CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS PLANAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO 316 L MEDIANTE ESPECTROSCOPÍA ULTRASÓNICA

J. Zambrano [1, 2,] E. Rodríguez [3], J. C. Pereira [2]

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (1): 133-146

CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS PLANAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO 316 L MEDIANTE ESPECTROSCOPÍA ULTRASÓNICA

J. Zambrano [1, 2,] E. Rodríguez [3], J. C. Pereira [2]

[1]: Centro de Investigaciones de Materiales – CIM Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.
[2]: Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela
[3:] Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad Simón Bolívar, Caracas Venezuela

** E-mail: jzambran@uc.edu.ve*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008
Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 20-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

El objeto del presente estudio, es caracterizar cambios microestructurales en muestras planas de acero inoxidable austenítico AISI 316L mediante espectroscopía ultrasónica. Para ello se realizaron tratamientos térmicos a las muestras, evaluados a través de microscopía óptica y microscopia electrónica de barrido. Durante la inspección ultrasónica, se utilizó el método pulso eco de contacto de haz normal empleando palpadores de 2.25, 5 y 10 MHz, con diámetro de 0.250 pulgadas, para la medición de atenuación y velocidad longitudinal. Para el análisis espectral se utilizaron palpadores de 2.25 y 5 MHz digitalizando las señales mediante un osciloscopio de 60 MHz con longitud de registro de 2.500 puntos por canal, las señales así obtenidas fueron procesadas por medio de MATLAB 7.2, obteniéndose cuantitativamente diversas características de interés. El estudio reveló que las mediciones experimentales de la velocidad ultrasónica longitudinal producían resultados dispersos y las mediciones de atenuación en las muestras corroboran el efecto del tamaño de grano. Así mismo, se realizó un análisis de los espectros de energía, determinándose que muestran comportamientos particulares en el material y que varían de acuerdo a la frecuencia del palpador utilizado, lo que permite establecer las frecuencias recomendadas para caracterización y estudio de este acero.

Palabras Claves: *Acero inoxidable, ultrasonido, espectroscopia, caracterización.*

Abstract

The object of the present study, is to characterize microstructural changes in flat samples of austenitic stainless steel AISI 316L by means of ultrasonic spectroscopy. Heats treatments were made, evaluated by optical microscopy and scanning electronic microscopy. During Ultrasonic inspection, the normal beam contact pulse- Echo method was used, using probes of 2.25, 5 and 10 MHz, with 0.250 inch diameter, for the measurement of attenuation and longitudinal speed. For the spectral analysis were used probes of 2.25 and 5 MHz, the signal digitalizations were made by a oscilloscope of a 60 MHz with length of registry of 2.500 points by channel, the signals thus obtained were processed using MATLAB 7.2®, quantitatively diverse characteristics were obtained. The study revealed that the experimental measurements of the longitudinal ultrasonic speed produced dispersed results and the attenuation measurements in the samples corroborate the grain size effect. Also, an the energy analysis spectrum was made, determining itself that they show particular behaviors in the material and that they vary according to the frequency of the used probes, which allows to establish the frequencies recommended for characterization and study of this steel.

Keywords*: stainless steel, ultrasound, spectroscopy, characterization*

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidables austeníticos son un importante tipo de aleación de ingeniería muy utilizados debido a que poseen gran estabilidad química. Estos aceros no son usados frecuentemente en la condición de trabajados en frío, debido a que la deformación plástica en frío tiene marcada influencia sobre las propiedades mecánicas, en particular a temperaturas menores a cero grados centígrados. Por otra parte, son ampliamente utilizados en aplicaciones donde se requiere combinación de alta resistencia a la

corrosión, a la conformabilidad y a la soldabilidad, particularmente en la industria química, naval, farmacéutica, aeronáutica, alimenticia, de transporte, entre otras. Esto determina su importancia crítica en el desarrollo de la industria tecnológica [1].

Por otro lado, durante la evaluación por ultrasonido de estos aceros se ha encontrado que son difíciles de inspeccionar, debido a su compleja microestructura, por lo cual se requiere desarrollar técnicas especiales de ultrasonido que permitan la evaluación de estos materiales, asegurando de esta forma una alta efectividad en la detección y dimensionamiento de los defectos presentes por diversos mecanismos de degradación, que pudieran poner en riesgo la integridad mecánica y confiabilidad operacional de recipientes y tuberías que sean fabricadas con estos aceros.

El análisis de espectros obtenidos de señales ultrasónicas, es ampliamente utilizado en la actualidad para la caracterización de materiales y la detección de discontinuidades en piezas metálicas, determinando la dependencia de las propiedades y características del material bajo el estudio de la frecuencia, debido a que la propagación de la onda ultrasónica se ve afectada por la microestructura del material, a través del cual se propaga.

Debido a que las señales obtenidas de los equipos de ultrasonido convencionales, se basan principalmente en las propiedades geométricas del ultrasonido y no proveen información adicional sobre la interacción del material con la onda [2], se hace necesario realizar el procesamiento de señales que permita estudiar el comportamiento espectral de la onda con el objeto de generar patrones que pudiesen ser utilizados al momento de inspeccionar aceros inoxidables austeníticos o servir de apoyo en el tipo de evaluación a realizar, esto con el fin de mejorar la confiabilidad en las operaciones de inspección y adicionalmente fijar los parámetros acústicos característicos necesarios.

El propósito de la espectroscopía ultrasónica es determinar la dependencia de las propiedades y características del material bajo estudio con la frecuencia. El análisis de una señal en dominio frecuencial también llamado "análisis dominio frecuencia", representa uno de los métodos utilizados para medir los contenidos de frecuencia de una señal detectada. De esta manera, una vez determinada la propiedad del sistema a medir (tamaño de grano, proporción de fases, entre otras), se analizan los cambios en el espectro que resultan de las interacciones de la señal ultrasónica al variar esa propiedad [2].

E. Rodríguez *et al* [3], evaluaron el comportamiento de las señales ultrasónicas, en un acero AISI-SAE 4340 con rugosidades en la cara frontal y agujeros taladrados de diversos tamaños, que actuaron como reflectores de referencia, utilizando el método de pulso eco de contacto de haz normal. Los resultados obtenidos determinaron que los espectros de amplitud y potencia presentaron comportamientos muy particulares en ese tipo de acero y varían de acuerdo a la frecuencia del palpador y además se ven influenciados por la orientación de la discontinuidad. El análisis espectral les permitió cuantificar diversos parámetros, mediante los cuales se puede caracterizar y evaluar el efecto de la rugosidad en la detección de dichas discontinuidades.

Gür y Tuncer [4] evaluaron por ultrasonido muestras de acero del tipo AISI–SAE 1040 y 4140, tratadas térmicamente bajo diferentes condiciones. Las microestructuras obtenidas fueron caracterizadas por microscopia óptica y electrónica. En las mismas se realizaron mediciones de velocidad del sonido y la atenuación utilizando la técnica del pulso eco. Sus estudios reportaron que la velocidad del sonido está directamente influenciada por las fases presentes, es mínima en el acero en presencia de martensita debido al incremento de la densidad de dislocaciones y a los esfuerzos residuales y se incrementa según la microestructura en el siguiente orden: bainita, ferrita-perlita fina, ferrita-perlita gruesa. El revenido de la martensita incrementa la velocidad ultrasónica. Por otro lado, determinaron que existe una relación inversa entre la velocidad ultrasónica y la dureza el material tratado térmicamente, a mayor dureza menor velocidad ultrasónica.

Kumar [5], evaluó diferentes materiales metálicos tales como aceros de bajo carbono, aceros ferriticos 9Cr-1Mo, aleaciones de titanio y superaleaciones base níquel tipo Inconel 625 recocidos y envejecidos a diferentes temperaturas. Sus estudios demostraron el efecto sobre la atenuación y la velocidad ultrasónica que tienen la fracción volumétrica de las fases y el tamaño de grano presente, permitiendo así la caracterización microestructural a través de ultrasonido convencional.

