



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICÓLAS DE HIDALGO**



**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALÚRGICAS**

**DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO DE UN
ACERO 4140K MEDIANTE LA ADQUISICIÓN DE SEÑALES
ULTRASÓNICAS Y PROGRAMACIÓN EN LABVIEW**

TESIS:

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS
MATERIALES**

PRESENTA:

ING. ERENDIRA ISAURO HERNÁNDEZ

ASESOR DE TESIS:

DR. ALBERTO RUIZ MARINES

Morelia, Mich., Agosto 2009

ÍNDICE GENERAL

	Página
Resumen	vi
Introducción	viii
Justificación	ix
Objetivos	x
Hipótesis	xi
CAPITULO I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	
1.1 Introducción	1
1.2 Clasificación de los aceros.	1
1.3 Aceros aleados.	2
1.4 Influencia de los elementos de aleación.	3
1.4.1 Níquel.	3
1.4.2 Cromo.	4
1.4.3 Molibdeno	4
1.4.4 Wolframio (tungsteno).	4
1.4.5 Vanadio.	4
1.4.6 Manganeso.	5
1.4.7 Silicio.	5
1.4.8 Cobalto.	5
1.4.9 Aluminio.	5
1.4.10 Titanio.	6
1.4.11 Cobre.	6
1.4.12 Boro.	6
1.5 Procesos de fabricación.	6
1.5.1 Tratamientos termomecánicos.	6
1.5.2 Recristalización.	7
1.5.3 Deformación elástica.	8
1.6 Nucleación.	8
1.7 Trabajo en caliente.	8
1.8 Recristalización secundaria.	9
1.9 Proceso de fabricación de los anillos de acero.	10
1.10 Ensayos no destructivos.	11
1.10.1 Ultrasonido.	11
1.10.2 Generación de ultrasonido	12
1.11 Efecto magnetoestrictivo.	12
1.12 Efecto piezoeléctrico	12
1.12.1 Algunos materiales piezoeléctricos.	14
1.13 Otros métodos de ensayos no destructivos.	15
1.14 Propagación del sonido.	15
1.14.1 Propagación de ondas a través de interfase.	16
1.14.2 Divergencia.	18
1.15 Atenuación ultrasónica.	18
1.16 Dispersión	21
1.17 Medición de la atenuación ultrasónica.	22

1.18	Técnica pulso–eco.	23
	CAPITULO II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	
2	Introducción	26
2.1	Caracterización del acero 4140K de los anillos.	26
2.2	Cálculos de pérdidas experimentales.	32
2.2.1	Pérdidas por impedancia acústica	32
2.2.2	Pérdidas por difracción	33
2.3	Ajustes del modelo teórico y determinación del tamaño de grano.	34
2.4	Programación en LabView.	38
2.5	Tratamientos térmicos.	40
2.6	Pruebas mecánicas	41
	CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3	Introducción	43
3.1	Adquisición de señal ultrasónica.	43
3.2	Procesamiento de la señal ultrasónica.	44
3.2.1	Acondicionamiento de la señal.	44
3.3.2	La transformada discreta de fourier	45
3.2.3	Muestreo discreto	45
3.2.4	Transformada Rápida de Fourier FFT	46
3.2.5	Programa para el calculo de impedancia acústica	47
3.2.6	Programa para la corrección por difracción	49
3.3	Determinación del tamaño de grano	50
3.4	Determinación del tamaño de grano por metalografía.	54
3.5	Ensayos de tensión	57
	CAPITULO IV. CONCLUSIONES	
	Conclusiones	59
	Recomendaciones	60
	Referencias bibliográficas	61
	Anexos	63

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.1	Secuencia recuperación-cristalización crecimiento. De t a t_1 se presenta la recuperación, estado antes de la formación de nuevos granos. De t_1 a t_2 se presenta la recristalización que es la nucleación de granos nuevos sin deformación. Después de t_2 se da el crecimiento de grano	7
Figura 1.2	Recristalización durante el laminado en caliente.	9
Figura 1.3	Ilustración esquemática de recristalización secundaria.	9
Figura 1.4	Figura esquemática de la secuencia de fabricación de anillos de acero por medio de una laminadora radial-axial.	10
Figura 1.5	Efecto piezoeléctrico del cuarzo (corte X).	13
Figura 1.6	Sistema de coordenadas en un cristal de cuarzo; cortes X e Y.	14
Figura 1.7	Incidencia del sonido normal a la interfase entre dos medios.	16
Figura 1.8	Valores de la presión acústica en los casos de reflexión de interfases de (a) acero-agua y (b) agua-acero en incidencia perpendicular.	17
Figura 1.9	Reducción de la intensidad de onda causada por la divergencia.	18
Figura 1.10	Medición de atenuación por el método pulso-eco para encontrar el coeficiente de atenuación	24
Figura 1.11	Diagrama de un sistema ultrasónico de pulso-eco para determinar la dependencia en la frecuencia de la atenuación.	24
Figura 2.1	Acero proporcionado por la empresa para su evaluación ultrasónica.	27
Figura 2.2	Dimensiones de las muestras a evaluar por atenuación ultrasónica.	27
Figura 2.3	Diagrama esquemático de la técnica de inmersión pulso-eco para las mediciones de atenuación ultrasónica.	28
Figura 2.4	Diagrama esquemático a) de la técnica de inmersión usando en el método pulso-eco b) de múltiples reflexiones en una placa con incidencia perpendicular.	29
Figura 2.5	Espectros correspondientes a los ecos R_2 y R_3 obtenidos después de aplicar la FFT, $f_{nominal} = 15\text{MHz}$, diámetro del transductor de 12.7 mm.	30
Figura 2.6	Curvas de pérdidas totales en la mediciones de atenuación.	31
Figura 2.7	Coeficiente de atenuación que resulta de la teoría unificada de Stanke y Kino para materiales policristalinos y ondas longitudinales a) teoría unificada, b) región de Rayleigh, c) región estocástica. Obtenido de F. E. Stanke y and G. S. Kino, <i>J. Acoust. Soc. Am.</i> 75 (3), (1984) p 665-681.	35
Figura 2.8	Determinación de valores para eje horizontal y vertical del coeficiente de atenuación sobre el modelo de Stanke y Kino	36
Figura 2.9	Grafico del modelo de la ecuación 2.11 para determinar el coeficiente de atenuación.	37
Figura 2.10	Diagrama de flujo del programa desarrollado en Labview para la	39

	adquisición y procesamiento de la señal de las mediciones de atenuación ultrasónica.	
Figura 2.11	Panel frontal del programa para obtención del tamaño de grano en tiempo real, de las muestras.	40
Figura 2.12	Probeta para el ensayo de tensión.	41
Figura 2.13	Resultados de dureza Rockwell C en muestras de acero 4140K	42
Figura 3.1	Panel frontal del programa de LabView donde se muestra la señal A-Scan del transductor de ultrasonido.	44
Figura 3.2	FFT, herramienta de LabView, la cual convierte la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.	46
Figura 3.3	Diagrama de bloques del Sub VI generador de frecuencia.	47
Figura 3.4	Diagrama de bloque y panel frontal del Sub VI que calcula las pérdidas por Impedancia.	48
Figura 3.5	Diagrama de bloques del Sub VI para calcular las perdidas por difracción en las muestras de acero 4140K.	49
Figura 3.6	Panel frontal del programa para determinar el tamaño de grano del acero 4140K.	50
Figura 3.7	Diagrama de bloques del programa para determinar el tamaño de grano del acero 4140K.	51
Figura 3.8	Grafico del panel frontal del programa en el que se observa el mejor ajuste al modelo teórico de Stanke y Kino para determinar el tamaño de grano de la muestra de material base.	52
Figura 3.9	Grafico del panel frontal del programa en el que se observa el mejor ajuste al modelo teórico de Stanke y Kino para determinar el tamaño de grano de la muestra tratada térmicamente a 950°C por 4 horas.	52
Figura 3.10	Grafico del panel frontal del programa en el que se observa el mejor ajuste al modelo teórico de Stanke y Kino para determinar el tamaño de grano de la muestra tratada térmicamente a 950°C por 6 horas.	53
Figura 3.11	Grafico del panel frontal del programa en el que se observa el mejor ajuste al modelo teórico de Stanke y Kino para determinar el tamaño de grano de la muestra tratada térmicamente a 950°C por 24 horas.	53
Figura 3.12	Metalografía de material base a 200X, ataque con Nital al 2% por 10 segundos.	54
Figura 3.13	Metalografía de material tratado térmicamente a 950°C por 4 horas, a 200X, ataque con Nital al 2% por 10 segundos.	55
Figura 3.14	Metalografía de material tratado térmicamente a 950°C por 6 horas, a 200X, ataque con Nital al 2% por 10 segundos.	55
Figura 3.15	Metalografía de material tratado térmicamente a 950°C por 12 horas, a 200X, ataque con Nital al 2% por 10 segundos.	56
Figura 3.16	Metalografía de material tratado térmicamente a 950°C por 24 horas, a 200X, ataque con Nital al 2% por 10 segundos.	56
Figura 3.17	Curvas esfuerzo vs deformación nominal de probetas de tensión.	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Composición nominal AISI-SAE para el acero 4140 K.	10
Tabla 1.2	Coefficientes teóricos de atenuación ultrasónica para sólidos elásticos policristalinos.	22
Tabla 2.1	Composición química del acero 4140K utilizado para fabricar los anillos de acero.	27
Tabla 2.2	Resultados de mediciones para obtener la densidad del acero.	32
Tabla 2.3	Valores obtenidos para las constantes del modelo desarrollado a partir del mejor ajuste.	37
Tabla 3.1	Parámetros que son necesarios para calcular la impedancia con el SubVI.	48
Tabla 3.2	Tiempo de tratamiento de muestras de acero 4140 K.	51

RESUMEN

Los ensayos no destructivos (END) son técnicas de inspección utilizadas para principalmente evaluar hoy en día la calidad, tanto interior como exterior de los materiales. El ultrasonido es una técnica no destructiva, utilizada para inspeccionar y evaluar la microestructura de diferentes tipos de materiales. Las ondas ultrasónicas se propagan en un medio con una velocidad que depende principalmente de las propiedades elásticas del medio y es atenuada por las características microestructurales del medio. De esta manera, las variables ultrasónicas: atenuación y velocidad pueden, ser empleadas para identificar y caracterizar la microestructura de un material como: tamaño de grano y/o propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad. Las técnicas de medición deben cuidar la precisión, asociada con la distancia de propagación y el tiempo de vuelo, para lograr una determinación precisa del tamaño de grano y la velocidad. La atenuación ultrasónica, definida como la pérdida en la intensidad del sonido, se da a través de la dispersión de la onda en la frontera de grano la cual es causada por múltiples reflexiones. La atenuación es función de la longitud de onda ultrasónica, del tamaño promedio de grano y de las propiedades elásticas del material, la mayor parte de los ensayos de inspección ultrasónica se realizan en el rango de frecuencias conocido como región de Rayleigh (región de baja frecuencia). La presente investigación tiene como objetivo determinar el tamaño de grano promedio de un acero 4140K, por mediciones de atenuación ultrasónica. Esto se hará como un esfuerzo de cooperación entre el grupo de ensayos no destructivos del IIM y la empresa FRISA FORJADOS S.A de C.V, para explorar por la posibilidad de que la empresa pueda contar con un método no destructivo automatizado para determinar características microestructurales de los anillos de acero 4140K fabricados en su planta. Teniendo con ello una herramienta no destructiva para de predecir cuantitativamente el comportamiento mecánico y garantizar la calidad de sus productos. Con el fin de lograr determinar el tamaño de grano promedio de las muestras del acero proporcionado por la empresa, se desarrollaron una serie de programas en el lenguaje de programación LabView[®], para hacer la adquisición y el procesamiento de la señal ultrasónica, determinar pérdidas por impedancia acústica y por difracción del haz ultrasónico en tiempo real. Se crearon también programas de LabView para introducir un modelo aproximado al modelo de propagación

de ondas elásticas en materiales propuesto por Stanke y Kino. Se utilizó el programa desarrollado para evaluar muestras del acero que proporciono la empresa, determinando en tiempo real el tamaño de grano, a partir de las mediciones de atenuación ultrasónica utilizando la técnica pulso–eco en inmersión. Como paso siguiente y para estudiar la capacidad del programa para determinar tamaños de grano, se realizaron una serie de tratamientos térmicos en muestras de este acero con el objetivo de generar diferentes tamaños de grano y determinar el tamaño de grano por este método no destructivo y comparar el resultado con el tamaño de grano obtenido mediante análisis metalográfico, para así tener un comparativo del tamaño de grano y determinar la confiabilidad del programa. Finalmente se comprobó que el programa desarrollado es capaz de establecer el tamaño de grano en tiempo real con gran precisión y en forma no destructiva.

Los resultados obtenidos en esta investigación comprobaron las capacidades del programa desarrollado para predecir el tamaño de grano en tiempo real con gran precisión y en forma no destructiva.

Estos resultados indican que el ultrasonido es un método confiable que se puede ser utilizado en forma confiable en la evaluación no destructiva de materiales.

INTRODUCCIÓN

Los ensayos no destructivos ultrasónicos son el método más efectivo para detectar defectos superficiales y no superficiales encontrados comúnmente en barras, placas y tubos de acero. Es sabido que la determinación de las propiedades elásticas de los materiales sirve para predecir y determinar su comportamiento en servicio; esta determinación usualmente se hace por métodos destructivos como ensayos de tracción, ensayos de impacto, etc., lo cual aumenta el costo de la producción.

En la empresa FRISA. S.A. de C.V., el proceso de conformación de anillos de acero AISI 4140K es realizado por laminado axial-radial el cual tiene ciertas ventajas en comparación con los *anillos fabricados de placa* entre las que destacan: menor desperdicio de materia prima, el flujo del grano es radial y existe un mayor ahorro de tiempo en el maquinado. Una de las desventajas que presenta el proceso de laminado axial-radial es que los anillos tienden a distorsionarse si no se controla el proceso de fabricación, esta distorsión se debe a los esfuerzos residuales causados por el enfriamiento desigual que sufren los anillos al final del proceso de fabricación y se incrementa aún más cuando los anillos son maquinados para darle al anillo las dimensiones finales.

Esta investigación está dirigida para realizar una serie de experimentos para medir la atenuación ultrasónica de ondas longitudinales mediante la técnica de inmersión a partir de señales ultrasónicas adquiridas y procesadas en tiempo real mediante el desarrollo de un programa en ambiente gráfico Labview en muestras de un anillo de acero 4140K laminado en caliente. Esto con el objetivo de determinar el tamaño de grano promedio usando una aproximación a un modelo teórico de propagación de ondas acústicas en materiales policristalinos encontrado en la literatura. La finalidad de determinar en forma cuantitativa algunas propiedades mecánicas durante el proceso de inspección no destructiva al que son sometidos los anillos para la búsqueda de defectos. Como se sabe el tamaño de grano influye de manera directa en las propiedades mecánicas de los materiales policristalinos por lo que la determinación del tamaño de grano en tiempo real permitirá garantizar la calidad de la producción de anillos al 100%.

JUSTIFICACIÓN

La justificación de este trabajo radica en lograr determinar el tamaño de grano en tiempo real de un acero 4140K por mediciones de atenuación ultrasónica para una evaluación cuantitativa de las propiedades mecánicas de los anillos de acero 4140K. Logrando con ello un ahorro potencial en costos de producción, al descartar aplicación de pruebas destructivas que implican un aumento en costo de producción y que limitan el análisis a unos cuantos especímenes de un lote de producción. En cambio el ultrasonido resuelve esta problemática ya que a partir de la interacción onda-material y de la implementación de la programación para la adquisición y procesamiento de señales acústicas es posible determinar de manera indirecta el tamaño de grano y establecer de manera cuantitativa propiedades mecánicas del material sin la necesidad de destruir al material ni afectar sus propiedades mecánicas.

OBJETIVOS

Dentro de los objetivos de esta investigación están:

Reto Técnico.

Desarrollar un programa en Labview para adquisición y procesamiento de la señal en tiempo real y así medir con gran precisión la atenuación de ondas ultrasónicas para detectar: i) Cambios pequeños de atenuación de las ondas ultrasónicas, ii) Realizar un mejor ajuste de los valores de atenuación a un modelo teórico simplificado para determinar en forma indirecta el tamaño de grano promedio del acero AISI 4140 K.

Comparación con pruebas destructivas:

Para sustentar los resultados obtenidos con el programa desarrollado en LabView, se producirán diferentes tamaños de grano de las muestras de acero 4140K por medio de tratamientos térmicos. Realizando posteriormente al tratamiento térmico pruebas mecánicas de tensión para evaluar el efecto del tratamiento térmico en las propiedades mecánicas.

HIPÓTESIS

Cuando una onda acústica se propaga por un material, las características microestructurales del material, es decir tamaño de grano, causan una pérdida de su intensidad; la cual se puede medir para obtener un coeficiente de atenuación. Además es sabido que el tamaño y forma de los granos está relacionado con las propiedades mecánicas. Cuando una onda acústica se propaga por un material, esta es afectada en su intensidad principalmente por el tamaño de grado de la microestructura. Es sabido que el tamaño de grano esta relacionado en forma directa con las propiedades mecánicas del material De esta manera, si la microestructura afecta las propiedades mecánicas y al coeficiente de atenuación, es posible que se puedan relacionar este coeficiente con el tamaño de grano en forma indirecta y así establecer cuantitativamente las propiedades mecánicas del material en estudio. La pérdida en intensidad de la onda se puede medir para calcular un coeficiente de atenuación el cuál estará afectado principalmente por el tamaño de grano y la frecuencia ultrasónica.

CAPÍTULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Introducción.

Los anillos de acero, de interés en este trabajo de tesis, son trabajados en caliente hasta que adquieren su forma final, posteriormente son maquinados para lograr obtener las dimensiones requeridas.

1.2 Clasificación de los aceros.

Los aceros son aleaciones hierro-carbono con concentraciones apreciables de otros elementos. Los aceros se clasifican de acuerdo al contenido de carbono en: bajo, medio y alto contenido en carbono. Los aceros al carbono solo contienen concentraciones residuales de impurezas mientras que los aceros aleados contienen elementos que se añaden intencionadamente en concentraciones específicas. Para estandarizar la composición de los aceros la Society of Automotive Engineers (SAE) y el American Iron and Steel Institute (AISI) establecieron métodos para identificar los diferentes aceros que se fabrican. Ambos sistemas son similares para la clasificación. Los sistemas utilizan cuatro dígitos para designar tipo de acero. Primer dígito indica el elemento predominante de aleación: 1- carbón, 2- níquel, 3 cromo, 4-molibdeno, 5-cromo, 6-cromo vanadio, 8-triple aleación, 9-silicio magnesio. El segundo dígito indica el porcentaje aproximado en pesos del elemento de aleación, señalado en el primer dígito. Los dígitos 3 y 4 indican el contenido promedio de carbono en centésimas. Si se tiene una letra al principio está indica el proceso que se utilizó para elaborar el acero. Por ejemplo, el acero código **AISI/SAE 1010**, es un acero al carbono (sin elementos de aleación adicionales) y un 0.1 % de C.

Aceros de bajo carbono:

Contienen menos del .25 % en peso de C, además de no responder al tratamiento térmico para dar martensita ni se pueden endurecer por acritud. La microestructura la constituyen ferrita y perlita. Estos aceros son relativamente blandos y no son resistentes, pero sin

embargo presentan gran ductilidad y tenacidad. A su vez, estos aceros son fácilmente mecanizables, soldables y baratos. Existe dentro de esta clasificación un grupo de aceros de bajo contenido de carbono altos en resistencia y baja aleación. Pueden contener concentraciones de Cu, V, Ni, y Mo (en un total del 10% en peso). Presentan resistencia mecánica aumentada por tratamiento térmico, manteniendo las propiedades de mecanizado fácil.

Aceros de medio carbono:

Con contenidos entre 0.25 y 0.60 % en peso de C. Estos aceros pueden ser tratados térmicamente por austenización, temple y revenido, esto para mejorar sus propiedades mecánicas. Su microestructura la constituye martensita revenida. Más resistentes que los aceros de bajo carbono pero presentan menor ductilidad y maleabilidad.

