una mejor colimación de las componentes de alta frecuencia

en el campo ultrasónico del transductor, y de una reflexión preferencial de la porción central del haz que regresa al transductor, por la forma de la discontinuidad.

A.J. Anderson, realizó evaluaciones ultrasónicas y de análisis de frecuencia a diversos materiales, entre las cuales destacan aleaciones de Zirconio, Aluminio y Titanio. De sus estudios, lograron obtener numerosas correlaciones así como también diversos parámetros necesarios con el fin de caracterizar cada uno de estos materiales, logrando así una relación entre el coeficiente de orientación de los granos en cada uno de estos materiales con las señales obtenidas ⁽⁸⁾.

Chen y Cheng indicaron la importancia del análisis de tiempo y frecuencia en sus evaluaciones no destructivas, resaltando tres aspectos cuando se analizan las señales en dominio tiempo y frecuencia de muestras de aluminio. La primera característica, es que la energía reflejada está asociada a la forma geométrica de los defectos, la segunda es que permite medir con exactitud la profundidad de los reflectores y la tercera es que se puede determinar el tamaño de los defectos geométricos ⁽⁹⁾.

Gericke, determinó una técnica para obtener las relaciones ultrasónicas de atenuación/frecuencia en una sola operación. Este método emplea la energía de los pulsos ultrasónicos en una banda ancha de frecuencias y utiliza un analizador de espectros para detectar la dependencia de la frecuencia con la atenuación ultrasónica. Todos estos ensayos fueron realizados en aleaciones de aluminio 2024 H2 ⁽¹⁰⁾.

Todas estas investigaciones han demostrado el empleo satisfactorio del análisis espectral ultrasónico en la evaluación de materiales. Es por ello que el análisis espectral ultrasónico, es de gran importancia en la caracterización de materiales y contribuye en el estudio y evaluación de las señales ultrasónicas. Cuando un pulso ultrasónico se propaga a través de un material, interactúa con sus componentes microestructurales (granos, inclusiones, grietas, etc.), esta interacción puede ser cuantitativamente relacionada con sus tamaños y geometrías, así como con la longitud de la onda incidente. Esta interacción puede ser evaluada como un cambio en la distribución de frecuencias del eco transmitido (análisis espectral del eco), o de la señal de ruido (análisis espectral de ruido) ^(1,2,3).

El objetivo de este trabajo fue evaluar y caracterizar patrones de aluminio 6063 T5, con entallas de diversos tamaños obtenidos a través de procesos de mecanizado, mediante la utilización de espectroscopia ultrasónica y ultrasonido convencional. Después de su preparación, la morfología y la ubicación de los defectos fueron verificadas por radiografía. Posteriormente fueron inspeccionados mediante el ensayo ultrasónico, empleando la técnica pulso eco de contacto, utilizando transductores de diferentes frecuencias y digitalizando las señales a través de un Osciloscopio. Las señales así obtenidas, fueron procesadas permitiendo así el análisis espectral del pulso transmitido en la muestra, en dominios de frecuencia. Dicho análisis fue utilizado para medir los contenidos de frecuencia de una señal detectada, con el fin de determinar la función del sistema bajo estudio y analizar los cambios del espectro que resultan de las interacciones con el sistema.

2. Desarrollo Experimental

2.1 Fabricación de las probetas empleadas

Para llevar a cabo el estudio se prepararon probetas de aluminio 6063 T5. En las mismas se generaron entallas o grietas a través de diversos procesos de mecanizado de 1, 2, 3 y 4 mm de profundidad. La forma, dimensiones y nomenclatura (Tipo) de cada una de ellas se muestran en la figura 1.

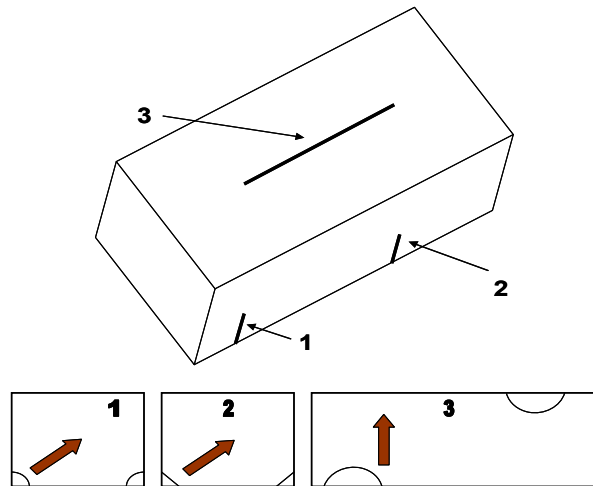


Figura 1. Modelo representativo de los defectos generados en las probetas de ensayo. Las flechas representan la dirección de la dimensión de cada defecto que fue variando desde 1mm hasta 4 mm.