Badidi et al [6] estudiaron muestras de acero al carbono, las cuales fueron templadas con el fin de generar cambios microestructurales, a través de la técnica de incidencia oblicua y normal ultrasónica por inmersión. Sus resultados permitieron determinar cualitativamente el tamaño de grano a través de mediciones de velocidad de onda transversal y longitudinal, no logrando resultados satisfactorios con el coeficiente de atenuación.

Palanichamy et al [7] utilizaron muestras de acero inoxidable austenítico 316, las cuales trataron térmicamente y luego analizaron mediante la técnica de pulso eco de contacto. Sus resultados mostraron que la medida de la velocidad ultrasónica puede ser utilizada para estimar el tamaño de grano como un procedimiento no destructivo. Así mismo, este puede ser eficientemente utilizado en campo ya que sugieren que la medida de las velocidades comparadas con las mediciones convencionales de atenuación representa una forma más exacta para determinar el tamaño de grano.

Dombret [8] presenta un análisis acerca de la inspección ultrasónica de muestras de aceros inoxidables austeníticos, señalando que la propagación de las ondas elásticas es fuertemente distorsionada por la estructura del grano grueso en los aceros inoxidables austeníticos, la cual puede variar de sitio a sitio a ser inspeccionado. Así como también la dependencia de la velocidad en la orientación y la existencia de modos de propagación y direcciones como consecuencia de la anisotropía presentada por dichos materiales.

1. PARTE EXPERIMENTAL

1.1 2.1 Material

La composición química (%Peso) del acero inoxidable austenítico AISI 316L utilizado en este estudio fue 16.54 Cr, 10.49 Ni, 1.95 Mo, 1.40 Mn, 0.57 Si, 0.05C, 0.0011 S, 0.0014 P, además de Fe para completar el balance, la cual fue determinada utilizando un espectrofotómetro marca Spectro modelo Spectrolab, empleando la técnica de espectrofotometría de emisión óptica.

La condición de entrega del material fue un tratamiento térmico de solubilización a 1035 °C por una hora, seguido de enfriamiento rápido. Se utilizaron muestras planas de 1/2" de espesor.

1.2 2.2 Tratamientos Térmicos

Las muestras planas fueron tratadas térmicamente, empleando un horno tipo mufla marca Thermolyne modelo 48000 equipado con un controlador de temperatura digital y dos termocuplas, los tratamientos térmicos efectuados se listan en la tabla 1.

Tabla 1. Tratamientos térmicos efectuados a las probetas planas de acero inoxidable austenítico

Muestra	*Tratamiento térmico*
1 a	Condición original
1 b	850ºC/2h/Enfriamiento lento
1 c	850ºC/6h/Enfriamiento lento
1 d	850ºC/10h/Enfriamiento lento
1 e	850ºC/24h/Enfriamiento lento
2 b	1000ºC/2h/Enfriamiento lento
2 c	1000ºC /6h/Enfriamiento lento
2 d	1000ºC /10h/Enfriamiento lento
2 e	1000ºC /24h/Enfriamiento lento

1.3 Evaluación metalográfica

1.3.1 Preparación de probetas para microscopia

Las probetas fueron preparadas para observar su microestructura por microscopia óptica y de barrido, siguiendo los pasos indicados por la norma ASTM E3 [9]. Para el ataque químico de la probeta se utilizó el reactivo químico recomendado por la norma ASTM E407-99 [10]; una solución compuesta por 10 ml de HNO_3, 15 ml de HCl, 10 ml ácido acético y 5 gotas de glicerina, mejor conocido como gliceregia. El ataque se realizó por frotamiento en tiempos variables según la probeta entre 50 s y 2 min., se lavó la probeta con abundante agua, luego se realizó una limpieza por ultrasonido con una solución jabonosa suave en un limpiador ultrasónico marca Cole-Palmer modelo 8892, se enjuagaron en agua nuevamente y se secaron con etanol y aire caliente, posteriormente se observó la muestra preparada a diferentes escalas de aumento en un microscopio marca Unión modelo Versamet 3, equipado con un sistema de captura de imágenes digital.

Para microscopia de barrido se empleó un microscopio electrónico de barrido con filamento de emisión de campo (FEG) tipo Schottkey JEOL JSM 6300, equipado con detectores de electrones secundarios y de electrones retrodispersados (BSE),

así como un sistema de microanálisis por dispersión de energía (EDX) Oxford Inca y cámara de infrarrojos.

1.3.2 Medición del tamaño de grano

El tamaño de grano de las muestra fue determinado utilizando el método de intercepto lineal de Heyn, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E-112 [11].

1.4 Evaluación por ultrasonido

1.4.1 Preparación de las muestras

Para el análisis por ultrasonido se utilizaron muestras de 30x30x12.7mm. La superficie para la evaluación fue preparada siguiendo las etapas de desbaste y pulido, para obtener una superficie con rugosidad inferior a 6.3 micrómetros, según lo recomendado por la norma ANSI/AWS D1.1-2004 [12]. Una vez preparadas las muestras se realizó la inspección por el método pulso eco de contacto utilizando un equipo de inspección Krautkramer modelo USN 60, detector de fallas, de amplia capacidad de memoria. Se utilizaron transductores del tipo emisor receptor de 2.25, 5, y 10 MHz de frecuencia. 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 utilizo como acoplante glicerina.

1.4.2 Velocidad longitudinal ultrasónica

Una vez calibrado y realizado el montaje para la inspección ultrasónica, se procedió a medir las velocidades de las ondas longitudinales para cada probeta a través de la función "Autocal" del equipo de inspección ultrasónico krautkramer modelo USN 60 [13].

1.4.3 Atenuación

Con el fin de cuantificar la atenuación en cada una de las muestras se determino el coeficiente de atenuación utilizando la siguiente ecuación:

$$\alpha\left[\frac{dB}{mm}\right]=\frac{20}{L}\log\left(\frac{Po}{P}\right) \qquad (1)$$

Donde Po y P son las presiones acústicas inicial y final, respectivamente, correspondientes en este caso a las amplitudes de Ao y A_1 del primero y segundo pico, para una sección de material de longitud L igual a dos veces el espesor [14].

Dicho coeficiente se hallo considerando un rango en ocho veces el espesor y se determino para cada una de las frecuencias utilizadas en nuestro estudio.

1.5 EspectroscopÍa ultrasónica

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 la pared de fondo de la probeta.

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 realizo el análisis espectral de estas señales empleando diversos algoritmos contenidos en el software de aplicaciones matemáticas MATLAB 7.2, permitiendo así la interpretación de la señal en dominio tiempo frecuencia.

Dicho análisis permitió la determinación de los espectros de energía y la cuantificación de algunos parámetros como la energía total, la energía máxima y la frecuencia asociada al máximo de energía.

El arreglo empleado para la toma de señales se observa en la figura 1.

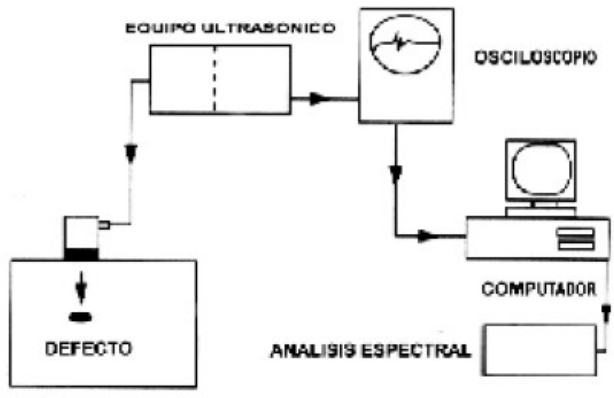


Figura 1. Arreglo experimental empleado para la toma de señales

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Evaluación microestructural

2.1.1 Micro estructura

En las figuras 2 y 3, se muestran las diferentes fotomicrografías obtenidas para todas las muestras de acero tratadas a un aumento de 100X.

