

**ESTUDIO Y CARACTERIZACION ULTRASONICA DE
MUESTRAS DE ACERO ALEADO CON 5% Y 12% DE
CROMO**

ING. BRENDA L. BUITRAGO. P.

Trabajo de grado presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela como requisito
parcial para optar al titulo de Magister Scientiarum
en Física de los Ensayos No Destructivos.

CARACAS, ABRIL DEL 2002

Certifico que he conducido y leído este Trabajo de Grado y lo encuentro apropiado tanto en su contenido como en su formato y apariencia externa.

Jacobo Reyes, PhD.
Tutor

Fecha

Certifico que he conducido y leído este Trabajo de Grado y lo encuentro apropiado tanto en su contenido como en su formato y apariencia externa.

Humberto Figueroa, PhD.
Tutor Industrial

Fecha

DEDICATORIA

A Dios por sobre todo.

A Ignacio y Andrés, mis estrellas en la vida.

A mi familia, mis padres German Buitrago e Ida Pérez, mis hermanas Sandra y Lisett, mi sobrino Carlitos, quienes siempre han estado presentes en mi corazón.

Y particularmente a todas las personas que disfrutan de mi éxito.

AGRADECIMIENTOS

Gracias Dios por colocar en mi camino a personas como a las que a continuación voy a citar, pues sin ellas no hubiese podido lograrlo...

A mi tutor Humberto Figueroa, sus enseñanzas, orientación, consejos y sobre todo su amistad me permitieron culminar este proyecto.

Al Prof. Jacobo Reyes por su incondicional apoyo y colaboración en el desarrollo de este trabajo.

A ti Ignacio por todo lo que me ayudas y todo lo que soportas de mi.

A todas las personas de PDVSA- Intevep que me brindaron su cooperación, muy especialmente a la Ing. Gladis Navas y a los especialistas Wilmer Bustillos, Luis Ganhao, Luis Silva.

Al Profesor Alexander Bueno por toda la colaboración que me presto como Jefe de la Unidad de Laboratorio de la USB - Litoral, como profesor y como amigo.

A mis compañeros profesores de la USB, especialmente a Gustavo Sánchez, Johnny Mendoza, Jesús Yriarte, Wilfrido González, Emil Morgado y a Ofelia García.

A la Sra. Niva y Helena Irausquin por todo cuanto me ayudaron con Andrés cuando estuve estudiando y cuando lo he necesitado.

A mi amigo David Castillo por su apoyo incondicional.

A mi papá, por todo siempre...

Gracias.

RESUMEN

Para esta investigación se seleccionaron muestras acero con aproximadamente 5% y 12% de cromo respectivamente, con el objeto de estudiar el comportamiento de las señales ultrasónicas longitudinales sobre estos materiales. Este estudio se realizó haciendo énfasis en la estimación de variables acústicas tales como la velocidad y la atenuación, asimismo se evaluaron los modos de respuesta espectral a diferentes valores de frecuencia central de transductor, utilizando para ello como referencia, una muestra adicional de acero al carbono con similares características de acabado superficial y de dimensiones. El desarrollo experimental se llevó a cabo utilizando el método de ensayo no destructivo por ultrasonido, empleando la técnica pulso eco de contacto directo. El análisis de resultados se efectuó mediante estudios de amplitud y del espectro de frecuencias del pulso reflejado, así como también, se realizó un estudio de velocidad longitudinal y atenuación del material, caracterizándolo ultrasónicamente. Además de esto, se propuso un modelo teórico para el cálculo de coeficiente de atenuación tomando en cuenta las pérdidas producidas por la divergencia del haz. Todo ello permitió establecer el comportamiento típico de las señales ultrasónicas en los aceros aleados estudiados.

INDICE GENERAL

	Pag.
APROBACION DE LOS TUTORES.....	ii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
RESUMEN.....	vi
INDICE GENERAL.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABLAS.....	xvi
LISTA DE ANEXOS.....	xvii
LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	xviii
1. INTRODUCCION.....	19
1.1 JUSTIFICACION	20
1.2 ALCANCE.....	21
1.3 OBJETIVOS.....	21
1.3.1 GENERAL.....	21
1.3.2 ESPECIFICOS.....	21
2. ANTECEDENTES.....	23
2.1 ESPECTROSCOPIA ULTRASONICA.....	23
2.2 VELOCIDAD DE PROPAGACION DE ONDAS ULTRASONICAS Y ATENUACION.....	24
2.3 ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES.....	31
2.4 ANALISIS ESPECTRAL DEL ULTRASONIDO	37

3. MARCO TEORICO.....	39
3.1 ACEROS ALEADOS.....	39
3.1.1 CARACTERISTICAS DE LOS ACEROS ALEADOS CON CROMO.....	39
3.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	40
3.3 ULTRASONIDO.....	42
3.3.1 ONDAS ULTRASONICAS.....	43
3.3.2 TECNICA DE PULSO ECO.....	47
3.3.2.1 Presentación Tipo A.....	48
3.3.2.2 Presentación Tipo B.....	49
3.3.2.3 Presentación Tipo C.....	50
3.3.3 FACTORES QUE AFECTAN LA INSPECCION ULTRASONICA.....	51
3.3.3.1 Características del transductor.....	52
3.3.3.1 Características del material.....	53
3.3.3.1 Características del haz ultrasónico.....	56
3.3.4 VELOCIDAD DE LA ONDA ULTRASONICA.....	59
3.3.5 ATENUACION DEL HAZ ULTRASONICO.....	62
3.4 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES.....	69
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	74
4.1 MATERIAL.....	74
4.1.1 DIMENSIONES DE LA PROBETA.....	75
4.1.2 COMPOSICION QUIMICA.....	75
4.1.2.1 Composición química de la probeta A.....	76
4.1.2.2 Composición química de la probeta B.....	76
4.1.2.3 Composición química de la probeta C.....	76

4.1.3 ANALISIS METALOGRAFICO.....	77
4.2 EQUIPOS E INSTRUMENTACION UTILIZADA.....	78
4.2.1 EQUIPO DE ULTRASONIDO.....	78
4.2.2 OSCILOSCOPIO DIGITAL.....	79
4.2.3 TRANSDUCTORES.....	80
4.2.4 ACOPLANTE.....	82
4.3 CARACTERIZACION ULTRASONICA DE LAS PROBETAS.....	82
4.3.1 VELOCIDAD ULTRASONICA LONGITUDINAL.....	82
4.3.2 ATENUACION DE LAS SEÑALES.....	84
4.3.3 ANALISIS ESPECTRAL DE FRECUENCIAS.....	86
5. RESULTADOS Y ANALISIS.....	90
5.1 ANALISIS QUIMICO.....	90
5.2 ANALISIS METALOGRAFICO.....	91
5.2.1 METALOGRAFIA DE LA PROBETA “A”.....	91
5.2.2 METALOGRAFIA DE LA PROBETA “B”	92
5.2.3 METALOGRAFIA DE LA PROBETA “C”	92
5.3 VELOCIDAD ULTRASONICA LONGITUDINAL.....	95
5.4 ATENUACION DE LAS SEÑALES ULTRASONICAS.....	98
5.4.1 ATENUACION DE LAS SEÑALES ULTRASONICAS CON FRECUENCIA CENTRAL DE 10 MHZ.....	98
5.4.2 ATENUACION DE LAS SEÑALES ULTRASONICAS CON FRECUENCIA CENTRAL DE 7,5 MHZ.	102
5.4.3 ATENUACION DE LAS SEÑALES ULTRASONICAS CON FRECUENCIA CENTRAL DE 5 MHZ.	104
5.4.4 ATENUACION DE LAS SEÑALES ULTRASONICAS CON FRECUENCIA CENTRAL DE 2,25 MHZ.....	106

5.4.5 ATENUACION DE LAS SEÑALES ULTRASONICAS CON FRECUENCIA CENTRAL DE 1,5 MHZ..	108
5.5 COEFICIENTE DE ATENUACION EXPERIMENTAL.....	110
5.5.1 MODELO PROPUESTO PARA EL CALCULO DEL COEFICIENTE DE ATENUACION EXPERIMENTAL.....	111
5.5.2 COEFICIENTE DE ATENUACIÓN ESTIMADO EN LAS MUESTRAS.....	116
5.6 ESPECTRO DE FRECUENCIA.....	120
5.6.1 ESPECTRO DE FRECUENCIA DE LA PROBETA “A”.....	122
5.6.1.1 Transductor de frecuencia central de 1,5 MHz.....	122
5.6.1.2 Transductor de frecuencia central de 2,25 MHz.....	124
5.6.1.3 Transductor de frecuencia central de 5 MHz.....	125
5.6.1.4 Transductor de frecuencia central de 7,5 MHz	128
5.6.1.5 Transductor de frecuencia central de 10 MHz	130
5.6.2 ESPECTRO DE FRECUENCIA DE LA PROBETA “B”.....	130
5.6.2.1 Transductor de frecuencia central de 1,5 MHz.....	132
5.6.2.2 Transductor de frecuencia central de 2,25 MHz	132
5.6.2.3 Transductor de frecuencia central de 5 MHz	135
5.6.2.4 Transductor de frecuencia central de 7,5 MHz	137
5.6.2.5 Transductor de frecuencia central de 10 MHz	137
5.6.3 ESPECTRO DE FRECUENCIA DE LA PROBETA “C”.....	140
5.6.3.1 Transductor de frecuencia central de 1,5 MHz	140
5.6.3.2 Transductor de frecuencia central de 2,25 MHz.....	142
5.6.3.3 Transductor de frecuencia central de 5 MHz	144
5.6.3.4 Transductor de frecuencia central de 7,5 MHz	146
5.6.3.5 Transductor de frecuencia central de 10 MHz	148

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	151
REFERENCIAS.....	153
BIBLIOGRAFIA.....	158
ANEXOS.....	162

LISTA DE FIGURAS

		Pag.
Fig.1	Diagrama de bloques del sistema pulso eco de superposición.....	27
Fig.2	Pulso transmitido y sus reflexiones	28
Fig.3	Trayectoria de la señal ultrasónica propagándose a través del agua (dw) y de la muestra (ds).....	28
Fig.4	Esquema de Propagación de las ondas longitudinales.....	44
Fig.5	Esquema de Propagación de las Ondas Transversales.....	45
Fig.6	Esquema de Propagación de Ondas Superficiales.....	46
Fig.7	Diagrama de funcionamiento de un sistema de ultrasonidos por pulso eco con representación tipo A (A- Scan).....	49
Fig.8	Diagrama de funcionamiento de un sistema de ultrasonidos por pulso eco con representación B (B- Scan).....	50
Fig.9	Diagrama de funcionamiento de un sistema de ultrasonidos por pulso eco con representación C (C- Scan).....	51
Fig.10	Zonas del haz ultrasónico.....	57
Fig.11	Propagación del ultrasonido en la dirección x.....	64
Fig.12	(a) Atenuación de la onda debido a la dispersión de grano (b)Representación de la atenuación ultrasónica. (b1) Atenuación de la onda (b2) Atenuación de la onda con dispersión de grano.....	65
Fig.13	Señales ultrasónicas en dominio temporal y frecuencial. (a) Pulso ultrasónico en dominio temporal. (b) Pulso ultrasónico en dominio frecuencial.	71
Fig.14	Dimensiones de las probetas.....	75
Fig.15	Fotografía del equipo de ultrasonido USN 52 L.....	79
Fig.16	Fotografía del osciloscopio Tektronix TDS 210.....	80
Fig.17	Transductores de 0,25" de Krautkramer.....	82

Fig.18	Arreglo experimental para la medición de la velocidad ultrasónica.....	84
Fig.19	Arreglo experimental para la estimación de atenuación ultrasónica.....	85
Fig.20	Diseño experimental de adquisición de la data para análisis de componentes en frecuencia.	87
Fig.21	Montaje experimental para la adquisición de la data de espectros de frecuencia.....	89
Fig.22	Montaje de la pesa sobre los transductores durante las mediciones.....	89
Fig.23	Fotografía de la microestructura en corte transversal de la probeta “A” tomada con un microscopio óptico a 100X de aumento.....	91
Fig.24	Fotografía de la microestructura en corte transversal de la probeta “B” (a) 500X de aumento (b) 100X de aumento.....	93
Fig.25	Fotografía de la microestructura en corte transversal de la probeta “C” (a) 500X de aumento (b) 100X de aumento.....	94
Fig.26	Gráfica de velocidad de la onda longitudinal vs. frecuencia ultrasónica...	95
Fig.27	Gráfica de velocidad de la onda longitudinal vs. porcentaje de cromo en cada una de las muestras.....	96
Fig.28	Gráficas de amplitud vs. distancia recorrida por la onda ultrasónica empleando transductor con frecuencia central de 10 MHz. (a) Diámetro de transductor de 0,5”. (b) Diámetro de transductor de 0,375”. (c) Diámetro de transductor de 0,25”.....	99
Fig.29	Gráfica de aproximación exponencial del comportamiento de atenuación de la probeta “A” con un transductor de 10 MHz y 0,375” de diámetro.....	101
Fig.30	Gráficas de amplitud vs. distancia recorrida por la onda ultrasónica empleando transductor con frecuencia central de 7,5 MHz. (a) Diámetro de transductor de 0,375”. (b) Diámetro de transductor de 0,25”.....	103
Fig.31	Gráficas de amplitud vs. distancia recorrida por la onda ultrasónica empleando transductor con frecuencia central de 5 MHz. (a) Diámetro de transductor de 0,5”. (b) Diámetro de transductor de 0,375”. (c) Diámetro de transductor de 0,25”.....	105
Fig.32	Gráficas de amplitud vs. distancia recorrida por la onda ultrasónica empleando transductor con frecuencia central de 2,25 MHz. (a) Diámetro de transductor de 0,5”. (b) Diámetro de transductor de 0,375”. (c) Diámetro de transductor de 0,25”.....	107

Fig.33	Gráficas de amplitud vs. distancia recorrida por la onda ultrasónica empleando transductor con frecuencia central de 1,5 MHz.....	109
Fig.34	Modelo teórico para el cálculo del coeficiente de atenuación experimental.....	111
Fig.35	Fracción de pérdida por divergencia del haz ultrasónico.....	113
Fig.36	Proyección del ángulo de divergencia del haz ultrasónico.....	114
Fig.37	Gráfica de coeficiente de atenuación experimental utilizando transductores de 0,25" de diámetro.....	118
Fig.38	Gráfica de coeficiente de atenuación experimental utilizando transductores de 0,375" de diámetro.....	118
Fig.39	Modelo de propagación del ultrasonido en las muestras de estudio.....	121
Fig.40	Transductor de 1,5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	123
Fig.41	Espectro de frecuencia de diferentes ecos de reflexión utilizando un transductor de 1,5 MHz y 0,375".....	125
Fig.42	Transductor de 2,25 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	126
Fig.43	Transductor de 5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	127
Fig.44	Transductor de 7,5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	129
Fig.45	Transductor de 10 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	131
Fig.46	Transductor de 1,5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	133
Fig.47	Transductor de 2,25 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	134
Fig.48	Transductor de 5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	136
Fig.49	Transductor de 7,5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	138

Fig.50	Transductor de 10 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	139
Fig.51	Transductor de 1,5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	141
Fig.52	Transductor de 2,25 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	143
Fig.53	Transductor de 5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	145
Fig.54	Transductor de 7,5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	147
Fig.55	Transductor de 10 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	149
Fig.56	Transductor de 1,5 MHz sobre plexiglass. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia	162
Fig.57	Transductor de 2,25 MHz sobre plexiglass. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	163
Fig.58	Transductor de 5 MHz sobre plexiglass. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	164
Fig.59	Transductor de 10 MHz sobre plexiglass. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.....	165

LISTA DE TABLAS

		Pag.
Tabla 1	Propiedades acústicas de varios materiales	55
Tabla 2	Atenuación debido a la dispersión de grano como función de la frecuencia.....	66
Tabla 3	Composición química según proveedor de la probeta “A”.....	76
Tabla 4	Composición química según proveedor de la probeta “B”.....	77
Tabla 5	Composición química según proveedor de la Probeta “C”.....	77
Tabla 6	Transductores utilizados.....	81
Tabla 7	Matriz de ensayo para la medición de velocidad ultrasónica longitudinal.....	83
Tabla 8	Matriz de ensayo para la medición atenuación.....	86
Tabla 9	Matriz de Ensayo para la adquisición de señales ultrasónicas.....	88
Tabla 10	Composición química según análisis efectuado sobre probeta “A”.....	90
Tabla 11	Composición química según análisis efectuado sobre probeta “B”.....	90
Tabla 12	Composición química según análisis efectuado sobre probeta “C”.....	90
Tabla 13	Aproximaciones empíricas de la atenuación de la señal de frecuencia central de 10 MHz y 0,375” de diámetro.....	101
Tabla 14	Aproximaciones empíricas de la atenuación de la señal de frecuencia central de 7,5 MHz y 0,375” de diámetro.....	104
Tabla 15	Aproximaciones empíricas de la atenuación de la señal de frecuencia central de 5 MHz y 0,375” de diámetro.....	106
Tabla 16	Aproximaciones empíricas de la atenuación de la señal de frecuencia central de 2,25 MHz y 0,375” de diámetro.....	108
Tabla 17	Aproximaciones empíricas de la atenuación de la señal de frecuencia central de 1,5 MHz y 0,375” de diámetro.....	109
Tabla 18	Angulo de divergencia en acero al carbono.....	163

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
Anexo 1 Comparación del ángulo de divergencia calculado por formula con el medido experimentalmente en acero al carbono	162
Anexo 2 Espectro de frecuencia de la señal sobre plexiglass de los transductores de 1,5 MHz, 2,25 MHz, 5 MHz y 10 MHz obtenidos experimentalmente.....	164
Anexo 3 Copia del certificado emitido por Krautkramer de algunos transductores empleados.....	169
Anexo 4 Procedimiento para la medición de velocidad ultrasónica longitudinal.....	176
Anexo 5 Procedimiento para la medición de atenuación ultrasónica.....	179
Anexo 6 Procedimiento para la adquisición de data para análisis espectral de las señales ultrasónicas.. ..	182

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

f	Frecuencia
α	Coefficiente de atenuación
θ	Angulo de divergencia del transductor
λ	Longitud de onda, corresponde a la distancia sucesiva entre dos crestas de onda.
RF	Abreviatura que designa el modo de presentación de onda no rectificadas de los equipos de defectología por ultrasonido.
V	Velocidad de onda
U.A	Unidades arbitrarias
Cr	Cromo
d	Distancia
A	Amplitud
r	Radio del transductor
V_L	Velocidad de onda longitudinal
V_T	Velocidad de onda transversal
V_s	Velocidad de onda superficial
END	Ensayos No Destructivos
Fig.	Figura
”	Pulgadas
R²	Factor de correlación

1. INTRODUCCION

Los aceros aleados con 1% hasta 18 % de contenido de cromo son ampliamente usados en refinерías, industria química y plantas de generación eléctrica, con aplicaciones generales en tubos, intercambiadores de calor, tuberías de sobrecalentamiento y recipientes de alta presión [White, 1.991]. De acuerdo al variado rango de temperaturas y condiciones de operación, se seleccionan aceros con concentraciones diferentes y tratamientos térmicos adecuados. De esta manera, acero con 2-1/4% de cromo se utiliza en tuberías de hornos que trabajan en un rango de temperaturas que va desde los 540° a los 590°C, donde estos materiales aplican para servicios de ambientes poco corrosivos. Por otro lado, acero con 5% de Cromo son empleados en Baffles, intercambiadores de calor y tuberías de hornos, los cuales operan en rangos de temperatura que van desde los 340° a los 455° C, destinados para componentes ubicados en unidades de crudo, craqueadores, coquificadores y plantas de catalítica. De igual forma, acero con 12% de Cromo se emplean, por ejemplo, en bandejas y en elementos internos cuyas temperaturas de trabajo oscilan entre 38 y 200°C, así como en servicios de alta presión, plantas de hidrógeno y plantas de tratamiento de gas.