Aceros de alto carbono:

Con contenidos entre 0.60 y 1.4 % en peso de C. Aceros muy duros y resistentes pero no dúctiles. Se utilizan con tratamientos de templado y revenido haciéndolos resistentes al desgaste, capaces de adquirir forma de herramienta de corte. Contienen generalmente Cr, V, W y Mo, que ayudan a la formación de carburos muy duros como $Cr^{23}C^6$, V^4C^3 .

1.3 Aceros aleados.

Los aceros aleados contienen además de los cinco elementos: carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre, contienen también cantidades relativamente importantes de otros elementos como el cromo, níquel, molibdeno, etc., útiles para mejorar alguna de sus características fundamentales. Los elementos de aleación que más frecuentemente suelen utilizarse para la fabricación de aceros aleados son: níquel, manganeso, cromo, vanadio, wolframio, molibdeno, cobalto, silicio, cobre, titanio, circonio, plomo, selenio, aluminio, boro y niobio. Utilizando aceros aleados es posible fabricar piezas de gran espesor, con resistencias muy elevadas en el interior de las mismas. En elementos de máquinas y motores se llegan a alcanzar grandes durezas con gran tenacidad. Es posible fabricar mecanismos que mantengan elevadas resistencias, aún a altas temperaturas. La tendencia

que tienen ciertos elementos a disolverse en la ferrita o formar soluciones sólidas con el hierro alfa, y la tendencia que en cambio tienen otros a formar carburos. Tendencia a ensanchar o disminuir los campos austeníticos o ferríticos correspondientes a los diagramas de equilibrio, y otras influencias relacionadas con el diagrama hierro-carbono, como la tendencia a grafitizar el carbono, a modificar el tamaño del grano. Existen otras influencias diversas, como mejoras en la resistencia a la corrosión, resistencia al calor, resistencia a la abrasión, etc.

1.4 Influencia de los elementos de aleación.

Gracias a la suma de elementos de aleación al acero, estos pueden proporcionar:

- Mayor resistencia y dureza
- Mayor resistencia a los impactos
- Aumento de la resistencia al desgaste
- Aumento de la resistencia a la corrosión
- Mejoramiento de maquinabilidad
- Dureza al rojo (altas temperaturas)
- Aumento de la profundidad a la cual el acero puede ser endurecido (penetración de temple)

1.4.1 Níquel.

El empleo de níquel se hace para evitar el crecimiento del grano en tratamientos térmicos del acero, útil para producir en gran tenacidad. Los aceros aleados con este elemento presentan para una misma dureza, un límite de elasticidad más elevado y mayor alargamiento, así como, mayor resistencia que para aceros al carbono de baja aleación. Es un elemento importante en la fabricación de aceros inoxidables y resistentes a temperaturas altas, con porcentajes de níquel entre 8 y 20%.

1.4.2 Cromo.

El elemento más empleado para la fabricación de aceros aleados. Se emplea en cantidades diversas entre 0.30 a 30%, sirve para aumentar la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros, mejora la templabilidad, impide las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste, y la inoxidabilidad. A su vez el cromo se disuelve en la ferrita y muestra una fuerte tendencia a formar carburos de cromo y carburos complejos.

1.4.3 Molibdeno.

La adición de este elemento mejora notablemente la resistencia a la tracción, la templabilidad y la resistencia a la termo fluencia de los aceros. Añadiendo solo pequeñas cantidades de molibdeno a los aceros cromo-níquel, se disminuye o elimina casi completamente la fragilidad Krupp, que se presenta cuando estos aceros son revenidos en la zona de 450°C a 550°C. Aumenta también la resistencia de los aceros en caliente y reemplaza al wolframio en la fabricación de los aceros rápidos, pudiéndose emplear para las mismas aplicaciones aproximadamente una parte de molibdeno por cada dos de wolframio. Su uso se debe a lo estabilizante que es de carburos complejos y por su tendencia a retardar el ablandamiento del acero durante el revenido.

1.4.4 Wolframio (tungsteno).

Este elemento es utilizado para mantener la dureza de los aceros a elevada temperatura evitando que se desafilan o ablanden herramientas hechas de estos aceros, aunque lleguen a calentarse a 500°C o 600°C. También se usa para la fabricación de aceros para imanes, para la fabricación de aceros de herramientas, empleándose en especial en los aceros rápidos, aceros para herramientas de corte y aceros para trabajos en caliente. El wolframio se disuelve ligeramente en la ferrita y tiene una gran tendencia a formar carburos los cuales presentan gran estabilidad.

1.4.5 Vanadio.

La adición de este elemento se hace con el fin de afinar el grano y disminuir la templabilidad. Es un elemento desoxidante muy fuerte y tiene una gran tendencia a formar

carburos, por esta razón, basta con añadir pequeñas cantidades, y pocos aceros, excepto los de herramientas, contienen más de 0.02% de vanadio. Una característica de los aceros con vanadio, es la resistencia que presentan al ablandamiento por revenido.

1.4.6 Manganeso.

Se añade para neutralizar la influencia del azufre y del oxígeno, que contienen los aceros cuando se encuentran en estado líquido. El manganeso actúa como desoxidante y evita, que en la solidificación del acero se desprendan gases que den lugar a porosidades perjudiciales en el material. Ayuda en la laminación y forja, donde el azufre encontrado en mayor o menor cantidad, forma sulfuros de hierro, los cuales son de muy bajo punto de fusión (981°C aprox.) que a temperaturas de trabajo en caliente (forja o laminación) funden, creando zonas de debilidad.

1.4.7 Silicio.

Se añade intencionadamente durante el proceso de fabricación como elemento desoxidante complementario del manganeso con objeto de evitar que aparezcan en el acero poros y otros defectos internos. Los aceros pueden tener porcentajes variables de 0.20 a 0.34% de Si. El silicio mejora significativamente la templabilidad y resistencia a disminuir la tenacidad. También mejora su resistencia a la oxidación.

1.4.8 Cobalto.

Este elemento se adiciona casi únicamente en los aceros rápidos de más alta calidad. Al ser incorporado, se combina con la ferrita, aumentando su dureza y su resistencia. Es uno de los pocos elementos aleados que mueve el punto eutectoide hacia la derecha reduciendo la templabilidad de los aceros. Se agrega en porcentajes variables entre el 3 y 10%.

1.4.9 Aluminio.

Elemento de aleación en los aceros de nitruración, que suele tener 1% aproximadamente de aluminio. Frecuentemente se emplea como desoxidante de muchos aceros. Todos los aceros aleados en calidad contienen aluminio en porcentajes pequeñísimos entre 0.001 a 0.008%.

1.4.10 Titanio.

Este elemento se añade en pequeñas cantidades a algunos aceros muy especiales para desoxidar y afinar el grano. El titanio tiene gran tendencia a formar carburos y a combinarse con el nitrógeno. En los aceros inoxidable cromo-níquel, actúa como estabilizador de los carburos y evita la corrosión intercrystalina.

1.4.11 Cobre.

El cobre se suele emplear para mejorar la resistencia a la corrosión de ciertos aceros de 0.15 a 0.30% de carbono, que se usan para grandes construcciones metálicas. Se suele emplear contenidos en cobre variables entre 0.40 y 0.50%.

1.4.12 Boro.

Este elemento se adiciona para mejorar notablemente la templabilidad de los aceros, siendo este aleante el más efectivo y de mayor carácter templante de todos los elementos de aleación. Se adiciona en pequeñísimas cantidades entre 0.0001 y 0.0006%.

1.5 Procesos de fabricación.

1.5.1 Tratamientos termomecánicos.

Los tratamientos termomecánicos son los procesos a los que se somete un metal para operaciones de deformación, de esta forma se logra mejorar sus propiedades mecánicas, además, de conseguir determinada forma al metal. En este tratamiento se controla la deformación plástica con un ciclo de tratamiento térmico, mejorando las propiedades mecánicas obtenidas por fabricación o por laminación común con tratamiento térmico separado, existiendo incremento significativo en el esfuerzo de fluencia, aumento de la tenacidad, se tendrá mayor resistencia a la fractura, mejora también la soldabilidad, ductilidad, tenacidad, resistencia a la termofluencia y reducción de costos en producción.

La deformación antes de la transformación es uno de los procesos más importantes, ya que es el proceso que debe ser más controlado en laminación. Durante el recalentamiento se debe limitar el tamaño de grano y los productos de transformación, controlando la

velocidad de enfriamiento y durante la laminación se debe controlar la recrystalización. Lo que también se consigue con la adición de microaleantes.

1.5.2 Recrystalización.

En la deformación plástica de un metal, se produce una recrystalización, por lo que los granos se alargan, posterior a la deformación el metal se calienta hasta la mitad de su temperatura de fusión. Produciéndose una secuencia recuperación-recrystalización-crecimiento de grano. Este proceso inicia al nuclearse los granos dentro de la matriz que ha sido trabajada en frío después de un tiempo (t_1), posterior a esto, los granos crecen rápidamente hasta otro tiempo (t_2), durante un tiempo el aumento del tamaño de grano es más lento hasta un tiempo t_3 y será el tamaño final de los granos. Ver la Fig. 1.

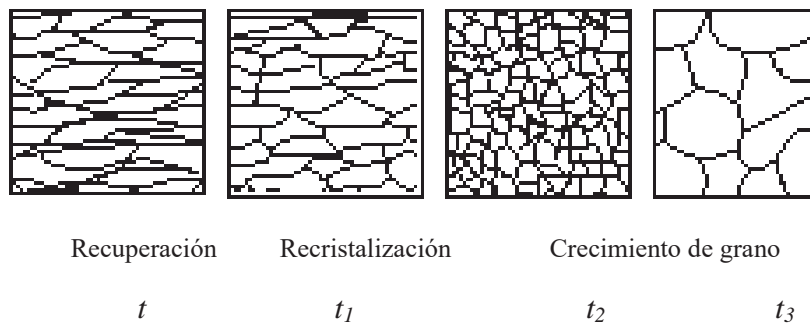


Figura 1.1 Secuencia recuperación-cristalización crecimiento. De t a t_1 se presenta la recuperación, estado antes de la formación de nuevos granos. De t_1 a t_2 se presenta la recrystalización que es la nucleación de granos nuevos sin deformación. Después de t_2 se da el crecimiento de grano.

Al deformar plásticamente un metal se consume energía, donde la mayor parte de esta se convierte en calor y solo una pequeña fracción permanece en el metal dándose la recuperación y la recrystalización. Y lo que respecta al crecimiento de grano esta relacionado de manera indirecta con la recuperación y la recrystalización. Por otro lado al deformar plásticamente un material se producen defectos en la red cristalina, estos defectos más la deformación elástica ayuda al almacenamiento de energía en una material.

1.5.3 Deformación elástica.

Al deformar la red, una cantidad ϵ se obtiene la energía de deformación por unidad de volumen dada por $\epsilon^2 E/2$, siendo E el módulo de Young, donde sólo un 5% a un 10% de la energía se almacena.

Algunos de los defectos que se generan por la deformación plástica son dislocaciones, vacancias, átomos intersticiales y/o fallas de apilamiento. Y los defectos más importantes presentes a temperatura ambiente son las dislocaciones y vacancias. Todos los procesos de deformación producen energías almacenadas. Una tensión simple solo activa un deslizamiento sobre dos planos de en metal CCC, por otro lado una deformación compleja activa el deslizamiento en todos los planos de deslizamiento. La temperatura tiene una influencia notable, una deformación a temperaturas bajas genera gran cantidad al de energía almacenada. Y por otro lado al disminuirse el tamaño de grano en un material la cantidad de energía almacenada aumenta.

1.6 Nucleación.

La nucleación se origina por el crecimiento de los límites de grano o de subgrano. Dependiendo del metal y del grado de deformación se presentan dos fenómenos de nucleación en la recristalización.. El crecimiento repentino se da cuando crece el límite entre un grano original con grandes dislocaciones y de un grano de baja densidad de dislocaciones. Mientras que los subgranos crecen por aglutinación o por migración del límite de grano. Al adicionar impurezas se incrementa la energía almacenada para deformación, esperando que se incremente la velocidad de crecimiento, sin embargo, no es así, las impurezas disminuyen la velocidad de crecimiento, así como la velocidad de nucleación.

1.7 Trabajo en caliente.

Durante el trabajado en caliente se producen simultáneamente la recristalización y la deformación, lo cual se ilustra en la figura 1.2.

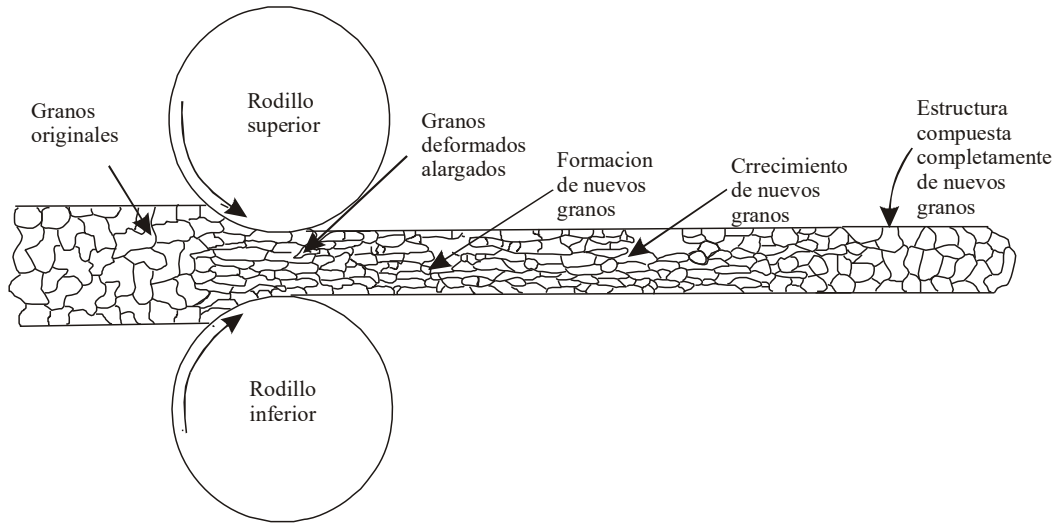


Figura 1.2 Recristalización durante el laminado en caliente.

Al someterse un material a un trabajo en caliente, los microconstituyentes se distribuyen y los límites de grano llegan a romperse [1].

1.8 Recristalización secundaria.

En algunos casos, durante la etapa de crecimiento de grano que se señala en la figura 1.3, se formarán algunos granos grandes que crecerán siguiendo una dirección y, de ahí, darán lugar a la estructura más pequeña de granos recristalizados. Este fenómeno se llama generalmente recristalización secundaria.

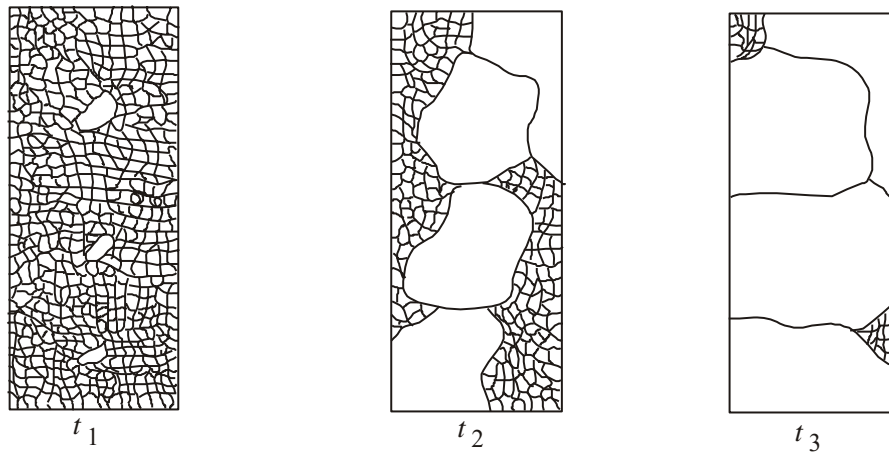


Figura 1.3 Ilustración esquemática de recristalización secundaria.

1.9 Proceso de fabricación de los anillos de acero.

El acero del cual están fabricados los anillos es un acero 4140K. De acuerdo a esta clasificación este es un acero microaleado con una composición nominal mostrada en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Composición nominal AISI-SAE para el acero 4140 K.

AISI-SAE Número	%C	%Mn	%Si	%Mo	%Cr
4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,15-0,35	0,15-0,25	0,80-1,10

La figura 1.4 muestra gráficamente el proceso de fabricación de los anillos que sigue la empresa FRISA S.A de C.V. El proceso se desarrolla de la siguiente manera, las palanquillas son cortadas en secciones requeridas, posteriormente los trozos de acero son metidos a diferentes tratamientos térmicos: un normalizado a 925°C, un austenizado a 900°C y un temple, para posteriormente ser forjados hasta las dimensiones requeridas del proceso. Después del forjado, las secciones de acero son medidas nuevamente en el horno para recalentarlas hasta 615 °C, después de que la temperatura es alcanzada, el acero es perforado en el centro por medio de un mandril y una prensa mecánica. El paso siguiente es montar el anillo en un transportador para ser llevado a la laminadora de rodillos cónicos donde se le dan las dimensiones especificadas para el anillo.

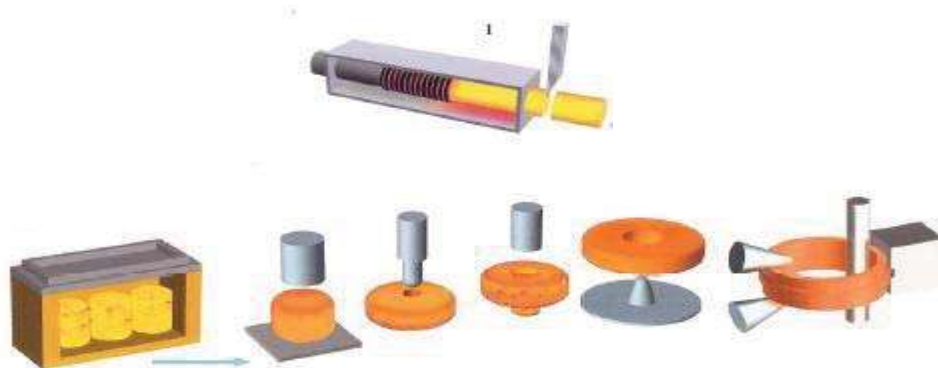


Figura 1.4 Figura esquemática de la secuencia de fabricación de anillos de acero por medio de una laminadora radial-axial.

1.10 Ensayos no Destructivos.

Por su flexibilidad, los END pueden ser usados en los procesos de fabricación para inspeccionar materiales metálicos y no metálicos. Las pruebas no destructivas son realizadas bajo procedimientos escritos, bajo requisitos de las principales norma de fabricación, tales como el ASME, ASTM, API y el AWS entre otros. Los ensayos no destructivos por ultrasonido están cambiando por el avance técnico; sin embargo sus principios básicos poseen una vigencia inalterable. Por lo que los conocimientos deben ser familiares para un usuario de este método, para permitir así resolver problemas de ensayo.

1.10.1 Ultrasonido.

De acuerdo a una definición general particular, la región del ultrasonido comienza más allá de la frecuencia de 20 kHz. Para el ensayo no destructivo de materiales el rango de 1 MHz a 15 MHz es de particular interés, en algunos casos específicos (mediciones en hormigón, por ejemplo), se usan también el rango de 25kHz a 100 kHz. Históricamente, los ensayos no destructivos (END) han sido usados para la detección de discontinuidades o defectos en estructuras. Es evidente que debido a la relación costo-efectividad de los END permiten que puedan expandirse a todos los aspectos de producción del material y aplicaciones de estos. Actualmente se hacen esfuerzos por desarrollar y perfeccionar las técnicas de medición para poder monitorear los procesos de producción de materiales, la integridad de estos después de su fabricación y la velocidad con que se degradarían los materiales en servicio. El ultrasonido es útil para la evaluación de la microestructura de los materiales, prediciendo algunas propiedades mecánicas y para detectar defectos macroscópicos y microscópicos. Actualmente, existen técnicas ultrasónicas tradicionales y especializadas, la diferencia entre ellas es la forma en que se considera el medio elástico, en el cual se propagan las ondas. El ultrasonido tradicional, asume que el medio elástico es ideal, es decir, isotrópico, homogéneo, lineal, libre de atenuación y dispersión. En todo ensayo no destructivo el medio o medios se consideran reales, ya que en los procesos de fabricación de materiales, se tiene una distribución aleatoria en la orientación cristalográfica, por lo que la estructura de los granos no es uniforme, no presentan la misma orientación. Por lo que la mayoría de los materiales policristalinos presentan una textura cristalográfica, que afecta en

gran medida las propiedades mecánicas de los materiales. A los materiales que tiene esta textura se les denomina materiales anisotrópicos los cuáles presentan propiedades elásticas más complejas (no hay homogeneidad, no hay linealidad, presentan atenuación y dispersión) que afectan la propagación ultrasónica. Es fundamental entender la interacción onda – material para poder establecer las propiedades mecánicas de un material al medir la variación en la respuesta ultrasónica con respecto a la respuesta en un medio ideal libre de defectos. Una onda al viajar a través de un material sufre atenuación por la pérdida de energía por varios mecanismos de pérdida. Por lo cual las mediciones de atenuación ultrasónica indican las pérdidas internas de energía causada por la microestructura y las alteraciones microestructurales del material sometido a prueba. La sensibilidad de las ondas ultrasónicas se debe a la interacción con varias discontinuidades que pueden ser grietas, inclusiones y fronteras de grano, entre otras.