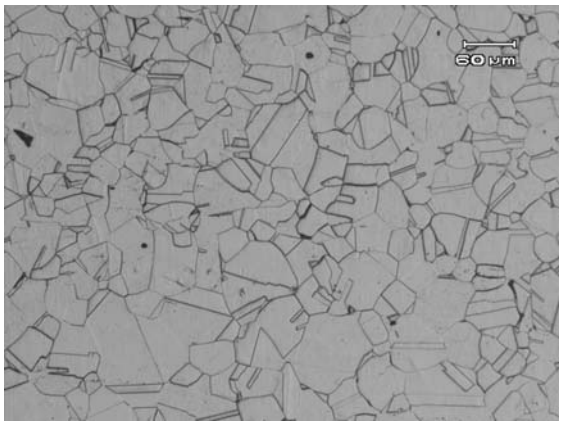
La figura 2, corresponde a las fotomicrografías de las muestras de acero AISI 316L tratadas a 850ºC. Tal como se aprecia en cada una de ellas, en todas las muestras se obtuvo una estructura austenítica. Si

bien, con los tratamientos realizados para las probetas 1b, 1c y 1d y 1e se buscó promover los carburos $M_{23}C_6$, estos fueron imposibles de ver a través de la microscopia óptica. Por otro lado, en dichas fotomicrografías se observan granos equiaxiales de austenita de diferentes tamaños, así como también maclas de recocido y bordes de grano oscuro, que de acuerdo al tiempo en el horno pudiesen ser carburos de cromo producto de la sensibilización, según los diagramas tiempo-temperatura-precipitación de Aydoğdu [15], lo cual no se podría aseverar por microscopia óptica.

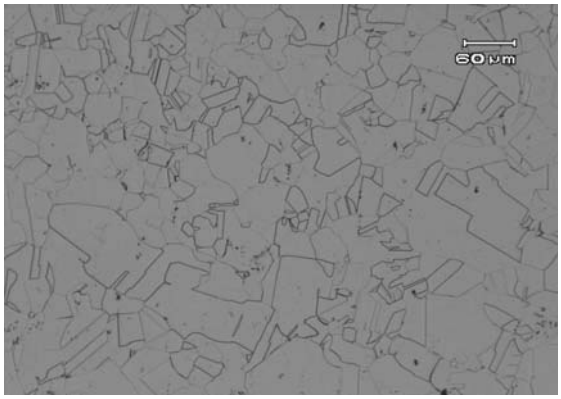
La figura 3, presenta las fotomicrografías correspondientes a las muestras de acero 316L tratadas a 1000ºC. En cada una de ellas se aprecia una estructura austenítica y se visualiza el crecimiento de los granos, debido al tratamiento térmico a 1000ºC en los diversos tiempos descritos, observándose gran cantidad de maclas características de este tipo de acero y de los granos de forma poligonal.

Sin embargo, si se comparan las fotomicrografías correspondientes a las probetas 316 L tratadas a 85ºC con las tratadas a 1000ºC, se observan que con el tratamiento a 1000ºC aparecieron colonias de granos cuyo tamaño es superior al de las muestras tratadas a 850ºC.

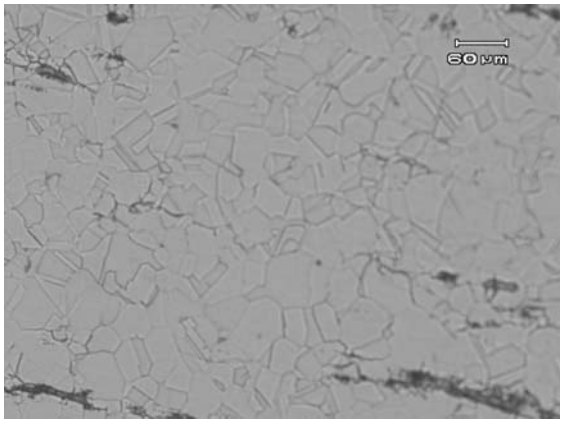
Las imágenes obtenidas por microscopia electrónica de barrido, corroboran la información suministrada por microscopía óptica y no suministran características relevantes que pudieran revelar la presencia de carburos. La figura 4, muestra una imagen correspondiente a la muestra 1b, recocida a 850°C.



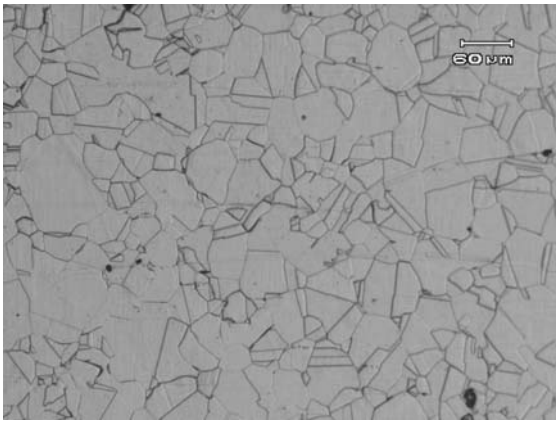
1b



1c

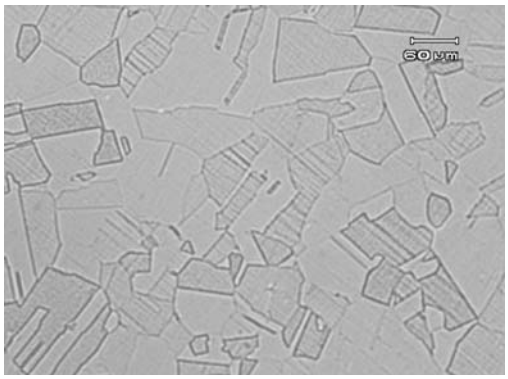


1d

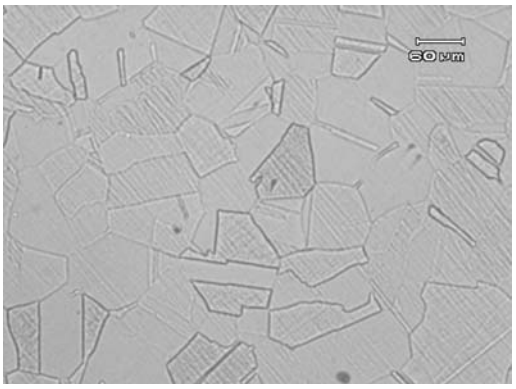


1e

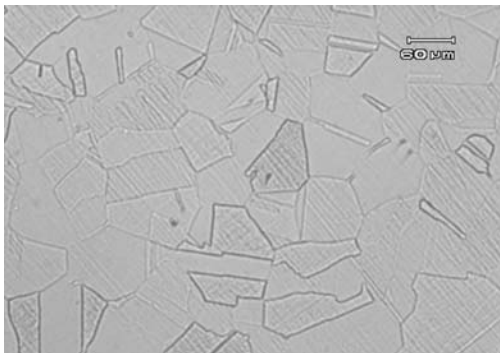
Figura 2. Muestras observadas por microscopia óptica a 100X de aumento tratadas a: 1b) 850ºC por 2h. 1c) 850ºC por 6h. 1d) 850ºC por 10h. 1e) 850ºC por 24h.



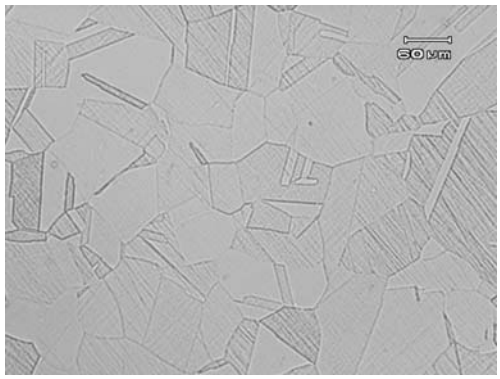
2b



2c



2d



2e

Figura 3. Muestras observadas por microscopia óptica a 100X de aumento tratadas a: 2b) 1000ºC por 2h. 2c) 1000ºC por 6h. 2d) 1000ºC por 10h. 2e) 1000ºC por 24h.