Se seleccionaron muestras con aproximadamente 5% y 12% de cromo respectivamente y además una muestra adicional de acero de bajo contenido de carbono, (usado como patrón de comparación) con el propósito de estudiar la interacción de las señales ultrasónicas longitudinales con estos materiales, a fin de mejorar la confiabilidad en

las operaciones de inspección de los aceros con cromo, y adicionalmente sentar las bases requeridas para estudiar variables y parámetros acústicos característicos necesarios en un procedimiento de inspección.

Las muestras de estudiadas fueron caracterizadas mediante el ensayo ultrasónico, empleando la técnica de pulso eco de contacto directo, utilizando para ello transductores de diferentes frecuencias. Seguidamente se consideraron como variables acústicas relevantes la velocidad de propagación de la onda ultrasónica longitudinal, los coeficientes de atenuación para señales de frecuencia diferentes y la respuesta espectral de estas señales cuando interaccionan con el material.

1.1. JUSTIFICACION DEL ESTUDIO

En la actualidad, la pericia de Inspección de la Gerencia de Tecnología de Infraestructuras de PDVSA-Intevep, está en la necesidad de comprender el comportamiento del ultrasonido en los aceros aleados con cromo, pues desea desarrollar una metodología de inspección para componentes de refinación fabricados con este tipo de acero que permita asegurar la calidad de las operaciones y garantizar sistemas de inspección confiables. Un estudio del comportamiento del ultrasonido en materiales como acero al cromo de baja aleación con las características de las muestras definidas en este proyecto, permitirá establecer aspectos de importancia que podrán ser recomendados en el procedimiento de inspección y será la base para el estudio de la interacción del ultrasonido en aceros similares sometidos a tratamientos térmicos diversos y de variada microestructura, así como también aceros inoxidable y aleaciones especiales de la industria petrolera.

1.2. ALCANCE

La investigación contempla establecer las frecuencias de mayor penetración y de menor distorsión del pulso para inspeccionar acero con 5% y 12% de cromo utilizando análisis espectral, además se requiere estimar la atenuación que sufren las señales ultrasónicas al interactuar con estos materiales, y comparar los resultados obtenidos con la interacción del ultrasonido en acero al carbono.

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1 GENERAL:

Estudiar la interacción de las ondas ultrasónicas longitudinales en muestras de acero aleado con 5% y 12% de cromo.

1.3.2 ESPECIFICOS:

- Recopilar material bibliográfico con el fin de determinar el estado del arte referido al tema de investigación.
- Diseñar los patrones de prueba.
- Realizar el análisis metalográfico de las probetas con el fin de conocer la estructura metalografica de cada una de las muestras.
- Realizar el análisis químico de las probetas, con el fin de constatar los porcentajes de los principales elementos de la aleación.

- Realizar el ensayo ultrasónico de cada una de las muestras, variando la frecuencia del transductor y tomando en consideración los siguientes aspectos:
 - a) Velocidad ultrasónica longitudinal.
 - b) Atenuación ultrasónica.
- Evaluar las señales ultrasónicas mediante el análisis espectral de frecuencias en cada una de las probetas.
- Analizar los resultados obtenidos.
- Establecer conclusiones.

2. ANTECEDENTES

2.1 ESPECTROSCOPIA ULTRASONICA

La espectroscopia ultrasónica es una técnica que permite la evaluación de los cambios de longitud de onda cuando las señales ultrasónicas interactúan con un material. Esta técnica ha sido utilizada en múltiples aplicaciones, entre otras la evaluación de superficies rugosas y determinación de corrosión en muestras de acero [Tucker, 2000], caracterización de defectos en uniones soldadas [Jiménez et al. 2000], caracterización de suspensiones coloidales, determinando distribución, concentración y tamaño de las partículas en la suspensión [McClements, 1.988].

Esta técnica ultrasónica representa uno de los métodos usados para analizar componentes de frecuencia en señales ultrasónicas. De esta manera cuando una señal ultrasónica atraviesa un medio, las componentes de frecuencia asociadas con la señal de entrada son alteradas. Para analizar estas variaciones, se utiliza por ejemplo, la transformada de Fourier, la cual puede ser usada con el fin de obtener la información del dominio de frecuencias, de tal forma que sea posible estudiar el efecto de las propiedades del material sobre la alteración de la señal de entrada estudiando su espectro de frecuencias.

2.2 VELOCIDAD DE PROPAGACION DE ONDAS ULTRASONICAS Y ATENUACION

Las ondas ultrasónicas se propagan en un medio homogéneo a una velocidad y atenuación que son características para cada material. De esta forma las dos propiedades pueden ser empleadas para establecer la existencia de defectos en su interior. La determinación de estos parámetros, que pueden ser considerados básicos y elementales, debe hacerse cuidadosamente, razón por la cual en su medición deben ser consideradas numerosas fuentes de error, tan significativas que ocultan algunas veces las magnitudes de interés, restando validez al método de medición y sus resultados [Gaete, 2001].

Para medios homogéneos, las técnicas de medición de velocidad de propagación deben cuidar principalmente la precisión que es posible alcanzar como resultado de los errores asociados a la determinación de las distancias de propagación (camino acústico) y el tiempo empleado en recorrer la distancia asociada (tiempo de vuelo). La situación es diferente cuando el medio es no-homogéneo, ya que en este caso se presenta el fenómeno de la dispersión y debe distinguirse la velocidad de propagación que el medio presenta para cada frecuencia, conocida como velocidad de fase, de la velocidad con que se propaga un grupo de ondas, llamada también velocidad de grupo [Gaete, 2001].

Así mismo, para medios homogéneos las mediciones de atenuación deben corregirse tomando en cuenta la difracción que experimenta el haz ultrasónico cuando se propaga a través del material bajo examen [E. P. Papadakis, et al. 1973]. Esta corrección

debe incluir las pérdidas de energía que se producen en el medio empleado para acoplar la muestra al transductor.

También para medios no-homogéneos los mecanismos de dispersión son variados [Sachse, 1978]. Esta puede ser causada por: (i) la presencia de las fronteras de la muestra (dispersión geométrica), (ii) la dependencia de las constantes del material, como por ejemplo, la densidad, los módulos elásticos, las constantes dieléctricas etc., de la frecuencia, (iii) dispersión de las ondas por inhomogeneidades finas densamente distribuidas en el material, (iv) la absorción o disipación de la energía de la onda en forma de calor u otro proceso irreversible, (v) la dependencia de la velocidad de la onda de la amplitud (dispersión no-lineal). Esta última forma de dispersión es propia de las ondas de gran amplitud y, en general, no se presenta en el caso de los ensayos no-destructivos. El fenómeno de la dispersión trae consigo una dependencia de las velocidades de propagación de una onda con la frecuencia, en estas circunstancias es necesario definir dos tipos de velocidades: la velocidad de fase que es la que tiene una onda monocromática desplazándose por el medio y la velocidad de grupo, que es la velocidad con que se propaga la envolvente de un paquete de ondas [Nicholson et al. 1996].

Igualmente la atenuación debida a absorción, dispersión o divergencia del haz hace que la señal de eco producida por una reflexión sea difícil de identificar en los casos en que por su nivel o por la diferencia de impedancias acústicas entre el medio y la superficie reflectante se confunde con rebotes espurios o no se distingue de la señal que conforma la zona ciega o zona muerta del transductor.

De las investigaciones realizadas en este ámbito, se puede citar la de Bongyoung et al. (2000) quien realizó mediciones de atenuación utilizando un sistema de inmersión para eliminar el problema de contacto entre el transductor y el espécimen de estudio, empleando frecuencias de 5, 10 y 15 MHz. En este estudio el espectro de frecuencias fue calculado con el fin de estimar la atenuación utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de la señal adquirida en el dominio temporal, concluyendo en su trabajo que la micro estructura de los aceros es muy complicada y que ésta depende en gran parte de los elementos involucrados en la aleación, los tratamientos térmicos y los procesos mecánicos a los que se ve sometido el material. La dispersión ultrasónica por ejemplo, en el hierro puro según Bongyoung es relativamente menos complicada que en los aceros pues ésta solo está compuesta de ferrita y la dispersión es determinada por la distribución de los granos de ferrita. El análisis de dispersión en aceros hipoeutectoides es de mayor dificultad porque tanto la perlita como la ferrita, que son las fases más evidentes en la aleación, contribuyen a la dispersión.

Por su parte P. Palamichamy et al.(1.994) realizó mediciones de velocidad ultrasónica empleando ondas longitudinales y transversales en muestras de acero inoxidable austenítico, con el fin de hacer una estimación aproximada del tamaño de grano. La medición de velocidad fue realizada aplicando el método de pulso-eco de superposición y desarrollando un equipo adecuado a esta técnica de medición. El principio de medición de este método se basa en tomar señales sucesivas de ecos de reflexión para superponerlos en el osciloscopio, manejando el eje de las abscisas con el portador de frecuencias cuyo periodo es el tiempo de vuelo entre las señales de interés. Entonces una señal aparece en el primer barrido del osciloscopio y la siguiente aparecerá en el próximo barrido. Luego son

medidos con precisión los espesores de los especímenes y se obtiene la correspondiente velocidad ultrasónica a partir de estos datos.

A continuación se presenta la Fig. 1 en la cual se muestra el diagrama de bloques del sistema de superposición empleado por P. Palamichamy et al.

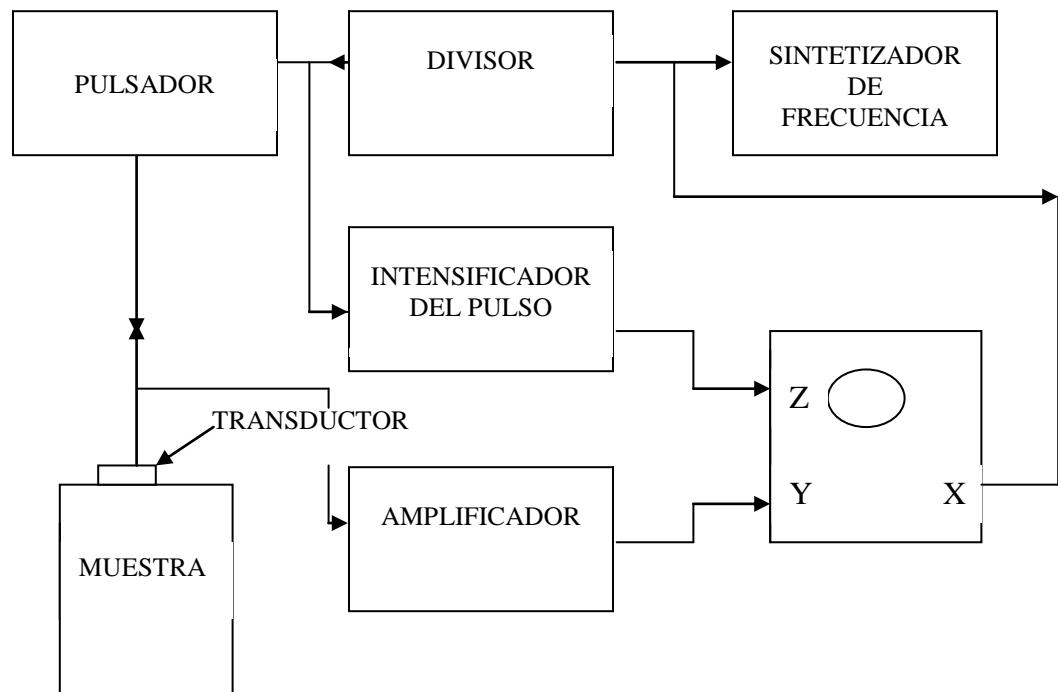


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema pulso eco de superposición [Tomado de P.Palamichamy et al. 1994]

El esquema de la figura anterior representa el modelo utilizado en los experimentos de Palamichamy para la estimación del tamaño de grano en muestras de acero inoxidable.

Un método para medir las pérdidas sufridas por ondas ultrasónicas propagándose en medios materiales se presenta en el trabajo de Selfridge (1985). El sistema experimental consta de un tanque con agua, un sistema de alineación donde se sitúa el material y un

transductor ultrasónico. Las pérdidas se miden entre ecos sucesivos del tren de pulsos que se envían a la muestra, determinándose a través de los coeficientes de reflexión y transmisión. La amplitud A_1 corresponde a la reflexión en la cara frontal de la muestra, A_2 a la reflexión en la cara posterior de la muestra, A_3 y A_4 a las reverberaciones dentro de la muestra, como se muestra en la Fig. 2

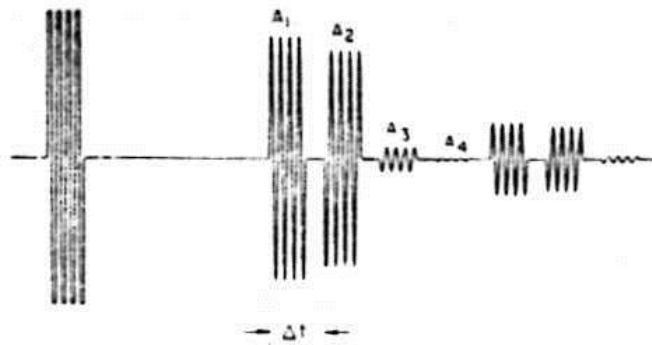


Fig. 2 Pulso transmitido y sus reflexiones [Tomado de Selfridge, 1985]

Con este mismo sistema experimental es posible determinar la velocidad de la onda longitudinal, para ello se debe medir el espesor de la muestra (d_s) con un micrómetro y el tiempo Δt con el osciloscopio, así la velocidad será

$$V = \frac{2d_s}{\Delta t} \quad (1)$$

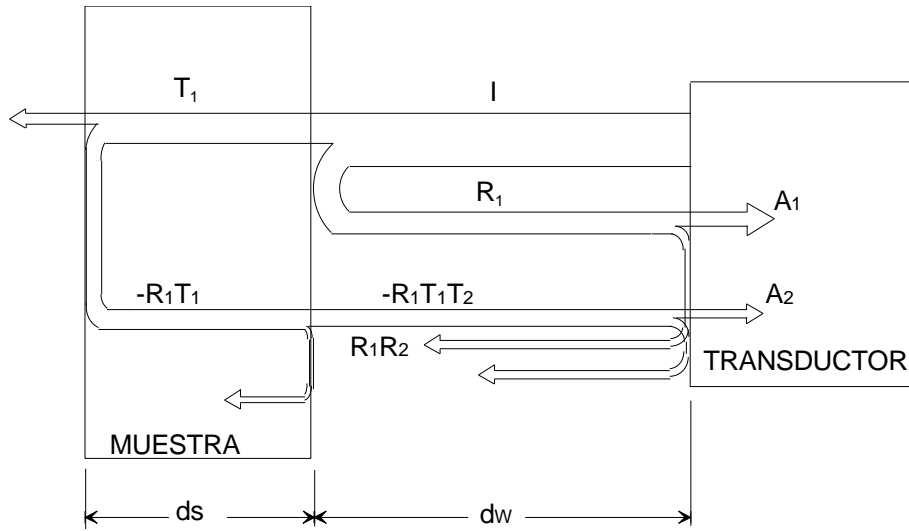


Fig. 3 Trayectoria de la señal ultrasónica propagándose a través del agua (d_w) y de la muestra (d_s) [Tomado de Selfridge, 1985]

En la Fig. 3 se aprecia como se propagaría la señal a través del agua y de la muestra. El coeficiente de reflexión de la interfase agua - muestra (R_1), es real y está dado por

$$R_1 = \frac{Z_s - Z_w}{Z_s + Z_w} \quad (2)$$

donde Z_s y Z_w es la impedancia acústica de la muestra y del agua, respectivamente. Parte de la señal es transmitida a la muestra, el coeficiente de transmisión (T_1) está dado por,

$$T_1 = \frac{2Z_s}{Z_s + Z_w} = 1 + R_1 \quad (3)$$

Otra parte de la señal continúa propagándose en la muestra, una parte de ésta es transmitida y otra es reflejada en la cara trasera de ésta. El coeficiente de reflexión en la cara trasera es $-R_1$. Cuando esta porción de la señal alcanza la cara delantera de la muestra parte de ella es reflejada y parte es transmitida hacia el agua. El coeficiente de transmisión es:

$$T_2 = \frac{2Z_w}{Z_s + Z_w} = 1 - R_1 \quad (4)$$

Se mide las amplitudes A_1 y A_2 directamente del osciloscopio y el tiempo entre ellas (Δt). Se observa de la Fig.2 que la señal A_2 está invertida con respecto a A_1 , esto significa que si se usa el ciclo positivo para medir en A_1 debe usar el negativo para A_2 . Dependerá del tipo de osciloscopio que se use la exactitud en la medición de este tiempo.