1.10.2 Generación de ultrasonido

Existe un gran número de métodos para generar ultrasonidos. Si los dispositivos capaces de oscilar se construyen con una frecuencia propia correspondientemente alta. Estos procedimientos mecánicos, y otros principios, no se utilizan en el ensayo no destructivo de materiales, por lo que se recurre a otros efectos físicos, como: el efecto magnetoestrictivo, y sobre todo el efecto piezoeléctrico.

1.11 Efecto magnetoestrictivo.

Los materiales ferromagnéticos (muy especialmente el níquel y el acero), tienen la propiedad de contraerse o expandirse por efecto de un campo magnético. Inversamente, en una barra de acero ferromagnético se produce un campo magnético si es expuesta a un esfuerzo de tracción o compresión. Este efecto se aprovecha para lograr altas potencias sonoras a relativamente bajas frecuencias.

1.12 Efecto piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico tiene una importancia mucho mayor, se aprovecha universalmente para el ensayo no destructivo de materiales. Hay cristales naturales como el cuarzo o

sintetizados que tienen la propiedad de que en presencia de un esfuerzo de tracción o compresión se originan cargas eléctricas en su superficie. La carga cambia de signo si se invierte la dirección del esfuerzo. Así es que en las superficies de un cristal expuesto alternativamente a un esfuerzo de tracción y un esfuerzo de compresión existe un potencial alternativamente positivo y negativo (tensión alterna). El efecto piezoeléctrico es reversible, cuando se aplica una carga eléctrica a la superficie del cristal, esta se contrae o se expande según el signo de la carga eléctrica. Una tensión eléctrica alterna, aplicada a las superficies del cristal, da origen a oscilaciones mecánicas de presión (expansión y contracción); ver Figura 1.5. De la reversibilidad se emplea el mismo principio para generar y recibir ondas longitudinales ultrasónicas. Utilizándose un mismo cristal como emisor y receptor.



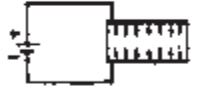

	Causa	Esquema	Efecto
Efecto Piezoeléctrico directo	Compresión sobre el cristal		Voltaje positivo sobre las caras
	Tracción sobre el cristal		Voltaje negativo sobre las caras
Efecto Piezoeléctrico sobre las caras	Voltaje positivo sobre las caras		Expansión del cristal
	Voltaje negativo sobre las caras		Contracción del cristal

Fig. 1.5 Efecto piezoeléctrico del cuarzo (corte X).

El efecto piezoeléctrico no es propio de todos los cristales y sólo se produce en determinadas condiciones. El ejemplo más conocido es el cuarzo. Un cristal de cuarzo natural tiene una forma determinada, siempre recurrente, que se describe con ayuda de los ejes cristalográficos, designados ejes X, Y y Z, igual que en un sistema de coordenadas cartesianas. El efecto piezoeléctrico sólo se consigue en el cuarzo si la lámina de cuarzo ha sido cortada del cristal, perpendicularmente al eje X o al eje Y. En el primer caso, la deformación mecánica del cristal tiene lugar en la misma dirección del campo eléctrico; en

el segundo caso perpendicularmente a ella. Por esto se habla de cuarzos, u oscilaciones, de corte X y de corte Y . Los cuarzos de corte X generan ondas longitudinales; los de corte Y , ondas transversales (Figura 1.6). En la mayoría de los casos entra en consideración el corte X . Otro mineral que presenta el efecto piezoeléctrico es la turmalina. Una importancia grande han alcanzado los transductores cerámicos sinterizadas que adquieren el efecto piezoeléctrico por "polarización", esto es un enfriamiento desde una alta temperatura característica del material con exposición a altos voltajes eléctricos. El efecto piezoeléctrico puede, sin embargo, perderse por despolarización cuando se excede la temperatura de Curie. Los cerámicos sinterizados más importantes son el titanato de bario, el sulfato de litio, el zirconato de plomo-titanio (PZT) y el metanobiato de plomo.

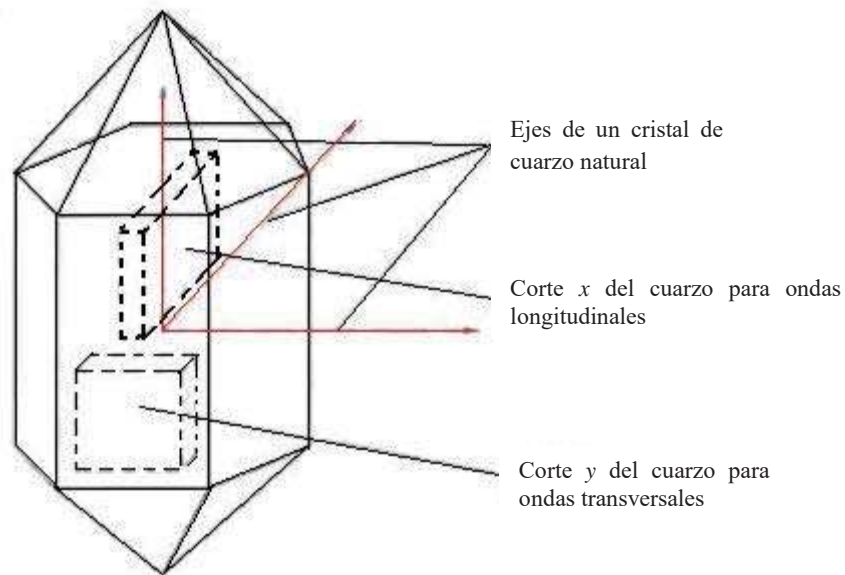


Fig. 1.6 Sistema de coordenadas en un cristal de cuarzo; cortes X e Y .

1.12.1 Algunos materiales piezoeléctricos.

Cuarzo.

Primer material usado. Tiene características muy estables en frecuencia, pero es muy pobre como generador de energía acústica y es comúnmente reemplazado por materiales más eficientes.

Sulfato de litio.

Es muy eficiente como receptor de energía acuática, pero es muy frágil, soluble en agua y su uso está limitado a temperaturas por debajo de los 75° C.

Cerámicas sinterizadas.

Producen los generadores más eficientes de energía acústica, sin embargo, tienden a desgastarse rápidamente.

1.13 Otros métodos de ensayos no destructivos.

Otros métodos de END detectan principalmente defectos superficiales y sub-superficiales, el ultrasonido también lo hace solo que es un poco más tardado a si se utilizan métodos como líquidos penetrantes y/o partículas magnéticas que son más rápidos. Con corrientes de Eddy y mediciones del campo magnético se puede predecir la profundidad de grietas en un material. En metales sobre todo son bastante útiles las corrientes de Eddy para detectar grietas bajo su superficie y resulta mejor utilizar medición de caída de C.A. para detectar grietas más profundas. El ultrasonido presenta una ventaja por poder detectar defectos internos con mayor precisión. Podemos decir que las principales ventajas de la técnica ultrasónica son: a) la interacción onda-material brinda información importante de las propiedades mecánicas del material, b) un alto grado de la penetración es posible en muchos materiales de uso general, que está en contraste con el grado más bajo de la penetración encontrado con la prueba radiológica de metales, c) exactitud en localización y medición de defectos, d) sensibilidad de detectar y clasificar defectos muy pequeños, e) compatibilidad con los dispositivos de exploración automática. Algunas desventajas son: a) Los operadores deben ser entrenados b) se requiere un alto grado de contacto entre el transductor y la superficie que se explorará, c) el costo elevado del equipo.

1.14 Propagación del sonido.

La propagación de las ondas se vincula a la materia. Por ejemplo si una onda se está propagando, debe existir un material sólido, líquido o gaseoso, por lo que se deduce que la onda no es más que la propagación de las vibraciones de las partículas del material elástico. Ya que líquidos y gases no ofrecen ninguna resistencia a los esfuerzos cortantes, las ondas

transversales (ondas de corte) no pueden ser propagadas en estos medios. “En líquidos y gases solamente pueden ser propagadas ondas longitudinales.”

1.14.1 Propagación de ondas a través de interfase.

Si una onda sónica incide en forma perpendicular a una interfase de dos materiales, una fracción de la energía de la onda es transmitida en el otro medio, mientras que otra parte será reflejada, como se muestra en la figura 1.7.

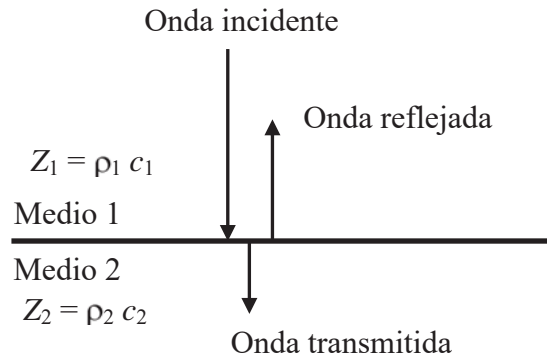


Fig. 1.7 Incidencia del sonido normal a la interfase entre dos medios.

Las proporciones de energía transmitida y reflejada dependen de la impedancia acústica de los dos medios. La impedancia acústica se puede calcular como:

$$Z = \rho c \tag{1.1}$$

Donde,

Z es la impedancia acústica [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

ρ es la densidad del medio considerado [kg/m^3]

c es la velocidad acústica del medio considerado [m/s]

Si una onda viaja a través de un material con impedancia acústica Z_1 , e incide perpendicularmente en una interfase correspondiente a otro material con impedancia acústica Z_2 , se pueden definir las siguientes variables para amplitudes de esfuerzo:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{1.2}$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \tag{1.3}$$

Donde R y T son los coeficientes de reflexión y transmisión, respectivamente. Indicando la cantidad de energía transmitida o reflejada en una interfase.

Para una interfase *acero-agua* tenemos $\rho_{ac}c_{ac} = 46.5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ y $\rho_{ag}c_{ag} = 1.5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ de las ecuaciones 1.2 y 1.3 se obtiene $R = -0.938$ y $T = 0.063$. La interpretación de este resultado es que la amplitud de la onda reflejada (esfuerzo) es 0.938 (o 93.8 %) de la amplitud de la onda incidente. El signo negativo indica que la onda reflejada esta 180° fuera de fase con la onda incidente. De esta forma cuando la onda incidente es de compresión la onda reflejada es de tensión y viceversa. La amplitud de la onda transmitida es solamente el 6.3% de la amplitud de la onda incidente. Esta situación de reflexión/transmisión se muestra en la Figura 1.8(a). Si se analiza ahora la interfase *agua-acero* con los valores anteriores y aplicando las ecuaciones 1.2 y 1.3 tenemos $R = 0.938$ y $T = 1.938$. De esta forma, la amplitud reflejada es aproximadamente la misma de la amplitud incidente, donde la amplitud transmitida (esfuerzo) es cercana al doble de la amplitud incidente.

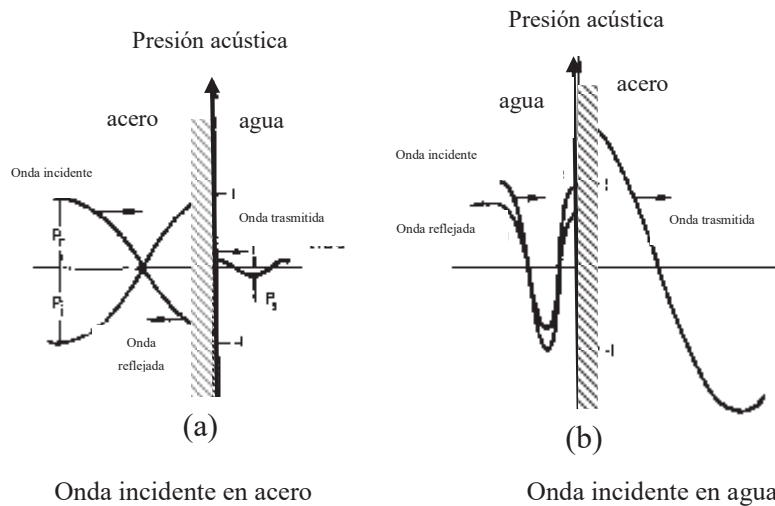


Fig. 1.8 Valores de la presión acústica en los casos de reflexión de interfases de (a) acero-agua y (b) agua-acero en incidencia perpendicular.

En términos de energía los coeficientes de reflexión y transmisión se pueden escribir:

$$R = \left[\frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} \right]^2 \quad \text{y} \quad T = \frac{4Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}^2 \quad (1.4)$$

1.14.2 Divergencia del haz ultrasónico.

Un transductor de ultrasonido no radia el sonido en una única dirección, sino en rango angular dado (similar a un "cono" luminoso). La sección transversal del haz se hace mayor al incrementar la distancia, de forma que la energía se distribuye sobre, un área cada vez mayor. De tal forma que la cantidad de energía de la onda por unidad de área que es captada por un receptor se va haciendo cada vez menor, si el receptor se aleja del emisor. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 1.9.

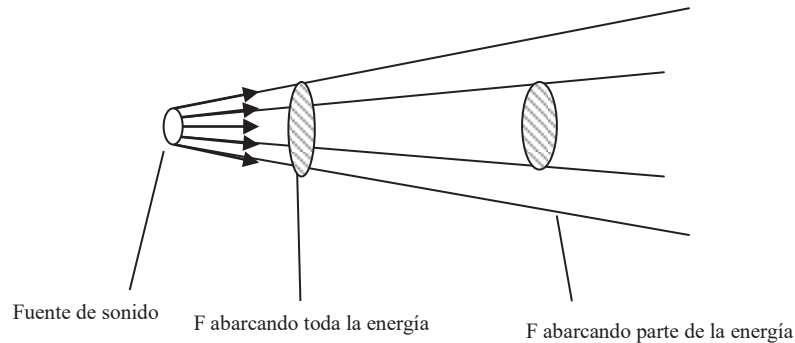


Figura 1.9 Reducción de la intensidad de onda causada por la divergencia.

1.15 Atenuación ultrasónica.

La atenuación es sinónimo de pérdida de energía. Cuando una onda acústica se propaga a través de un material, su amplitud disminuye conforme la distancia recorrida aumenta. Entre los diferentes mecanismos de pérdida de la intensidad acústica tenemos:

- Absorción (*absorption*): disipación fundamental de la energía en forma de calor.
- Dispersión (*scattering*): pérdida causada por las características microestructurales del material: tamaño de grano, frontera de grano, textura, etc.

- Divergencia del haz (*beam spreading*): Esta pérdida es causada por la naturaleza de onda de un haz ultrasónico ya que este diverge en forma de cono produciendo pérdidas de la intensidad acústica de una onda.

La dispersión y la absorción son los mecanismos de pérdida de energía que gobiernan la atenuación en el rango de frecuencias de interés para caracterizar la mayoría de los materiales con aplicaciones en ingeniería.

En forma general atenuación significa la *pérdida* P de la intensidad de la señal al incrementarse la distancia de propagación. La pérdida es definida como el cociente de dos amplitudes y es regularmente expresada en unidades logarítmicas como el Neper o el decibel [dB] por las fórmulas:

$$P \text{ Neper} = \ln \frac{A_1}{A_2} \tag{1.5}$$

$$P \text{ dB} = 20 \log \frac{A_1}{A_2} \tag{1.6}$$

Donde A_1 es la amplitud de la señal sin atenuación, A_2 es la amplitud de la señal con atenuación.

En algunos casos la pérdida P , ocurre en forma local como resultado de una interacción de la onda con una discontinuidad del material, entre estas pérdidas están las pérdidas por reflexión y transmisión de la onda ultrasónica en la interfase *transductor-especimen-transductor*, pérdidas por dispersión en superficies rugosas, etc. También existen otras pérdidas y estas ocurren en una distancia conforme la onda ultrasónica se propaga, pero no son proporcionales a la distancia cubierta. Estas pérdidas están asociadas con la divergencia o ensanchamiento del haz ultrasónico. Cuando hablamos estrictamente de atenuación causada por el medio, entonces limitamos el concepto de atenuación al fenómeno que causa una pérdida proporcional a la distancia de propagación, es decir que la pérdida total en el material puede ser expresada como:

$$P = \alpha d \tag{1.7}$$

donde d es la distancia de propagación y α es el llamado coeficiente de atenuación.

Existen dos clases principales de mecanismos de atenuación que se deben de considerar en la caracterización ultrasónica de materiales. El primero, la absorción convierte la energía acústica en calor a través de viscosidad, histéresis elástica, etc. El proceso de absorción de energía es una pérdida irreversible del campo acústico ya que se disipa en el medio. El segundo, la dispersión que convierte la energía del haz colimado y coherente, en ondas incoherentes y divergentes como resultado de la interacción de las ondas con heterogeneidades del material. La energía dispersada llevada por las ondas acústicas incoherentes no necesariamente se pierde ya que al menos parte de ella puede ser recogida por el mismo transductor ultrasónico. Considerando esto, el coeficiente de atenuación puede ser escrito como:

$$\alpha = \alpha_{\text{absorción}} + \alpha_{\text{dispersión}} \tag{1.8}$$

Aunque la dispersión cuenta como la mayor parte de la atenuación en metales policristalinos y cerámicos, la absorción es la pérdida dominante en otros materiales como polímeros y fluidos. Por ejemplo, en agua, la cual es usada frecuentemente en sistemas de inmersión el coeficiente de absorción es:

$$\alpha_{\text{agua}} = 0.2 f^2 \tag{1.9}$$

En la ecuación (1.9), f es la frecuencia ultrasónica en MHz y α_{agua} es el coeficiente de atenuación [dB/m]. La atenuación severa ocurre a altas frecuencias mientras que a bajas frecuencias la expansión del haz ultrasónico es la causa predominante de pérdida sobre una distancia de propagación grande. Por ejemplo, con 10 MHz de frecuencia $\alpha_{\text{agua}} = 0.2$ dB/cm, lo que indica que la atenuación por absorción se puede despreciar en distancias en el agua de hasta unos cuantos centímetros. En metales, la absorción se da por la conversión de energía acústica en calor y es función de la conductividad térmica del material, cuando una onda ultrasónica pasa a través del material existe un flujo de calor de zonas de

compresión a zonas de dilatación en el material. Lücke [2] indica que este tipo de pérdidas es proporcional al cuadrado de la frecuencia pero su valor absoluto es despreciable si se compara con las pérdidas por dispersión.

1.16 Dispersión

Como se mencionó anteriormente cuando una onda se propaga en un material, sufre una pérdida en su intensidad y ésta es causada por las características microestructurales del material: tamaño *de grano*, *frontera de grano*, *textura*, etc. Esta pérdida es la variable que es necesario determinar para caracterizar en forma no destructiva un material. Para determinar esta disminución en la intensidad de la onda acústica al propagarse es necesario determinar dos ecos consecutivos de la pared posterior del espécimen. Las técnicas para medir la dispersión han sido usadas principalmente para determinación de tamaño de grano [3-5]. Los parámetros principales que gobiernan la naturaleza y magnitud de la dispersión son los cambios de la impedancia acústica y la relación α/λ . La técnica de dispersión ha probado su valía en la medición de profundidad en capas endurecidas [6], monitoreo de porosidad y textura en metales y compuestos [7,8].

La atenuación inducida por dispersión aumenta en función de la frecuencia a través de todo el rango de frecuencia. En el rango de frecuencia, existen tres regiones diferentes de acuerdo al mecanismo de pérdida de energía, de estas regiones la *región de baja frecuencia* o *región de Rayleigh* (1 MHz a 30 MHz) es el más importante, debido que las técnicas ultrasónicas ordinarias se llevan a cabo en esta región, debido a que la atenuación es aceptablemente baja. La Tabla 1.3 muestra los coeficientes de atenuación en estas tres regiones.