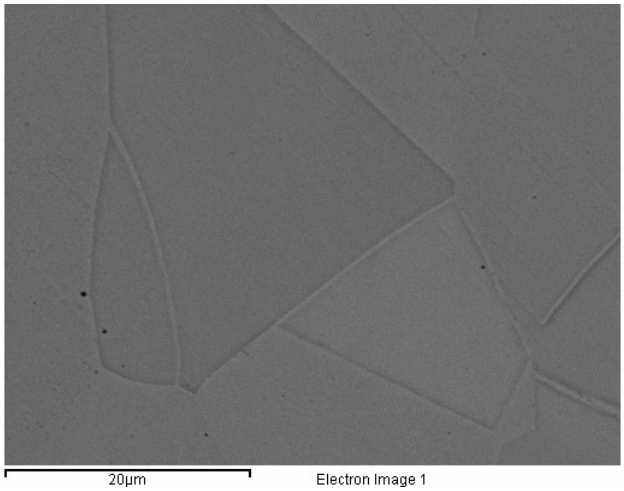


Figura 4. Muestra 1b observada por microscopia electrónica de barrido a 2500 X de aumento.

2.1.2 Tamaño de grano

El tamaño de grano fue determinado sobre imágenes a 100 X, obtenidas por microscopia óptica, según el procedimiento descrito, los valores de tamaño de grano promedio se muestran en la tabla 2.

Obtenido el tamaño de grano se representó gráficamente su variación con respecto al tiempo de permanencia de la muestra en el horno, la cual se muestra en la figura 5.

Tabla 2. Tamaño de grano obtenido mediante el método el método de intercepto lineal de Heyn [11], para las muestras Tipo1

Muestra	*Diámetro (µm)*	*Tamaño de grano ASTM*
1 a	31.25	6.71
1 b	30.30	6.80
1 c	28.57	6.97
1 d	30.30	6.80
1 e	31.74	6.66

Como era de esperarse las muestras tratadas a mayor temperatura presentaron un aumento en el tamaño de grano, con respecto a la muestra original (1 a) y a su vez un aumento al tener más tiempo de permanencia en el horno. Este es el caso de las

muestras 2, las cuales a tiempo de permanencia de 6h y 10h conservaron aproximadamente el mismo tamaño de grano, aumentando significativamente para tiempo de permanencia de 24h.

Tabla 3. Tamaño de grano obtenido mediante el método el método de intercepto lineal de Heyn [11], para las muestras Tipo 2.

Muestra	*Diámetro (μm)*	*Tamaño de grano ASTM*
2 b	42.55	5.82
2 c	45.45	5.63
2 d	45.46	5.63
2 e	51.28	5.28

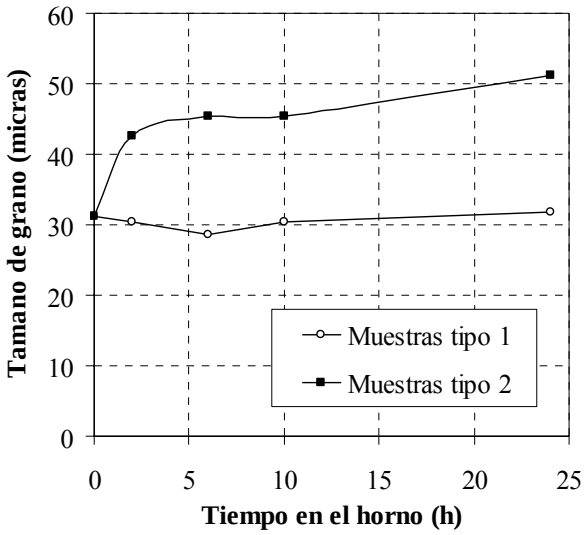


Figura 5. Relación del tamaño de grano con el tiempo de permanencia en el horno para muestras Tipo 1 tratadas a 850ºC y muestras Tipo 2 tratadas a 1000 ºC.

Las muestras Tipo 1 y Tipo 2, presentan pequeñas variaciones en cuanto a su tamaño de grano, notándose una ligera disminución en el tamaño de grano para el caso de la muestra tratada por 6 horas (1c) y un aumento significativo para la muestra tratada por 24 horas (1e).

2.2 Evaluación ultrasónica

En primer lugar se midió la velocidad longitudinal de cada muestra y luego se siguió el procedimiento descrito para el cálculo de los coeficientes de atenuación utilizando para ambos casos los palpadores de frecuencias 2.25, 5 y 10 MHz de 0.25”de diámetro.

2.2.1 Velocidad longitudinal

La velocidad se obtuvo para las nueve (9) muestras y los valores reportados corresponden a un promedio de diez (10) mediciones por muestra. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Velocidad ultrasónica longitudinal con el palpador de frecuencia 2.25 MHz

Muestra	*Velocidad (m/s)*
1 a	5746.90± 13.3.
1 b	5718.30±14.9
1 c	5738.50±16
1 d	5731.22±7
1 e	5746.80±17.5
2 b	5729.70±20.1
2 c	5748.10±15.9
2 d	5733.30±24.7
2 e	5783.10±17.6

Los valores de velocidad ultrasónica longitudinal medidos con el palpador de 2.25 MHz oscilan entre 5718.30 m/s y 5.783.10 m/s con una desviación estándar máxima de 24.7. Ahora bien, al observar la información proporcionada por la tabla 4, utilizando el palpador de 2.25 MHz, se ve que la diferencia de velocidades entre las muestras tratadas es muy pequeña con una alta desviación estándar, lo que hace imposible diferenciar los valores de velocidad para cada uno de los casos.

En la figura 6 se observa el comportamiento mostrado por los dos tipos de probeta, los valores reportados por las muestras Tipo 1 son ligeramente superiores a los reportados por las muestras Tipo 2, comportamiento que se debe a las características microestructurales del acero, particularmente de la velocidad de fase en el acero. Por otro lado, se aprecia como la diferencia de los valores de velocidad longitudinal en cada una de las muestras utilizando el palpador de 2.25 es muy pequeña, lo que no nos permite correlacionar con exactitud la velocidad longitudinal con el tipo de muestra tratada.

En la tabla 5, se muestran los valores obtenidos de la velocidad longitudinal utilizando el palpador de frecuencia 5 MHz, en la misma se aprecia que los valores oscilan entre 5656.10 m/s y 5.792 m/s con una desviación estándar máxima de 62.2, aumentando considerablemente la dispersión con el uso de dicha frecuencia.

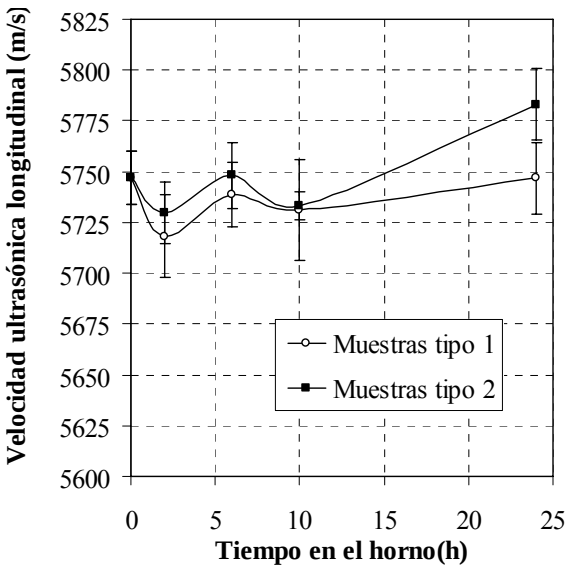


Figura 6. Variación de la velocidad ultrasónica longitudinal en función del tiempo en el horno, medida con el palpador de 2.25MHz

Tabla 5. Velocidad ultrasónica longitudinal con el palpador de 5 MHz

Muestra	*Velocidad (m/s)*
1 a	5712.10±47.5
1 b	5656.10±54.3
1 c	5726.50±10.0
1 d	5670.90±60.4
1 e	5736.90±7.6
2 b	5700.10±42.8
2 c	5691.90±62.2
2 d	5699.20±58.8
2 e	5792.00±8.3

En la figura 7 se observa que los valores de velocidad obtenidos en cada una de las muestras utilizando el palpador de 5 MHz, muestran un comportamiento muy similar al obtenido con el palpador de 2.25 MHz por cuanto los resultados muestran una diferencia muy pequeña y una altísima desviación estándar.