Con la impedancia acústica del agua conocida y la determinación de la de la muestra es posible calcular la razón entre A_2 y A_1 , suponiendo que no hay pérdidas en la muestra, por medio de los coeficientes de transmisión y reflexión

$$\frac{A_2}{A_1} = T_1 * T_2 = 1 - R_1^2 \quad (5)$$

Para obtener las pérdidas reales en dB/cm, en el material, se compara la razón medida de A_2 a A_1 con la calculada, esto es

$$\text{Pérdidas en dB/cm} = 20 * \log \frac{\left[\left(\frac{A_2 \text{ calculada}}{A_1} \right) \right]}{\left[\left(\frac{A_2 \text{ medida}}{A_1} \right) \right]} \quad (6)$$

Este método no toma en cuenta los efectos de la difracción de la señal.

También puede mencionarse el trabajo desarrollado por Ferreira A et. al. [2001] el cual realizó mediciones de atenuación y velocidad ultrasónica utilizando ondas longitudinales y transversales sobre rocas, con el fin de evaluar la influencia de la porosidad, grietas y orientación del tamaño de grano sobre la propagación de las ondas ultrasónicas en los especímenes utilizados para el estudio. La medición de velocidad en

ambos casos (ondas longitudinales y transversales) fue realizada utilizando la correlación entre los tiempos de vuelo y el espesor de las muestras, basados en la fórmula:

$$V = \frac{d}{t} \quad (7)$$

Donde

V = es la velocidad de la onda

d = es el espesor de la muestra

t = es el tiempo de vuelo

Seguidamente las señales ultrasónicas propagadas a través de las muestras fueron adquiridas mediante un osciloscopio y digitalizadas, luego se transfirieron mediante un puerto serial a un microprocesador donde se le aplico la Transformada Rápida de Fourier, la cual permitió obtener el espectro de frecuencias necesario para la evaluación de la atenuación. Ellos concluyeron que el análisis ultrasónico es una herramienta importante para predecir el comportamiento mecánico de las rocas cuando son utilizadas en trabajos ingenieriles.

2.3 ANALISIS Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

El procesamiento digital de señales (PSD) se refiere a un rango muy amplio de operaciones que se pueden realizar sobre señales muestreadas. Estas operaciones pueden realizarse con distintos fines, bien para mejorar la información contenida en las señales, bien como método de análisis y extracción de parámetros para evaluación y medida

El procesamiento de señales ultrasónicas requiere por su parte, de un sistema de medida de ultrasonidos básico, que este conformado por lo menos con tres componentes elementales, tales como [Valdecantos C. 1984]:

- Sistema de emisión ultrasónico: que introduce las ondas acústicas en el medio explorado. Este consta de (1) un circuito electrónico de excitación, (2) uno o varios transductores ultrasónicos que transforman la energía eléctrica en energía mecánica y (3) el acoplante que realiza la transmisión de la energía desde el transductor hasta el medio explorado.
- Medio explorado: del cual se pretende obtener información física. Este medio es perturbado por las ondas ultrasónicas.
- Sistema de recepción, que consta de (1) uno o varios sensores capaces de convertir las ondas mecánicas en señales eléctricas (pueden ser los mismos transductores que realizan la emisión), y (2) un sistema de tratamiento de las señales eléctricas que puede ser analógico y/o digital. En este sistema se incluyen todos los componentes, con cables y conectores, los cuales idealmente realizan la función identidad, pero que, en la práctica, pueden dar origen a problemas en los sistemas reales.

Cada tipo de aplicación o de ensayo ultrasónico requiere un diseño específico en el que se tienen que optimizar los componentes del sistema de medida. Por un lado, están aquellos aspectos que condicionan la perturbación mecánica, y por otro, la determinación del tratamiento más adecuado para extraer la información deseada de las señales, sea ésta una imagen, una medida, evaluación de un defecto, etc.

Las principales áreas de aplicación del análisis y procesamiento de señales ultrasónicas son el diagnóstico médico y los ensayos no destructivos (END) en la industria. Aunque las técnicas correspondientes a ambas aplicaciones tienen las mismas bases y grandes semejanzas, existen ciertas diferencias que han conducido a desarrollar dos campos muy específicos y con escasos espacios comunes en la práctica. Las principales diferencias surgen de la diversidad en el objeto de la aplicación. Mientras que en medicina los sistemas están muy normalizados y son explotados masivamente por las instituciones sanitarias, los sistemas industriales son mucho más diversos y exigen prácticamente un diseño específico para cada aplicación.

Las técnicas de procesamiento de señales ultrasónicas (PDS-UT) son usadas para mejorar la información aportada por las señales ultrasónicas, y pueden ser aplicadas eficientemente para aumentar la calidad de imágenes, la precisión de las medidas, etc. Pero es muy importante considerar que no hay ningún procesamiento que pueda sustituir a una práctica correcta en las instalaciones y en la realización de las medidas. En este sentido, la elección de la instrumentación dentro de las diferentes alternativas existentes tendrá gran influencia en los resultados de ensayos no destructivos. Ello supone realizar un diseño específico de cada uno de los componentes [Singh G. et al. 1991]:

- Tipo de transductor: comúnmente se usan transductores piezoeléctricos determinando sus características (frecuencia, ancho de banda, tamaño, etc) en función de (1) la penetración deseada que depende de la atenuación del material, (2) la sensibilidad o capacidad para detectar un defecto, (3) resolución axial y lateral o capacidad para distinguir defectos entre sí, etc.

- Tipo de excitación, que puede ser continua, monopulsada – un solo flanco para generar un pulso ultrasónico de banda muy ancha-, o multipulsada – para generar trenes de pulsos cuya duración, frecuencia (fija o variable) y amplitud se pueden controlar electrónicamente. Para ciertas aplicaciones se generan trenes de pulsos codificados, y mediante técnicas de procesamiento digital de señales se facilita la recuperación de la máxima resolución axial manteniendo al mismo tiempo una buena relación señal-ruido (RSR).
- Electrónica de recepción y acondicionamiento de señales, que básicamente consiste en una o varias etapas de amplificación y filtrado analógico, para convertir señales inferiores a un milivoltio a niveles utilizables. Los equipos de ensayos no destructivos (END) requieren ciertas características específicas:
 - Rango dinámico: determinado por la relación señal-ruido (RSR). Para pequeñas señales suele aceptarse una relación señal / ruido en amplitudes de 2:1 (6 dB), esto es, para una señal de 0,1 mV de pico, el valor máximo del ruido no debería superar los 50 μ V de pico. Expresado en dB (esto es, $20 \log_{10} V_{\max}/V_{\min}$), algunas aplicaciones superan los 90 dB de rango dinámico. Como el ruido es una componente aleatoria, suele estimarse que su valor eficaz es 6,6 veces menor que la amplitud de pico.
 - Ancho de banda: los amplificadores deben poseer un ancho de banda superior al que presentan los transductores al máximo nivel de atenuación esperado, para evitar una distorsión de la señal y una reducción de la resolución

axial. En general, es aceptable un ancho de banda de 10 MHz para la mayoría de las aplicaciones hasta 5MHz, siendo preferible un ancho de banda mayor.

- Nivel de ruido: para obtener indicaciones válidas de las señales más bajas, es preciso que los niveles de ruido de origen térmico u otros generado en el amplificador sea muy bajo. Para mejorar la relación señal / ruido, eliminando especialmente componentes de ruido captadas del exterior, es conveniente disponer de un juego de filtros que se adaptarán a la frecuencia central del transductor.
- Detección de envolvente: Las señales entregadas por el transductor en recepción son pulsos de radiofrecuencia (RF) cuya envolvente es del máximo interés por contener información sobre las características de los reflectores. Los métodos analógicos de detección de envolvente proporcionan una buena aproximación al valor real de ésta, aunque actualmente pueden ser superados por las técnicas PDS.
- Compensación atenuación-distancia (CAD): Las señales ultrasónicas sufren una atenuación en su propagación por el medio inspeccionado. Como consecuencia, reflectores idénticos producirán ecos diferentes en función de la profundidad a la que se encuentren, efecto tanto más acusado cuanto mayor sea el coeficiente de atenuación del material. La función CAD compensa este efecto, aumentando el factor de amplificación con el tiempo (distancia).

En una definición mas clara el análisis y procesamiento de señales comprende métodos, algoritmos y técnicas electrónicas para mejorar la información y facilitar la

interpretación de las señales ultrasónicas que previamente han interactuado con un medio a explorar. Las técnicas analógicas permiten realizar un procesamiento rápido de las señales ultrasónicas sin ocupar tiempo adicional al tiempo de adquisición, pero tienen el inconveniente de que son poco flexibles y difíciles de aplicar. Por ello, la tendencia actual es a utilizar técnicas digitales de procesamiento de señales. En este sentido, los avances continuados en tecnología electrónica permiten crear sistemas de procesamiento cada vez más rápidos, de bajo coste y reducido volumen [Ullate et al. 1998]

Por lo antes señalado se puede decir que, las señales obtenidas en los equipos de ultrasonido convencionales se basan principalmente en las propiedades geométricas del ultrasonido y, por lo tanto, no proveen información detallada sobre la interacción de éste con el material inspeccionado, razón por lo cual se hace necesario el uso del procesamiento de señales que permitan estudiar el comportamiento espectral.

Cabe agregar que una de las herramientas más utilizadas para el análisis y procesamiento de señales es la Transformada de Fourier. Esta fue desarrollada por Jean Baptiste Joseph Fourier hace tres siglos atrás, estableciendo que cualquier señal, periódica o no periódica, puede ser aproximada a una sola función sinusoidal tipo $\sin(\omega t)$ y $\cos(\omega t)$ de diferentes frecuencias “ ω .” El mayor número de funciones sinusoidales usadas es la aproximación más exacta. Si la señal puede ser sintetizada desde funciones sinusoidales, el proceso puede ser invertido y al algoritmo matemático que ejecuta esto se le conoce como Transformada de Fourier. El proceso de conversión desde el dominio de frecuencia al dominio de tiempo es llamado Transformada Inversa de Fourier [Hanspeter et al. 2000].

Una transformada de Fourier del pulso reflejado permite determinar la componente espectral del mismo. De esta manera un determinado impulso de entrada, emergerá teniendo un espectro de frecuencia diferente luego de atravesar materiales disímiles. El análisis del espectro da esencialmente una "firma" ultrasónica que es genérica al tipo de microestructura particular de interés [Petculescu, 1.998]. Por lo tanto, el espectro de frecuencia de un pulso incidente es modificado durante la interacción de la señal con una discontinuidad, el estudio de ese cambio en el dominio de frecuencia, proporciona información adicional sobre la discontinuidad, entonces cuando una señal ultrasónica atraviesa un medio, las componentes de frecuencia asociados con la señal de entrada son alteradas.

2.4 ANALISIS ESPECTRAL DEL ULTRASONIDO

El análisis del dominio de frecuencias utilizando FFT (Fast Fourier Transform) ha sido ampliamente utilizado en estudios de caracterización de discontinuidades de punta aguda ("Tip sharpness"), en el desarrollo de trabajos para la detección de daños causados por hidrógeno en aceros al carbón y en investigaciones relacionadas con estructuras austeníticas, en las que ha permitido estudiar el efecto de las propiedades de los materiales sobre la alteración de las señales de entrada sujetas a análisis tiempo-frecuencia.

En este orden de ideas Kruger et al (1.999) reportan el uso de análisis espectral ultrasónico en la detección de daños por fluencia aplicado a muestras, en donde se confrontan los resultados del estudio ultrasónico con el examen metalográfico. De esta manera verifican notables diferencias en el espectro de frecuencia correspondiente a daños

producidos por fluencia, concluyendo que el método es sensible para la detección de variaciones microestructurales acumulados por dichos daños.

De igual forma Wei (1998) desarrollo estudios para la caracterización de discontinuidades de punta aguda, siendo este tipo de discontinuidades un factor muy importante en la determinación de probabilidades de que una discontinuidad pueda propagarse cuando es sometida a esfuerzos. Su investigación muestra que el análisis en el dominio de frecuencias señala una frecuencia pico de la señal reflejada de la región de punta, la cual se incrementa en la medida en que se hace más aguda la punta. Este fenómeno es presentado como el resultado de una colimación de componentes de alta frecuencia en el campo ultrasónico del transductor y de la reflexión preferencial de una porción central del campo de fondo del transductor por el mismo efecto de la punta aguda.

Kumar et al. (1998) realizaron investigaciones con el fin de establecer la influencia del tamaño de grano en parámetros ultrasónicos espectrales, utilizando muestras de acero inoxidable. En estos estudios se correlacionaron la frecuencia pico del dominio frecuencial del primer eco de fondo, con el tamaño promedio de grano, el cual fue medido mediante metalografía óptica. Las muestras seleccionadas estaban sometidas a diferentes tratamientos térmicos con el fin de variar el tamaño de grano. Los análisis de sus resultados establecieron que a medida que se incrementa el tamaño de grano en las diferentes muestras, la amplitud de la frecuencia pico del espectro disminuye, esto les permitió concluir que el método empleado es sumamente ventajoso para medir tamaño de grano particularmente aplicado a materiales con atenuación muy alta (aceros austeníticos inoxidables) pues solo requiere el estudio de la primera reflexión del pulso ultrasónico.

3. MARCO TEORICO

3.1. ACEROS ALEADOS

Los aceros aleados pueden ser definidos como aquellos cuyas propiedades características se deben a algún elemento diferente al carbono. Los elementos de aleación se añaden con el fin de mejorar propiedades diversas en el material [Avner, 1.990].

3.1.1. CARACTERISTICAS DE LOS ACEROS ALEADOS CON CROMO

Los aceros aleados con cromo son ampliamente usados en refinerías, industrias químicas y plantas generadoras de energía eléctrica. La selección apropiada de este material depende de las propiedades mecánicas deseadas, de los requerimientos de servicio, de las consideraciones de costo y de otros factores. La principal ventaja de estos aceros es la resistencia a la corrosión, por eso es muy bien visto en intercambiadores de calor, tuberías de alta presión, entre otros componentes de la industria.

El cromo se adiciona al acero para aumentar la resistencia a la corrosión, aumentar la dureza, incrementar la resistencia a altas temperaturas y mejorar la resistencia a la abrasión en aceros de alto contenido de carbono. El cromo es además un alto formador de carburos, lo cual hace necesario un largo tiempo de calentamiento antes de efectuar un tratamiento térmico como temple, con la finalidad de que los carburos complejos que se

formen pasen a solución en la fase austenítica. El cromo puede ser usado como elemento endurecedor, y es frecuentemente acompañado de otros elementos, como por ejemplo el níquel y el molibdeno, el cual aumenta mucho mas la resistencia al acero a altas temperaturas.

3.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los Ensayos No Destructivos (END), agrupan una diversidad de métodos que permiten obtener una información muy amplia sobre las propiedades, estructura, presencia de discontinuidades y dimensiones de un material o de una pieza, sin alterar sus condiciones de servicio [ASM Handbook]. Las técnicas de evaluación no destructiva, pueden ser aplicadas para:

- Análisis dimensional de piezas.
- Detección, identificación y dimensionamiento de discontinuidades.
- Caracterización de materiales.
- Control de calidad de procesos industriales y de fabricación de materiales.
- Evaluación de la condición de un componente para determinar su continuidad en servicio.

Basándose en los requerimientos específicos de las diversas aplicaciones que tienen los ensayos no destructivos, se han desarrollado diversos métodos, los cuales pueden ser agrupados desde varios puntos de vista. Una de las clasificaciones más aceptadas se basa en la complejidad y facilidad de empleo de los ensayos no destructivos; esta clasificación es:

- Ensayos no destructivos convencionales: Inspección visual, líquidos penetrantes, ensayo de fuga, partículas magnéticas, corrientes inducidas, radiografía industrial, gammagrafía y ultrasonido.
- Ensayos no destructivos no convencionales: Ensayo de vibraciones, emisión acústica, radiografía por neutrones, holografía óptica, holografía acústica y tomografía industrial.

Los métodos de ensayo no destructivo son complementarios entre sí, por lo que no existe un solo método que, para una aplicación específica, reúna toda la información requerida. Esta afirmación es aplicable principalmente en el caso de los estudios de defectología.

Los ensayos no-destructivos se basan en la medición de las propiedades de los materiales, y en el caso de los ultrasonidos lo que se busca es establecer relaciones entre los diferentes parámetros de las constantes de propagación y la existencia de posibles defectos en un material. Las propiedades que se miden son de diferente índole y van desde la ecogenicidad (capacidad de producir ecos) para formar imágenes hasta la determinación de constantes elásticas, a veces mediante el estudio de modos de propagación complejos. [Gaete, 2001].

3.3 ULTRASONIDO

El ensayo no destructivo ultrasónico es una técnica en donde pulsos de altas frecuencias traspasan al material inspeccionado, con el fin de detectar discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas [ASM Handbook. Vol 17,1994]. Las ondas sónicas que tengan frecuencias superiores a los 20 KHz son conocidas como ondas ultrasónicas, pero comúnmente para inspecciones se utilizan a frecuencias que oscilan entre los 0.1 y 25 MHz.

La mayoría de los equipos de defectología por ultrasonido detectan discontinuidades mediante monitoreo de una o varias de las variables y parámetros señalados a continuación [ASM Handbook. Vol 17,1994]:

- Reflexión de las ondas ultrasónicas en las interfases producto de límites de capas de materiales distintos o de discontinuidades presentes en un material.
- Tiempo de transito de la onda, también llamado tiempo de vuelo.
- Atenuación de la onda ultrasónica.
- Señales características dentro del espectro de frecuencia de la señal recibida.

Por todo esto, el ensayo ultrasónico es uno de los métodos de ensayo no destructivo más utilizado en la inspección de materiales, con aplicaciones muy diversas y diferentes áreas.