Tabla 1.2 Coeficientes teóricos de atenuación ultrasónica para sólidos elásticos policristalinos.

Relación de longitud de onda	Mecanismo de atenuación	Coefficiente de atenuación
$\lambda \gg \pi D$	Dispersión de Rayleigh	$\alpha \propto \Delta^2 D^3 f^4$
$\lambda \cong \pi D$	Estocástica	$\alpha \propto \Delta^2 D f^2$
$\lambda \ll \pi D$	Geométrica	$\alpha \propto \Delta^2 D^{-1}$

En donde λ es la longitud de onda, D el tamaño de grano nominal, f es la frecuencia ultrasónica, α es el coeficiente de atenuación y Δ el cambio relativo de las propiedades elásticas entre el dispersor y el medio.

Para cristales cúbicos Δ puede ser definido como el factor de anisotropía:

$$\Delta = \frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}} - 1 \quad (1.10)$$

donde C_{nm} son constantes elásticas del material.

Otra forma de escribir el mecanismo de atenuación en la región de Rayleigh es:

$$\alpha_{\text{Rayleigh}} = a_R D^3 f^4 \quad (1.1)$$

donde a_R es un coeficiente proporcional a Δ^2 , a_R puede ser determinada ya sea por medios empíricos o analíticos y es la relación básica entre los parámetros del material (grado de anisotropía y tamaño de grano) por un lado y frecuencia ultrasónica por el otro. El coeficiente a_R ha sido tabulado para la mayoría de materiales policristalinos [9]. Otros parámetros que afectan la medición de la atenuación son de gran importancia en muchos casos. Por ejemplo, la orientación preferencial entre granos vecinos (estructura granos columnares, flujo plástico severo, etc.). F. E. Stanke y G. S. Kino [13] en su teoría unificada demostraron que es posible utilizar técnicas estadísticas generales para obtener la atenuación inducida por dispersión como función de la frecuencia sin asumir ninguna relación de tamaño de grano y longitud de onda.

1.7 Medición de la atenuación ultrasónica.

La atenuación o pérdida se mide en decibeles (dB o Neper), una unidad comparativa logarítmica.

$$P \text{ dB} = 20 \log \frac{E_1}{E_2} \quad (1.12)$$

Donde, E_1 , E_2 son los voltajes medidos de dos reflexiones consecutivas y P es la pérdida medida.

1.18 Técnica pulso–eco.

Este procedimiento utiliza la porción de onda reflejada en la pared posterior al mismo tiempo para la evaluación de materiales. El transductor funciona a la misma vez como emisor y como receptor de la señal ultrasónica. En esta técnica un impulso eléctrico de alto voltaje y de cortísima duración excita al cristal piezoeléctrico del transductor para generar una onda ultrasónica; inmediatamente después, mientras aún se propaga la onda, el transductor está listo para la recepción. La onda sonora penetra en el material, hasta que, como resultado de una superficie límite, tiene lugar una reflexión parcial o total. Si la superficie reflectante se encuentra perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, ésta es reflejada en su dirección de emisión y al cabo de un tiempo determinado, que depende de la velocidad del sonido en la muestra analizada y de la distancia que existe entre el transductor y la superficie reflectante, llega de vuelta al transductor, siendo nuevamente convertida en un impulso eléctrico. Sin embargo no toda la energía que regresa es reconvertida en energía eléctrica, sino que en la interfaz entre el transductor y la superficie de la pieza tiene lugar de nuevo una reflexión parcial; una parte menor del sonido atraviesa por segunda vez a pieza, y así sucesivamente. De este modo se origina una sucesión de ecos en el dominio del tiempo como se muestra en forma esquemática en la Figura 1.10. Analizando las señales, se obtiene un coeficiente de atenuación contra frecuencia cuyo espectro es único de cada material. La señal puede analizarse en el dominio del tiempo pero al medir directamente las amplitudes de voltaje de cada señal en el osciloscopio y poner los resultados en una gráfica, obtenemos una medición de atenuación pero esta no es exacta. Por lo tanto es más usual analizarla en el dominio de la frecuencia utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT) para convertir la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

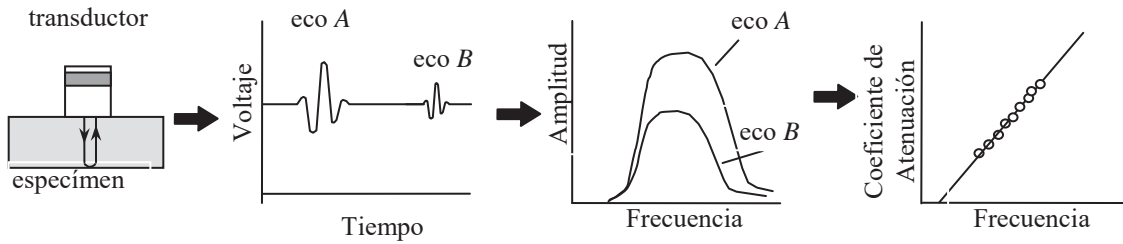


Figura 1.10 Medición de atenuación por el método pulso-eco para encontrar el coeficiente de atenuación

Al analizar la señal en el dominio de la frecuencia se puede apreciar en forma clara la dependencia en la frecuencia del coeficiente de atenuación en un rango amplio de frecuencias.

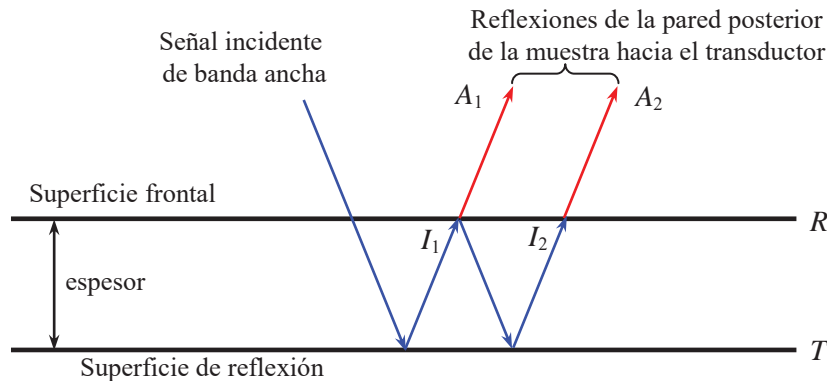


Figura 1.11 Diagrama de un sistema ultrasónico de pulso-eco para determinar la dependencia en la frecuencia de la atenuación.

Donde A_1 , A_2 , I_1 e I_2 en la figura 1.11 son función de la frecuencia (Transformadas de Fourier de las cantidades en el dominio de la frecuencia). El coeficiente de reflexión R es en general también función de la frecuencia y puede ser determinado en términos de energía (intensidad) o amplitud (presión) [10]. El coeficiente de atenuación puede ser escrito como [11,12]:

$$\alpha = \frac{1}{2d} \ln \left(R \frac{A_1}{A_2} \right) \tag{1.13}$$

La técnica pulso-eco, es una de las más usadas para medir la atenuación de manera precisa para caracterizar materiales microestructuralmente y determinar así las propiedades mecánicas de materiales.

CAPITULO II

DESARROLLO EXPERIMENTAL

2. Introducción.

El coeficiente de atenuación es un parámetro del efecto de la microestructura del material en las ondas acústicas. A través de la determinación precisa de este coeficiente se pueden determinar algunas variables microestructurales como el tamaño de grano. Para ello, se utilizará la técnica pulso-eco en su modalidad de inmersión. Para hacer mediciones de atenuación en forma precisa es necesario hacer cálculos de algunas pérdidas en la intensidad de la onda ultrasónica las cuales no están relacionadas con las características microestructurales del material. Entre estas pérdidas tenemos: pérdidas de impedancias acústicas y pérdidas por la difracción del haz ultrasónico. Realizar una precisa corrección de estas pérdidas es de suma importancia para la determinación precisa del coeficiente de atenuación, el cual es necesario para determinar el tamaño de grano a partir de la aproximación que proponemos al modelo matemático de Stanke y Kino. En este desarrollo experimental se explican la forma en que se corrigen estos fenómenos acústicos para determinar en forma precisa el tamaño de grano del acero 4140 K. También se describe en este capítulo, el procedimiento y las consideraciones teóricas utilizadas en esta investigación.

2.1 Caracterización del acero 4140K de los anillos.

Estos anillos fueron fabricados con acero 4140K y el material fue proporcionado por la empresa FRISA FORJADOS S.A DE C.V. Como se muestra en la Figura 2.1, de los segmentos de acero se obtuvieron cortes para a partir de estos fabricar las probetas para los tratamientos térmicos y para después hacer la caracterización ultrasónica.



Figura 2.1 Acero proporcionado por la empresa para su evaluación ultrasónica

El material base fue caracterizado para conocer la composición química y resistencia mecánica. Los resultados de composición química se muestran en la tabla I.

Tabla 1. Composición química del acero 4140K utilizado para fabricar los anillos de acero.

CONTROL AHMSA DE CALIDAD	NOMBRE DEL DOCUMENTO														
	LABORATORIO QUIMICO CENTRAL														
	REPORTE DE ANALISIS QUIMICO % EN PESO														
MUESTRA	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	Ni	Mo	Al	V	Cb	Ti	Al sol	
MUESTRA ESPECIAL DE ACERO	0,40	0,86	0,012	0,011	0,22	0,170	0,970	0,100	0,190	0,018	0,033	0,001	0,003	0,015	

Posteriormente, con el material proporcionado por la empresa, se prepararon mediante corte y maquinado seis especímenes con dimensiones de 50 mm × 50 mm × 13 mm para tener la geometría mostrada en la Figura 2.2.

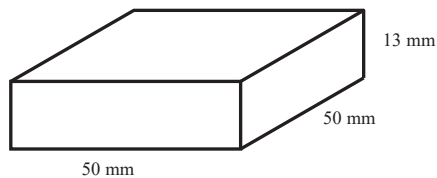


Figura 2.2 Dimensiones de las muestras a evaluar por atenuación ultrasónica.

Las probetas se lijaron en las caras con sección transversal más grande. Para ello, se comenzó con papel lija de número 320 y se terminó con el número 600. El propósito de

lijar las probetas fue el de dar una superficie con acabado similar al acabado final que se les da a estos anillo lo cual elimina las pérdidas en la intensidad de la onda acústica generadas por la rugosidad.

Para las mediciones de atenuación ultrasónica, se realizó un arreglo experimental utilizando la técnica de pulso-eco en inmersión. Utilizando en este arreglo un transductor de inmersión marca Panametrics, con serie V317-525492 con frecuencia 20 MHz. Los transductores son montados en un sistema de traslación marca Velmex xyz, donde la distancia transductor–muestra es de 20 mm. La Figura 2.3 muestra gráficamente el arreglo experimental.

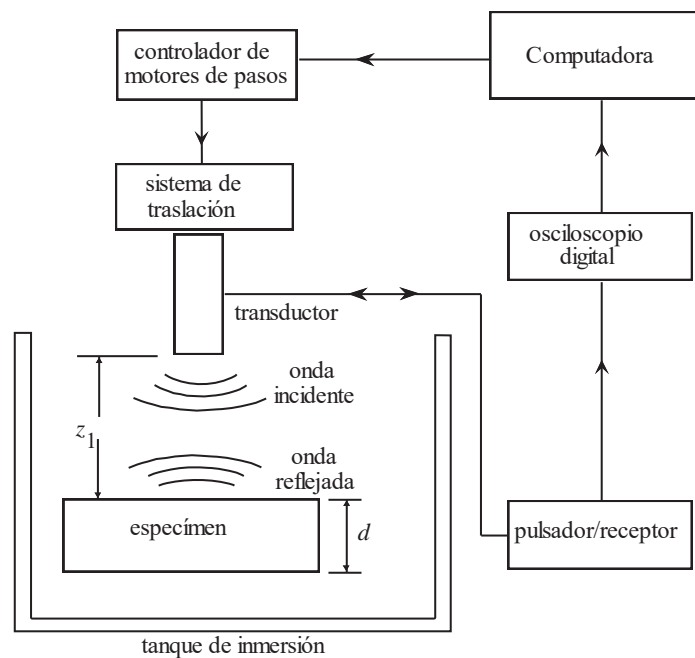
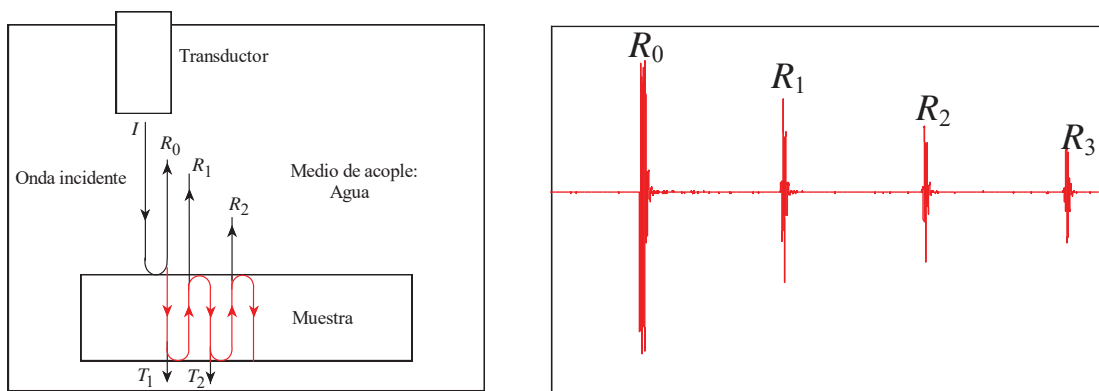


Figura 2.3 Diagrama esquemático de la técnica de inmersión pulso-eco para las mediciones de atenuación ultrasónica [15].

El transductor utilizado es excitado en modo *pulso-eco* por un pulsador/receptor modelo 5073PR marca Panametrics. El haz ultrasónico se hace incidir perpendicularmente sobre la superficie de la muestra, utilizando un goniómetro. El control de la posición del transductor y la distancia de este con respecto a la muestra se hace mediante el diseño de un programa escrito en lenguaje gráfico utilizando LabView; este programa controla el sistema de traslación y los motores de pasos conectados a la PC por el puerto serial (RS-232). Los

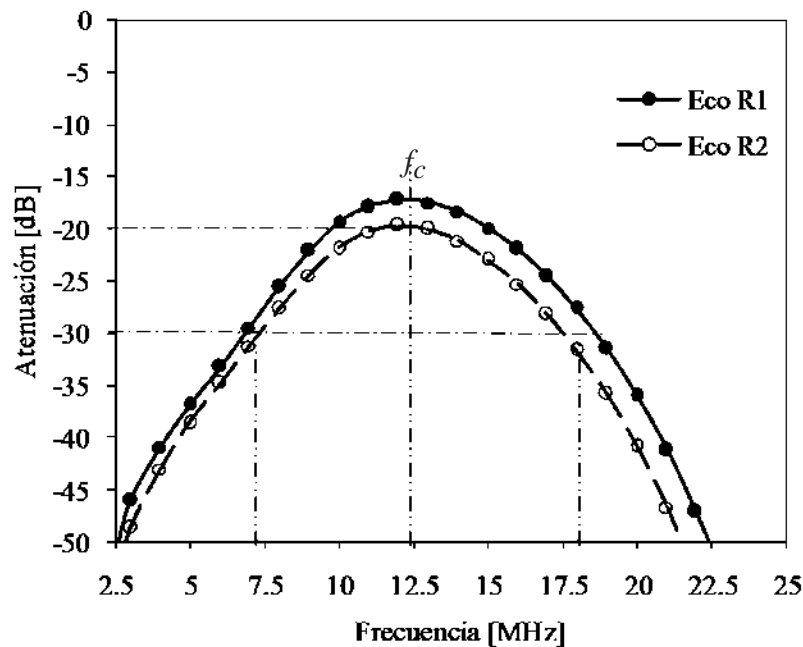
motores de paso son los componentes del sistema de traslación y sus características son 200 pasos por revolución lo cual permite mover el transductor en el plano xy 2 mm por revolución. En la figura 2.4 a) se muestra en forma esquemática el proceso de reflexión-trasmisión del sonido en el ensayo pulso-eco donde al ser excitado el transductor, la señal ultrasónica generada por el cristal piezoeléctrico viaja en el agua hasta incidir en la interfase *agua-acero* y parte de la energía de la señal se reflejara como un eco ultrasónico en la pared superior del espécimen (reflexión frontal R_0), también parte de la energía incidente se transmite en el metal para viajar a través del espesor y posteriormente reflejarse en la cara inferior del espécimen y regresar hacia la cara superior y repetir el proceso de reflexión/transmisión pero ahora en una interfase *acero-agua* (R_1). Finalmente, el transductor recibe la señal ultrasónica y la convierte en una señal eléctrica por medio del efecto piezoeléctrico, descrito en el capítulo I. Finalmente la señal eléctrica es recibida por el pulsador/receptor la cual es enviada a un una computadora donde será procesada posteriormente. La señal obtenida en las mediciones de atenuación ultrasónica tiene componentes de voltaje y tiempo, y esta se puede ver en un osciloscopio como una señal A-scan como se muestra en la Figura 2.4. En esta figura, el primer eco al que denominaremos R_0 será identificada como el eco de la primera reflexión de la pared superior de la muestra, y el eco R_1 se identifica como la primera reflexión de la pared inferior de la muestra, el



tercer (R_2) y cuarto (R_3) son reflexiones múltiples del segundo y tercer ecos de la pared inferior de la muestra.

Figura 2.4 Diagrama esquemático a) de la técnica de inmersión usando el método pulso-eco b) de múltiples reflexiones en una placa con incidencia perpendicular.

Para medir la atenuación ultrasónica necesitamos de dos señales de la pared posterior, es usual tomar dos señales consecutivas de la pared posterior. El análisis y procesamiento de los datos se harán en el dominio de la frecuencia, utilizando análisis espectral mediante la transformada discreta de Fourier. Esto para aprovechar la característica de banda ancha que tiene el transductor lo cual permitirá analizar las señales en un rango amplio de frecuencias. Para saber el rango de frecuencias del transductor este se caracterizará utilizando una caída de 10 dB (3.3 voltios) en la intensidad de la señal acústica. Esto se puede observar de forma clara en la Figura 2.5 donde se observa el espectro de frecuencia



de un transductor de 15MHz el cual puede operar óptimamente en un rango de frecuencia de 7 a 18 MHz.

Figura 2.5 Espectros correspondientes a los ecos R_2 y R_3 obtenidos después de aplicar la FFT, $f_{nominal} = 15\text{MHz}$, diámetro del transductor de 12.7 mm.

Una vez obtenidos los espectros de frecuencia de los ecos ultrasónicos se puede calcular las pérdidas globales en forma experimental al simplemente restar en forma algebraica los valores de los espectros de los ecos R_1 y R_2 . El resultado de restar los dos espectros de frecuencia de los ecos R_1 y R_2 se observa en la figura 2.6, esta representación es la pérdida global del experimento.



Figura 2.6 Curvas de pérdidas totales en la mediciones de atenuación a la muestra tratada térmicamente durante 24 horas a 950°C.

De la figura 2.6 se observa en una de las muestras, tratada térmicamente a 950°C por 24 horas el efecto de la difracción del haz ultrasónico en frecuencias bajas, el cual consiste en un aumento aparente en las pérdidas. Además, se observa que la pérdida total de la amplitud aumenta en forma exponencial con la frecuencia. Sin embargo, no es suficiente obtener esta curva, ya que no podemos obtener características microestructurales debido a que hace falta determinar las pérdidas causadas por la dispersión en las fronteras de grano, ya que estas revelan las características microestructurales del material analizado. Para ello, es necesario hacer dos correcciones causadas por pérdidas que no son atribuidas a la microestructura del material entre las que tenemos: pérdidas por impedancia acústica entre las dos interfases y las pérdidas por la difracción que sufre el haz ultrasónico al propagarse en el agua y en el material. Eliminando estas pérdidas permitirá determinar el coeficiente de atenuación.

Los cálculos matemáticos necesarios para realizar las mediciones están dados por la fórmula

$$P_T = P_{dif} + P_{imp} + P_{mat} \tag{2.1}$$

Donde:

- P_T es la pérdida de energía total
- P_{dif} es la pérdida de energía causada por la divergencia del haz ultrasónico
- P_{imp} es la pérdida de energía por el cambio de impedancias entre medio 1 (agua) y el medio 2 (acero)
- P_{dif} es la pérdida por la dispersión del haz ultrasónico en la frontera de grano.