Los valores de velocidad longitudinal obtenidos utilizando el palpador de 10 MHz oscilan entre 5699.80 m/s y 5.720.10 m/s con una desviación estándar máxima de 62.1, los valores reportados se muestran en la Tabla 6.

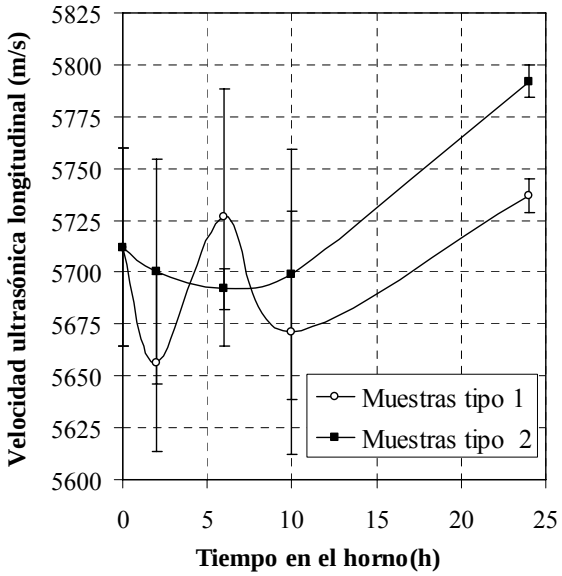


Figura 7. Variación de la velocidad ultrasónica longitudinal en función del tiempo en el horno, medida con el palpador de 5 MHz

Tabla 6. Velocidad ultrasónica longitudinal con el palpador de 10 MHz

Muestra	*Velocidad (m/s)*
1 a	5705.2±34.2
1 b	5705.4±22.4
1 c	5731.5±22.9
1 d	5726.80±18.2
1 e	5715.5±29.7
2 b	5719.6±9.3
2 c	5704±41.5
2 d	5699.8±51.0
2 e	5720.1±62.1

Observando la figura 8, se tiene que los valores de velocidad longitudinal presentaron una altísima dispersión, no pudiéndose establecer una tendencia clara en cuanto a su comportamiento ya que los resultados para todas las muestras oscilan entre valores muy cercanos y con una altísima dispersión de la señal, producto de utilizar una alta frecuencia en este tipo de microestructura. Finalmente se observa que en general las velocidades obtenidas entre las diferentes muestras tratadas son muy pequeñas y la desviación estándar es muy alta, por tal motivo se recomienda un método de medición de velocidad más adecuado que nos permita obtener resultados más confiables y con una

mínima dispersión.

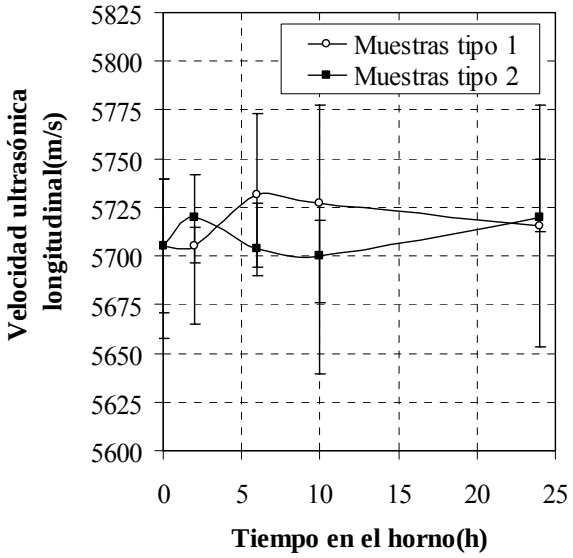


Figura 8. Variación de la velocidad ultrasónica longitudinal en función del tiempo de tratamiento, medida con palpador de 10 MHz

2.2.2 .Coeficiente de atenuación

En la tabla 7 se aprecian los resultados obtenidos del coeficiente de atenuación utilizando los palpadores de 2.25 ,5 y 10 MHz. Las Figuras 9, 10 y 11 visualizan la variación del coeficiente de atenuación en cada una de las muestras evaluadas.

En general en las muestras Tipo 1, para cada una de las frecuencias utilizadas, se aprecia un claro aumento del coeficiente de atenuación a medida que aumenta el tiempo de tratamiento. Por otro lado, a medida que se aumenta la frecuencia de inspección para cada caso en particular se aprecia un aumento del coeficiente de atenuación, salvo algunos casos. Tal comportamiento en algunas muestras pudiera estar asociado a la ligera variación en cuanto al tamaño de grano a medida que aumenta el tiempo de tratamiento, así como también a la presencia de colonias de granos diferentes en la muestra.

En cuanto a la muestra Tipo 2, para cada una de las frecuencias utilizadas se corrobora el aumento del coeficiente de atenuación a medida que aumenta el tiempo del tratamiento, así mismo se aprecia un incremento del coeficiente de atenuación a medida que se aumenta la frecuencia de inspección.

Tabla 7. Coeficientes de atenuación expresado en dB/mm, obtenidos con los palpadores de frecuencias 2.25, 5 y 10 MHz.

Muestra	*Frec 2.25MHz*	*Frec 5MHz*	*Frec 10MHz*
1 a	0.282	0.160	0.223
1 b	0.276	0.138	0.215
1 c	0.285	0.137	0.207
1 d	0.284	0.185	0.235
1 e	0.293	0.214	0.422
2 b	0.274	0.170	0.281
2 c	0.276	0.287	0.437
2 d	0.297	0.318	0.487
2 e	0.314	0.336	0.489

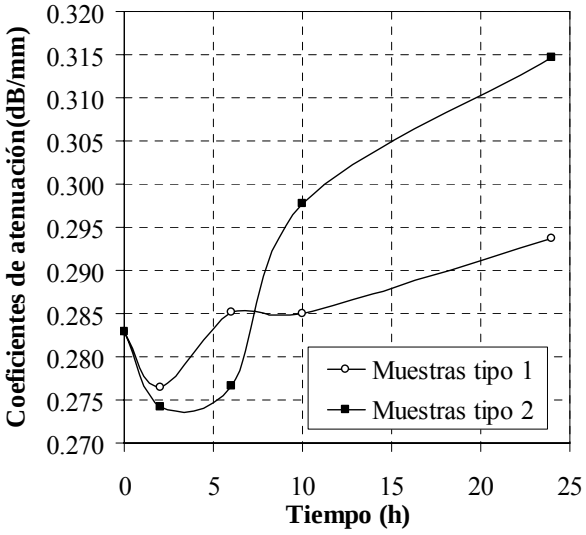


Figura 9. Variación del coeficiente de atenuación en función del tiempo de tratamiento, medida con el palpador de 2.25 MHz.

En las figuras 12 y 13 se presenta la relación existente entre el coeficiente de atenuación, el tamaño de grano y el tiempo de permanencia en el horno, para el palpador de 10 MHz para las muestras Tipo 1 y Tipo 2.