En síntesis el campo de utilización de las técnicas de ultrasonidos se extiende, a todos aquellos ámbitos de la actividad industrial en los que la calidad de los productos o la seguridad de estructuras, instalaciones o personas están implicadas. Así, son clásicas las aplicaciones en aeronáutica (revisión en producción y periódica de estructuras aerodinámicas, motores, etc.), centrales nucleares (revisión de elementos críticos, soldaduras, etc.), transporte (en especial ferroviario, detección de grietas en ruedas, uniones soldadas, etc.), prospección y distribución del petróleo (oleoductos, columnas de perforación, etc.), industria química (tuberías, válvulas, reactores, etc.), siderúrgica (control de calidad de planchas, perfiles, etc.), naval (inspección de estructuras), aeroespacial y todas aquellas en las que se requiera un alto grado de fiabilidad, un seguimiento de defectos críticos o una detección prematura de causas de rotura o avería como consecuencia de la corrosión, fatiga mecánica u otras. En el campo de la Automoción, las inspecciones por ultrasonidos son muy valiosas, pudiéndose aplicar en todo tipo de elementos mecánicos (control de calidad en ejes, pernos, etc.), detectar oclusiones, defectos de fabricación, aparición de grietas, revisión en continuo de puntos de soldadura, etc. En la construcción también puede ser interesante el estudio mediante ultrasonidos del fraguado del hormigón, pudiendo sustituir a los ensayos destructivos que se realizan en la actualidad.

3.3.1 ONDAS ULTRASONICAS

Las ondas ultrasónicas consisten en oscilaciones o vibraciones de las partículas atómicas o moleculares de un material respecto a su punto de equilibrio, debido a la aplicación de una determinada fuerza. Estas se propagan en medios elásticos: sólidos y líquidos, pero no en gaseosos. Pueden ser clasificadas basándose en el modo de

desplazamiento en: ondas longitudinales, ondas transversales, ondas de superficie y ondas de Lamb [Krautkramer J, 1.969]

- Ondas longitudinales: Son ondas que producen compresiones y dilataciones a lo largo de su propagación. Las moléculas del medio vibran alrededor de su posición de equilibrio, siendo sus trayectorias rectas paralelas con la dirección de propagación del frente de ondas. La velocidad de propagación de la onda ultrasónica esta condicionada por las fuerzas de interacción entre las partículas del medio, cada partícula empuja a la siguiente de tal manera que la perturbación se propaga en todos los medios: sólidos, líquidos, gases y plasmas. En la Fig. 4 mostrada a continuación se representa esquemáticamente una onda longitudinal y su dirección de propagación

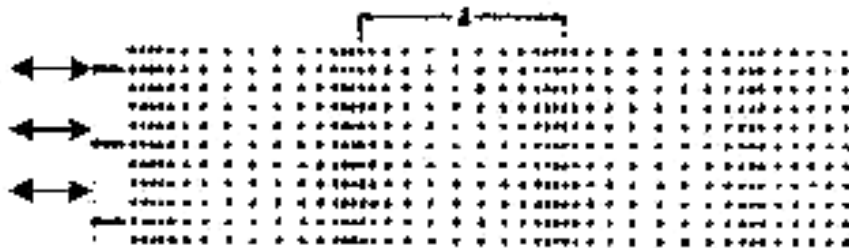


Fig. 4 Esquema de Propagación de las Ondas Longitudinales. [Tomado de Krautkramer, J 1.969]

- Ondas transversales: En este tipo de onda ultrasónica, la vibración de la partícula en el medio se realiza linealmente pero perpendicular a la dirección de propagación del frente de ondas. Pueden viajar a través de medios sólidos y en

algunos líquidos muy viscosos. El esquema de propagación de estas ondas se muestra en la Fig. 5

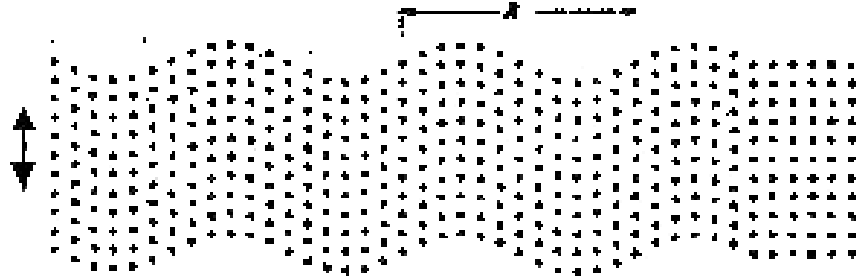


Fig. 5. Esquema de Propagación de las Ondas Transversales [Tomado de J. Krautkramer, 1.969]

Las ondas transversales no se propagan por los choques elásticos de las partículas del material, sino que se propagan por la poderosa fuerza de atracción que cada partícula tenga con su vecino, para que de esta forma toda la estructura del medio se mueva uniformemente.

La velocidad de las ondas transversales es aproximadamente la mitad de la velocidad de las ondas longitudinales para un mismo material.

- Ondas Rayleigh o de superficie: son conocidas también como ondas de Rayleigh. Estas ondas se propagan sobre la superficie de los sólidos cuyo espesor sea mayor que el tamaño de la longitud de la onda empleada. Bajo la acción de estas ondas, la superficie de un cuerpo posee un movimiento longitudinal y otro transversal, las moléculas ejecutan una trayectoria elíptica al paso del frente de onda. En la grafica mostrada en la Fig. 6 se muestra la representación de una onda de Rayleigh o de superficie.

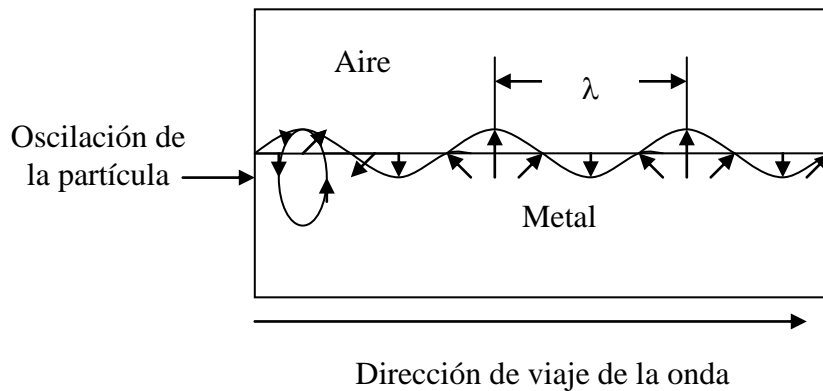


Fig. 6 Esquema de Propagación de las Ondas Superficiales [Tomado de J. Krautkramer, 1.969]

Las partículas ejecutan una elipse dextrogiro con relación a la dirección de propagación de la onda y cuyo eje cambia hasta que las partículas vibran solo en la dirección vertical y después ejecutan un movimiento levógiro que se atenúa hasta un 1% de la amplitud de vibración a la profundidad de una longitud de onda de la superficie. La onda se mueve hacia la derecha y las partículas sucesivamente según la dirección del movimiento ejecutan una elipse. La existencia de las ondas de Rayleigh implica un espesor del sólido mayor que la longitud de una onda, estas pueden propagarse solamente en sólidos.

- Las Ondas de Lamb: son conocidas también como ondas de placa. Este tipo de ondas es propagado en placas de materiales compuestos o metálicos, con espesores comparables al tamaño de la longitud de onda, consisten en complejas vibraciones que ocurren a través del espesor del material, en la cual partículas del medio siguen una trayectoria elíptica en el plano perpendicular a

la dirección de propagación. Su propagación dependerá de la densidad, propiedades elásticas y estructura del material, así como de la frecuencia.

3.3.2 TECNICA DE PULSO - ECO

La técnica por pulso-eco se basa en la emisión de pulsos ultrasónicos de corta duración los cuales se propagan dentro de un material a intervalos regulares de tiempo. Si los pulsos enviados encuentran en su recorrido una superficie reflectora, parte de la energía total del pulso será reflejada, a este pulso reflejado se le denomina eco. La intensidad del eco reflejado depende entre otros factores, de la proporción existente entre el tamaño de la superficie reflectora y diámetro del pulso ultrasónico incidente en la misma. La dirección del eco reflejado depende de la orientación de la superficie reflectora con respecto a la onda incidente. La energía reflejada y el tiempo de recorrido son medidos conjuntamente [Metals Handbook, Volumen 17, 1.994].

El funcionamiento de un sistema de pulso-eco consiste en un reloj electrónico que envía pulsos eléctricos para sincronización de los diferentes elementos del equipo. El pulsador envía a su vez pulsos eléctricos al transductor, el cual por medio de un efecto piezoeléctrico transforma dichos pulsos eléctricos en vibraciones mecánicas. Las vibraciones mecánicas son transmitidas a una pieza mediante el uso de un acoplante. Cuando el haz ultrasónico se encuentra con una interfase perpendicular al haz, el mismo es reflejado y retorna al transductor. El retorno del haz se realiza en la misma trayectoria y a la misma velocidad que el haz incidente, pero en dirección contraria, hasta llegar de nuevo al acoplante y de allí pasar al transductor. Cuando el haz retorna al transductor, la vibración mecánica hace que vibre de nuevo el cristal piezoeléctrico del transductor,

produciéndose ahora un pulso eléctrico, que pasa a un amplificador y es mostrado en una pantalla de rayos catódicos CRT. Este proceso es repetido miles de veces por segundo para cada pulso sucesivo, mientras que la pantalla muestra los ecos reflejados cada cierto tiempo. [Metals Handbook, Vol. 17, 1.994]

El pulso emitido aparece en visualización tipo A, como un pico en el borde izquierdo de la pantalla, y el eco aparece como otro pico ubicado a cierta distancia hacia la derecha del anterior. La distancia es función del tiempo que invierte el pulso ultrasónico en recorrer la pieza inspeccionada (recorrido de ida y vuelta), y de la velocidad con que se desplaza de izquierda a derecha el punto luminoso en la pantalla (barrido).

En la técnica de pulso-eco, las ondas ultrasónicas que viajan a través de un material se atenúan en su recorrido, y se reflejan en las interfaces. El haz ultrasónico que es reflejado se visualiza y se analiza para determinar el tipo y ubicación de discontinuidades presentes en el material.

Existen tres formas de visualizar el haz reflejado por el equipo de ultrasonido, las cuales operan sobre la base de la amplitud y/o el tiempo de recorrido del haz ultrasónico y son: Tipo A (A-Scan), Tipo B (B-Scan) y Tipo C (C-Scan).

3.3.2.1 Presentación Tipo A:

Este tipo de presentación proporciona una visualización en forma simultánea de la amplitud y el tiempo de recorrido del eco recibido en un punto de la superficie de la pieza inspeccionada. El diagrama de funcionamiento de un sistema de ultrasonido por

pulso – eco con representación Tipo A (A-Scan) se muestra en la Fig. 7. La representación Tipo A (A-Scan) es la forma mas empleada, pudiendo ser utilizada en el análisis, tamaño y localización de discontinuidades.

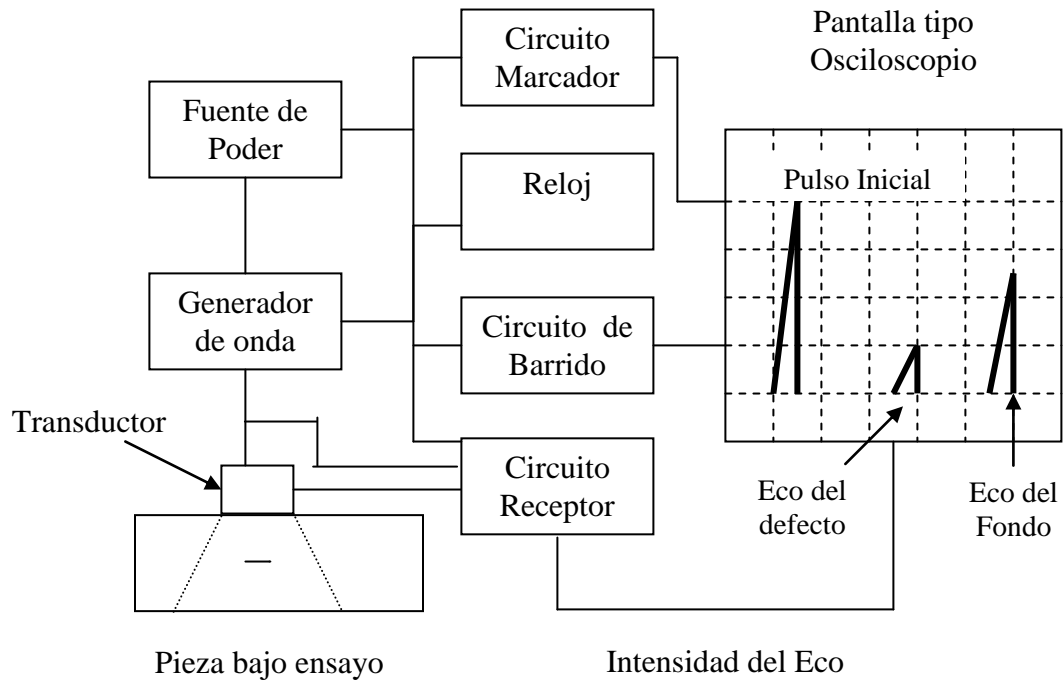


Fig. 7 Diagrama de funcionamiento de un sistema de ultrasonidos por pulso eco con representación Tipo A (A-Scan) [Tomado Metals Handbook, Vol. 17, 1.994]

3.3.2.2 Presentación Tipo B:

En este tipo de presentación se visualiza el tiempo de recorrido de los ecos reflejados a lo largo de una línea de la superficie de un material. La presentación Tipo B (B-Scan) muestra la relativa profundidad de los puntos en donde se producen los ecos reflejados. Esto es empleado para determinar el tamaño de la discontinuidad en una dirección, posición y profundidad y, en cierto grado, la forma y orientación de la

discontinuidad. El diagrama de funcionamiento de un sistema de ultrasonido por pulso eco con representación Tipo B (B-Scan) se muestra en la Fig. 8.

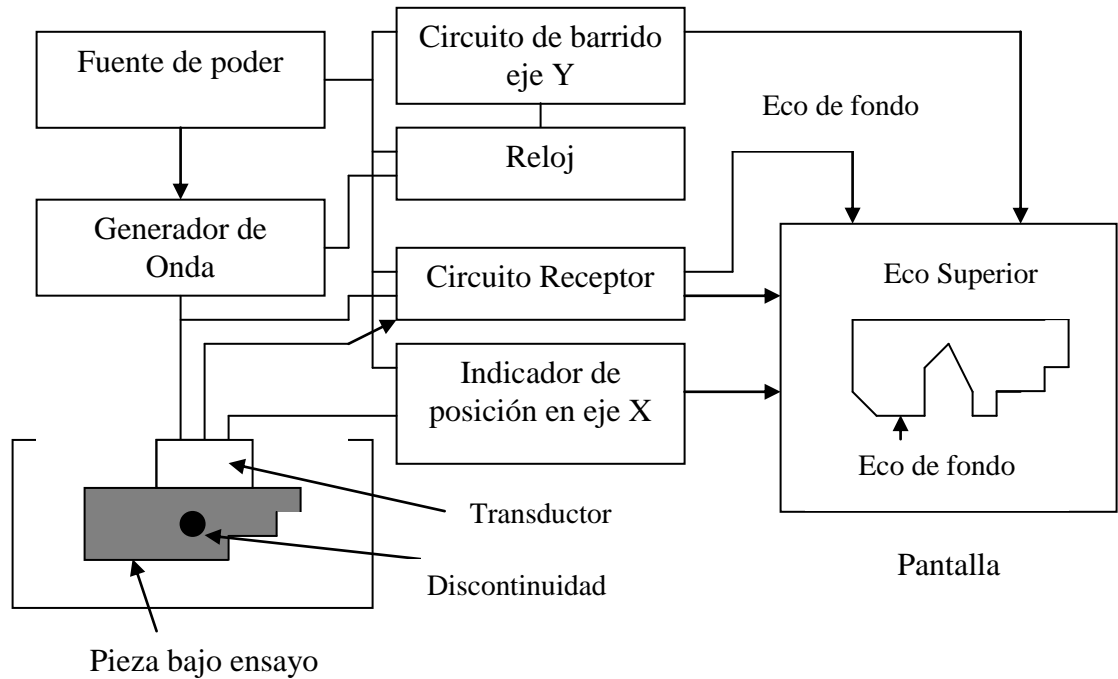


Fig. 8. Diagrama de funcionamiento de un sistema de ultrasonidos por pulso eco con representación Tipo B (B-Scan) [Tomado Metals Handbook, Vol. 17, 1.994]

3.3.2.3 Presentación Tipo C:

El modo Tipo C (C-Scan) brinda un barrido real de la ubicación de las discontinuidades presentes en un plano de una determinada pieza. En la Fig. 9 se muestra el modo del sistema de pulso-eco de presentación Tipo C. Este se basa en el monitoreo del

tiempo de vuelo del eco reflejado, y la información se muestra en forma de profundidades, luego de ser procesada.