2.2 Inspección ultrasónica

Los ensayos se realizaron utilizando un equipo de Ultrasonido Krautkramer modelo USN 52L, detector de fallas, de amplia capacidad de memoria. Se utilizaron transductores del tipo emisor receptor de 5, 7.5 y 10 MHz de frecuencia y con una incidencia de 45°. Con el fin de eliminar la capa de aire que se pudiera formar entre el transductor y la superficie de las probetas de ensayo, se utilizó como acoplante glicerina.

2.3 Obtención y procesamiento de las señales

Las señales fueron obtenidas por medio de un Osciloscopio Tektronix modelo TDS 1002 de 60 MHz y una longitud de registro de 2.500 puntos por canal. Para la realización del análisis de frecuencia de las señales ultrasónicas se seleccionó la señal RF proveniente de cada defecto en cada una de las probetas evaluadas. Se aisló la señal, de forma que apareciera únicamente esa señal en la pantalla y se procedió a almacenar la data digitalizada. Una vez digitalizadas, se realizó el análisis espectral de estas señales empleando diversos algoritmos contenidos en el software de aplicaciones matemáticas MATLAB 6.5, permitiendo así la interpretación de la señal en dominio tiempo frecuencia. Dicho análisis permitió la:

- ✓ Determinación de los espectros de potencia.

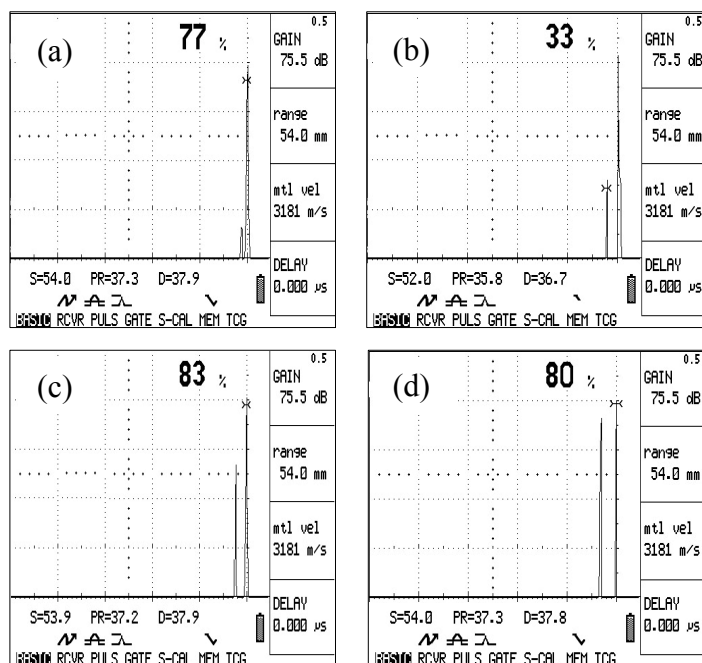
- ✓ Determinación del ancho de banda y del rango de frecuencia en cada uno de los espectros.
- ✓ Determinación de la potencia total y de la potencia máxima de los espectros.

3. Resultados y análisis de resultados

3.1 Evaluación ultrasónica

Con el fin de evaluar y caracterizar cada una de las entallas en las probetas de aluminio, se procedió a la calibración del equipo siguiendo las prácticas estandar ASTM E114-95⁽¹¹⁾ en el caso de incidencia normal y la ASTM E587-00⁽¹²⁾ para incidencia angular. A continuación se presentan las señales ultrasónicas obtenidas por cada uno de los defectos evaluados en la pantalla del equipo ultrasónico, a una frecuencia en particular.