Tal como se observa en la muestra Tipo 1 (Fig.12) y en la muestra Tipo 2 (Fig.13), en las mismas se aprecian un aumento significativo del tamaño de grano así como también del coeficiente de atenuación a medida que aumenta el tiempo de tratamiento.

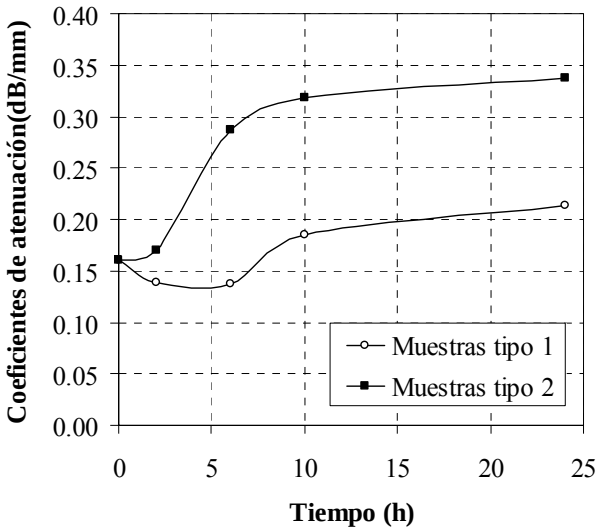


Figura 10. Variación del coeficiente de atenuación en función del tiempo de tratamiento, medida con el palpador de 5 MHz.

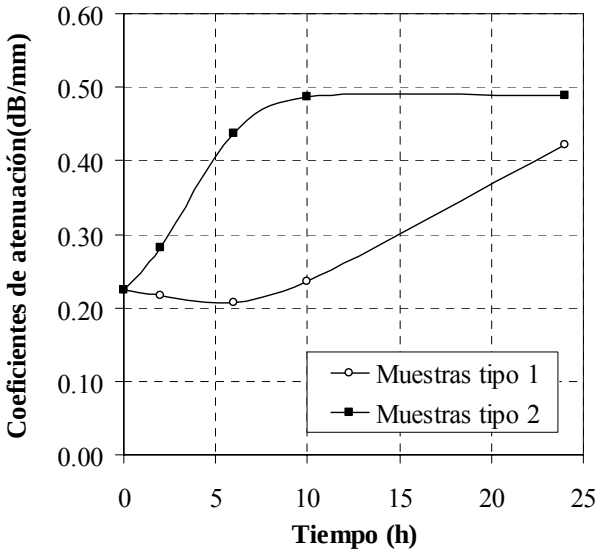


Figura 11. Variación del coeficiente de atenuación en función del tiempo en el horno, medida con palpador de 10 MHz

Por tal motivo y en base a la alta atenuación de la señal utilizando el palpador de 10 MHz, el mismo se descarta como frecuencia recomendada al evaluar este tipo de acero.

2.3 Espectroscopia ultrasónica

2.3.1 Señales

Las figuras 14, 15, 16 y 17, presentan los espectros de energía de las señales para cada una de las probetas con diferentes tratamientos térmicos.

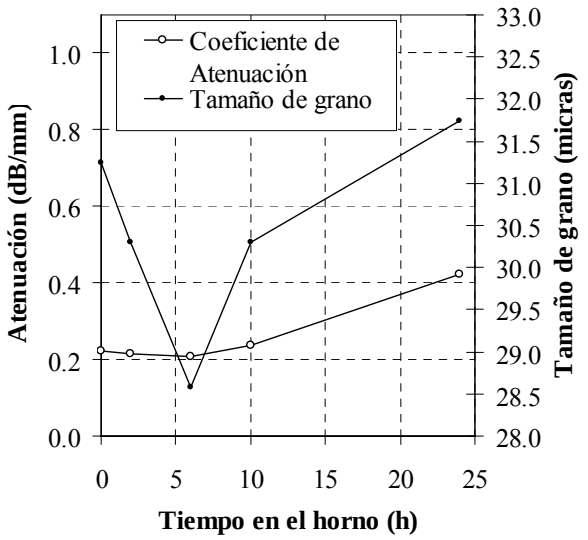


Figura 12. Variación del coeficiente de atenuación y del tamaño de grano en función del tiempo en el horno, medida con el palpador de 10 MHz para muestras Tipo 1.

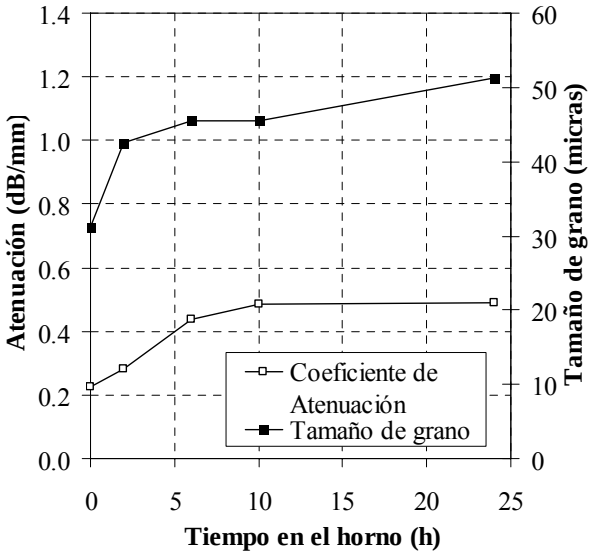


Figura 13. Variación del coeficiente de atenuación y del tamaño de grano en función del tiempo de tratamiento, medida con palpador de 10 MHz para muestras Tipo 2.

Cada uno de estos espectros cuantifica la energía del pulso transmitido en cada una de las muestras evaluadas. En general se observa que los espectros obtenidos no son simples, mostrando diferentes máximos de energía, distribución irregular que presentan la mayor parte de los aceros inoxidables y que se origina posiblemente a la distorsión de la red producto de los elementos aleantes. Por otro lado, se aprecia que con el aumento de la frecuencia se incrementa el efecto de atenuación

del haz ultrasónico, reflejándose en menores valores de energía. Cabe destacar que se intentó tomar las señales con el palpador de 10 MHz, lo cual no fue factible debido a la alta atenuación de la señal lo que dificulta su adquisición y procesamiento.

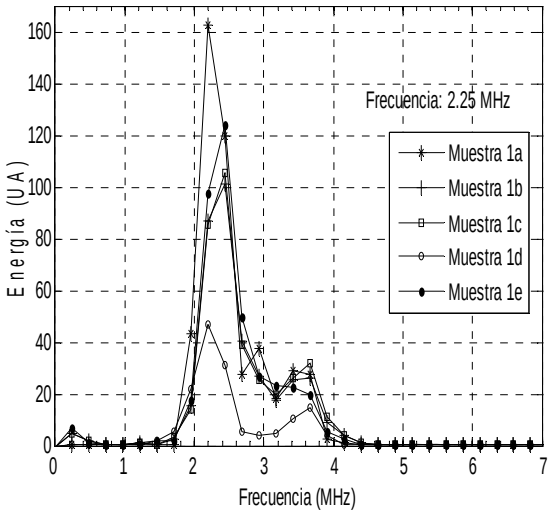


Figura 14. Espectros de energía para las muestras Tipo 1 con frecuencia de 2.25 MHz

Las señales obtenidas con el palpador de 2.25 MHz, muestran valores de energía que tienden a superponerse, observándose valores de energía mayores para la muestra en condición original y una disminución al realizar los tratamientos térmicos a 850 ºC, lo cual se explica por la pequeña variación del tamaño de grano en el juego de muestras Tipo 1, lo cual no se aprecia fácilmente para el juego de muestras Tipo 2, que presentan en general una tendencia para cada caso muy similar y que no muestran una atenuación significativa a medida que aumenta el tiempo de tratamiento, utilizando este palpador en particular.