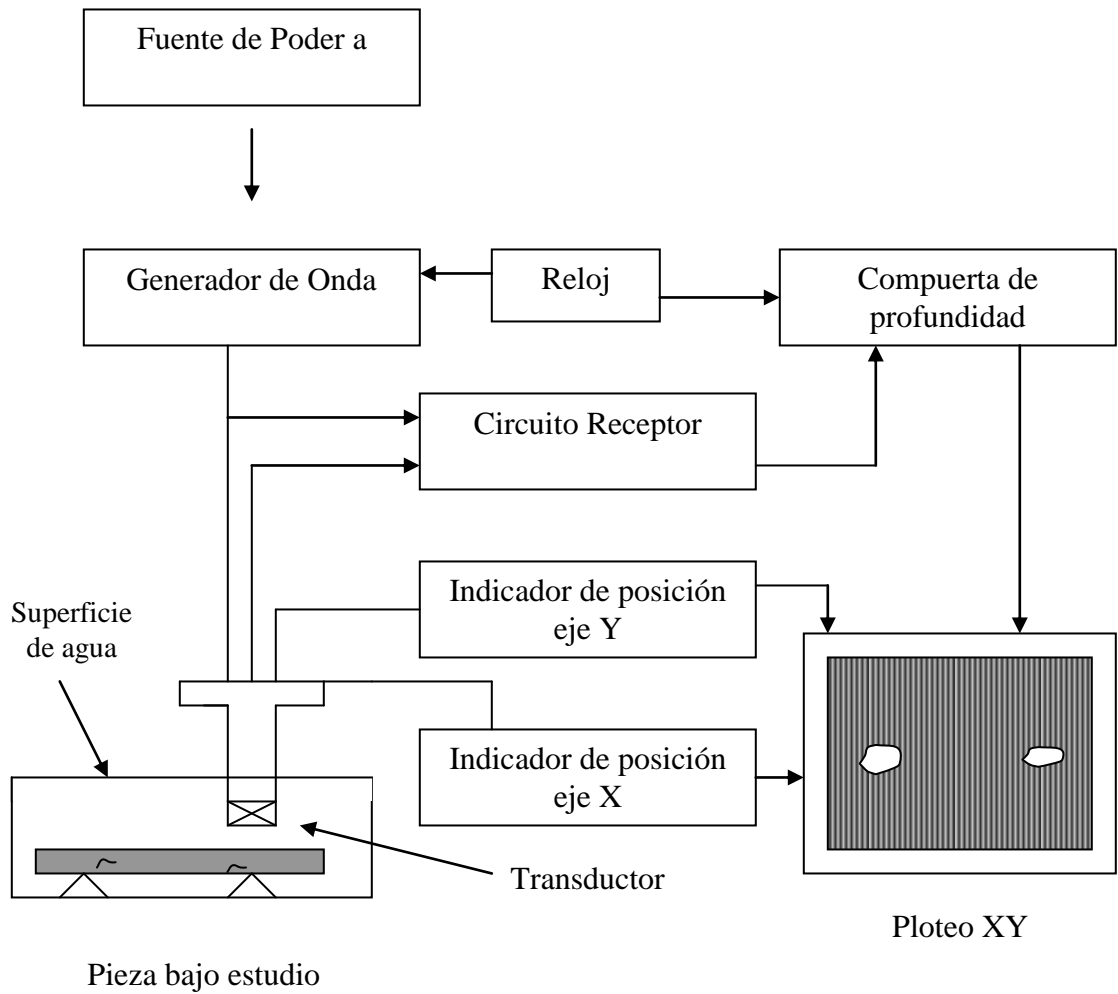


Fig. 9 Diagrama de funcionamiento de un sistema de ultrasonidos por pulso eco con representación Tipo B (B-Scan) [Tomado Metals Handbook, Vol. 17, 1.994]

3.3.3 FACTORES QUE AFECTAN LA INSPECCION ULTRASONICA

Entre las variables que determinan la capacidad de detección de discontinuidades a través de la técnica por pulso-eco se encuentran: características del transductor, propiedades del haz ultrasónico y características del material.

3.3.3.1 Características del transductor

Dentro de las principales características de los transductores que afectan en forma notoria la inspección ultrasónica se tienen: la frecuencia del transductor y el diámetro del mismo.

La frecuencia “f” es el número de ciclos en la unidad de tiempo. La unidad de frecuencia es el Hertz . Esta variable influye de varias maneras en la inspección de una pieza. La capacidad de detección de discontinuidades pequeñas, es decir, la sensibilidad se incrementa con el empleo de altas frecuencias. La resolución del equipo, que es la habilidad de separar con claridad señales de discontinuidades o defectos muy próximos, se ve favorecida con el uso de altas frecuencias. La longitud de onda es menor a medida que la frecuencia sea más alta.

El valor de la frecuencia “f” puede ser obtenido en función de los parámetros acústicos de longitud de onda “λ” y velocidad acústica “V” mediante la siguiente ecuación:

$$f * \lambda = V \quad (8)$$

Donde:

$f=$ es la frecuencia del transductor

$\lambda=$ es la longitud de la onda

$V=$ es la velocidad acústica.

La penetración del ultrasonido, que es la máxima profundidad que alcanza el haz ultrasónico dentro del material, se ve disminuida con el uso de frecuencias elevadas, especialmente en los metales. Para un mismo diámetro de transductor, si la frecuencia usada es mayor, la divergencia del haz es menor. El campo cercano, que es una zona de interferencias de las señales o pulsos emitidos, es mayor con el uso de frecuencias elevadas.

3.3.3.2 Características del material

Cada material que es inspeccionado posee características propias, que afectan en forma favorable o desfavorable la inspección ultrasónica. A continuación se citan las características que afectan mayormente el haz ultrasónico.

- Impedancia acústica: se define como la resistencia que ofrece un medio a la propagación de una onda ultrasónica, en otras palabras, es la resistencia que ofrece un medio a la vibración de sus partículas.

La impedancia acústica se denota con la letra “Z” y puede ser expresada de dos formas. Una se expresa como el producto de la densidad del material evaluado (ρ) por la velocidad de la onda longitudinal (V_L) en el material:

$$Z = \rho * V_L \quad (9)$$

Y la otra se expresa como una relación existente entre la presión acústica (P) y la velocidad instantánea de vibración (V) de la partícula:

$$Z = \frac{P}{V} \quad (10)$$

La impedancia acústica es una constante del material. Si un medio posee una impedancia acústica alta, sus elementos de masa viajan a velocidades muy bajas, y se requerirá de grandes cambios de la presión acústica, o sea, el medio ofrece una gran resistencia a las deformaciones elásticas causadas por la onda. Las propiedades acústicas de varios materiales se muestran en la Tabla 1.

- Condición superficial: la presencia de pintura, oxido, discontinuidades y cualquier partícula extraña sobre la superficie del material puede afectar la señal ultrasónica. La rugosidad superficial ocasiona pérdidas de la sensibilidad debido a la dispersión. Estas pérdidas son mayores cuando la rugosidad es aproximadamente del orden de la mitad de la longitud de onda. Además, puede ocasionar pérdidas de la resolución en la superficie cercana al transductor, debidas a un alargamiento del pulso transmitido.

Las capas de pintura o de revestimiento producen variaciones considerables en la sensibilidad y la precisión de las mediciones. La pintura es un material amorfo que produce una alta absorción ultrasónica y, la diferencia de las impedancias acústicas de la pintura y el material a evaluar causa pérdidas de energía adicionales. El valor de la impedancia acústica de la pintura es entre 1/4 y 1/6 que el de la mayoría de los metales, y se producen reflexiones en la

interfase pintura-metal base, que conllevan a reducciones de la amplitud del eco de fondo en el metal. Ambos factores de pérdidas causan un incremento considerable en la ganancia del equipo. Por tanto es recomendable la remoción de las capas de pintura o revestimiento previamente a una inspección.

Para asegurar una buena transmisión del ultrasonido entre el transductor y la pieza ensayada se recomienda que la superficie se encuentre libre de capas de óxido o de pintura, y que la misma sea lo menos rugosa posible, para lo cual se recomienda una adecuada limpieza superficial y el uso de protectores (zapatitas) en los transductores.

- **Tamaño de grano:** Este puede ser considerado como una de las fuentes de atenuación presentes con mayor frecuencia en la mayoría de las inspecciones de metales, tales como acero inoxidable, debido al efecto que posee una estructura cristalina gruesa sobre la interacción con ondas ultrasónicas.

Tabla 1. Propiedades acústicas de varios materiales [Tomado de ASM Handbook. Vol 17,1994]

MATERIAL	DENSIDAD [10 ³ k/m ³]	VELOCIDAD DE LA ONDA LONGITUDINAL [10 ³ m/s]	VELOCIDAD DE LA ONDA TRANSVERSAL [10 ³ m/s]	IMPEDANCIA ACUSTICA [10 ⁶ kg/ m ² s]
METALES				
Aluminio	2,7	6,32	3.08	17
Plomo	11,4	2,16	0.7	25
Acero	7,85	5,9	3.23	46.5
Oro	19,3	3,24	1.2	63
Hierro forjado	7,2	3,5-5,8	2.2-3.2	25-40
Cadmio	8,6	2,78	1.5	24
Cobre	8,9	4.7	2.26	42
Magnesio	1,7	5.77	3.05	10
Bronce	8,5-8,6	3.83	2.05	33
Níquel	8,9	5.63	2.96	50
Platino	21,4	3.96	1.67	85
Mercurio	13,6	1.45		20
Plata	10,5	3.6	1.59	38
Bismuto	9,8	2.18	1.1	21
Zinc	7,1	4.17	2.41	30
Estaño	7,3	3.32	1.67	24
NO METALES				
Resina	1,15-1,3	2.5-2.8	1.1	2.8-3.7
Oxido de Aluminio	3,7-3,9	10		37-39
Hielo	0,9	3.98	1.99	3.6
Vidrio	2,5-3,6	4.26-5.66	2.56-3.42	14-15
Caucho	1,1-1,6	2.3		2.5-3.7
Vulcanizado				
Parafina	0,86-0,92	2.2		1.9-2.0
Perspex	1,18	2.73	1.43	3.2
Poliestireno	1,05	2.67		2.8
LIQUIDOS				
Glicerina	1,26	1.92		2.4
Diesel	0,88-1,02	1.25		1.1-1.3
Aceite SAE 20 a 30	0,89-0,96	1.74		1.-1.7
Agua a 20°C	1,0	1.4		1.5

3.3.3.3 Características del haz ultrasónico

La superficie del cristal piezoeléctrico no vibra de manera uniforme bajo la acción del impulso eléctrico aplicado, sino que lo hace de forma similar a un mosaico de pequeños cristales individuales, que vibran en la misma dirección pero no siempre en la misma fase. Cada uno de estos pequeños cristales constituye un emisor de onda, produciendo por superposición de las ondas producidas por todos ellos, un frente de onda plano cerca de la superficie de la pastilla piezoeléctrica, aunque debido a los frentes de onda esféricos producidos en los bordes de la pastilla, se crean haces de onda secundarios conocidos como lóbulos.

Si se mide la intensidad del haz sonoro a varias distancias del transductor, se observa que es posible distinguir tres zonas diferentes tal y como se muestra en la Fig. 10

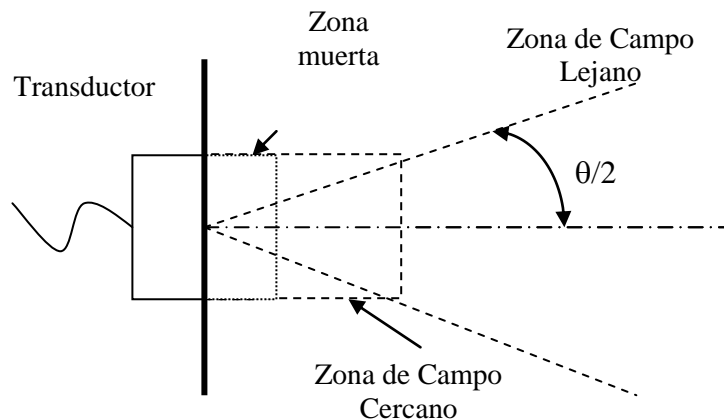


Fig. 10 Zonas del Haz ultrasónico[Tomado de ASM Handbook. Vol 17,1994]

De la figura anterior se destaca la zona muerta del haz ultrasónico. Esta se debe a la interferencia producida por las vibraciones del cristal, y su presencia en el haz

está determinada por el tiempo de oscilación, o sea, el tiempo requerido por el cristal para generar el pulso de vibración. Se le llama zona muerta, pues cualquier discontinuidad presente en ésta, será totalmente obviada durante el tiempo de oscilación del cristal, debido a que la presión acústica del haz es nula en toda su profundidad.

Por otro lado, debido al fenómeno de interferencia en las regiones cercanas al cristal, se producen zonas en las que las presiones acústicas alcanzan valores máximos y mínimos, siendo en consecuencia el campo ultrasónico irregular. La región donde ocurre esto se denomina “campo cercano”. En la zona de campo cercano o zona de Fresnel como también es llamada, por efecto de las fluctuaciones de la intensidad, es sumamente difícil lograr la detección de discontinuidades, pues se producirán indicaciones múltiples, y la amplitud de las mismas tendrán grandes variaciones de acuerdo a la distancia desde la superficie reflectora a la cara del transductor.

La longitud del campo cercano puede ser calculada de mediante la expresión:

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4 * \lambda} \quad (11)$$

Donde:

N= es la longitud del campo cercano

D =es el diámetro físico del oscilador

λ = es la longitud de onda.

Pero para longitudes de onda λ muy cortas, comparadas con el diámetro del oscilador, se puede despreciar el término λ^2 en el numerador, entonces en algunos casos es práctica la aplicación de la siguiente expresión:

$$N = \frac{D^2}{4 * \lambda} = \frac{r^2}{\lambda} = \frac{A}{\pi * \lambda} \quad (12)$$

Donde:

r = es el radio del oscilador

A= es la superficie del oscilador.

Inmediatamente, después de la zona de interferencia o zona de campo cercano, comienza la zona de campo lejano o zona de Fraunhofer. En ésta zona, la intensidad o la presión sonora se estabiliza, teniendo mayor magnitud alrededor del eje imaginario del haz, y va disminuyendo hacia los límites del mismo. De la misma forma, con aumentos de la distancia, desde el límite entre las zonas de campo cercano y lejano, la presión disminuirá exponencialmente por efecto de varios factores productores de pérdidas.

El ángulo de divergencia “ θ ”, a partir del eje central del haz ultrasónico, se encuentra definido por la expresión:

$$\theta = 2 \operatorname{Asn} \left(0.5 \frac{\lambda}{D} \right) \quad (13)$$

Donde:

D = Diámetro del transductor

λ = Longitud de onda

Esta expresión es válida únicamente para valores de λ/D pequeños.

3.4 VELOCIDAD DE LA ONDA ULTRASÓNICA

Se puede calcular la velocidad ultrasónica de diversos tipos de ondas a partir de las siguientes constantes elásticas del material: el modulo de Elasticidad E (en N/m^2), técnicamente en kp/mm ; factor de conversión $1kp/mm^2 = 0,98 \cdot 10^7 N/m^2$ y la relación de Poisson ν (adimensional).

Para ondas longitudinales:

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (14)$$

Para ondas transversales:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (15)$$

Para ondas superficiales:

$$V_s = \frac{0,87 + 1,12 \nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1+\nu)}} \quad (16)$$

Entre si estas velocidades están relacionadas por las siguientes expresiones:

$$V_T = V_L \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (17)$$

Y además

$$V_S = V_T \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (18)$$

Por otro lado, según referencias de experimentos de Ingeniería Biomecánica, se cita igualmente que la velocidad de una onda ultrasónica “V” depende de la elasticidad y de la densidad (ρ) del material bajo estudio. Para ondas longitudinales:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (19)$$

Donde “E” es el módulo Elasticidad o Módulo de Young. Esta ecuación es válida para una varilla homogénea de longitud mucho mayor que la longitud de onda y con un ancho mucho menor que la longitud de onda. Si el ancho es mucho mayor que la longitud de onda, la velocidad de la onda viene dada por el modulo tensorial. En 1 o en la dirección X esto es:

$$C_{1111} : V = \sqrt{\frac{C_{1111}}{\rho}} \quad (20)$$

En 3 o en la dirección Z es C_{3333} . Para materiales isotrópicos:

$$C_{1111} = C_{2222} = C_{3333} = C_{4444} = E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (21)$$

con “ ν ” como el coeficiente de Poisson.

La velocidad puede ser medida determinando el tiempo de retardo de la onda cuando pasa a través del material de muestra. La velocidad es la distancia (espesor) dividido por el tiempo de retardo. En este método un transductor envía la onda y otro la recibe. También se pueden usar dos muestras de material y medir la diferencia de retardo en las muestras. La velocidad V se determina por la diferencia Δt en el tiempo de vuelo de la señal, conocidas las longitudes L_1 y L_2 de los especímenes; esto es,

$$V = \frac{(L_1 - L_2)}{\Delta t} \quad (22)$$

También es posible determinar la velocidad de la onda longitudinal empleando un transductor del tipo emisor-receptor. En este caso se crean una serie de ecos, para lo cual se utiliza la medición del tiempo de retardo entre los ecos adyacentes. En los cálculos se usa como longitud la distancia total recorrida por la onda.

3.5 ATENUACION DEL HAZ ULTRASONICO

Supóngase un haz paralelo de ultrasonido propagándose en la dirección x de un medio y que la intensidad, o la amplitud del exceso de presión, se mide en x_1 y x_2 (Fig.11). La palabra atenuación se emplea para describir la reducción total de intensidad, o de la

amplitud del exceso de presión, del haz entre x_1 y x_2 [Cracknell, 1983]. Esta atenuación será el resultado de:

- La absorción de energía por el medio entre x_1 y x_2
- La pérdida de energía durante el trayecto del haz, por reflexión, refracción, difracción y dispersión.

La absorción implica la conversión del ultrasonido en alguna otra forma de energía, mientras que el caso de la reflexión, refracción, difracción y dispersión, el ultrasonido cambia, simplemente de dirección. La absorción dependerá de la naturaleza del medio entre x_1 y x_2 y puede, por tanto, suministrar información acerca de las propiedades físicas de éste. Las pérdidas por reflexión, refracción, difracción y dispersión dependen de la geometría del sistema, así como de sus propiedades físicas. La reflexión y la refracción tendrán lugar en los límites entre zonas con distinta impedancia acústica. La difracción se producirá en las barreras interpuestas en el trayecto del haz. Las pérdidas por dispersión son características de la estructura del material; por ejemplo, en un policrítal, depende del tamaño de grano.

Para un haz de ultrasonido, la disminución $-\delta I$ de la intensidad I al recorrer un distancia δx del medio es proporcional a I y a δx . De esta manera

$$-\delta I = \alpha_1 I \delta x \quad (23)$$

y así

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha_I I \quad (24)$$

donde α_I es una constante. De aquí

$$I = I_0 e^{(-\alpha_I x)} \quad (25)$$

Por otra parte se puede considerar el exceso de presión p que cumple que

$$p = p_0 e^{(-\alpha_p x)} \quad (26)$$

donde α_p recibe el nombre de coeficiente de atenuación del medio.