En la figura 2, se aprecian las imágenes obtenidas de cada una de las entallas del defecto Tipo 1 en la pantalla del equipo ultrasónico. La entalla se aprecia como una indicación de ecos sucesivos, cuya envolvente tiene una cierta anchura que depende del tamaño del reflector. En las evaluaciones realizadas utilizando el palpador de 10 MHz, se observaron variaciones de acuerdo a la frecuencia y a la magnitud del defecto evaluado. La amplitud del eco reflejado por la entalla permite correlacionarlo con el tamaño de la misma, mientras mayor es la amplitud de la entalla mayor es el tamaño de la indicación correspondiente a cada una de ellas. El porcentaje (%) registrado en la pantalla del equipo corresponde a la altura registrada por cada uno de los ecos, así mismo se aprecia la ubicación exacta en la probeta.



**Figura 2. Señales UT del defecto Tipo 1 utilizando el palpador de 10 MHz
(a) 1mm (b) 2 mm (c) 3 mm y (d) 4 mm**

De acuerdo a las evaluaciones realizadas, la mejor frecuencia de inspección de este tipo de defecto resulto ser la de 10 MHz, esto en base a los valores experimentales mostrados por los diferentes tamaños de grieta durante la evaluación ultrasónica. Por otro lado, en la evaluación de este tipo de discontinuidad se aprecia la reflexión de la misma y de la pared de fondo de la probeta, producto de que el área de contacto de la entalla durante la evaluación utilizando palpadores angulares es muy pequeña, observándose señales muy estrechas y un eco de una pared de fondo constante a lo largo de las evaluaciones. Es por ello que el palpador de 10 MHz ofrece una alta sensibilidad y resolución en la evaluación de este tipo de entalla.

La figura 3 corresponde a las señales obtenidas del defecto Tipo 2 y Tipo 3 de las grietas de 3 mm, en la pantalla del equipo de ultrasonido.

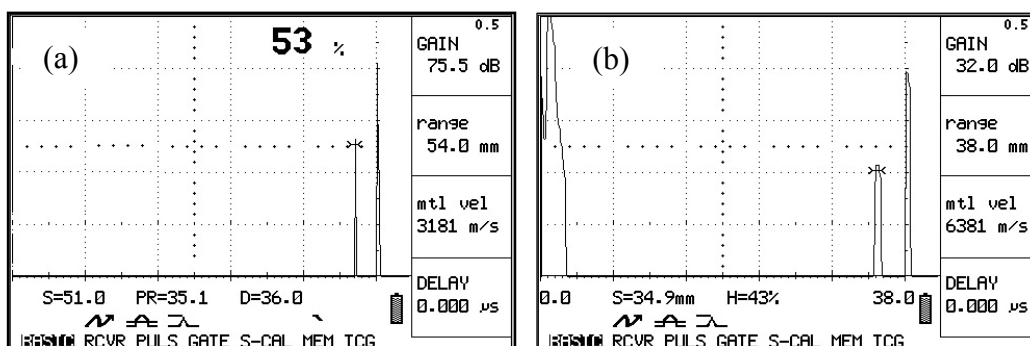


Figura 3. Señales UT de los defectos (a) Tipo 2, correspondiente a la grieta 3 mm utilizando un palpador de 7.5 MHz y (b) Tipo 3 correspondiente a la grieta de 3 mm utilizando el palpador de 10 MHz

El defecto Tipo 2 mostrado en la figura 3 se aprecia como una indicación, cuya envolvente tiene una cierta anchura que depende del tamaño del reflector. Por otro lado, para este tipo de defecto, la reflexión del haz es ligeramente menor al observado por el defecto Tipo 1, por lo que gran parte de las señales obtenidas por este tipo de defecto ofrece indicaciones mucho mas estrechas y definidas. Así mismo, las evaluaciones realizadas permitieron corroborar que la mejor frecuencia de inspección para este tipo de defecto resulto ser la de 7.5 MHz, y tal observación se basa en los valores experimentales obtenidos para diferentes tamaños del defecto Tipo 2. Por otro lado, la figura 3(b) corresponde a la grieta de 3 mm del defecto Tipo 3, la misma se aprecia como una envolvente muy aguda y estrecha y cuyo ancho es función del diámetro y del tamaño del defecto. En general se observa que el modo de incidencia del haz influye en la evaluación de cada uno de estos defectos. Tanto en la incidencia normal como angular, la curvatura del defecto produce divergencia del haz ultrasónico, en algunos casos aumentándolos o disminuyéndolos (focalización). Es por ello y en base a estas observaciones, se deduce que para cada discontinuidad se podría recomendar un tipo de palpador en particular que permita la detección y evaluación más adecuada.