Ahora bien, en cuanto a las características generales del espectro los mismos presentan espectros mucho más limpios y definidos lo que no descarta la utilización del palpador de 2.25 MHz en la caracterización de estos aceros.

Al realizar el procesamiento de las señales obtenidas con el palpador de 5 MHz, se observan comportamientos muy particulares con pulsos de mayor ancho de banda y en el rango de frecuencia de dicho palpador se observa que la muestra en condición original (1 a) presenta el máximo mayor de energía y que disminuye a medida que aumenta el tiempo de tratamiento.

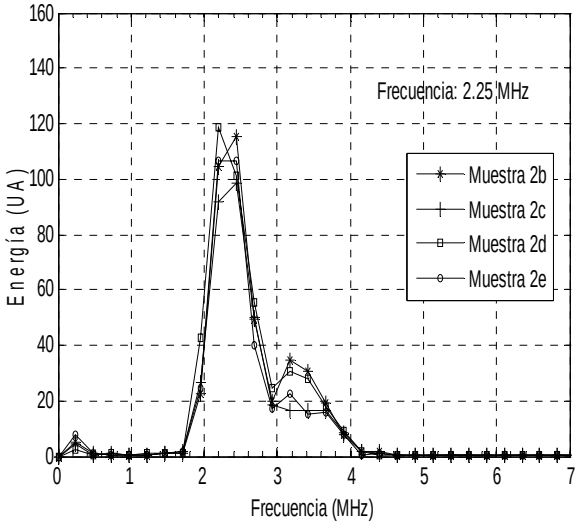


Figura 15. Espectros de energía para las muestras Tipo 2 con frecuencia de 2.25 MHz

En general, se aprecia que el palpador de 5 MHz permite cuantificar en forma de energía el comportamiento de cada una de las señales correspondientes a las muestras tratadas Tipo 1, mostrando una clara tendencia a medida que aumenta el tiempo de tratamiento. En cuanto al juego de muestras Tipo 2, no presenta una clara tendencia en forma de energía a fin de asociarlos con los cambios que se han generado en cada una de las probetas Tipo 2.

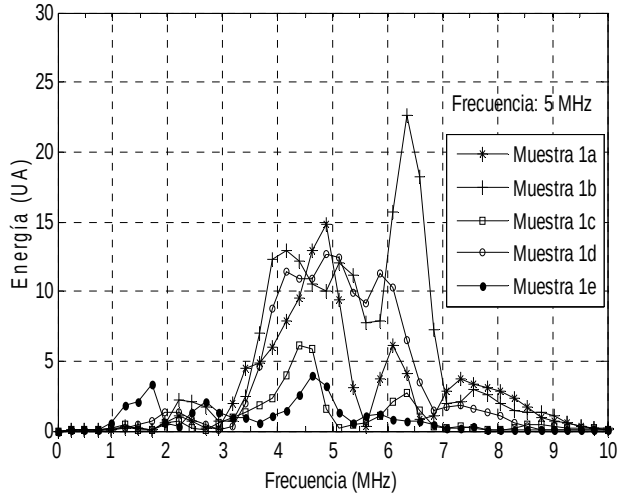


Figura 16. Espectros de energía para las muestras Tipo 1 con frecuencia de 5 MHz

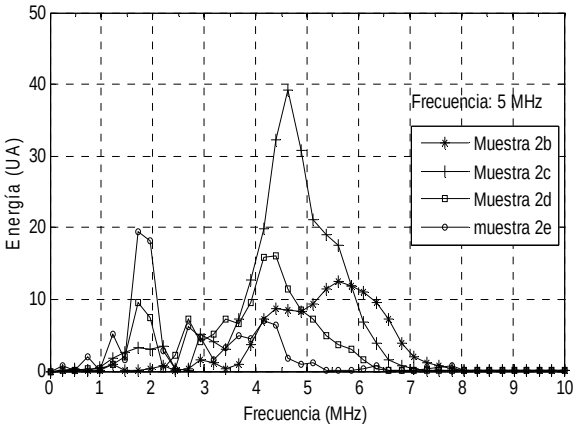


Figura 17. Espectros de energía para las muestras Tipo 2 con frecuencia de 5 MHz

A continuación se presentan las características obtenidas de los espectros, entre ellas: energía total *(Etotal)*, energía máxima (Emáx) y la frecuencia asociada a la energía máxima, para las muestras 1 y 2, obtenidas con los palpadores de 2.25 MHz (Tabla 8 y 9) y 5 MHz. (Tabla 10 y 11). La energía total corresponde a la energía de las señales transmitidas evaluadas en el rango que corresponde a un 50% de caída de la señal.

Tabla 8. Características obtenidas de los espectros de energía, frecuencia 2.25 MHz, muestras Tipo 1

Muestra	*Emáx (UA)*	*Frecuencia Emáx (MHz)*	*Etotal (UA)*
1 a	162.5	2.197	466.47
1 b	100.9	2.441	246.98
1 c	105.5	2.441	247.05
1 d	46.56	2.197	439.35
1 e	124.2	2.441	275.69

Tabla 9. Características obtenidas de los espectros de energía, frecuencia 2.25 MHz, muestras Tipo 2

Muestra	*Emáx (UA)*	*Frecuencia a Emáx (MHz)*	*Etotal (UA)*
2 b	115.5	2.441	287.64
2 c	98.6	2.441	279.45
2 d	118.4	2.197	319.88
2 e	106.6	2.197	294.63

Tabla 10. Características obtenidas de los espectros de energía, frecuencia 5 MHz, muestras Tipo 1

Muestra	*Emáx (UA)*	*Frecuencia a Emáx (MHz)*	*Etotal (UA)*
1 a	14.83	4.88	236.73
1 b	12.97	4.15	203.01
1 c	6.12	4.39	238.77
1 d	12.62	4.88	262.41
1 e	4.63	3.98	246.60

Tabla 11. Características obtenidas de los espectros de energía, frecuencia 5 MHz, muestras Tipo 2

Muestra	*Emáx (UA)*	*Frecuencia a Emáx (MHz)*	*Etotal (UA)*
2 b	12.44	5.61	216.53
2 c	39.18	4.63	269.52
2 d	16.13	4.39	283.10
2 e	7.107	4.15	308.26

En las figuras 18 y 19, se observa la variación en la energía total de cada uno de los espectros con respecto al tiempo del tratamiento en cada una de las muestras evaluadas. En la figura 19, se observa en general que la energía total de los espectros en la muestra Tipo 2, es mayor que la correspondiente energía total para la muestra Tipo 1, determinando así que la mejor frecuencia de inspección para las probetas Tipo 1 y 2, corresponde a la frecuencia de 5 MHz, comportamiento no observado en la figura 18, que corresponde a la frecuencia de 2.25 MHz.