2.2 Cálculos de pérdidas experimentales.

2.2.1 Perdidas por impedancia acústica

Las pérdidas por impedancia acústica son las más fáciles de calcular ya que solo se necesitan la densidad y la velocidad ultrasónica del material. Para determinar la densidad del acero 4140K se utilizó una probeta fabricada especialmente para este propósito con dimensiones cuidadosamente maquinadas las cuales nos dieron un volumen de 24.78cm^3 , posteriormente se determinó el peso de la muestra el cual fue de 199.2879 gr.

Finalmente se determinó la densidad a partir de $\rho = \text{masa} \times \text{volumen}$

Tabla 2.2 Resultados de mediciones para obtener la densidad del acero.

Material	Masa [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]
Acero 4140 K	199.2879	24.78	8.042

Posteriormente, se obtuvo la velocidad ultrasónica de la onda longitudinal, para ello se siguió el método discutido en el capítulo I para determinar el tiempo de vuelo de dos ecos consecutivos de la pared posterior. Se utilizó la fórmula

$$c_{long} = \frac{2d}{t} \tag{2.2}$$

Donde, c_{long} es la velocidad ultrasónica de acero, d es el espesor del espécimen y t es el tiempo de vuelo o diferencia de tiempo entre dos ecos consecutivos.

Las pérdidas por impedancia acústica se calculan a partir de la fórmula

$$P_{imp} = P_{TLA} + P_{TAL} \quad (2.3)$$

Donde, P_{TLA} es la pérdida de transmisión entre el agua (L) y el acero (A) y P_{TAL} es la pérdida de transmisión entre el acero (A) y el agua (L) causadas por el desajuste de impedancias acústicas y T es el coeficiente de transmisión dado por:

$$T^2 = 1 - R^2 \quad (2.4)$$

Aquí, R es el coeficiente de reflexión dado por:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.5)$$

Donde, Z_1 y Z_2 son las impedancias acústicas del agua y del acero, respectivamente.

La pérdida por impedancia acústica es calculada con la siguiente ecuación:

$$P_{imp} = 20 \log \frac{1}{T^2} \quad (2.6)$$

Como el objetivo de esta tesis es el de hacer los cálculos en tiempo real, se desarrolló un programa en LabView para hacer el cálculo de este tipo pérdidas de manera automática. Al cual es necesario ingresar para operarlo los parámetros, como las velocidades acústicas del material y del líquido, las densidades del material y del líquido y el espesor de la muestras.

2.2.2 Pérdidas por difracción

Como se mencionó anteriormente este tipo de pérdidas están asociadas con la geometría del transductor y por lo tanto no son causadas por los parámetros microestructurales del material. Para medir la atenuación ultrasónica con precisión es necesario eliminar estas pérdidas. Para su cálculo se recurrió a una solución analítica propuesta por Rogers y Van Buren [12] y está dada por la ecuación

$$P_{dif} = 1 - e^{-(2\pi/s)i} \left[J_0 \ 2\pi/s + i J_1 \ 2\pi/s \right] \quad (2.7)$$

Aquí, $J_{0,1}$ son funciones de Bessel de primer y segundo orden, $s = 2\pi z_1/ka^2$ donde z_1 es la distancia del transductor a la muestra, k es el número de onda y a es el radio del transductor.

El mecanismo de las pérdidas es el siguiente, debido a que el haz no conserva su forma cilíndrica, la energía fuera del cilindro no es recibida por el transductor cuando el eco retorna, generando pérdidas (atenuación) en la intensidad del haz. También se presenta variaciones de fase que pueden generar cancelaciones de ondas. Al igual que en el procedimiento para el cálculo de las pérdidas por impedancia se hizo un programa en LabView para calcular las pérdidas por difracción del haz ultrasónico. Para la interfase *agua-acero-agua* de este desarrollo experimental también se considera el efecto de la refracción del haz al pasar de un medio a otro. Teniendo que corregir también para esta refracción, con la fórmula siguiente.

$$z = z_1 + z_2 \frac{c_2}{c_1} \quad (2.8)$$

Donde,

- z es el promedio de las distancias de propagación entre el transductor y la parte posterior del espécimen
- z_2 es el espesor del espécimen,
- c_1, c_2 son las velocidades del sonido en el medio 1 y 2 respectivamente.

El programa desarrollado para este propósito se utilizó como una subrutina que esta anexado en el programa principal.

2.3 Ajustes del modelo teórico y determinación del tamaño de grano.

Como se ha mencionado, las mediciones de atenuación, permiten determinar el tamaño de grano del acero 4140K, los resultados obtenidos por el ensayo de ultrasonido serán comparados con las metalografías de las muestras analizadas. La aplicación del modelo matemático de Stanke y Kino [13] hace consideraciones que aplican para cualquier material policristalino; y no para materiales que presentan anisotropía, la cual puede darse en forma

de textura y/o elongación de los granos. Este modelo es válido para cualquier longitud de onda y cualquier tamaño de grano. En su fundamento teórico, la teoría unificada de Stanke y Kino para materiales policristalinos con granos equiaxiales y simetría cúbica implica el desarrollo y el conocimiento de complejos cálculos matemáticos, estos cálculos permiten i) modelar la forma irregular de los granos del material, ii) caracterizar la propagación de la onda en el medio, y además iii) de ser válida en todos los rangos de frecuencia para ondas armónicas. Los resultados de las predicciones teóricas para el coeficiente de atenuación en hierro como se muestra en la Figura 2.7. Identificando las tres regiones de dispersión en la propagación de ondas elásticas en sólidos policristalinos.

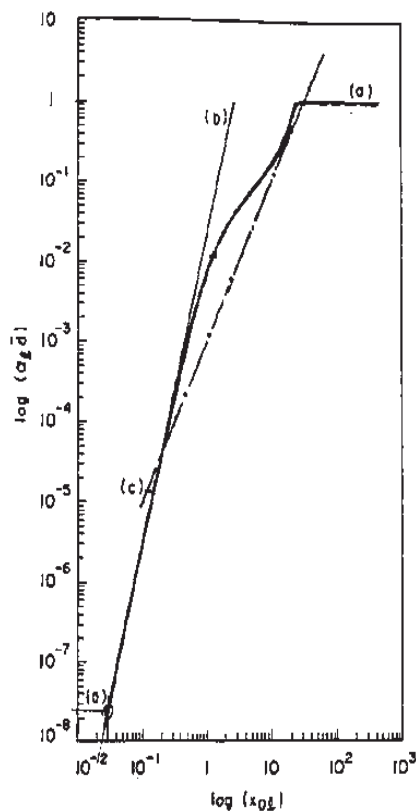


Figura 2.7 Coeficiente de atenuación que resulta de la teoría unificada de Stanke y Kino para materiales policristalinos y ondas longitudinales a) teoría unificada, b) región de Rayleigh, c) región estocástica. Obtenido de F. E. Stanke y and G. S. Kino, *J. Acoust. Soc. Am.* **75**(3), (1984) p 665-681.

En esta tesis se propone hacer una aproximación a la teoría de Stanke y Kino en la región de Rayleigh mediante un modelo aproximado utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Modelo} = \frac{1}{\frac{1}{a(\log(\alpha d))^4} + \frac{1}{b(\log(\alpha d))^2} + \frac{1}{c}} \quad (2.9)$$

Donde,

a, b y c son constantes del modelo aproximado las cuales son determinadas por un mejor ajuste.

α es el coeficiente de atenuación

d es el tamaño promedio de grano del material

Para obtener la aproximación de este modelo se hace lo siguiente: a) se establece una cantidad considerable de puntos en el modelo de Stanke y Kino Figura 2.8, b) Una vez que se determino el valor vertical y horizontal de cada punto, los datos son llevados a una hoja de Excel.

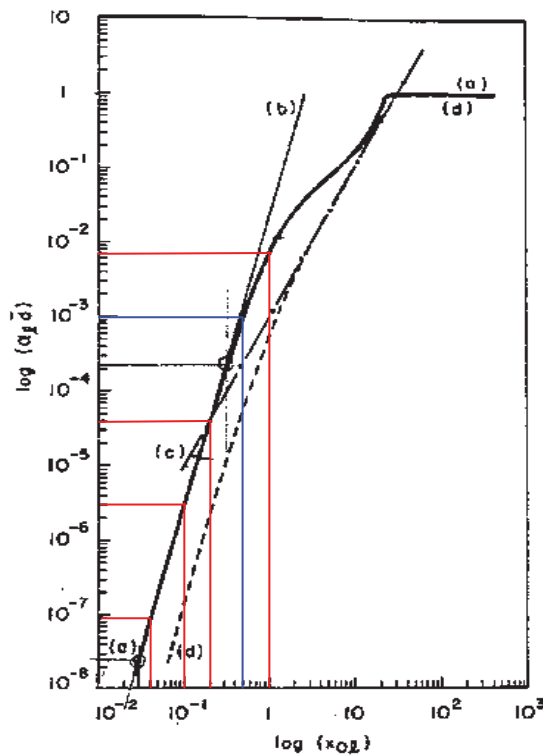


Figura 2.8 Determinación de valores para eje horizontal y vertical del coeficiente de atenuación sobre el modelo de Stanke y Kino

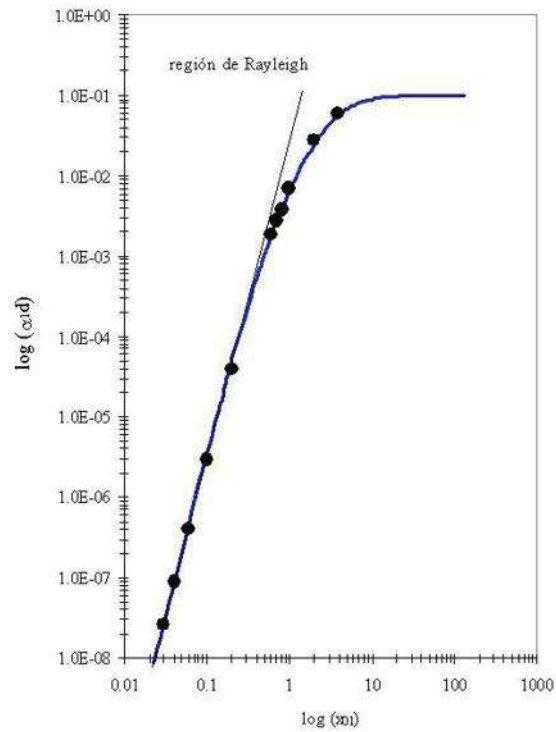


Figura 2.9 Grafico del modelo de la ecuación 2.9 para determinar el coeficiente de atenuación.

c) Una vez realizado lo anterior se procedió a aplicar la ecuación anterior y se realizó un mejor ajuste los resultados de este se observan en la Figura 2.9.

Los valores de las constantes que se obtuvieron para el mejor ajuste se muestran en la Tabla 2.3

Tabla 2.3 Valores obtenidos para las constantes del modelo desarrollado a partir del mejor ajuste

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
0.036	0.0085	0.1

La ecuación 2.9 no describe el complejo comportamiento del coeficiente de atenuación en todo el espectro como en la teoría de Stanke y Kino. Pero para las necesidades de este estudio, es suficiente para determinar el coeficiente de atenuación de Rayleigh, región en la cual la mayor parte de los ensayos ultrasónicos tienen lugar.

Después de hacer la aproximación al modelo teórico de Stanke y Kino, se desarrolla otra subrutina en el programa Labview, esta subrutina calcula la ecuación 2.9 para que esta sea visualizada en la pantalla principal del programa para determinar el tamaño de grano a partir de mediciones de atenuación ultrasónica en tiempo real.

En el mismo programa se determinan las variables del modelo en el eje horizontal (frecuencia normalizada) y el eje vertical (atenuación promedio αd). Estas variables están dadas por

$$\text{Log}(x_{0l}) = 2\pi c_l f d = \text{Eje horizontal} \quad (2.10)$$

$$\log(\alpha d) = \text{Eje vertical} \quad (2.11)$$

donde,

- c_l es la velocidad ultrasónica longitudinal.
- f es la frecuencia ultrasónica en Neper/mm.
- d es el tamaño de grano. (La variable a determinar).

2.4 Programación en LabView.

En esta parte se explica el programa de LabView para la determinación del tamaño de grano. Además se implementaron subrutinas para la adquisición de la señal ultrasónica en tiempo real, el programa calcula simultáneamente las pérdidas involucradas en las mediciones de atenuación. Determina el tamaño de grano promedio utilizando la aproximación al modelo teórico de Stanke y Kino. En la Figura 2.10 se muestra el diagrama de bloques de las diferentes funciones que controlan entre otras cosas a la adquisición, el procesamiento, la generación de graficas que despegan la imágenes A-scan y la aproximación, el posicionamiento de motores, compuertas de selección de ecos, etc.

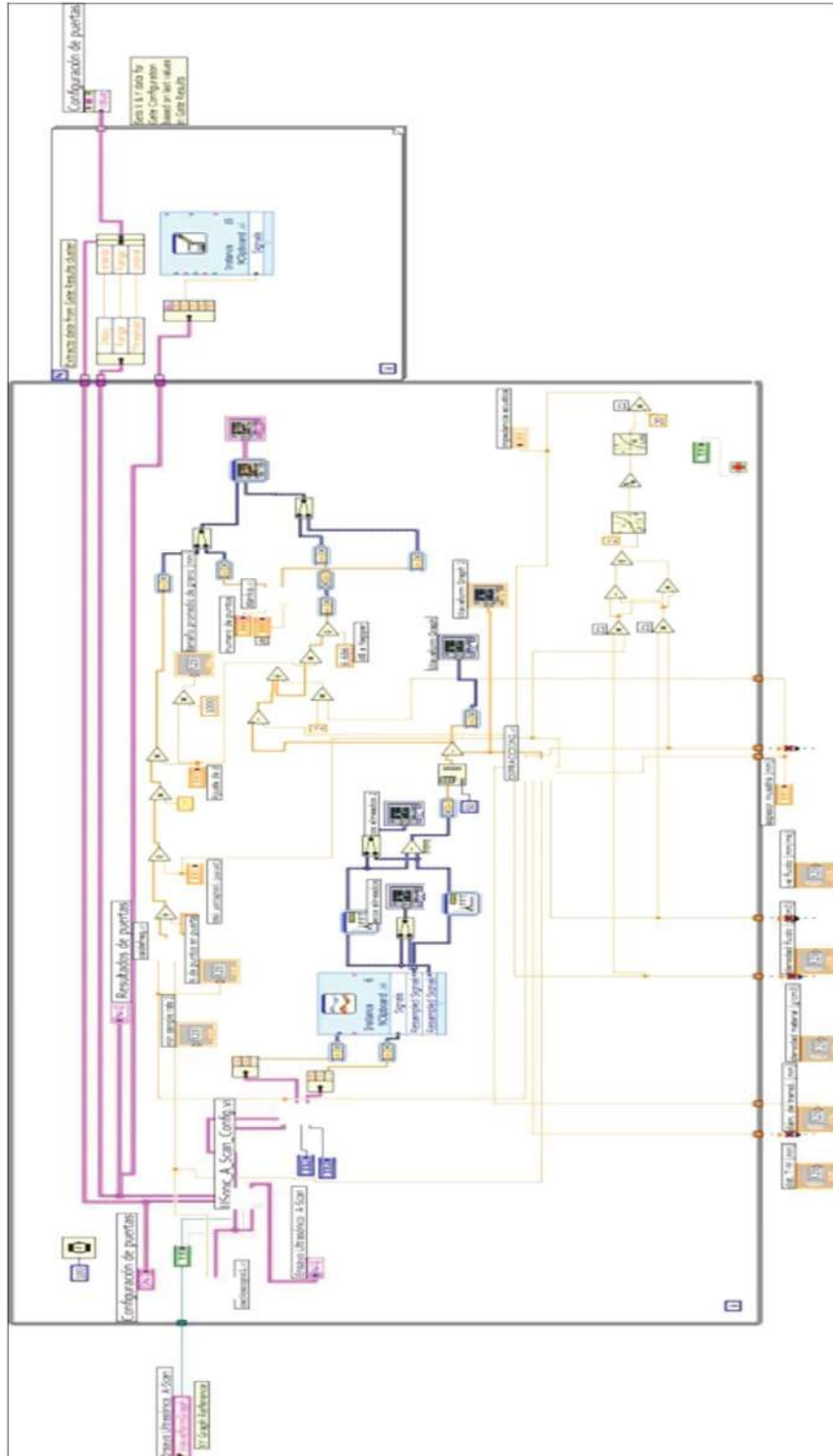


Figura 2.10 Diagrama de flujo del programa desarrollado en Labview para la adquisición y procesamiento de la señal de las mediciones de atenuación ultrasónica.

Labview es un lenguaje de programación gráfico, los programas desarrollados son llamados instrumentos virtuales (VIs). Un control en LabView es equivalente a una entrada de determinado dato y los indicadores son las salidas [14].

Labview ofrece un ambiente amigable para sus usuarios, al permitir cambiar las entradas y poder ver los resultados en tiempo real, los cuales lo hacen muy útil y práctico. Es por ello que se eligió LabView para desarrollar nuestro programa de adquisición de señales ultrasónicas, así como desarrollar el programa para resolver y aplicar la ecuación 2.9 que permite calcular el tamaño de grano en aceros. La programación y funcionamiento del programa desarrollado se analizara mas a fondo en el próximo capítulo. En la Figura 2.11 se muestra el panel de control del programa, ventana con la cual interactúa el usuario para manejo del mismo.

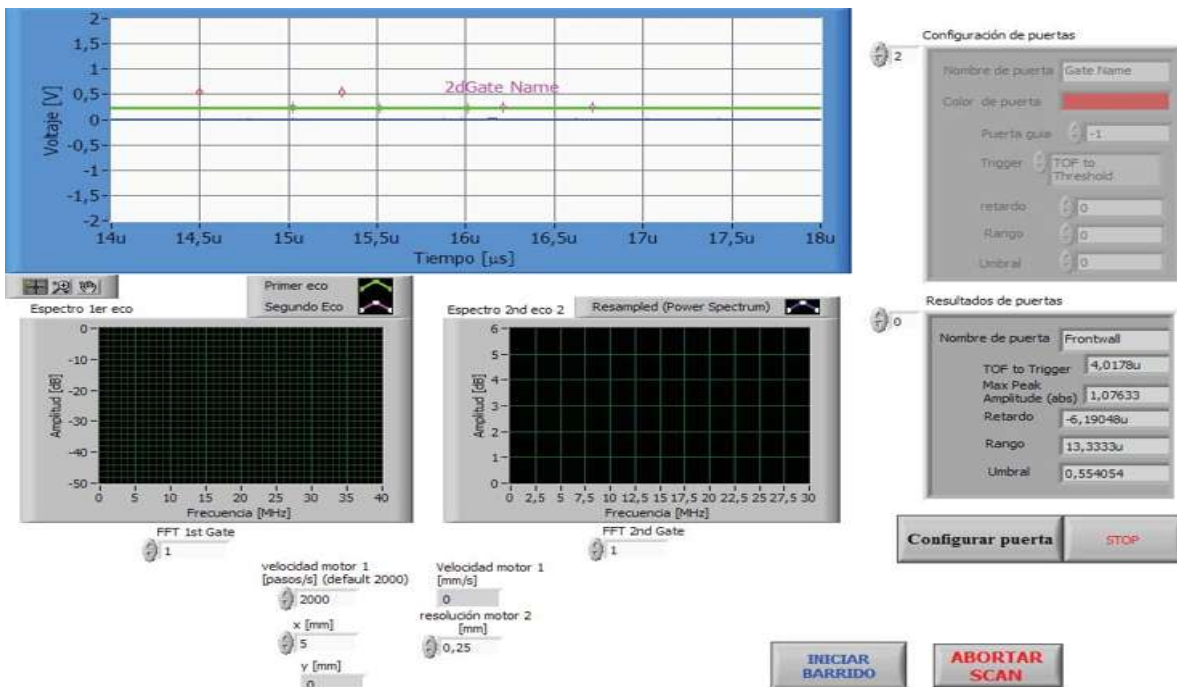


Figura 2.11 Panel frontal del programa para obtención del tamaño de grano en tiempo real, de nuestras muestras.