La frecuencia idónea de inspección durante la evaluación de la mayor parte de los defectos generados en las probetas de aluminio es la de 10 MHz, aún cuando para el

defecto Tipo 2, la mejor frecuencia de inspección es la de 7.5 MHz. Tales recomendaciones se basan en las evaluaciones e inspecciones realizadas. En general se aprecia la necesidad de utilizar palpadores con un alto poder del haz ultrasónico y por consiguiente con una alta sensibilidad y resolución, por tratarse de la detección de indicaciones muy pequeñas.

3.2 Espectros de potencia de los defectos provenientes de las probetas de aluminio

Los espectros de densidad de potencia (PSD), describen como la potencia se distribuye con la frecuencia. A continuación se presentan las gráficas y características correspondientes a los espectros de potencia de las señales obtenidas en cada uno de los defectos inducidos en las probetas de aluminio 6063 T5, evaluadas en el rango que corresponde a un 50% de caída de la señal.

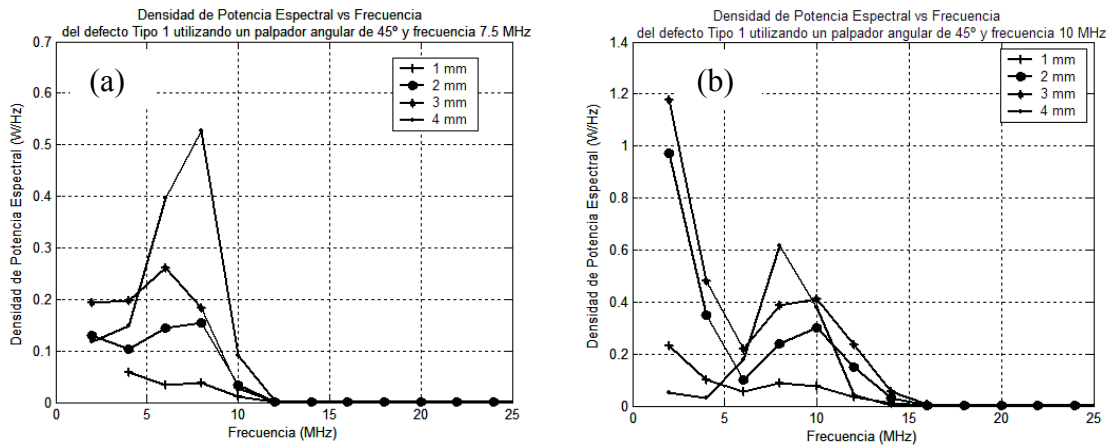


Figura 4. Espectros de densidad de potencia del defecto Tipo 1 evaluado a la frecuencia de (a) 7.5 MHz y (b) 10 MHz

La Figura 4, muestra los espectros de densidad de potencia (PSD) de las señales correspondientes del defecto Tipo 1 en las probetas de aluminio 6063 T5, utilizando un palpador de 7.5 y 10 MHz. En los espectros de potencia tomados con el palpador de 7.5 MHz (Fig.4 (a)), se observa que la potencia máxima se alcanza a una frecuencia de 7 MHz, presentando un ancho de banda entre 4 MHz y 8 MHz. Por otro lado, se observa que la potencia total de los espectros aumenta a medida que aumenta el tamaño de cada uno de los reflectores. En lo que respecta a los espectros de densidad de potencia de las señales obtenidas por cada uno de los defectos tomados con el palpador de 10 MHz, se observa que la frecuencia máxima dominante se alcanza a una frecuencia de 9 MHz, presentando un ancho de banda entre 6 MHz y 10 MHz. Así mismo se evidencia nuevamente que la potencia total de los espectros aumenta a medida que aumenta el tamaño de cada uno de los reflectores.