El exceso de presión $p(x,t)$ es proporcional al desplazamiento $u(x,t)$. Ya que la intensidad de una onda ultrasónica es proporcional al cuadrado del desplazamiento, se tiene entonces que $I \propto p^2$. De las ecuaciones (25) y (26) se obtiene:

$$e^{(\alpha_I x)} = \frac{I}{I_0} = \frac{p^2}{p_0^2} = e^{(\alpha_p x)} \quad (27)$$

y por tanto

$$\alpha_I = 2 \alpha_p \quad (28)$$

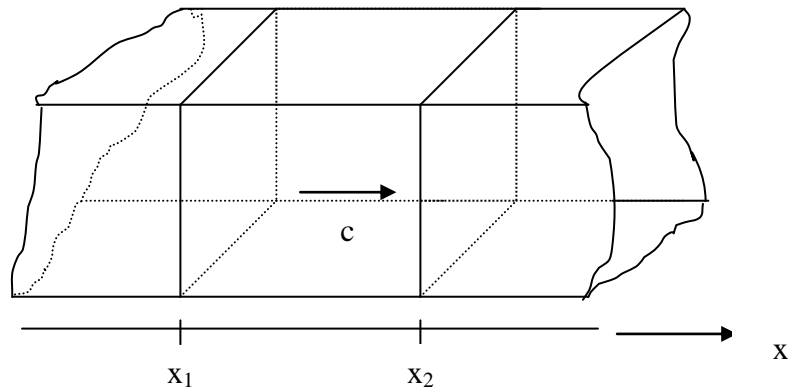
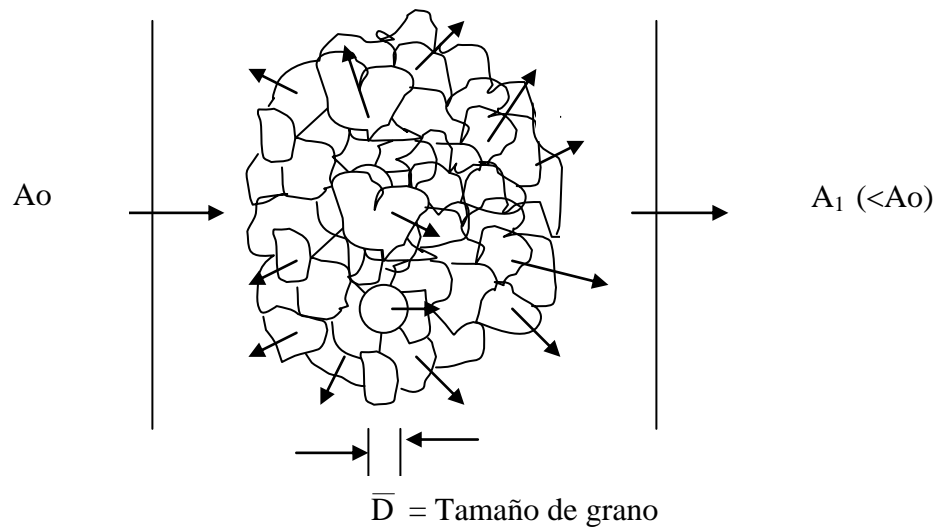


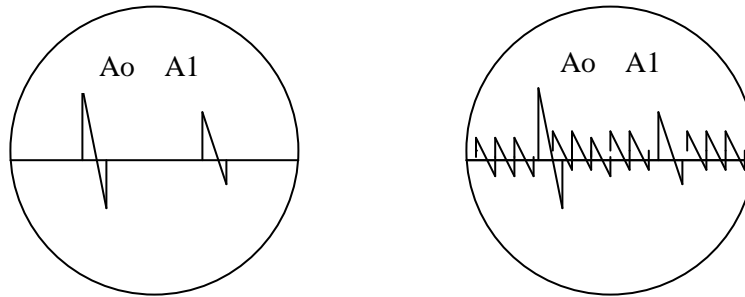
Fig. 11 Propagación del ultrasonido en la dirección x. [Tomado de Cracknell, 1.983]

En general existen varias fuentes de atenuación en materiales, aquella producto de la dispersión en el grano (también llamada algunas veces ruido) y la atenuación debida a la absorción. Las pérdidas por dispersión de grano surgen debido a que a un nivel microestructural, los metales están compuestos de pequeños granos cristalinos (Fig. 12a) que dispersan la onda incidente en muchas direcciones diferentes, resultando en una pérdida de amplitud con distancia en la dirección de propagación. En la pantalla de un osciloscopio, los efectos de esta dispersión aparecen como ruido de alta frecuencia, en el cual está la señal atenuada. (Fig. 12b) [Schmerr L, 1998].

La dependencia que tiene la frecuencia del coeficiente de atenuación sobre la dispersión de grano se debe principalmente al tamaño de la longitud de onda λ con relación al diámetro promedio de grano \bar{D} , como es mostrado en la tabla 2, donde \bar{V} es el volumen promedio de un grano.



(a)



(b.1)

(b.2)

Fig. 12 (a) Atenuación de la onda debido a dispersión de grano. (b) Representación de la atenuación ultrasónica. (b.1) Atenuación de la onda (b.2) Atenuación de la onda con dispersión de grano. [Tomado de Schmerr L, 1998]

En contraste con la atenuación debida a la dispersión de grano, están las pérdidas por absorción debidas a la conversión de energía mecánica en calor (pérdidas por viscosidad) durante el movimiento de la onda. Para estas pérdidas el coeficiente de atenuación por absorción típicamente varía con la frecuencia como f^2 .

Tabla 2. Atenuación debido a la dispersión de grano como función de la frecuencia.
[Tomado de Schmerr L, 1.998]

DIAMETRO DE LONGITUD DE ONDA	TIPO DE DISPERSION	VARIACION DE LA FRECUENCIA
$\lambda / \bar{D} \gg 1$	Rayleigh	$\bar{V} f^4$
$\lambda / \bar{D} \cong 1$	Estocastica	$\bar{D} f^2$
$\lambda / \bar{D} \ll 1$	Difusión	$1 / \bar{D}$

En el agua por ejemplo, a temperatura ambiente la atenuación ha sido medida como:

$$\alpha(f) = 25.3 \times 10^{-15} f^2 \frac{\text{Np}}{\text{m}} \quad (29)$$

Donde :

f = Frecuencia en Hz

α = Coeficiente de atenuación.

Las unidades de α son nepers (Np) por metro (un neper es una unidad adimensional).

Efectos similares también son importantes en sólidos viscoelásticos, pero tales materiales no son comúnmente usados en ensayo ultrasónico.

Ambas pérdidas limitan las posibilidades de los ensayos no destructivos por ultrasonidos en materiales, pero según dos vertientes ligeramente distintas:

- La absorción pura debilita la energía transmitida o la amplitud del eco, para contrarrestar este efecto, hay que incrementar el voltaje de emisión y la amplificación o, también recurrir el uso de frecuencias mas bajas.
- La dispersión es mucho más perturbadora, por ejemplo, en la técnica de pulso-eco, no solo reduce la amplitud de la señal, sino que además produce ecos o reflexiones parásitas que pueden enmascarar falsas indicaciones.

La atenuación α representa el coeficiente de la caída exponencial que describe los efectos de atenuación en un material. En muchos estudios de atenuación los autores prefieren establecer sus mediciones en términos de relaciones de amplitud medido decibeles, de modo que es necesario relacionar estos valores de decibeles con α . Para obtener esta relación considérese “ p_1 ” como la presión en $z = z_1$ para una onda plana unidimensional viajando en la dirección positiva de z , y “ p_2 ” como la presión en $z = z_2$, donde $z_2 > z_1$. Entonces, la relación de estas dos presiones viene dada por:

$$\left| \frac{p_1}{p_2} \right| = \exp(\alpha \Delta z) \quad (30)$$

Donde:

$$\Delta z = z_2 - z_1$$

Por definición el cambio de amplitud en decibeles $\Delta p(\text{dB})$ está dado mediante:

$$\Delta p_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{P_1}{P_2} \right| = 20 \log_{10} [\exp(\alpha \Delta z)] \quad (31)$$

$$\Delta p_{dB} = 20 \alpha \Delta z \log_{10} e \quad (32)$$

$$\Delta p_{dB} = 8.686 \alpha \Delta z \quad (33)$$

El coeficiente de atenuación α (dB/L), medido en decibeles sobre longitud unitaria está definido como:

$$\alpha_{\frac{dB}{L}} = \frac{\Delta p_{dB}}{\Delta z} \quad (34)$$

De la ecuación (33) se obtiene la relación:

$$\alpha_{\frac{dB}{L}} = 8.686 \alpha \quad (35)$$

$$\alpha \cong \frac{k}{2c_f} \quad (36)$$

3.4 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

El procesamiento digital de señales (PSD) es el conjunto de técnicas matemáticas, encargadas de analizar las características de una señal, descomponerla y

codificarla en una forma en que se pueda transmitir fácilmente por un canal de comunicación y extraer de ella la información requerida para múltiples aplicaciones. El procesamiento de señales puede realizarse a través de computadoras personales o empleando microprocesadores denominados procesadores digitales de señales (DSP).

Una señal en forma simplificada, se puede entender como cualquier mecanismo que es empleado para transmitir información. Ejemplos de señales son: una conversación telefónica, ondas electromagnéticas enviadas por radar, sonido viajando en el aire, etc. [Irrázaval, 1999] Igualmente una señal es una variable de una o más dimensiones, y por definición de variable ésta puede tomar distintos valores. En muchos casos toma diferentes valores a medida que el tiempo transcurre, es decir, puede ser por ejemplo una función del tiempo. El sonido puede ser escrito como la presión en el aire, en un lugar específico, como función del tiempo. Pero también puede ser descrito como la presión del aire en un momento específico, como función del lugar. En general, las señales son funciones del tiempo y del espacio, pero es común sólo preocuparse de una dependencia a la vez.

Las señales en principio pueden ser clasificadas como continuas o discretas. [Irrázaval, 1999]. En el caso de las señales de tiempo continuo la variable independiente es continua y entonces estas señales están definidas para una sucesión continua de valores de la variable independiente. Por otra parte, las señales de tiempo discreto están solo definidas en tiempo discretos y, en consecuencia para estas señales, la variable independiente toma solo un conjunto de valores discretos.

Cuando se trabaja con valores en el dominio temporal, se pueden calcular fácilmente valores como media, desviación estándar, varianza, etc., sin embargo, otro tipo de información, como el contenido de frecuencia de la señal, no es evidente en el dominio temporal, pero si en el dominio frecuencial, y una de sus aplicaciones más importantes es determinar si una señal está limitada a una banda o si contiene ciertas frecuencias características.

El PDS se refiere a un rango muy amplio de operaciones que se pueden realizar sobre las señales muestreadas. Estas operaciones pueden realizarse con distintos fines, bien para mejorar la información contenida en las señales ó bien como método de análisis y extracción de parámetros para evaluación y medida.

Las señales ultrasónicas se adquieren en el dominio temporal y pueden ser expresadas en función del tiempo. En la Fig. 13 (a) por ejemplo se puede observar un pulso ultrasónico representado por una senoide cuya frecuencia es la de vibración del transductor f_0 , modulada por una envolvente $A(t)$ cuya anchura determina el ancho de banda del pulso:

$$x(t) = A(t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) \quad (37)$$

Una técnica muy usada en PDS consiste en transformar la señal desde el dominio del tiempo al de la frecuencia, lo que permite representar ciertas propiedades de las señales de forma más clara y compacta. Por ejemplo, se puede advertir en qué rango de frecuencias se encuentra la energía del pulso, o bien conocer la frecuencia de un ruido para

deducir su procedencia, etc. (Fig. 13 b). A partir del espectro de frecuencias también se pueden obtener datos cuantitativos y deducir ciertas características del material como la atenuación, velocidad del sonido, etc.

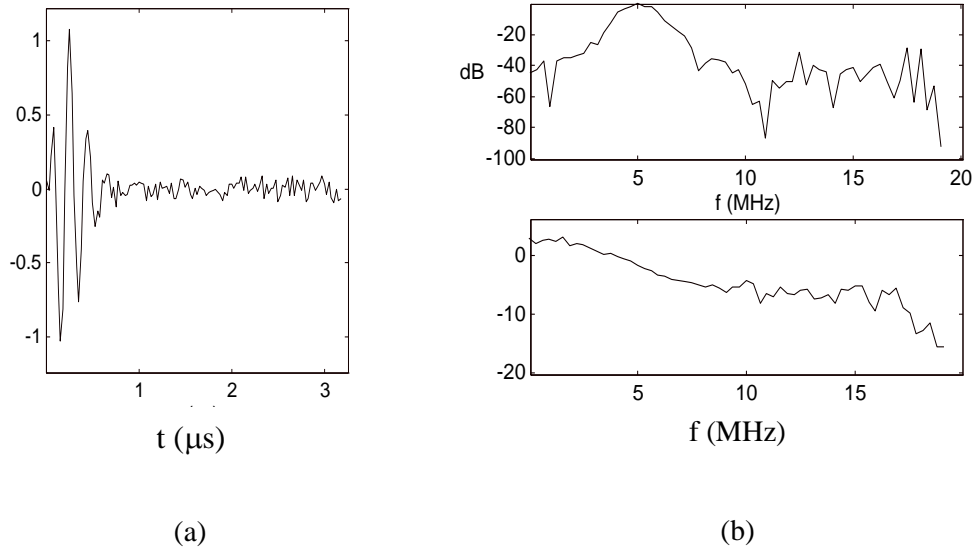


Fig. 13 Señales ultrasónicas en dominios temporal y frecuencial. (a) Pulso ultrasónico en el dominio temporal. (b) Pulso ultrasónico en el dominio frecuencial. (amplitud y fase). [Tomado de Ullate, 1999]

La integral de Fourier permite representar en el dominio frecuencial la amplitud y fase de una señal continua a partir del dominio temporal y viceversa. Así la transformada directa de Fourier es:

$$X(f) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (38)$$

y la transformada inversa:

$$x(t) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi f t} df \quad (39)$$

De esta manera, en el área del procesamiento de señales, la transformada de Fourier tiene gran importancia para conocer, analizar y resolver los diferentes sistemas, ya que permite trasladar de una forma reversible, la información de una serie temporal al dominio de la frecuencia y viceversa. La información de la señal, que a menudo se encuentra dispersa en el dominio del tiempo, se puede concentrar en el de la frecuencia haciendo más fácil su estudio y procesamiento. Otra ventaja que aporta usar el dominio frecuencial es que muchos de los sistemas y fenómenos lineales asociados a inspección ultrasónica pueden ser descritos mediante sus características de respuesta en frecuencia lo cual facilita su estudio y caracterización. [Ullate et al, 1999]

La transformada discreta de Fourier permite transformar una secuencia de datos, normalmente obtenidos muestreando la señal continua, al dominio discreto de la frecuencia. En este caso, la transformada directa para una secuencia de N puntos $x(k)$ es:

$$X(n) = \sum_{k=0:N-1} x(k) \exp(-2jkn/N) \quad (40)$$

para $0 \leq n \leq N-1$

Y la transformada inversa:

$$x(n) = (1/N) \cdot \sum_{k=0:N-1} X(k) \exp(2jkn/N) \quad (41)$$

para $0 \leq n \leq N-1$

El cálculo directo de la transformada discreta de Fourier requiere una fuerte carga computacional incluso para señales relativamente cortas, por lo que se han desarrollado diversos algoritmos que aceleran su obtención, destacando la transformada rápida de Fourier (FFT) presentada por Cooley y Tukey en 1965. Hoy en día, existen dispositivos de procesamiento de señal que permiten el cálculo rápido de la FFT, permitiendo obtener la FFT compleja de una señal de 1024 puntos en menos de un milisegundo [Ullate et al, 1999].

Aunque la FFT es la más usada, no significa que sea la única ni tampoco la que mejor resultados aporte. Existen otros tipos de transformadas además de la de Fourier capaces de manipular una secuencia de datos.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 MATERIAL

Se utilizaron para la fabricación de las probetas tres aceros diferentes suministrados por PDVSA- Intevep, con las siguientes características obtenidas de su ficha técnica provista por el fabricante:

Probeta “A”: Elaborada en acero de bajo carbono, la cual sirve como patrón de referencia para comparar los resultados de las señales obtenidas de las otras dos probetas. Es un material de aplicaciones comunes dentro de la industria.

Probeta “B”: Elaborada en acero de baja aleación, cuyo elemento principal en la aleación es el cromo, con una concentración de 4,75 – 5,50 % aproximadamente. Con excelente tenacidad y alta resistencia en caliente. El estado de entrega indica un tratamiento térmico de recocido.

Probeta “C”: Elaborada en acero de baja aleación, cuyo elemento principal en la aleación es el cromo, presente con una concentración de 11 – 13 % aproximadamente. Este material presenta gran resistencia al desgaste, elevada dureza, buena tenacidad y alta templabilidad. El estado de entrega indica un tratamiento térmico de recocido.

4.1.1 DIMENSIONES DE LAS PROBETAS

En función de los espesores característicos que poseen algunos componentes que operan en la industria petrolera, fabricados con aceros aleados al cromo, se establecieron las siguientes dimensiones de las probetas:

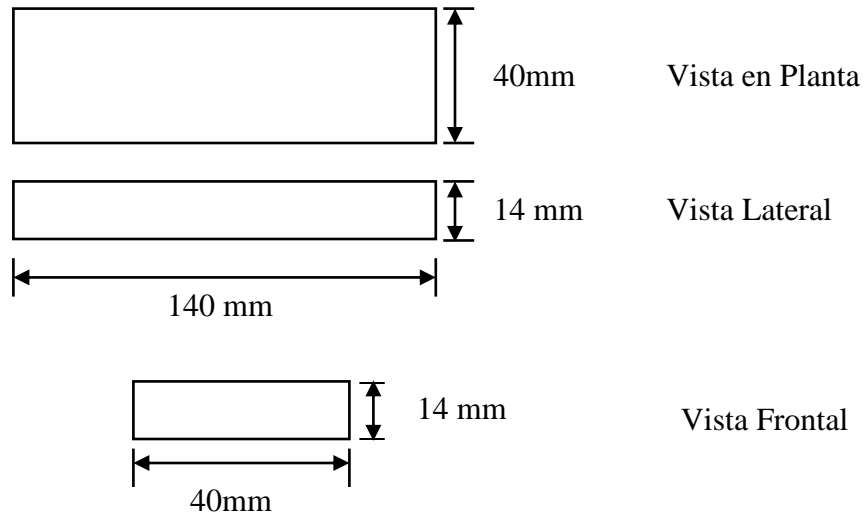


Fig.14 Dimensiones de las Probetas

Todas las muestras se fabricaron con las mismas condiciones de acabado superficial, con un valor promedio de rugosidad de $1,3 \mu$ para las tres muestras de estudio, medidas con un rugosímetro marca Mitutoyo, modelo SJ-301, considerando invariante la variación de las señales por efecto de la rugosidad.