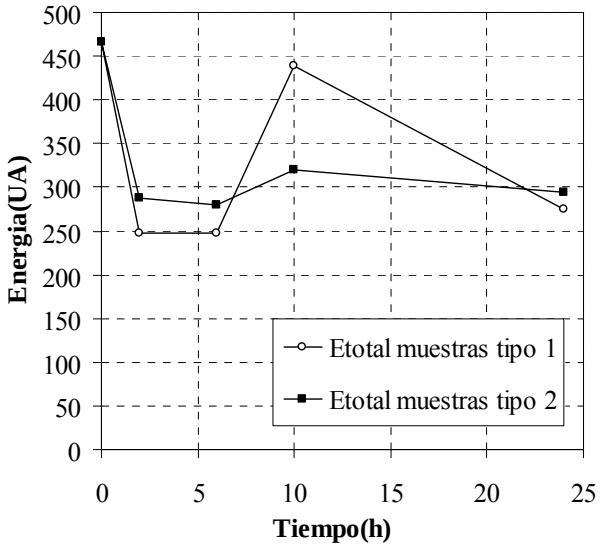


Figura 18. Energía total para las muestras Tipo 1 y 2,

con el palpador de 2.25 MHz

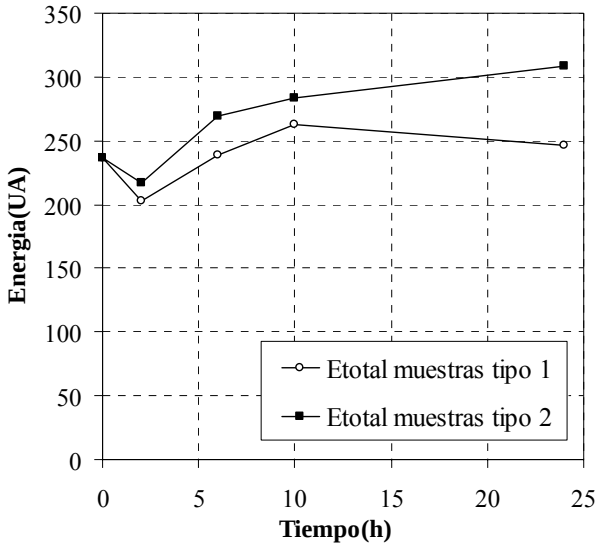


Figura 19. Energía Total para las muestras Tipo1 y 2, con palpador de 5 MHz

En las figuras 20 y 21, se muestra la variación en la energía máxima de los espectros de cada una de las muestras evaluadas.

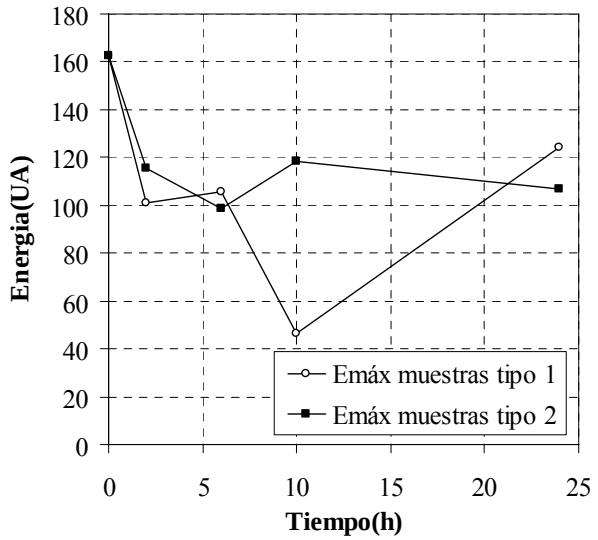


Figura 20. Energía máxima para las muestras estudiadas con frecuencia de 2.25 MHz

Tal como se observa a partir de dos horas de permanencia en el horno, la energía máxima en las muestras Tipo 2 es superior al observado en las muestras Tipo 1. Por otro lado, existe una frecuencia en particular a través de la cual se obtiene una mejor reflectividad para el caso de la muestra 2c, por lo que para cada condición se podría recomendar una frecuencia en particular que permita la detección y evaluación del tamaño real de las discontinuidades.

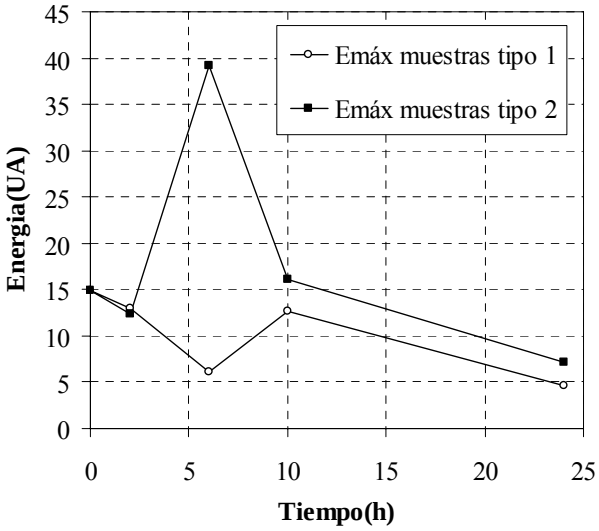


Figura 21. Energía Máxima para las muestras 1 y 2, con palpador de frecuencia 5 MHz

3. CONCLUSIONES

El estudio reveló que las mediciones experimentales de la velocidad ultrasónica longitudinal producían resultados dispersos y las mediciones de atenuación en las muestras corroboran el efecto del tamaño de grano. Pudiéndose relacionar el coeficiente de atenuación y el tamaño de grano con el tiempo de permanencia de la pieza en el horno.

El análisis de los espectros de energía, determinó que dichos espectros muestran comportamientos particulares en el material y que varían de acuerdo a la frecuencia del palpador utilizado, lo que permite establecer la frecuencia de 5MHz como recomendada para el análisis espectral. No obstante no se descarta la frecuencia de 2.25MHz, por cuanto aun de no presentar diferencias que permitan cuantificar en forma de energía los cambios presentes en el material, los mismos presentan pulsos más definidos. Por otro lado se descarta la frecuencia de 10 MHz por la alta atenuación que presenta en este tipo de material.

La energía máxima y total obtenida de los espectros, permiten diferenciar entre las muestras 1 y 2, debido a que las muestras 2 presentan mayor

energía, lo cual puede asociarse en este caso a las diferencias en cuanto a tamaño de grano. De igual forma se presentan comportamientos particulares para algunas muestras, por lo que se recomienda investigar a profundidad desde el punto de vista de posibles cambios microestructurales no solo de tamaño de grano, producidos al realizar los diferentes tratamientos térmicos.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASM Handbook. "Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys", American Society of Metals, Vol. 1, 10th Edition, 1993.

[2] ASM Handbook. "Nondestructive evaluation and quality control" American Society of Metals, Vol. 17, 9th Edition, 1992.

[3] E Rodríguez, L. Amorer, F Fraudita, A Bueno y K. Suárez.: "Análisis espectral en el estudio de las señales ultrasónicas de un acero AISI-SAE 4340", Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V, Vol. 19, Nº 2 pp.89-98. 2004

[4] C.H Gür, B.O Tuncer. "Investigating the microestructure ultrasonic property relationships in steels", 16th WCNDT - World Conference on NDT, 2004.

[5] A. Kumar "Correlation of microestructure and mechanical properties with ultrasonic parameters in metallic materials", Ph D. Thesis, Department of metallurgical and materials engineering Indian Institute of technology. India. 2003

[6] A Badidi Bouda, S Lebaili, A Benchaala. "Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation", Revista NDT & E International Vol 36.pp. 1-5. 2003

[7] P Palanichamy, A. Joseph, T. Jayakumar y Baldev Raj. "Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel", NDT & International, Vol 28, Nº3, pp. 179-195. 1995

[8] Ph Dombret. "Methodology for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel", Nuclear Engineering and Design, Vol. 131, Issue 3, pp 279-284. 1991

[9] Norma ASTM E3-01, Standard Guide for Preparation of metallographic specimens, American Society for Testing and Materials ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

[10] Norma ASTM E407-99 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, American Society for Testing and Materials ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

[11] Norma ASTM E-112. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, American Society for Testing and Materials ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

[12] Norma ANSI/AWS D1.1-2004. Structural Welding Code-Steel, American Welding Society.19th Edition. Miami, Florida. Volumen 2.

[13] Manual de operación de detector de fallas ultrasónico USN 60. KRAUTKRAMER serie USN 60, Parte N° 021-002-163.Rev. 22.07.2006. Departamento Técnico- Llog, s.a de c.v.

[14] Krautkramer, J.: "Ultrasonic Testing of Materials". Berlín Springer-Verlag, New York, Segunda Edición, 1977.

[15] Aydoğdu Güldun. Determination of susceptibility to intergranular corrosion in AISI 304L y 316L type stainless steels by electrochemical reactivation method. Thesis Msc. (EE.UU.).Middle East Technical University.2004.