2.5 Tratamientos térmicos.

Los anillos a estudiar en esta investigación fueron tratados térmicamente durante el proceso de fabricación. Tiene un normalizado a 925°C; la normalización produce la recristalización del acero, por lo que elimina la estructura de un grano basto (grande) obtenida durante la

fabricación de palanquillas. También tiene un austenizado a 900°C, donde se forma austenita que al ser enfriada se genera rápidamente martensita, lo que le da una máxima resistencia al acero. Y un temple – revenido a 615°C, aplicado para lograr el máximo nivel de dureza o resistencia requerida.

Sin embargo para realizar esta investigación, se llevaron a cabo una serie de tratamientos térmicos a las muestras con la finalidad de lograr una homogenización de la microestructura y producir un crecimiento del tamaño de los granos del metal base. Para ello, se aplicó un recocido completo a una temperatura de 950°C, por 2, 4, 6, 12 y 24 horas por muestra.

2.6 Pruebas mecánicas

También se realizaron pruebas de resistencia a la tracción a probetas tratadas térmicamente y de material base para analizar el efecto del tamaño de grano. Las probetas de tensión fueron maquinadas bajo la norma ASTM A 370 para tener la forma mostrada en la Figura 2.12. Se utilizó un extensómetro marca



Figura 2.12 Probeta para el ensayo de tensión.

Finalmente se hicieron pruebas de dureza Rockwell C a cada una de las muestras mecanizadas, para observar la homogeneidad del acero. La Figura 2.13 muestra los resultados obtenidos.

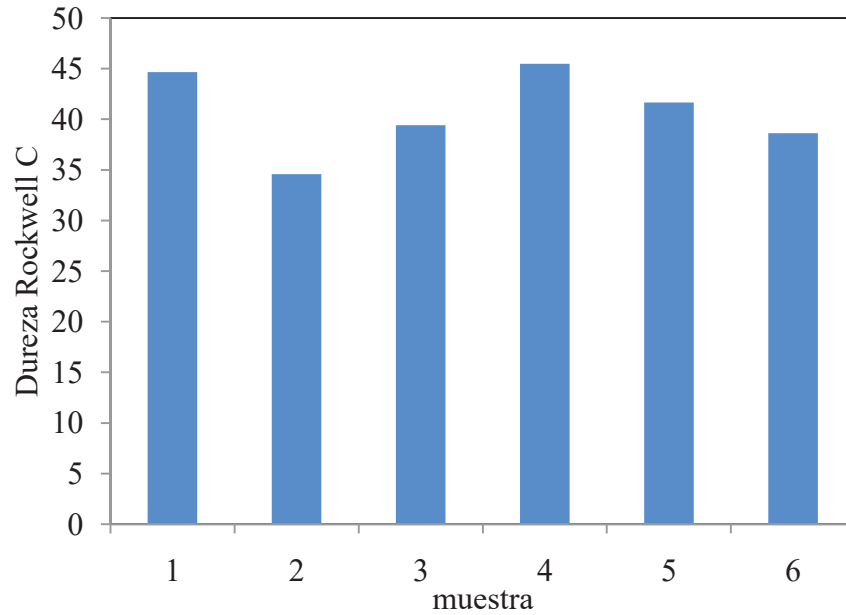


Figura 2.13 Resultados de dureza Rockwell C en muestras de acero 4140K.

Las seis muestras fueron obtenidas del mismo anillo y cómo se puede observar, la dureza cambia para algunas probetas, lo cual indica que hay una variación en las propiedades a lo largo del espesor del anillo.

CAPITULO III

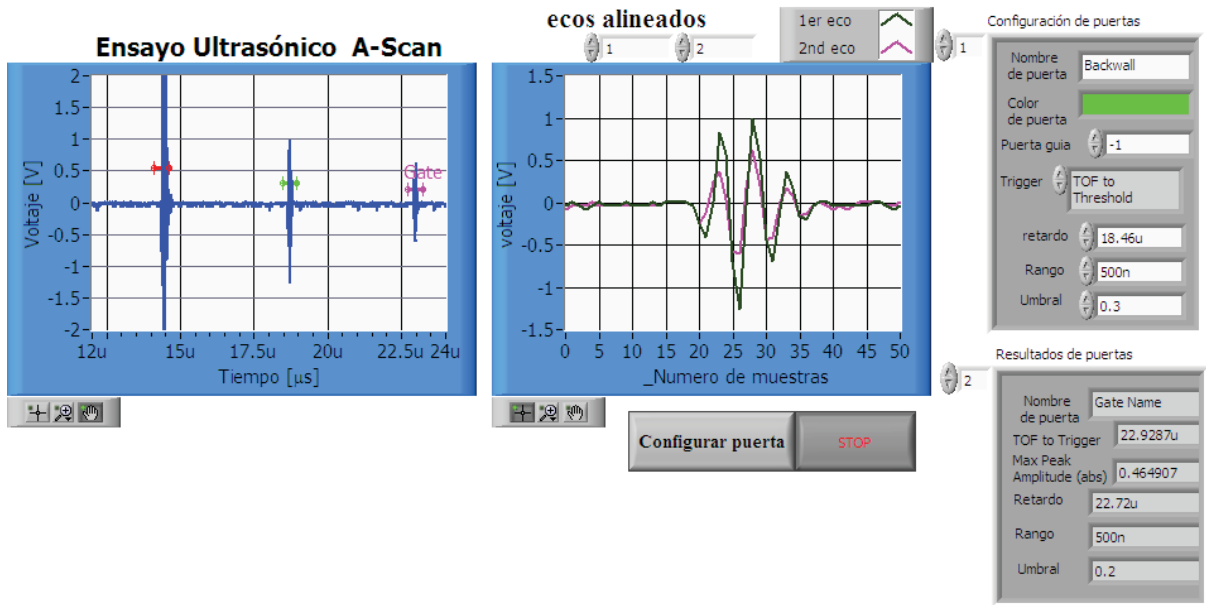
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. Introducción.

Los resultados experimentales obtenidos en la investigación se presentan en este capítulo, estos son obtenidos en base al arreglo experimental mencionado en el capítulo 2. Se presentan los resultados del programa de LabView, para obtención del tamaño de grano del acero 4140K en tiempo real a partir de mediciones de coeficiente de atenuación y el ajuste de estos resultados al modelo teórico de Stanke y Kino. Por último se presentan los resultados de los ensayos de tensión para ver el efecto del tratamiento térmico en las propiedades mecánica y el análisis metalográfico donde se observa el tamaño de grano del material.

3.1 Adquisición de señal ultrasónica.

La adquisición de la señal ultrasónica se hizo con una tarjeta osciloscopio de National Instruments NI-PCI-5012 de 8 bits de resolución. En la Figura 3.1 se muestra el panel frontal del programa (VI) con el cual se obtiene la señal A-Scan en el dominio del tiempo, la cual es generada a partir de la señal ultrasónica que envía el pulsador/receptor al transductor de ultrasonido. Misma que es acondicionada para hacer el cálculo del coeficiente de atenuación para determinar el tamaño de grano en las muestras de acero 4140K. Al obtenerse la señal ultrasónica como se puede observar en la Figura 3.1 se tiene un módulo de configuración, con el cual se controlan tres puertas. Este control permite posicionar en forma individual una puerta sobre una señal del eco ultrasónico. Para este experimento usamos las compuertas color verde y color rosa para posicionarlas en los ecos de la pared posterior. Una vez hecho esto, el programa aísla los ecos para hacer el procesamiento. La adquisición de la señal es en tiempo real, por lo que los cálculos de pérdidas por impedancia, pérdidas por difracción y el ajuste al modelo matemático teórico de Stanke y Kino se hacen simultáneamente.



3.1 Panel frontal del programa de LabView donde se muestra la señal A-Scan adquirida mediante la tarjeta tipo osciloscopio.

3.2 Procesamiento de la señal ultrasónica.

3.2.1 Acondicionamiento de la señal.

Antes de hacer correcciones a los ecos ultrasónicos para impedancia y difracción es necesario convertir la señal al dominio de la frecuencia. Como se mencionó, la señal A-Scan esta digitalizada en el dominio del tiempo, para poder trabajar con ella es necesario hacer la conversión al dominio de la frecuencia, utilizando la transformada de Fourier, utilizando la herramienta de LabView para esta conversión. En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de bloques donde se hace la conversión de la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. En este experimento se convierte la señal analógica del pulsador, esta señal varía en función del tiempo por lo que puede representarse como $x = x(t)$ la señal puede ser modelada como una combinación lineal de un juego de N funciones de Z .

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k Z_k(t) \quad (3.1)$$

Esta función puede representarse mediante el uso de la Transformada de Fourier FT (por sus siglas en ingles). La suma de la ecuación 3.1 se puede escribir como una integral dando como resultado

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{i2\pi ft} df \quad (3.2)$$

Donde, $X(f)$ es el componente de Fourier y determina la amplitud del exponencial con frecuencia f . En forma inversa los componentes de Fourier $X(f)$ pueden obtenerse con la siguiente ecuación

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{i2\pi ft} dt \quad (3.3)$$

Las ecuaciones 3.2 y 3.3 son llamadas la *Transformada de Fourier* y la *Transformada Inversa de Fourier* respectivamente.

3.3.2 La Transformada Discreta de Fourier.

Con algunas restricciones causadas por el muestreo discreto como la del teorema de Nyquist [16], la Integral de la Transformada De Fourier puede escribirse como

$$X(f_k) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi f_k t} dt \approx \sum_{j=0}^{N-1} x(t_j)e^{-i2\pi f_k t_j} \Delta t \quad (3.4)$$

$$\text{Con } k = -\frac{N}{2} + 1, \dots, 0, \dots, +\frac{N}{2} \quad (3.5)$$

3.2.3 Muestreo discreto.

En un experimento real, no se puede muestrear la cantidad x en forma continua, pero esta señal puede ser muestreada al discretizarla N veces. Si las muestras se adquieren a espacios iguales de tiempo, donde la diferencia de tiempo entre muestras está dado por Δt , Entonces podemos definir frecuencia de muestreo como

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \quad (3.6)$$

y además, el tiempo en el cual cada muestra se representa es:

$$t_j = j\Delta t \quad j = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (3.7)$$

3.2.4 Transformada Rápida de Fourier FFT.

La Transformada Rápida de Fourier es un algoritmo computacional para calcular la Transformada Discreta de Fourier y requiere un cómputo intensivo que con las computadoras modernas se puede realizar en forma instantánea. Para obtener una máxima eficiencia de cálculo, una restricción en este algoritmo está relacionada con el número de puntos del arreglo que debe de ser una potencia de dos, es decir $N = 2^m$ donde $m = 1, 2, 3, \dots$. La FFT son algoritmos más eficientes para lograr las transformaciones de datos. LabView tiene una herramienta que realiza la FFT y es llamada la herramienta FFT digital, la cual se muestra en la Figura 3.2.

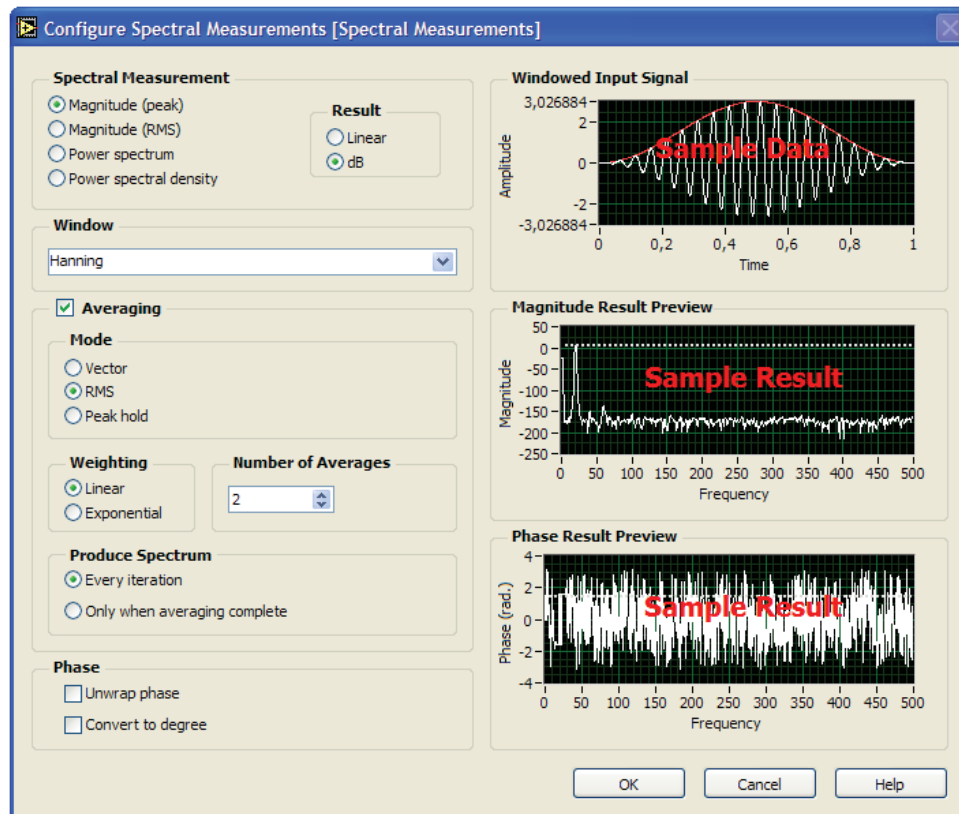


Figura 3.2 FFT, herramienta de LabView, la cual convierte la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Esta herramienta se puede configurar para diferentes necesidades, en este experimento se utiliza la medición espectral llamada *Power Spectrum* ya que sólo se necesita la magnitud de la FFT, se utilizó una ventana *Hamming* para un mejor muestreo y se promedió la señal medida para aumentar la resolución del experimento. El resultado de la FFT es una señal en el dominio de la frecuencia llamada espectro de frecuencia en el eje vertical; tiene la magnitud en dB y en el eje horizontal tiene el número de muestra del arreglo. Para calcular la frecuencia asociada con cada elemento del arreglo de f_k de la salida de la FFT se programó otra subrutina en LabView, esta es llamada generador de frecuencias. La Figura 3.3 muestra el diagrama de bloques de esta subrutina VI para.

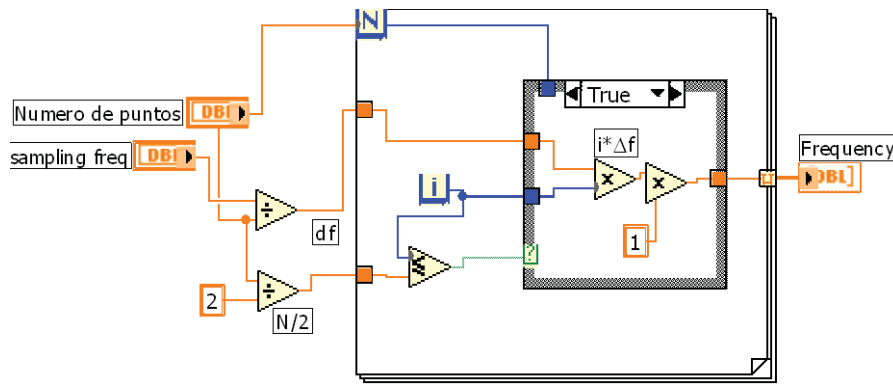
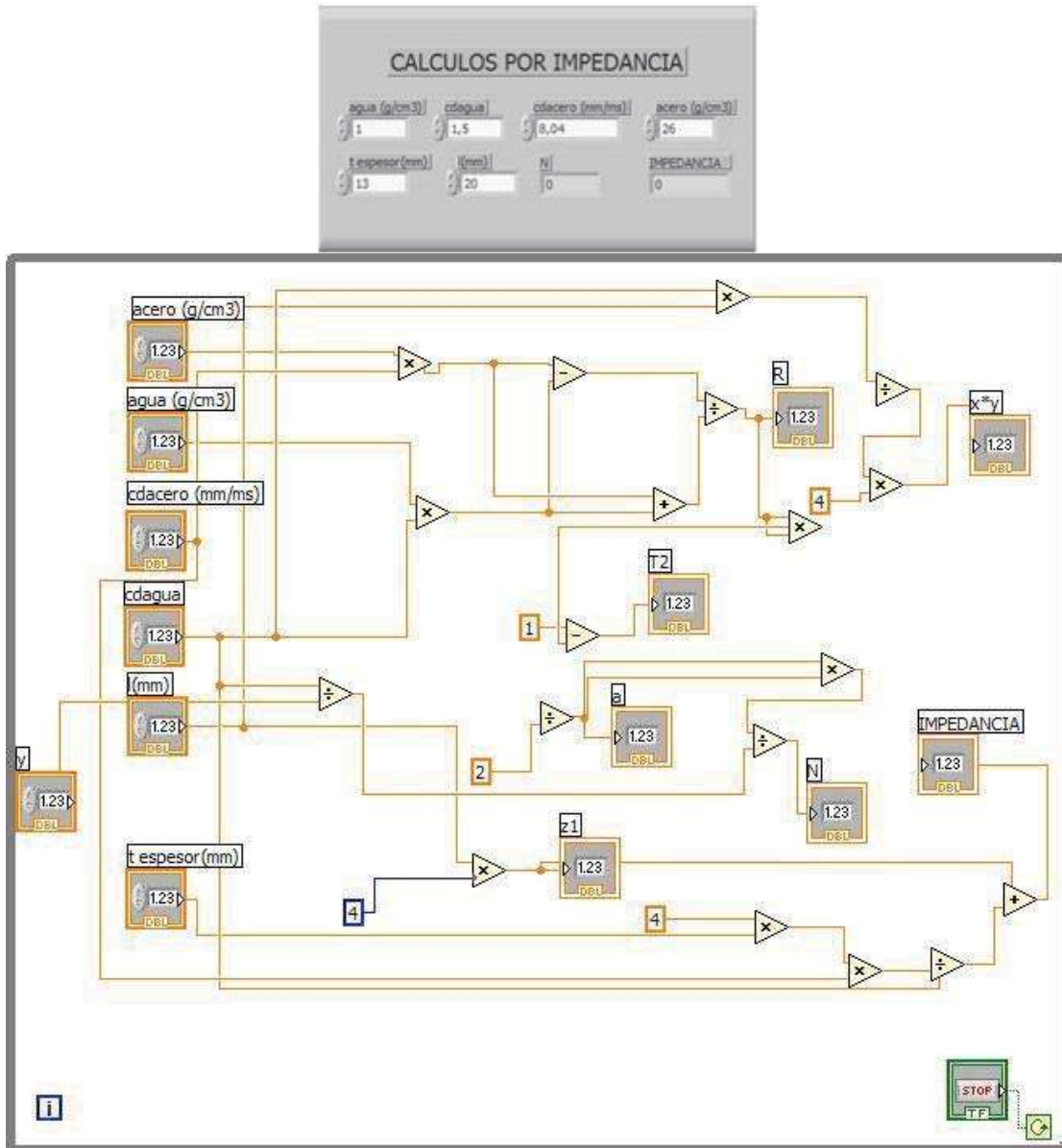


Figura 3.3 Diagrama de bloques del Sub VI generador de frecuencia.

3.2.5 Programa para el cálculo de impedancia acústica.

Dentro del programa para adquisición de la señal se desarrolló otro programa (subrutina VI) que hace los cálculos para determinar las pérdidas por impedancia acústica. En la Figura 3.4 se muestra el panel frontal y el diagrama de bloques de la subrutina que calcula las pérdidas por impedancia acústica aplicando las fórmulas mencionadas en el Capítulo II de esta Tesis. Determinado en tiempo real las pérdidas por impedancia.



3.4 Diagrama de bloque y Panel frontal del Sub VI que calcula las pérdidas por Impedancia.

En la tabla 3.1 se muestran los parámetros introducidos al programa para calcular las pérdidas por impedancia.

Tabla 3.1 Parámetros que son necesarios para calcular la impedancia con el Sub VI.

c_d [mm/ μ s]	c_A [mm/ μ s]	Espesor t [mm]	Distancia muestra-transductor l [mm]	Diámetro del transductor [mm]
5.97701	1.5	13	20	12.5

3.2.6 Programa para la corrección por difracción.

Como se mencionó en el Capítulo II, otras pérdidas presentes en las mediciones, son las pérdidas que se asocian con las características geométricas del transductor, estas son las pérdidas por difracción, calculadas con la fórmula 2.7. Se desarrolló un Sub VI para calcular estas pérdidas, en la Figura 3.5 se muestra el Diagrama de bloques del Sub VI.