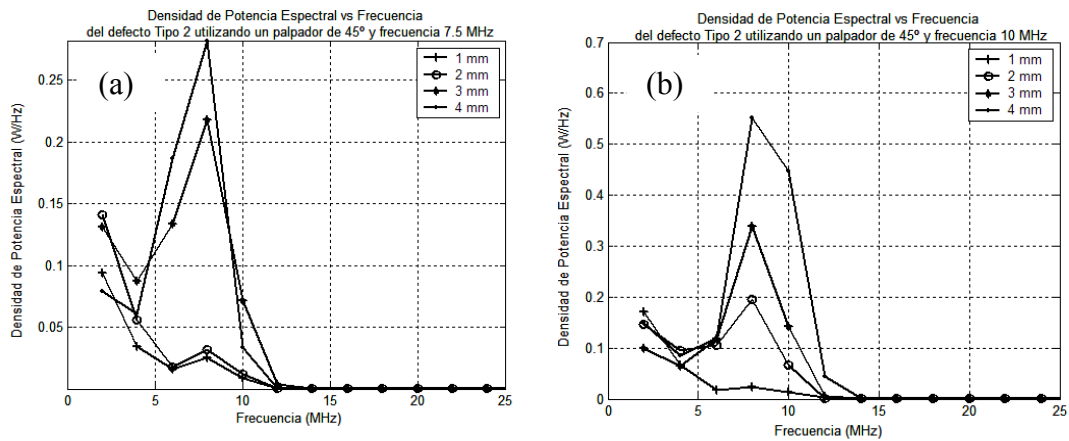


Figura 5. Espectros de densidad de potencia del defecto Tipo 2 evaluado a la frecuencia de (a) 7.5 MHz y (b) 10 MHz

La Figura 5, muestra los espectros de densidad de potencia espectral (PSD) de las señales correspondientes del defecto Tipo 2 en las probetas de aluminio 6063 T5, tomados a 7.5 y 10 MHz. En la Fig.5(a), se observa que la potencia máxima se alcanza a una frecuencia de 7 MHz, presentando un ancho de banda entre 6 MHz y 8 MHz. Por otro lado, se observa que la potencia total de los espectros aumenta a medida que aumenta el tamaño de cada uno de los reflectores. Así mismo, los espectros de densidad de potencia espectral de las señales obtenidas de cada uno de los defectos tomados con el palpador de 10 MHz, muestran una frecuencia máxima dominante entre los 7 MHz y 9 MHz, presentando un ancho de banda entre 2 MHz y 4 MHz. Así mismo se evidencia nuevamente que la potencia total de los espectros aumenta a medida que aumenta el tamaño de cada uno de los reflectores.

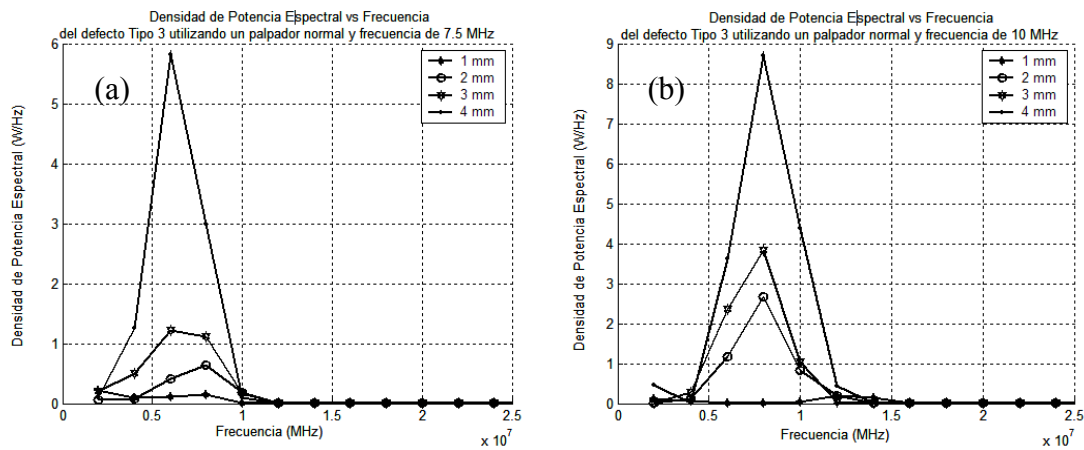


Figura 6. Espectros de densidad de potencia del defecto Tipo 3 evaluado a la frecuencia de (a) 7.5 MHz y (b) 10 MHz