4.1.2 COMPOSICION QUIMICA

La composición química de las aleaciones se determinó solo sobre los principales elementos que conforman la aleación, con el fin de corroborar los datos obtenidos de la ficha del proveedor del material. El método utilizado para el análisis

químico fue el de espectroscopia de absorción atómica, el cual se basa en la absorción de luz por los átomos de un elemento a cuantificar en una muestra, cuando se hace incidir en ella un haz de luz emitido por una lámpara con una rigurosa longitud de onda definida, la cual corresponde a la longitud de onda de emisión característica del elemento particular escogido para el análisis. La extensión a la cual la luz es absorbida provee una estimación de la concentración del elemento en la muestra, la cual debe estar en solución .

4.1.2.1 Composición química de la probeta “A” :

A partir de la ficha técnica emitida por el proveedor del material, se obtuvo la composición del mismo, el cual se muestra en la Tabla 3, presentada a continuación.

Tabla 3. Composición química de la probeta “A” según el proveedor

hierro	CARBONO	FOSFORO	SILICIO	MANGANESO
97-98%	0,37-0,43%	0,04% Max.	0,05% Max	0,3 –0,6 %

4.1.2.2 Composición química de la probeta B:

Según la ficha técnica suministrada por el proveedor, la composición de este material se muestra en la Tabla 4.

4.1.2.3 Composición química de la probeta C:

Según la ficha técnica, la composición de este material se muestra en la Tabla 5.

Tabla 4. Composición química de la probeta “B” según el proveedor

CARBONO	AZUFRE	FOSFORO	SILICIO	MANGANESO
0,32-0,45%	0,03% Max.	0,03% Max.	0,80-1,20%	0,20-0,50%

CROMO	NIQUEL	MOLIBDENO	VANADIO	TUNGSTENO
4,75-5,50%	-	1,1-1,7%	0,80-1,20%	-

Tabla 5. Composición química de la probeta “C” según el proveedor

CARBONO	AZUFRE	FOSFORO	SILICIO	MANGANESO
1,2-1,4%	0,04% Max.	0,04% Max.	0,30-0,50%	0,30-0,60%

CROMO	NIQUEL	MOLIBDENO	VANADIO	TUNGSTENO
11-13%	-	0,8-1,20%	1,10%	-

4.1.3 ANALISIS METALOGRAFICO

Las muestras fueron preparadas metalográficamente siguiendo técnicas convencionales según la norma ASTM E3, utilizando como reactivo de ataque una mezcla a partes iguales de Nital 4% y Picral 4%. El estudio se realizó mediante la técnica de microscopia óptica, adicionalmente se obtuvieron las microfotografías mediante el analizador de imágenes marca Buehler.

4.2 EQUIPOS E INSTRUMENTACION UTILIZADA

Durante el desarrollo de este trabajo se utilizaron los siguientes equipos e instrumentos.

4.2.1 EQUIPO DE ULTRASONIDO

El equipo de ultrasonido de la compañía Krautkramer, modelo USN 52L es un dispositivo detector de fallas, de amplia capacidad de memoria que posee las siguientes características:

- Es un equipo portátil, por lo que puede ser trasladado fácilmente a cualquier lugar donde se realice una inspección o estudio.
- Posee una pantalla de 480 x 320 pixeles.
- Peso de 5,98 libras con baterías incluidas.
- Modo para congelamiento de la imagen en pantalla disponible.
- Alarma para indicar rangos de dimensiones.
- Funciones alfanuméricas.
- Selección de unidades de medida en sistema métrico y en pulgadas.
- Modos de prueba en pulso-eco y de transmisión-recepción.
- Rango de 0.2 a 200 pulgadas en acero.

- Selector de amplio rango de frecuencias para inspección



Fig. 15 . Fotografía del Equipo de Ultrasonido USN 52L

En la Fig. 15 se puede apreciar el equipo de ultrasonido utilizado para el desarrollo de la investigación.

4.2.2 OSCILOSCOPIO DIGITAL

Fue utilizado un osciloscopio digital marca Tektronix, serie TDS 210 con las siguientes características:

- Ancho de banda seleccionable de 20 a 60 MHz.
- Longitud de registro de 2500 puntos
- Pantalla LDC de alta resolución y contraste.

- Velocidad de muestreo de 1GS/s (Giga muestreo por segundo)

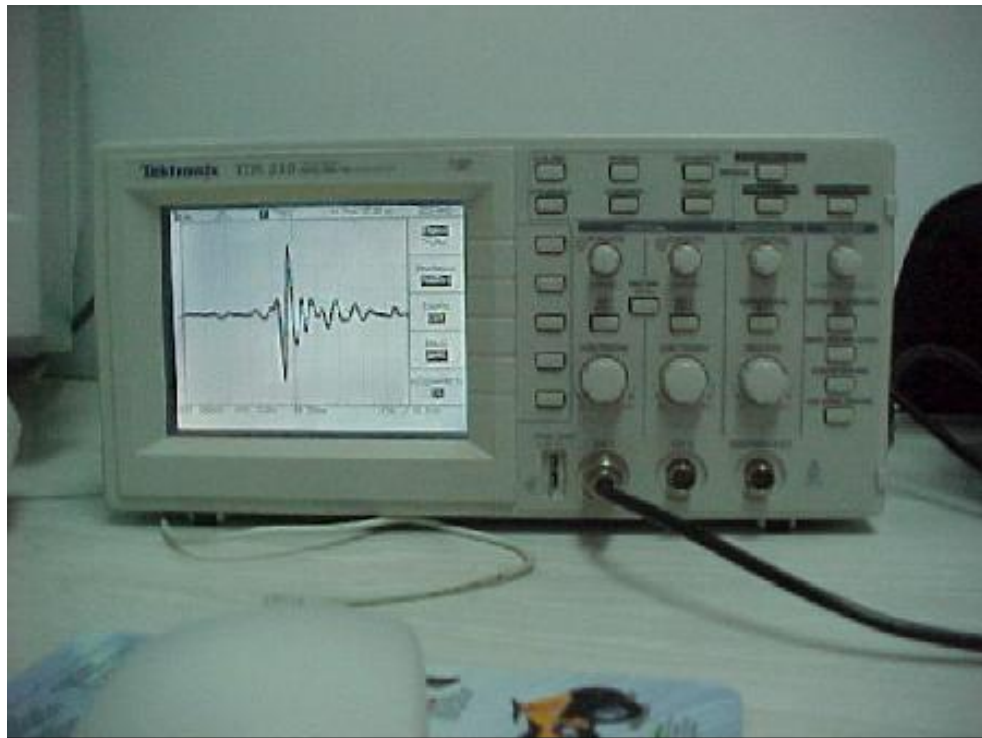


Fig. 16. Fotografía del Osciloscopio Tektronix TDS 210

En la fotografía mostrada en la Fig. 16 se observa el osciloscopio digital utilizado para la adquisición de la data obtenida del desarrollo experimental de esta investigación.

4.2.3 TRANSDUCTORES

Se utilizaron transductores del tipo doble cristal de incidencia normal, y para obtener un amplio rango de información, se seleccionaron una gama de transductores con las siguientes características:

Tabla 6. Transductores utilizados

IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL	FABRICANTE	FRECUENCIA	DIAMETRO
1	Krautkrämer	1.5 MHz	0.375"
2	Krautkrämer	2.25 MHz	0.25"
3	Krautkrämer	2.25 MHz	0.375"
4	Krautkrämer	2.25 MHz	0.5"
5	Krautkrämer	5 MHz	0.25"
6	Panametrics	5 MHz	0.375"
7	Krautkrämer	5 MHz	0.5"
8	Krautkrämer	7.5 MHz	0.25"
9	Krautkrämer	7.5 MHz	0.375"
10	Krautkrämer	10 MHz	0.25"
11	Panametrics	10 MHz	0.375"
12	Krautkrämer	10 MHz	0.5"

En la Fig. 17 se presentan algunos de los transductores empleados en el desarrollo de este proyecto.



Fig. 17 Transductores fabricados por Krautkrämer de 0.25" de Diámetro

4.2.4 ACOPLANTE

En vista de lo importante que es utilizar un medio acústicamente conductor interpuesto entre el transductor y la muestra de ensayo, y con el fin de eliminar la capa de aire que pudiera formarse entre el transductor y la superficie a estudiar de las muestras, se seleccionó glicerina como acoplante durante todas las mediciones.

4.3 CARACTERIZACION ULTRASONICA DE LAS PROBETAS

La caracterización de las probetas se hizo según diferentes montajes experimentales, en los cuales se adquirieron los datos correspondientes para estimar la velocidad ultrasónica longitudinal de la onda, la atenuación de las diferentes señales y el espectro de frecuencias característico de cada muestra para los diferentes transductores.

4.3.1 VELOCIDAD ULTRASONICA LONGITUDINAL

Con el fin de caracterizar cada muestra y poder realizar apropiadamente posteriores mediciones es necesario realizar el estudio de velocidad ultrasónica de la onda longitudinal. La siguiente matriz de ensayo se utilizó para la estimación de velocidad ultrasónica.

Tabla 7. Matriz de ensayo para la medición de velocidad ultrasónica longitudinal

TRANSDUCTOR	PROBETA	NUMERO DE MEDICIONES
1	“A”	10
3	“A”	10
6	“A”	10
9	“A”	10
11	“A”	10
1	“B”	10
3	“B”	10
6	“B”	10
9	“B”	10
11	“B”	10
1	“C”	10
3	“C”	10
6	“C”	10
9	“C”	10
11	“C”	10

Con el propósito de disminuir el rango de error experimental, se realizaron un total 10 mediciones por cada frecuencia empleada, para cada una de las probetas, obteniéndose finalmente 50 datos por cada una de las probetas en estudio. El arreglo experimental para este procedimiento se ilustra en la siguiente Fig. 18.

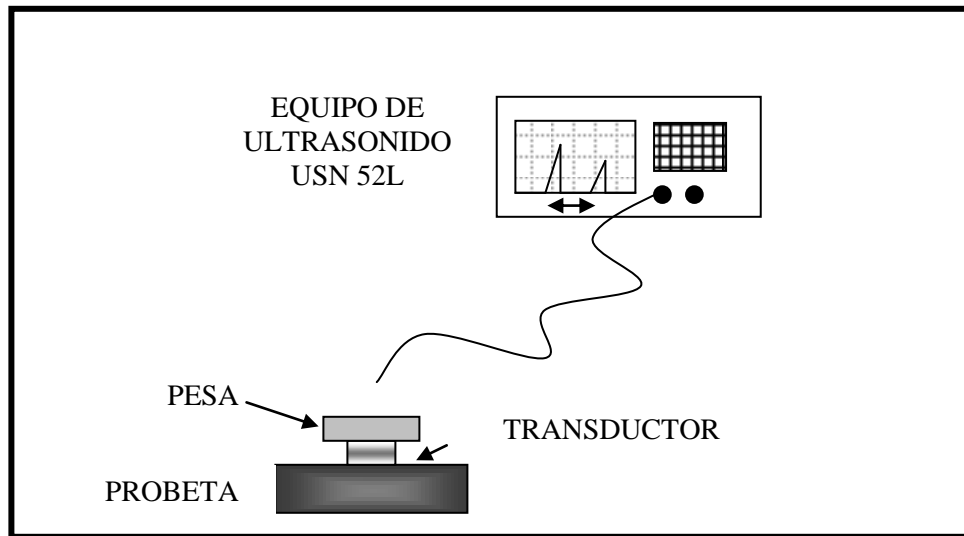


Fig.18. Arreglo experimental para la medición de la velocidad ultrasónica

La estimación de los valores de velocidad de la onda ultrasónica longitudinal en las diferentes muestras se basó en un procedimiento sencillo mediante el cual, el equipo de ultrasonido presenta un valor de velocidad, en función de la distancia que recorre la onda, la cual se corresponde con el espesor de las muestras y el tiempo que tarda en recorrer dicha distancia. Este tiempo recibe el nombre de como "tiempo de vuelo".

4.3.2 ATENUACION DE LAS SEÑALES

Con el fin de conocer la proporción de pérdida de amplitud de la onda ultrasónica al incidir sobre las diferentes muestras, se estableció el arreglo experimental mostrado a continuación en la Fig.19 para medir la caída en decibeles que sufre la señal ultrasónica en diferentes frecuencias.

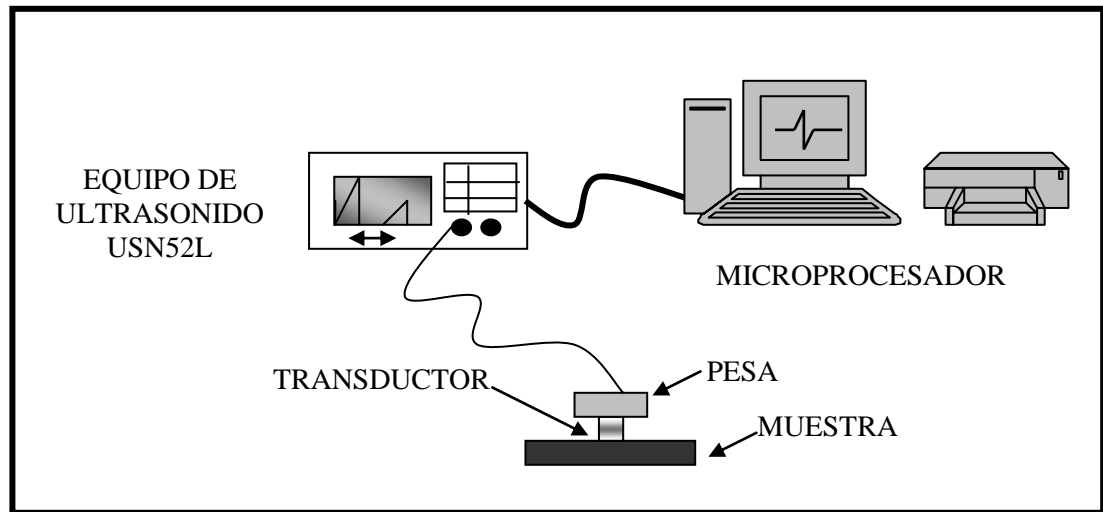


Fig. 19. Arreglo Experimental para la estimación de Atenuación Ultrasónica

La estimación de atenuación se obtuvo directamente de la señal representada en la pantalla del equipo de ultrasonido. Esta se llevó a cabo empleando transductores de frecuencias y diámetros diferentes, colocados aleatoriamente sobre la superficie de las probetas. Para ello se llevó y se mantuvo el primer eco de reflexión al 80% de la pantalla del equipo, observándose como los ecos sucesivos fueron perdiendo amplitud en la medida en que aparecieron diferentes reflexiones. Las señales típicas de cada frecuencia sobre los diferentes materiales de estudio fueron transmitidas al computador mediante el programa UltraDOC, versión 3.3 de la compañía Krautkramer, con el propósito de obtener las señales típicas y de realizar las gráficas correspondientes a la atenuación relativa de las señales. Tales datos fueron obtenidos considerando la matriz de ensayo mostrada en la Tabla 8.

Tabla 8. Matriz de ensayo para la medición atenuación

TRANSDUCTOR	PROBETA	NUMERO DE MEDICIONES POR PROBETA
1	“A”, “B” y “C”	2
2	“A”, “B” y “C”	2
3	“A”, “B” y “C”	2
4	“A”, “B” y “C”	2
5	“A”, “B” y “C”	2
6	“A”, “B” y “C”	2
7	“A”, “B” y “C”	2
8	“A”, “B” y “C”	2
9	“A”, “B” y “C”	2
10	“A”, “B” y “C”	2
11	“A”, “B” y “C”	2
12	“A”, “B” y “C”	2

En total se obtuvieron 24 gráficas para cada una de las diferentes muestras de estudio.

4.3.3 ANALISIS ESPECTRAL DE FRECUENCIAS

El diseño experimental para la adquisición de la data necesaria para obtener los espectros de frecuencia, puede ser apreciado en la Fig. 20

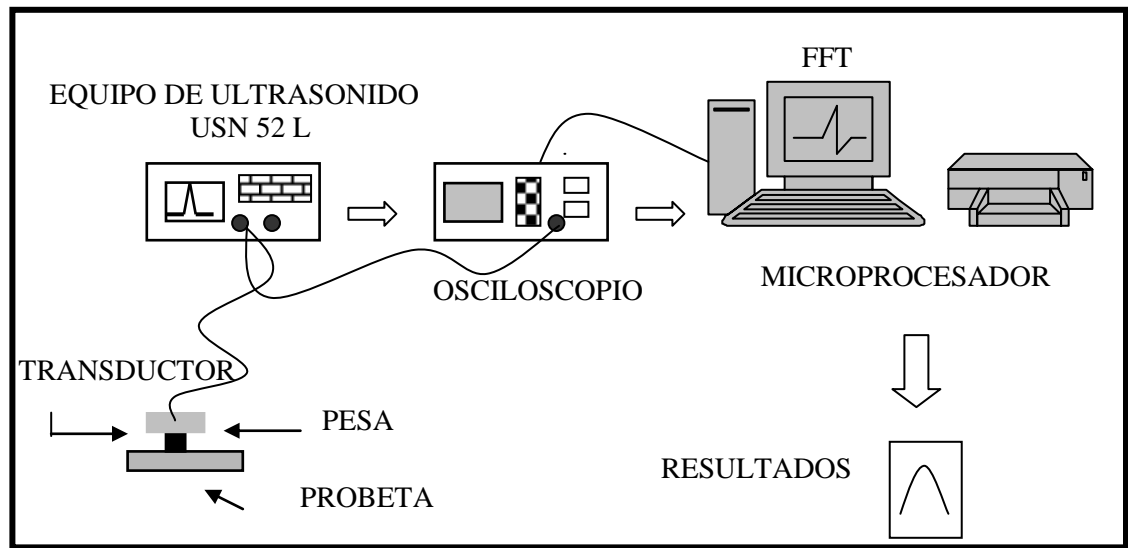


Fig. 20 Diseño Experimental de adquisición de la data para análisis de componentes en frecuencia

La Fig. 20 muestra un transductor que emite y recibe un pulso ultrasónico, el cual se encuentra acoplado al equipo de ultrasonido, quien está conectado en paralelo al osciloscopio digital. Ambos equipos permiten visualizar la señal en radio frecuencia (RF), seguidamente, el osciloscopio está conectado al microprocesador a través de un puerto serial, este último utiliza el programa WaveStar versión 2.2 de Tektronix Inc., para la adquisición de los datos de la señal. Una vez obtenida la data correspondiente se inicia el procesamiento matemático utilizando el “software” de aplicaciones matemáticas, MATLAB® Versión 5.1, el cual permite bajo una programación sencilla evaluar los espectros de frecuencia de cada una de las señales.