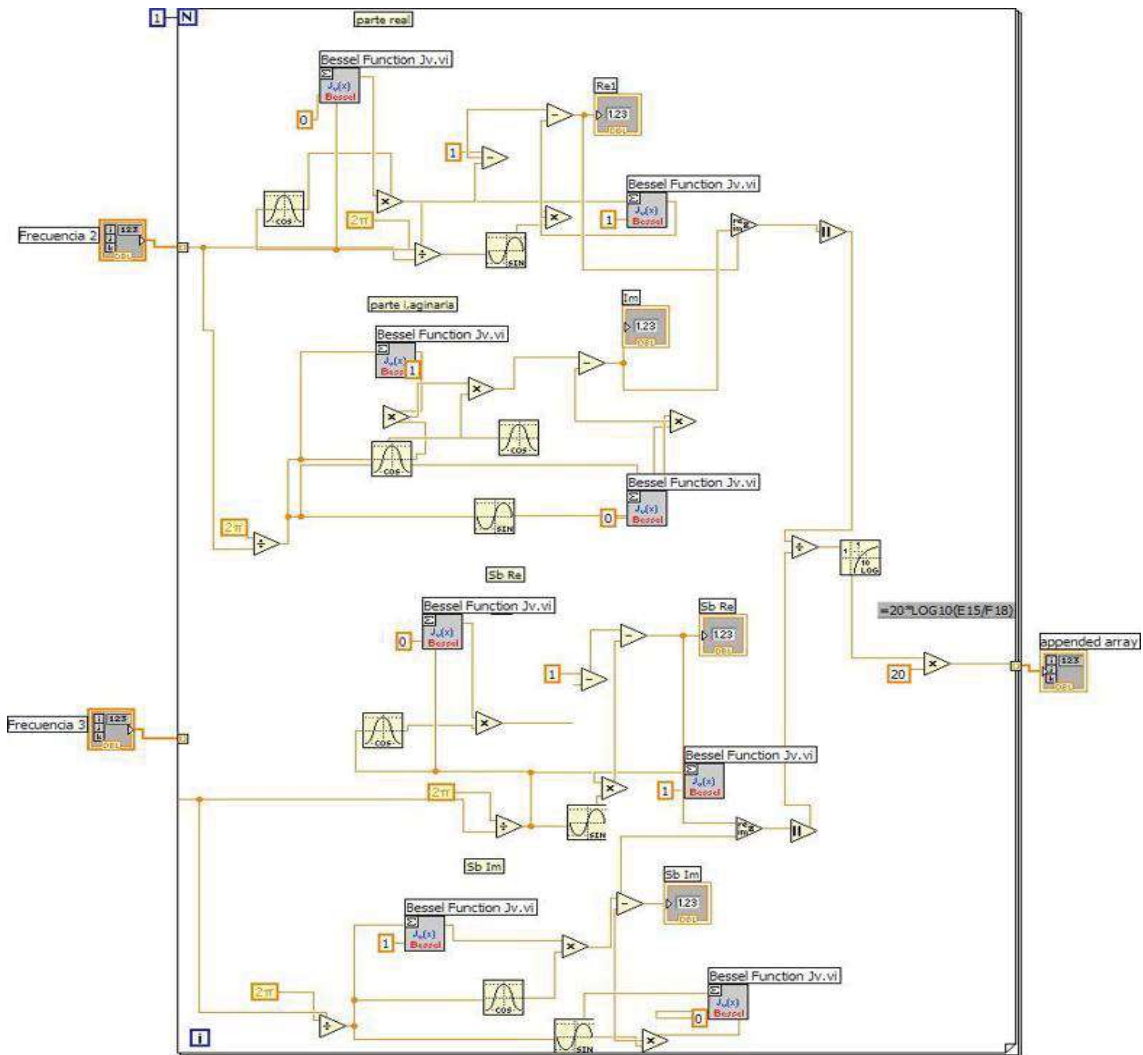


Figura 3.5 Diagrama de bloques del Sub VI para calcular las pérdidas por difracción en las muestras de acero 4140K.

Finalmente, al ser todos estos cálculos hechos en tiempo real, podemos observar las correcciones hechas a nuestras mediciones en el programa desarrollado e integrado por las subrutinas VI mencionadas. Ahora es posible determinar el coeficiente de atenuación. Se

mencionó en el Capítulo II que las mediciones se hacen en la región de Rayleigh, por lo que el modelo matemático que se aproxima al modelo de Stanke y Kino es usado para lograr un mejor ajuste de los datos experimentales a este modelo aproximado dado por la ecuación 2.9. Este modelo aproximado a la teoría de Stanke y Kino fue también desarrollado mediante una subrutina en Labview la cual y se anexó al Programa Principal para la determinación del tamaño de grano.

3.3 Determinación del tamaño de grano.

Los datos procesados mediante LabView nos permiten determinar el diámetro promedio de grano ajustado al modelo teórico matemático de Stanke y Kino. La Figura 3.6 muestra el panel frontal del programa principal completo para determinar el tamaño promedio de grano del acero 4140K. La figura 3.7 muestra el diagrama de bloques.

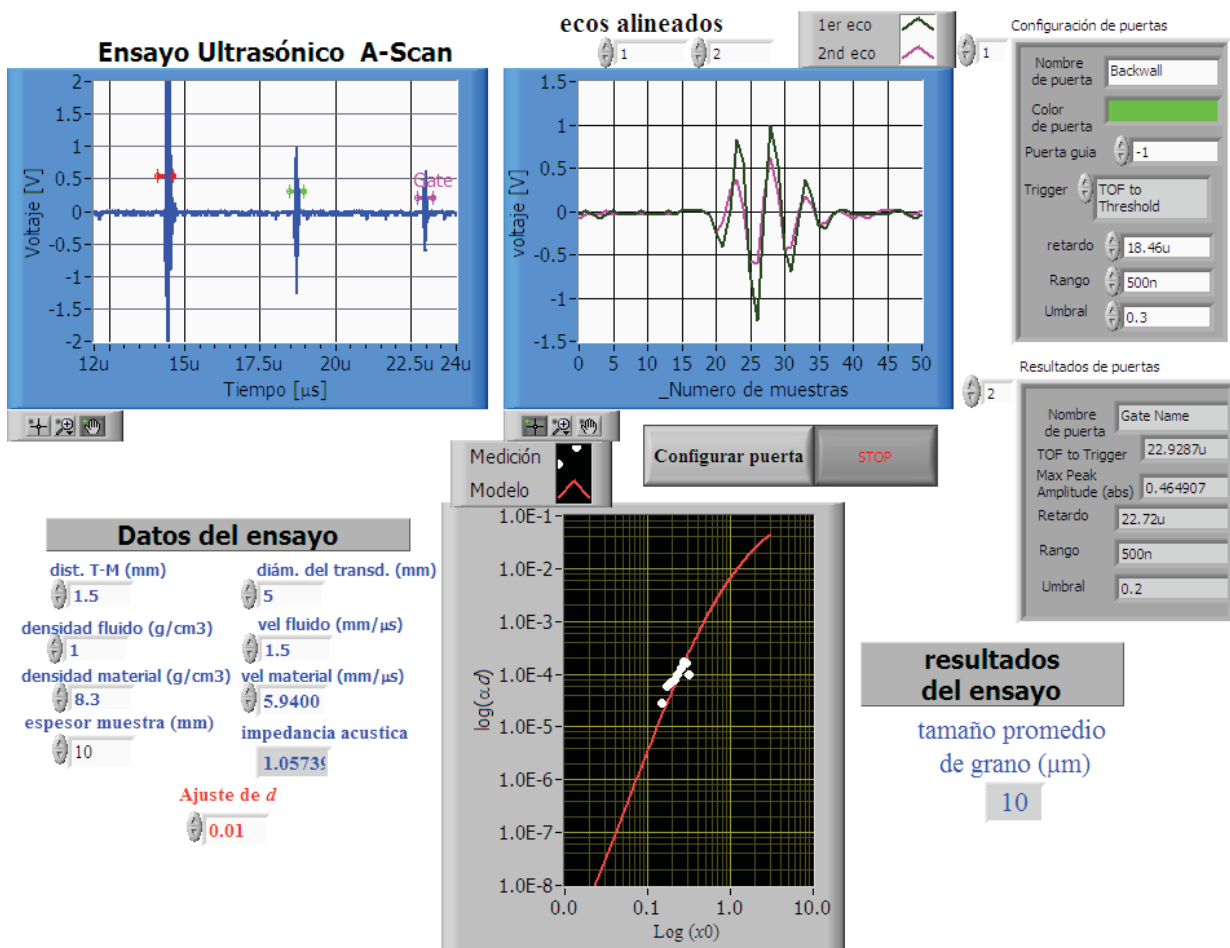


Figura 3.6 Panel frontal del programa para determinar el tamaño de grano del acero 4140K.

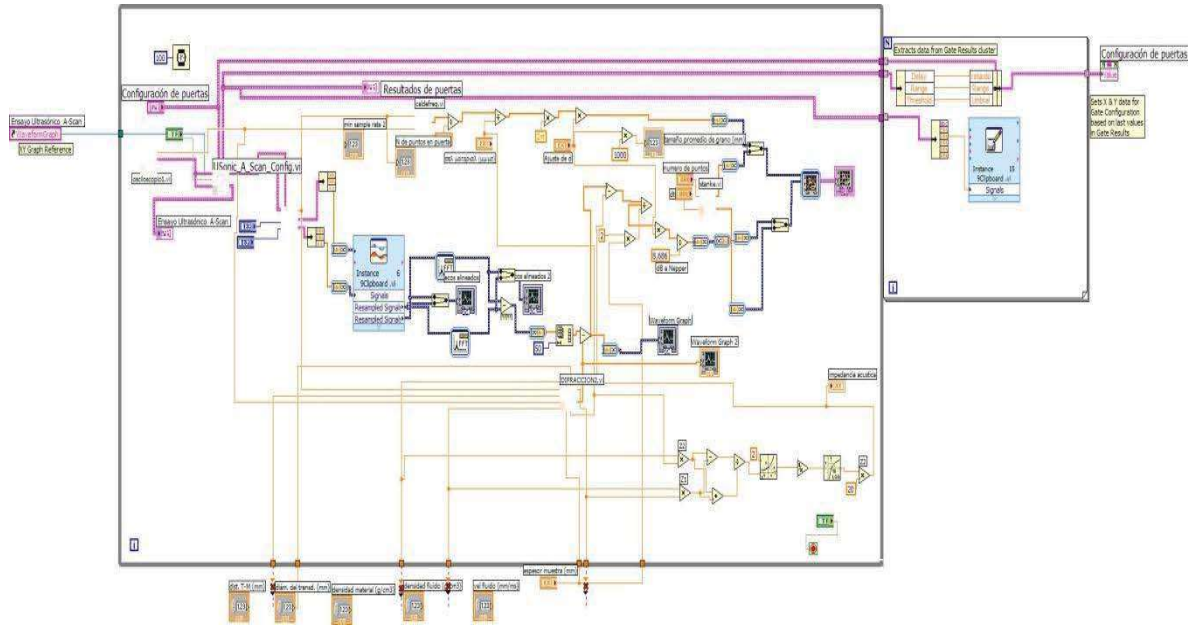


Figura 3.7 Diagrama de bloques del programa para determinar el tamaño de grano del acero 4140K.

De acuerdo al desarrollo experimental, se hizo tratamiento térmico a las muestras, esto con el objetivo de producir en crecimiento del tamaño del grano. El tratamiento de recocido a 950 grados se aplico a 5 muestras del acero 4140 K. La tabla 3.2 muestra los tiempos de tratamiento de cada pieza.

Tabla 3.2 Tiempo de tratamiento de muestras de acero 4140 K.

No. De muestra	Temperatura (°C)	Tiempo (h)
1		Material Base
2	950	4
3	950	6
4	950	12
5	950	24

Los resultados obtenidos por el programa son los siguientes; para la muestra de material base el tamaño de grano determinado es de 12µm mostrado en la Figura 3.8. Para la muestra tratada a 950°C por 4 horas el tamaño promedio de grano es de 14µm mostrado en la figura 3.9. Para la muestra tratada a 950°C por 6 horas el tamaño promedio de grano es de 19µm mostrado en la figura 3.10, finalmente el tamaño de grano para la muestra tratada a 950°C por 24 horas es de 30µm y se muestra en la figura 3.11.

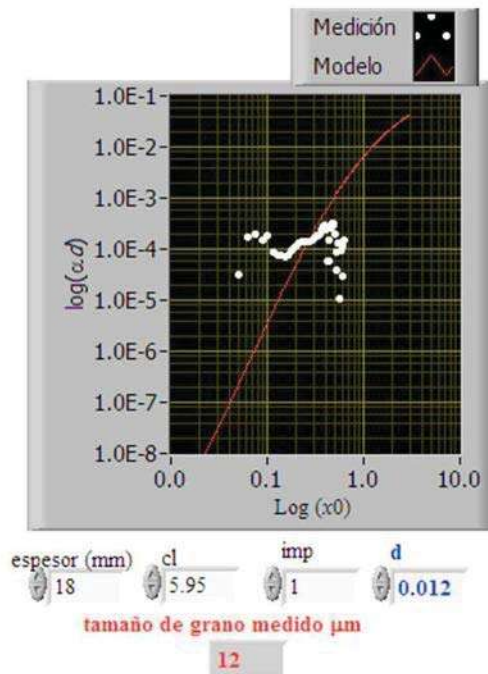


Figura 3.8 Gráfico del panel frontal del programa en el que se observa el mejor ajuste al modelo teórico de Stanke y Kino para determinar el tamaño de grano de la muestra de material base.

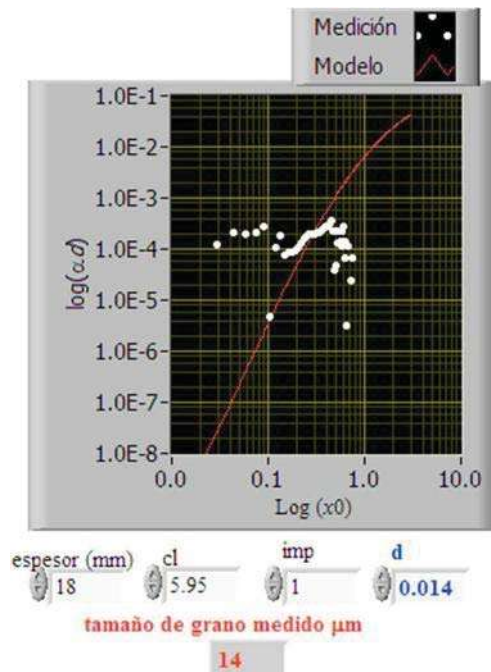


Figura 3.9 Gráfico del panel frontal del programa en el que se observa el mejor ajuste al modelo teórico de Stanke y Kino para determinar el tamaño de grano de la muestra tratada térmicamente a 950°C por 4 horas.

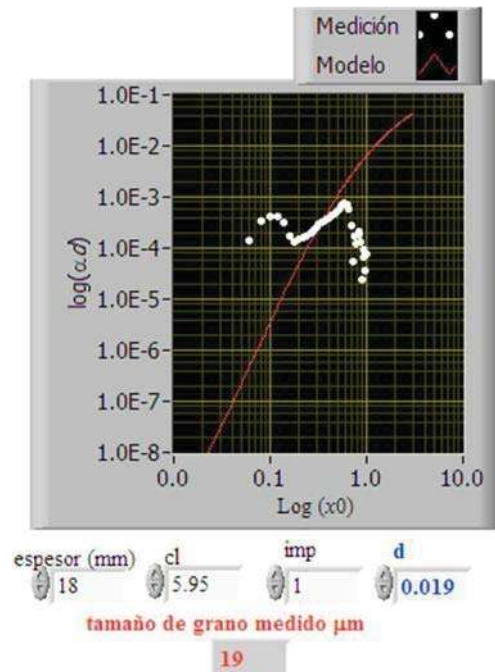


Figura 3.10 Gráfico del panel frontal del programa en el que se observa el mejor ajuste al modelo teórico de Stanke y Kino para determinar el tamaño de grano de la muestra tratada térmicamente a 950°C por 6 horas.

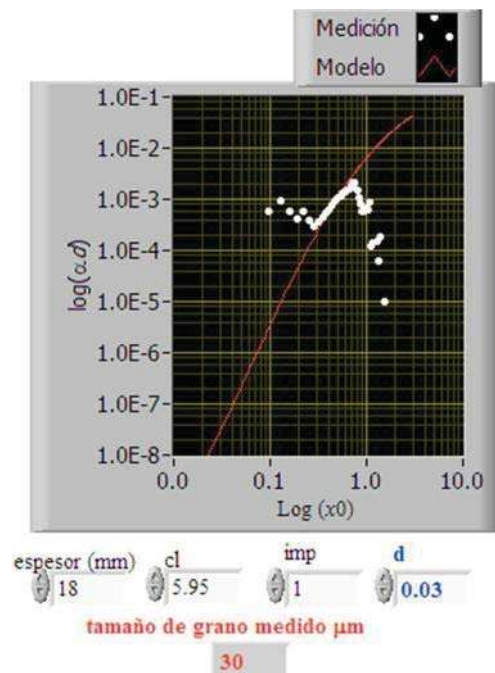


Figura 3.11 Gráfico del panel frontal del programa en el que se observa el mejor ajuste al modelo teórico de Stanke y Kino para determinar el tamaño de grano de la muestra tratada térmicamente a 950°C por 24 horas.

Debido a la interacción de la onda acústica con el material, el valor obtenido de d es el promedio de la interacción de la onda ultrasónica con las fronteras de grano, lo cual significa que dentro de las muestras de acero 4140K existirán granos grandes y granos pequeños, por lo tanto d es el tamaño promedio que prevalece en el material. Y debido a que las mediciones están hechas en la región de Rayleigh, ya que es en esta región donde las pérdidas de la intensidad del haz son más significativas y es donde se realizan la mayor parte de los ensayos no destructivos

Para verificar que las predicciones y los resultados obtenidos con el programa concuerdan con valores reales, se hizo análisis metalográfico para comparar los valores obtenidos por metalografía.

3.4 Determinación del tamaño de grano por metalografía.

De acuerdo a la norma internacional ASTM E 112 se determinó el tamaño de grano. Cada muestra se atacó con Nital al 2% por 10 segundos. La figura 3.12 muestra la metalografía del material base.

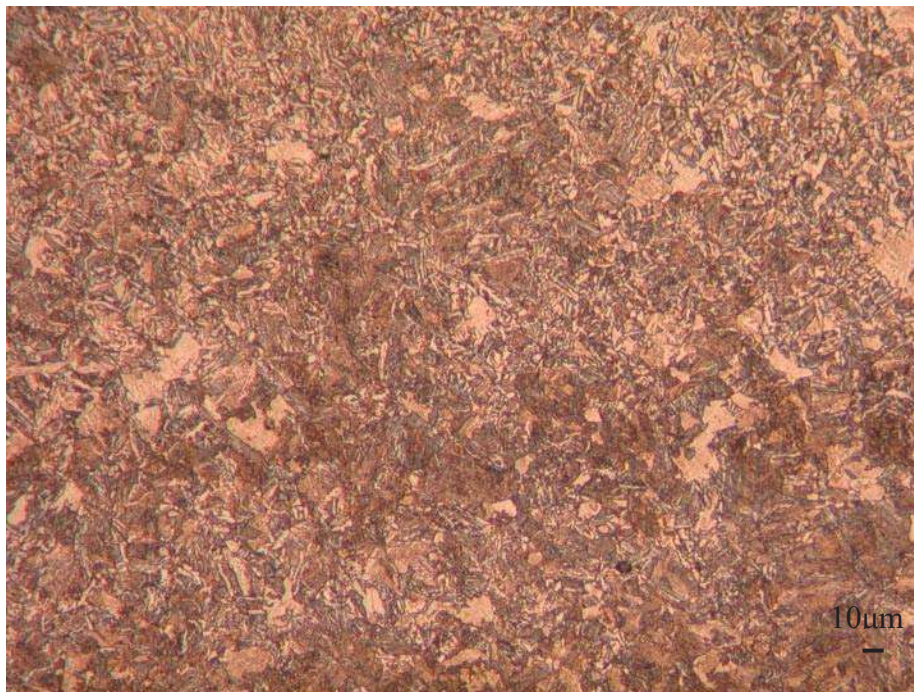


Figura 3.12 Metalografía de material base a 200X, ataque con Nital al 2% por 10 segundos.