La Figura 6, muestra los espectros de las señales correspondientes al defecto Tipo 3 en las probetas de aluminio 6063 T5, utilizando palpadores de 7.5 y 10 MHz. Los espectros de potencia tomados con el palpador de 7.5 MHz (Fig.6(a)), muestran una máxima

potencia a una frecuencia de 7 MHz, presentando un ancho de banda entre 6 MHz y 8 MHz y en el caso de utilizar un palpador de 10 MHz (Fig. 6(b)), la máxima potencia se ubica a una frecuencia entre 7 y 13 MHz, presentando un ancho de banda entre 6 y 13 MHz. Por otro lado, se observa que la potencia total de los espectros aumenta a medida que aumenta el tamaño de cada uno de los reflectores, corroborando así que la energía que llega al transductor es mayor a medida que aumenta el tamaño de la grieta. Por otro lado, se aprecia que los valores de máxima potencia se alcanzan en rangos de frecuencia entre 6 y 8 MHz para la frecuencia de 7.5 MHz y 8 a 12 MHz para el palpador de 10 MHz.

3.3 *Análisis de los espectros de potencia de las entallas provenientes de las probetas de aluminio*

En la caracterización de cada uno de los espectros de potencia se pudo determinar parámetros importantes tales como, la potencia máxima, la frecuencia máxima y el ancho de banda que alcanza el espectro en un rango de frecuencias en que la señal presenta una caída del 50 %.

En la figura 7(a), se observa la variación en la potencia máxima de cada uno de los espectros con respecto al tamaño de grieta Tipo 1 en las probetas de aluminio, a medida que se aumenta la frecuencia de ensayo. En la misma, se puede observar que la potencia máxima de los espectros de potencia aumenta a medida que aumenta el tamaño del defecto y la frecuencia del palpador.

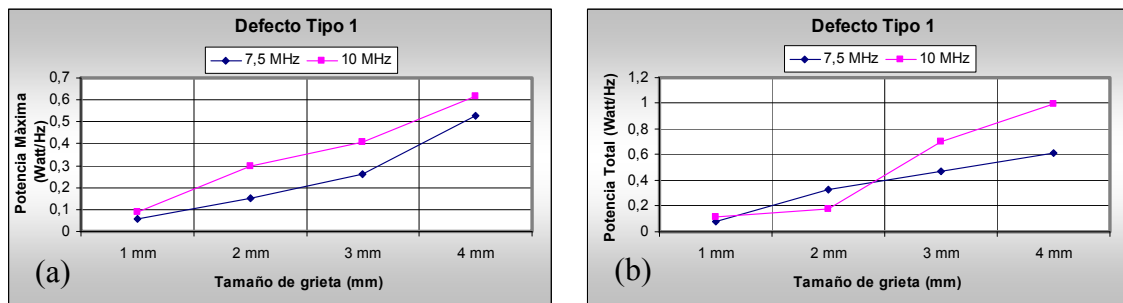


Figura 7. Valores de potencia máxima y potencia total en cada uno de los espectros del defecto Tipo 1 en las probetas de aluminio 6063T5

En la figura 7 (b), se observa la variación de la potencia total de cada uno de los espectros con respecto al tamaño de grieta Tipo 1, en las probetas de aluminio 6063 T5, a medida que se aumenta la frecuencia de ensayo. En la figura 7(b), se aprecia que a medida que aumenta el tamaño del reflector, aumentan las reflectividades de cada una de las señales, debido a que la energía que llega al transductor es mayor a medida que aumenta el tamaño del reflector. También es posible distinguir que para cada uno de los reflectores, existe una frecuencia en particular a través de la cual se obtiene una mejor reflectividad, por lo que para cada discontinuidad se podría recomendar una frecuencia en particular que permita la detección y evaluación del tamaño real de las discontinuidades.

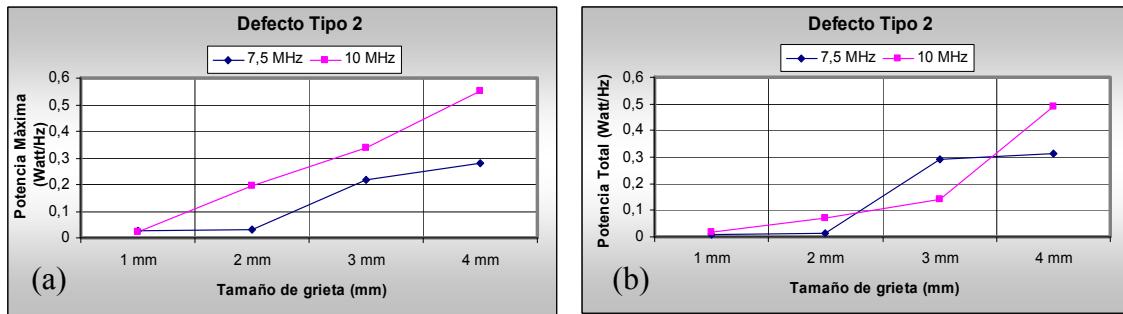


Figura 8. Valores de potencia máxima y potencia total en cada uno de los espectros del defecto Tipo 2 en las probetas de aluminio 6063T5

La figura 8(a), muestra la variación de la potencia máxima de cada uno de los espectros con respecto al tamaño de grieta Tipo 2 en las probetas de aluminio, a medida que se aumenta la frecuencia de ensayo. En la misma, se evidencia que la potencia máxima de los espectros de potencia aumenta a medida que aumenta el tamaño del defecto y la frecuencia del palpador. Por otro lado, la figura 8(b) evidencia nuevamente el aumento en la potencia total de los espectros a medida que se aumenta el tamaño del reflector, producto de que la energía que llega al transductor es mayor a medida que aumenta el tamaño del reflector. También es posible distinguir que para cada uno de los reflectores, existe una frecuencia en particular a través de la cual se obtiene una mejor reflectividad, por lo que para cada discontinuidad se podría recomendar una frecuencia que permita la detección y evaluación del tamaño real de las discontinuidades.

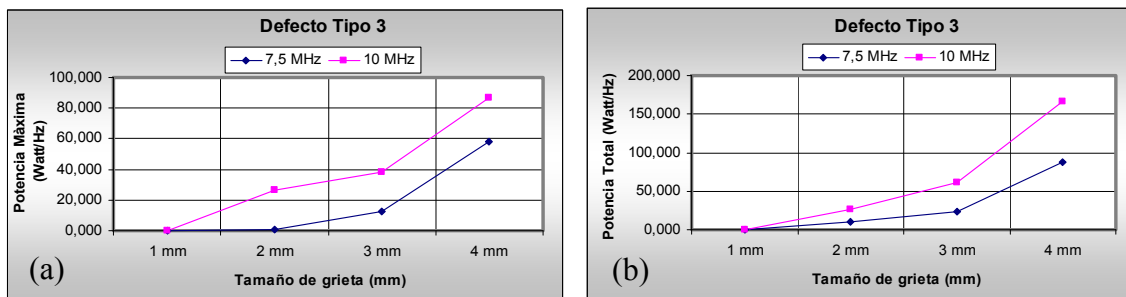


Figura 9. Valores de potencia máxima y potencia total en cada uno de los espectros del defecto Tipo 3 en las probetas de aluminio 6063T5

En el defecto Tipo 3, tal como se muestra en la figura 9(a), los valores de potencia máxima aumentan a medida que aumenta el tamaño del defecto y la frecuencia. En general, se aprecia que para el caso de entallas con un tamaño superior a los 2 mm en las probetas de aluminio el comportamiento que presentan los espectros son muy similares aun cuando para tamaños menores se acercan significativamente. Así mismo, en la figura 9(b), se observa la variación de la potencia total de cada uno de los espectros con respecto al tamaño de grieta, a medida que se aumenta la frecuencia de ensayo. En la misma se evidencia nuevamente el aumento de la potencia total con el tamaño del reflector. Sin embargo para tamaños muy cercanos a 1 mm, las reflectividades mostradas por ambos espectros tomados a las dos frecuencias evaluadas

no muestran una diferencia significativa, lo que si se observa a medida que aumenta el tamaño de cada uno de los defectos.