La figura 3.13 muestra la metalografía de la muestra 2 tratada térmicamente a 950°C por 4 horas.

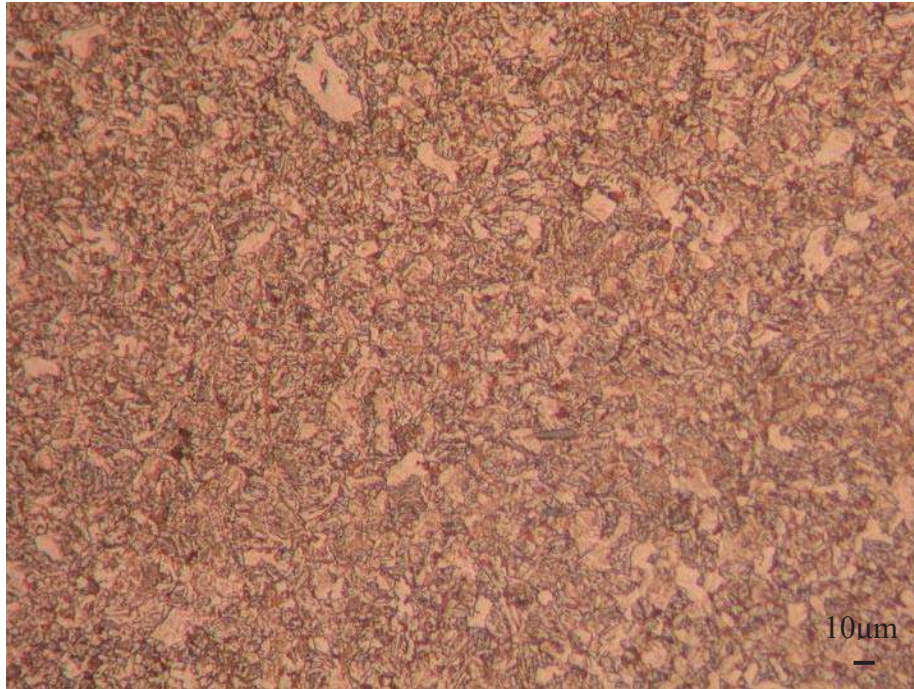


Figura 3.13 Metalografía de material tratado térmicamente a 950°C por 4 horas, a 200X, ataque con Nital al 2% por 10 segundos.

La figura 3.14 muestra la metalografía de la muestra 3 tratada térmicamente a 950°C por 6 horas. Y la figura 3.15 muestra la metalografía de la muestra 4 tratada térmicamente a 950°C por 12 Horas.



Figura 3.14 Metalografía de material tratado térmicamente a 950°C por 6 horas, a 200X, ataque con Nital al 2% por 10 segundos.

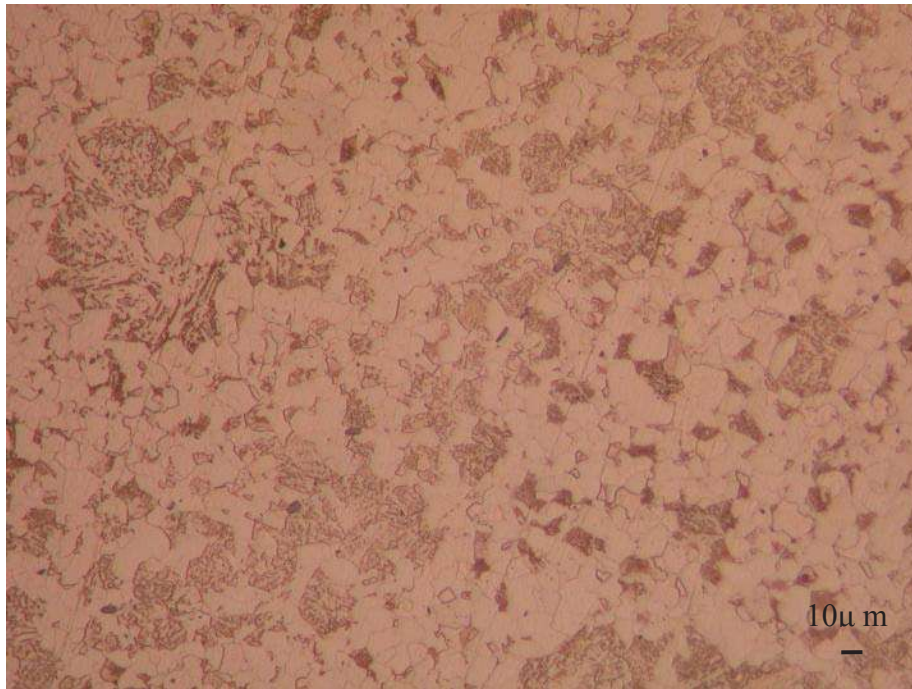


Figura 3.15 Metalografía de material tratado térmicamente a 950°C por 12 horas, a 200X, ataque con Nital al 2% por 10 segundos.

Finalmente, la figura 3.16 muestra la metalografía de la muestra 5 tratada térmicamente a 950°C por 24 horas.

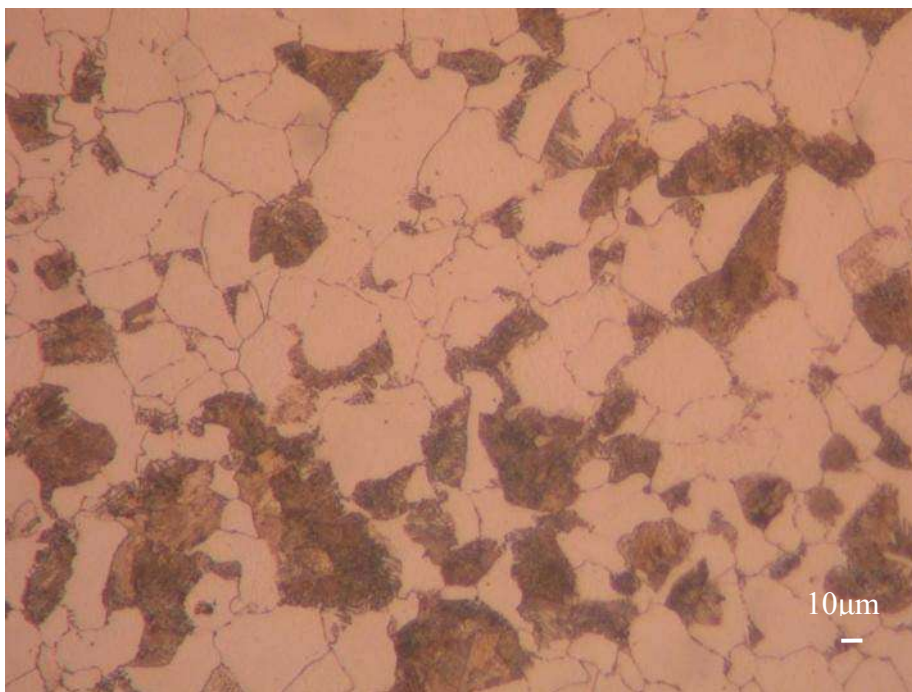


Figura 3.16 Metalografía de material tratado térmicamente a 950°C por 24 horas, a 200X, ataque con Nital al 2% por 10 segundos.

El método para determinar el tamaño de grano utilizado, fue el método por comparación. Por este método de la metalografía de la muestra de material base se determinó que presenta un tamaño de grano promedio ASTM 9, para la metalografía de la muestra tratada térmicamente por 4 horas se observa que no hay un aumento significativo en el tamaño de grano estando entre el tamaño ASTM 8-9, para la metalografía de la muestra tratada térmicamente a 950°C por 12 horas se observa un tamaño de grano ASTM 8. Y donde se puede observar el mayor crecimiento del grano es en la muestra tratada térmicamente a 950°C por 24 Horas, observado un tamaño de grano ASTM 7-6. Es importante mencionar que la comparación se hizo con las metalografías a 100X. Determinados los tamaños de grano con este método destructivo, observamos que los resultados obtenidos con el programa en LabView son confiables.

3.5 Ensayo de tensión.

Los ensayos de tensión en las probetas utilizadas que tienen forma y dimensiones estandarizadas por la norma ASTM 370 [18] para acero 4140K. Los resultados de los ensayos de tensión los observamos en la Figura 3.17.

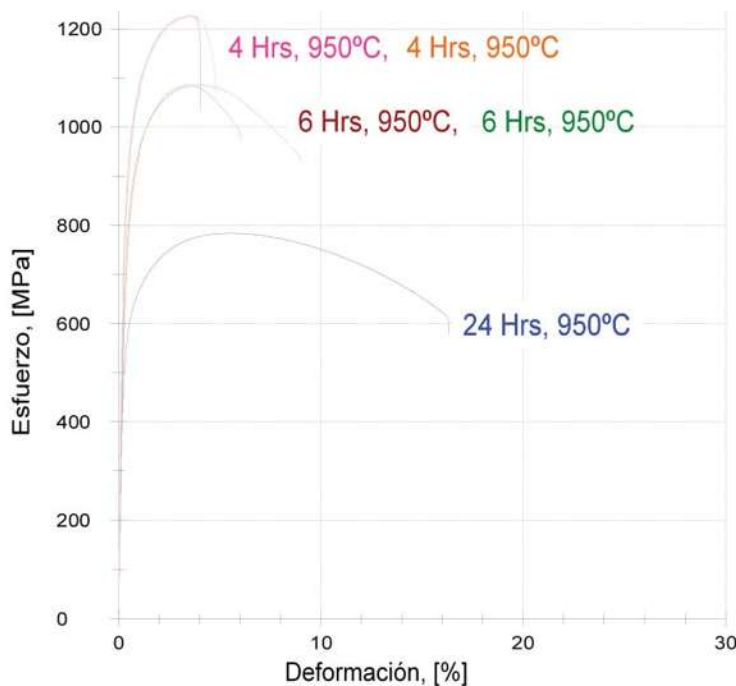


Figura 3.17 Curvas esfuerzo vs deformación nominal de probetas de tensión.

Los ensayos de tensión en las probetas utilizadas que tienen forma y dimensiones estandarizadas por la norma ASTM A370. Puede consultarse esta norma en el apéndice de la pagina 63. Este tipo de ensayo se emplea ampliamente para obtener información básica sobre la resistencia mecánica de materiales y como ensayo de recepción para la especificación de los mismos. La figura 3.17 muestra los resultados del ensayo de tensión para probetas de acero 4140K obtenidas al aplicar una fuerza monoaxial de aumento progresivo en una dirección de interés, la cual es el sentido de laminación. En la probeta de 24 horas se observa una diferencia comparativa en el punto de cedencia de 400 MPa aproximadamente conforme a las probetas de 4 y 6 Hrs, disminuyendo asimismo la resistencia a la tensión del material de 780 MPa. En las curvas de las probetas de 4 y 6 Hrs se observa que la resistencia a la tensión es de 1220MPa y 1080 MPa respectivamente sin embargo; en estas probetas tratadas hay una disminución en la ductilidad del material ya que la probeta de 24 Hrs tiene un porcentaje de deformación del 16%, a comparación de probeta de 4 Hrs con 5% y la de 6Hrs con 9%. Estas diferencias en las propiedades mecánicas del acero 4140k con tratamiento térmico son debidas a la homogeneización del tamaño de grano en cada una de ellas.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES

En el caso de la atenuación se observan variaciones considerables en función de la frecuencia y del tamaño de grano del material. La mayor atenuación se aprecia en el acero 4140K tratado térmicamente a 950°C por 24 horas, esto se debe al tamaño de grano mayor presente. Si el tamaño de grano fuera constante, el coeficiente de atenuación sería afectado por los procesos de absorción y dislocación, por otro lado, al utilizar una sola frecuencia central y si el tamaño de grano fuera constante el coeficiente de atenuación permanece constante, de lo contrario de varia la frecuencia, al aumentar la frecuencia del transductor sin aumentar el tamaño de grano el coeficiente de atenuación es afectado incrementándose. Para el diseño y desarrollo del programa para la determinación del tamaño de grano del acero 4140K en tiempo real, fue necesario determinar ciertos parámetros, los tamaños de grano determinados en tiempo real con LabView, primero son congruentes con los tamaños de grano proporcionados por la empresa para el material base. Los tamaños de grano determinados con el programa, para las muestras tratadas térmicamente por 4, 6, 12 y 24 fueron comparados con las metalografías de estas muestras y son congruentes. Con esto es posible determinar de manera indirecta propiedades mecánicas de materiales sin necesidad de destruirlos.

RECOMENDACIONES

Sería interesante, operar el programa en la evaluación de materiales en línea, dentro de la empresa con la que se colaboró para el desarrollo de esta tesis. Es necesario hacer pruebas en campo para así poder analizar y corregir los problemas que se puedan presentar.

Al igual se recomienda hacer una evaluación de otro acero diferente al de interés en esta investigación para comprobar la efectividad de programa desarrollado en LabView.

Se recomienda crear un ambiente adecuado para llevar a cabo pruebas experimentales de medición de atenuación, ya que por condiciones del ambiente, los resultados obtenidos podrían no considerarse óptimos.

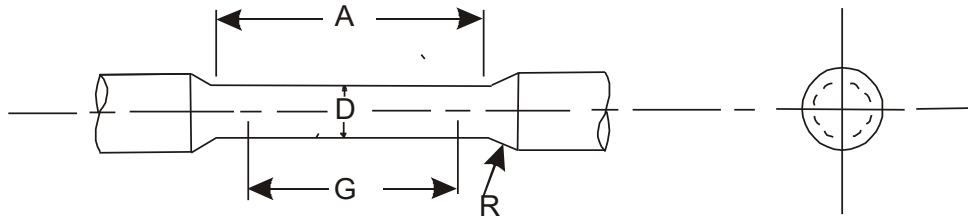
REFERENCIAS

- [1] Keyser. Ciencia de los materiales para ingeniería. Editorial Limusa:p 244.
- [2] Lücke, K. *Journal of Applied Physics* New York, NY: American Institute of Physics (1956): p 1433-1438.
- [3] Papadakis, E. “Ultrasonic Velocity and Attenuation Measurement Methods for Scientific and Industrial Applications,” *Physical Acoustics-Principles and Methods*. Vol. 12 W. Mason and R. Thurston, eds. New York, NY: Academic Press (1976): p 277-374.
- [4] Goebbels, K. “Structural Analysis By Scattered Ultrasonic Radiation,” *Research Techniques In Nondestructive Testing*. Vol. 4, R. Sarphe, ed. London, England: Academic Press (1980): p 87-157.
- [5] Theiner, W. and H. Willems. “Determination of Microstructural Parameters by Ultrasonic NDE,” *Nondestructive Methods for Material Property Determination*. C. Ruud and R. Green eds. New York, NY: Plenum Press (1984): p 249-258.
- [6] Roberts P. H. and A. L. Van Buren “An exact expression for the Lommel diffraction correction,” *J Acoust. Soc. Of Am.* 55, 724 (1974).
- [7] Good, M. and J. Rose. “Measurements of Thin Case Depth in Hardened Steel by Ultrasonic Pulse-Echo Techniques,,” *Nondestructive Methods for Material Property Determination*. C. Ruud and R. Green eds. New York, NY: Plenum Press (1984): p 189-206.
- [8] Telschow, K. and J. Flinn. “Ultrasonic Characterization of Consolidated Rapidly Solidified Powders,” *Nondestructive Characterization of Materials: II*. J. Bussière, J. Monchalín, C. Ruud and R. Green eds. New York, NY: Plenum Press (1987): p 149-157.
- [9] Qu, J. and J. Achenbach. “Analytical Treatment of Polar Backscatter from Porous Composites,” *Review of Progress in nondestructive Evaluation*. Vol. 68. D. Thompson and D. Chimenti. eds. New York, NY: Plenum Press (1987): p 1137-1146.
- [10] Green, R. “Effect of Metallic Microstructure on Ultrasonic Attenuation,” | *Nondestructive Evaluation-Microstructural Characterization and Reliability Strategies*. O. Buck and S. Wolf. Eds. Warrendale, Metallurgical Society of the American Institute of Mechanical Engineers (1981): p 115-132.

- [11] Vary, A. "Concepts for Interrrelation Ultrasonic Attenuation, Microstructure and Fracture Toughness in Polycrystalline," *Materials Evaluation*. Vol. 4, No. 5. Columbus OH; The American Society for Nondestructive Testing (1988): p 642-649
- [12] Roberts P. H. and A. L. Van Buren "An exact expression for the Lommel diffraction correction," *J Acoust. Soc. Of Am.* 55, 724 (1974).
- [13] Stanke, F. E. and Kino G.S. "A unified theory for elastic wave propagation in polycrystalline materials," *J Acoust. Soc. Of Am.* 75, 665-681 (1984).
- [15] Pérez, M.I. "Determinación no destructiva de propiedades mecánicas en anillos de acero" Tesis de Maestría. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas UMSNH, 2007.
- [16] Annual Book of ASTM Standards 2001 Section three Metals Test Methods and Analytical Procedures Volume 03.01. ;Metals Machanical Testing; Elevated and Low-Temperature Test; Metallography
- [17] Krautkramer, J. And H. Krautkramer. *Ultrasonic testing of material*. New york, NY: Springer-Verlag (1969).
- [18] Vary, A. and H. Kautz. "Transfer function concepts for ultrasonic characterization of materials microestructure" *International Advances in Nondestructive Testing*. Vol. 13. W. McGonnagle, ed. New york, NY: Gordon and Breach (1998): p 193-249

APÉNDICE A

ASTM A 370



DIMENSIONS

Nominal Diameter	Standar Specimen				Small-Size Specimens Proportional to Standar					
	In	mm	In	mm	In	Mm	In	Mm	In	mm
	0.005	12.5	0.350	8.75	0.250	6.25	0.160	4.00	0.113	2.50
G-Gage legh	2.00± 0.005	50.0± 0.10	1.400± 0.005	35.0± 0.10	1.000± 0.005	25.0± 0.10	0.640± 0.005	16.0± 0.10	0.450± 0.005	10.0± 0.10
D-Diameter (Note 1)	0.500± 0.010	12.5± 0.25	0.350± 0.007	8.75± 0.18	0.250± 0.005	6.25± 0.12	0.160± 0.003	4.00± 0.08	0.113± 0.002	2.50± 0.05
R-Radius of fillet,min	3/8	10	1/4	6	3/16	5	5/32	4	3/32	2
A-Legth of reduced section,min(note2)	2 ¼	60	1 ¾	45	1 ¼	32	¾	20	5/8	16

NOTE 1—The reduced section may have a gradual taper from the ends toward the center, with the ends not more than 1 percent larger in diameter than the center (controlling dimension).

NOTE 2—If desired, the length of the reduced section may be increased to accommodate an extensometer of any convenient gage length. Reference marks for the measurement of elongation should, nevertheless, be spaced at the indicated gage length.

NOTE 3—The gage length and fillets shall be as shown, but the ends may be of any form to fit the holders of the testing machine in such a way that the load shall be axial (see Fig. 9). If the ends are to be held in wedge grips it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

NOTE 4—On the round specimens in Fig. 5 and Fig. 6, the gage lengths are equal to four times the nominal diameter. In some product specifications other specimens may be provided for, but unless the 4-to-1 ratio is maintained within dimensional tolerances, the elongation values may not be comparable with those obtained from the standard test specimen.

NOTE 5—The use of specimens smaller than 0.250-in. (6.25-mm) diameter shall be restricted to cases when the material to be tested is of insufficient size to obtain larger specimens or when all parties agree to their use for acceptance testing. Smaller specimens require suitable equipment and greater skill in both machining and testing.

NOTE 6—Five sizes of specimens often used have diameters of approximately 0.505, 0.357, 0.252, 0.160, and 0.113 in., the reason being to permit easy calculations of stress from loads, since the corresponding cross sectional areas are equal or close to 0.200, 0.100, 0.0500, 0.0200, and 0.0100 in.², respectively. Thus, when the actual diameters agree with these values, the stresses (or strengths) may be computed using the simple multiplying factors 5, 10, 20, 50, and 100, respectively. (The metric equivalents of these fixed diameters do not result in correspondingly convenient cross sectional area and multiplying factors.)

fig. Standard 0.500-in. (12.5-mm) Round Tension Test Specimen with 2-in. (50-mm) Gage Length and Examples of Small-Size Specimens Proportional to the Standard Specimens