En general la mayoría de los espectros muestran comportamientos y formas muy limpias y definidas, que se relacionan con la incidencia del haz sobre cada una de las discontinuidades. De allí la importancia de la incidencia del haz sobre cualquier discontinuidad, ya que cualquier reflector o defecto que no sea plano o perpendicular al haz incidente, dispersa parte de la energía ultrasónica del haz incidente, dando origen a espectros muy irregulares. También se observa que mientras más grande es el reflector, mayor es la reflectividad que produce, esto se debe a que la energía que llega al transductor es mayor mientras más grande es el tamaño del defecto.

Por otro lado, se corrobora la necesidad de utilizar palpadores de varias frecuencias que nos permitan diferenciar y determinar con mayor exactitud el tamaño real de las discontinuidades, a objeto de caracterizar defectos a través de análisis espectral.

4. Conclusiones

En el estudio ultrasónico de las señales se pudo detectar y caracterizar los defectos generados en cada una de las probetas evaluadas.

Para el tipo de defectología evaluado en las muestras de aluminio, el palpador de 10 MHz ofrece una mayor resolución y sensibilidad en la detección de los defectos Tipo 1 y 3, y el palpador de 7.5 MHz para los defectos Tipo 2.

En el análisis espectral se pudo observar en los espectros de potencia, que la potencia máxima de los mismos aumenta a medida que aumenta el tamaño del reflector. Por otro lado, se aprecia un aumento en la potencia total a medida que aumenta el tamaño del reflector.

Para cada uno de los reflectores evaluados en las probetas de aluminio, existe en particular una frecuencia a través de la cual se obtiene una mejor reflectividad y este depende del tipo de defecto que se estudia y del modo de incidencia utilizado en su detección y evaluación.

Mediante la caracterización de los espectros de los defectos evaluados en las probetas de aluminio 6063T5, es posible apreciar que los mismos muestran comportamientos muy particulares. Es por ello que se puede predecir que en el rango de frecuencias estudiadas cada tipo de discontinuidad presenta una frecuencia particular que permite la detección y evaluación del tamaño de una discontinuidad.

5. Referencias

1. Nondestructive Testing Handbook, 'Ultrasonic Testing', 2nd Edition, Volume 7, ASNT, USA, 1991.
2. Rodríguez, E., Amorero, L., Veracierta J., 'Análisis espectral en el estudio de las señales ultrasónicas en muestras de acero', Cimenics 2004 Proceedings, Vol. 1, pp EC49-EC56, Abril, 2004.

3. Rodríguez E., Amorer L., Fraudita F., Bueno A., Suárez K., 'Aplicación de análisis espectral en el estudio de las señales ultrasónicas de un acero AISI-SAE 4340'. Revista de la Facultad de Ingeniería. UCV, Vol. 19, pp. 89-98, 2004
4. Min, X.; Kato, H.; Narisawa, N. y Kageyama, K.: 'Real-time ultrasonic measurement during fatigue testing of aluminum alloys'. Materials Science and Engineering, Vol. A392, pp 87-93, 2005.
5. Min, X. H. y Kato, H.: 'Change in ultrasonic parameters with loading/unloading process in cyclic loading of aluminum alloy'. Materials Science and Engineering A. Vol. A372, pp 269-277, 2004.
6. Vanlanduit, S. Guillaume, P. y Van Der Linden, G.: 'On-line monitoring of fatigue cracks using ultrasonic surface waves'. NDT & E International. Vol. 36, pp 601-607, 2003.
7. Wei. W. 'Characterization of discontinuity tip sharpness using ultrasonic spectral analysis'. Material Evaluation. pp 195-199. February 1998
8. Anderson, A.J. 'Ultrasonic texture characterization of aluminum, zirconium and titanium alloys'. Ames Lab., IA (United States), Thesis (Ph.D.); PBD, 1997.
9. Chen C.H. y Cheng T.H. 'Time-frequency analysis in ultrasonic nondestructive testing', WCNDT96 Proceedings, New Delhi. 1996.
10. Gericke, O.R. 'Spectrum and contour analysis of ultrasonic pulses for improved Nondestructive Testing'. Type Technical Report OrgWatertown Arsenal Labs., Mass WAL-TR-830.5/1, 1960
11. ASTM E114-95: 'Standard practice for ultrasonic pulse-echo straight-beam examination by the contact method'. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 03.03, 2005.
12. ASTM E587-00. 'Standard practice for ultrasonic angle-beam examination by the contact method' Annual Book of ASTM Standards. Vol. 03.03, 2005.