La matriz de ensayo utilizada para la adquisición de la data se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Matriz de Ensayo para la Adquisición de Señales Ultrasónicas

TRANSDUCTOR	PROBETA	NUMERO DE MEDICIONES POR PROBETA
1	"A","B" y "C"	5
2	"A","B" y "C"	5
3	"A","B" y "C"	5
4	"A","B" y "C"	5
5	"A","B" y "C"	5
6	"A","B" y "C"	5
7	"A","B" y "C"	5
8	"A","B" y "C"	5
9	"A","B" y "C"	5
10	"A","B" y "C"	5
11	"A","B" y "C"	5
12	"A","B" y "C"	5

En total fueron adquiridas 180 señales para su posterior procesamiento. De estas fueron seleccionadas las mas relevantes.

El montaje principal del proyecto se muestra en la Fig.21



Fig. 21 Montaje experimental de la adquisición de la data para espectros de frecuencia

En la Fig. 22 se presenta el detalle correspondiente a la pesa colocada sobre los transductores en todas las mediciones realizadas, esto permite mantener la presión constante en todos los ensayos realizados.



Fig. 22 Montaje de la pesa sobre los transductores durante las mediciones.

5. RESULTADOS Y ANALISIS

5.1 ANALISIS QUIMICO

Utilizando el método de espectroscopia de absorción atómica, se realizó el análisis químico a los principales elementos aleantes de cada una de las muestras de estudio, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 10. Composición química según análisis efectuado a la probeta “A”

CARBONO	CROMO	MOLIBDENO	NIQUEL
0,37 %	0%	0%	0%

Tabla 11. Composición química según análisis efectuado a la probeta “B”

CARBONO	CROMO	MOLIBDENO	NIQUEL
0,3 %	4,8%	0,9%	0%

Tabla 12. Composición química según análisis efectuado a la probeta “C”

CARBONO	CROMO	MOLIBDENO	NIQUEL
1,2 %	11,8%	1%	0%

Se puede observar según los resultados obtenidos que el principal elemento aleante en la probeta “A” es el carbono, mientras que en las probetas “B” y “C” el mayor aleante lo constituye el cromo, lo cual confirma la composición química de las muestras de acero empleadas en la investigación.

5.2 ANALISIS METALOGRAFICO

Siguiendo las técnicas convencionales de la norma ASTM E3, se obtuvieron los siguientes resultados de la microestructura de las muestras para este estudio.

5.2.1 METALOGRAFIA DE LA PROBETA “A”

En la muestra se observo una estructura granular como se muestra en la Fig.23

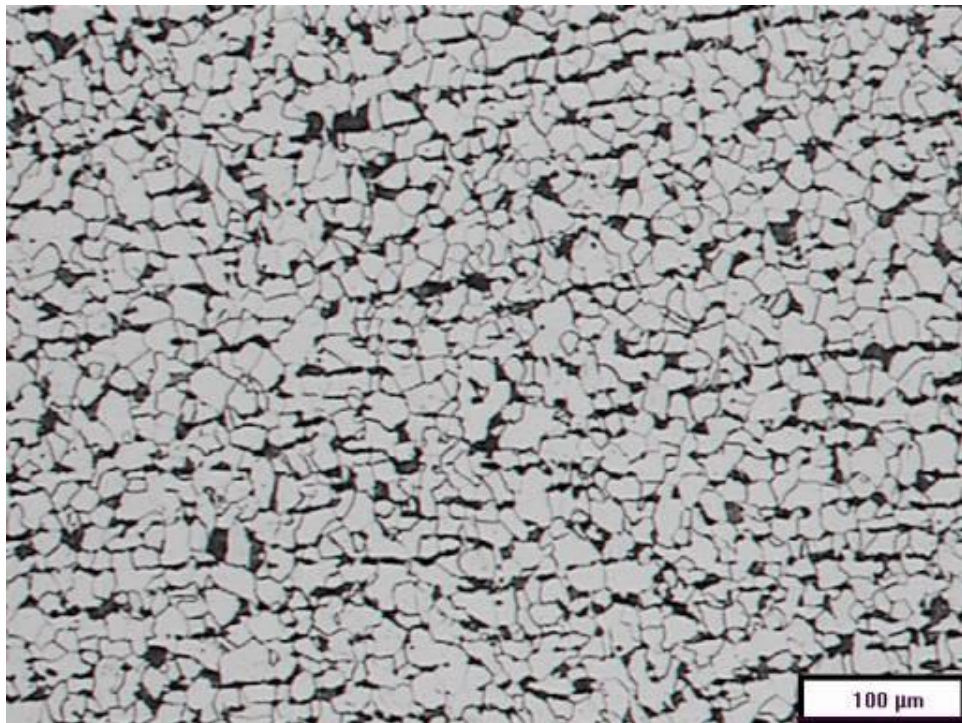


Fig. 23 Fotomicrografía de la microestructura en corte transversal de la probeta “A” tomada con un microscopio óptico a 100X de aumento

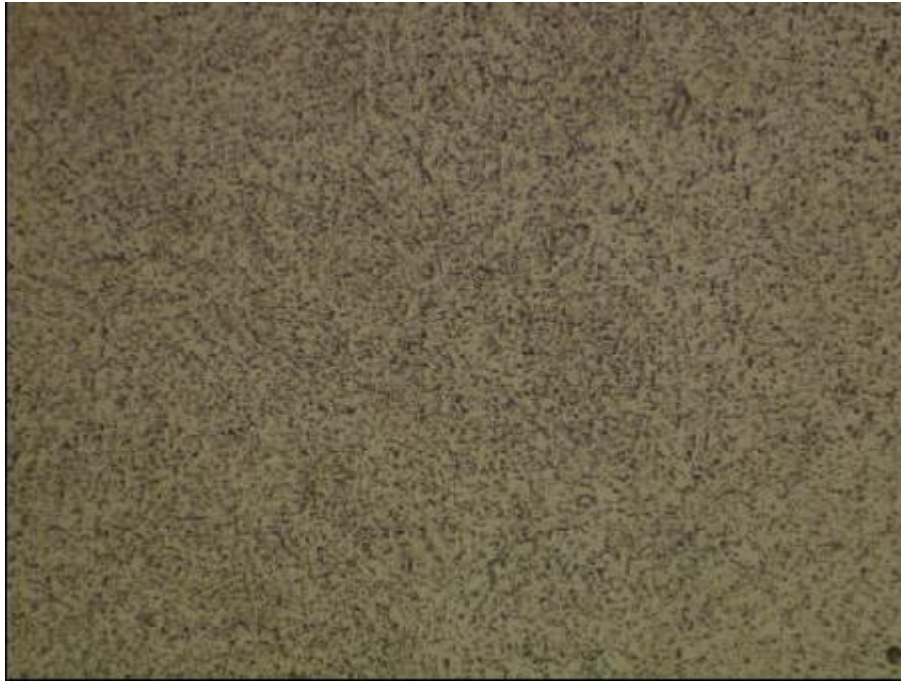
De acuerdo a la distribución mostrada en la fotomicrografía de la Fig. 23, se observa una estructura metalografica en donde los granos se encuentran claramente definidos, apreciándose fronteras de estos y la formación de la fase perlítica en la matriz de ferrita, característico de los aceros al carbono.

5.2.2 METALOGRAFIA DE LA PROBETA “B”

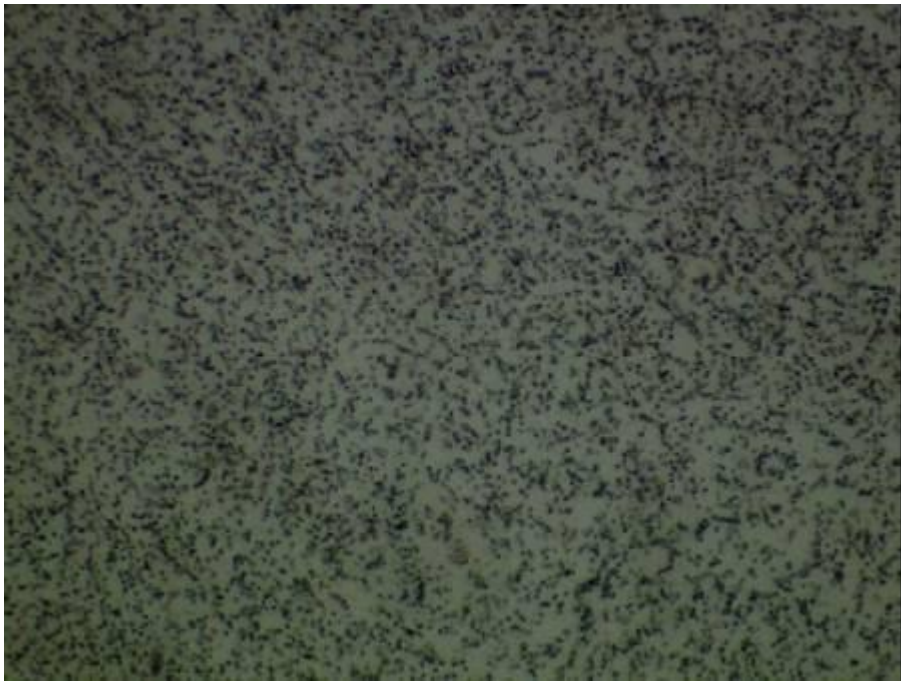
Utilizando en microscopio óptico y el equipo analizador de imágenes se obtuvieron las microfotografías presentadas en la Fig. 24, donde se muestra la estructura metalográfica de la muestra de acero aleado con 5% de cromo. En esa figura se puede apreciar una microestructura constituida por pequeños carburos esferoidales homogéneamente distribuidos en la matriz ferrítica del material, esta estructura se corresponde con la de un acero tipo AISI H13. [ASM Handbook]. El microscopio óptico no permite apreciar una definición clara de los límites de grano de la probeta “B”, por lo que se hace muy difícil establecer el tamaño promedio del mismo mediante esta técnica.

5.2.3 METALOGRAFIA DE LA PROBETA “C”

La muestra de acero con aproximadamente 12% de cromo, presentó una estructura como se muestra mas adelante en la Fig. 25. La distribución granular observada mediante un microscopio óptico, consiste de partículas finas y gruesa de carburos de cromo en una matriz ferrítica, con una distribución más dispersa de dichas partículas en comparación con la que presenta la muestra de la probeta “B”.



(a)

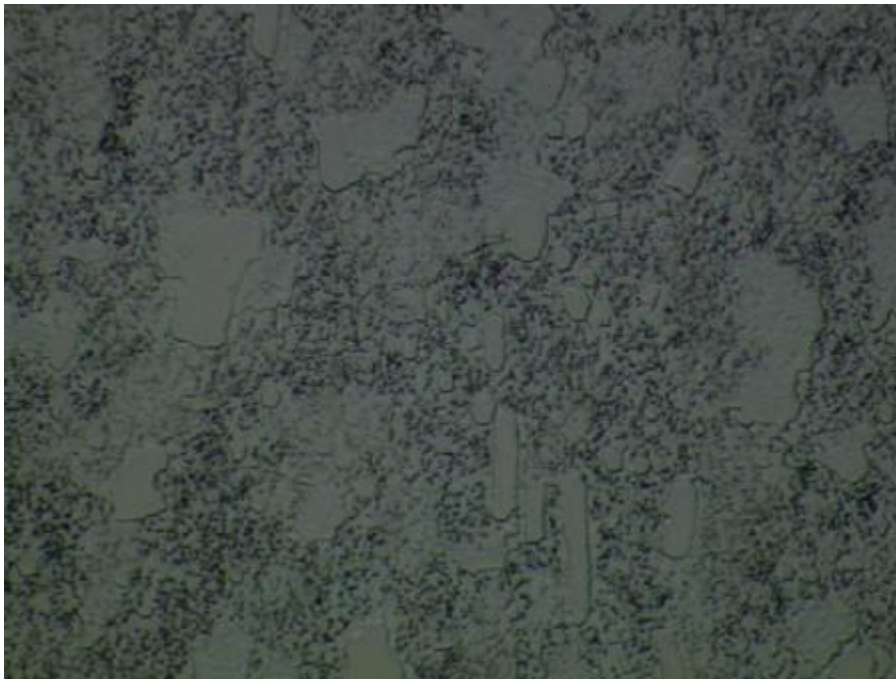


(b)

Fig. 24 Fotomicrografía de la microestructura en corte transversal de la probeta “B” tomada con un microscopio óptico. (a) 500X de aumento y (b) 1000 X de aumentos



(a)



(b)

Fig. 25 Fotomicrografía de la microestructura en corte transversal de la probeta “C” tomada con un microscopio óptico. (a) 500X de aumento y (b) 1000 X de aumentos

En la estructura que presenta la probeta “C”, mostrada en la Fig. 25, también es posible observar pequeñas cantidades de austenita retenida, este tipo de distribución corresponde a un acero AISI D2. [ASM Handbook]. Al igual que ocurre con la probeta “B”, no es posible apreciar mediante la técnica de análisis metalográfico empleada, una definición clara de las fronteras de grano, por lo que su estimación en tamaño promedio es imprecisa con este ensayo.

5.3 VELOCIDAD ULTRASONICA LONGITUDINAL

Mediante la matriz de ensayo presentada en la Tabla 9, se midió la velocidad de las ondas ultrasónicas longitudinales en los tres tipos de acero en función de la frecuencia ultrasónica. Los resultados obtenidos son representados a continuación en la Fig. 26

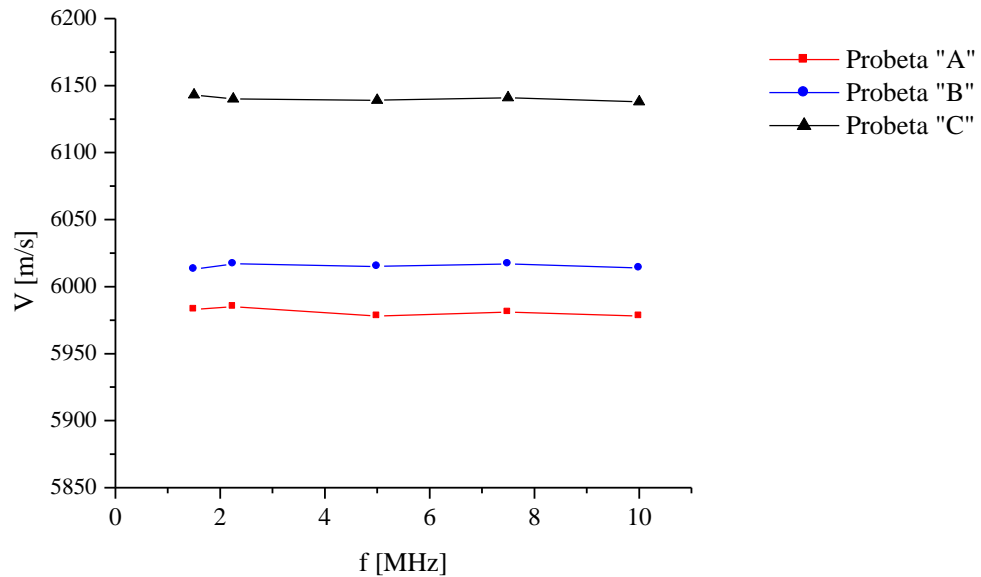


Fig. 26 Gráfica de velocidad de la onda longitudinal vs. frecuencia ultrasónica.

En la Fig. 26 se puede observar que para el acero al carbono se midió una velocidad de 5980 m/s, mientras para el acero con 5%Cr (Probeta “B”) y 12% Cr (Probeta

“C”), las velocidades promedio medidas fueron de 6015 m/s y 6140 m/s respectivamente.

Lo cual corresponde con lo observado en la literatura [ASM Handbook. Vol 17,1994].

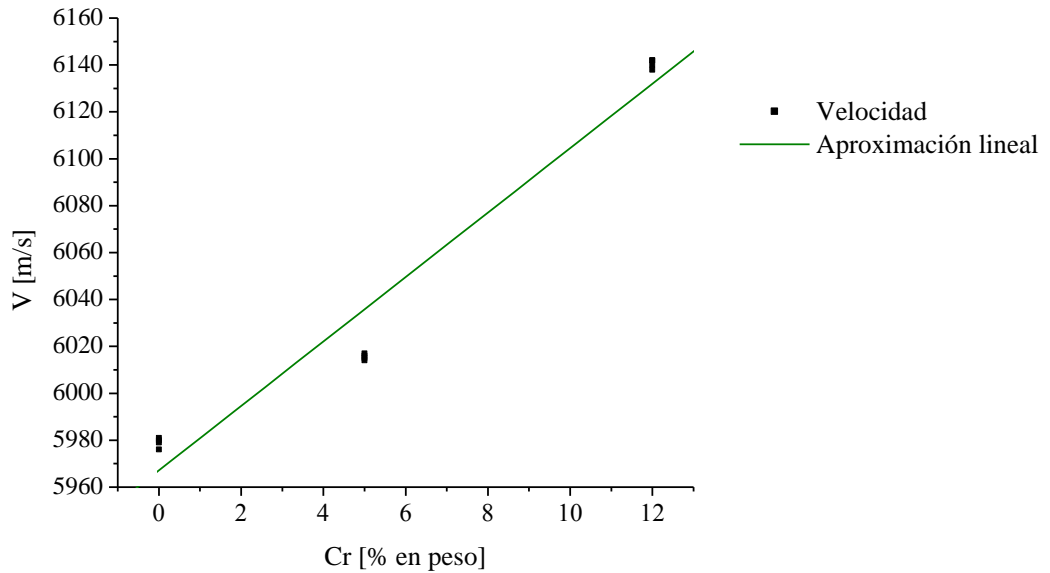


Fig. 27 Gráfica de velocidad de la onda longitudinal vs. porcentaje de cromo en cada una de las muestras.

En la Fig. 27 se puede observar que la velocidad de la onda longitudinal es una función directa de la concentración de cromo en el acero con las características metalográficas y composición química de las muestras bajo estudio, de esta manera, cuanto mayor es la concentración de cromo, mayor la velocidad ultrasónica longitudinal. Este comportamiento se puede expresar mediante una aproximación lineal como la que se presenta a continuación:

$$V = 5967,1353 + 13,7408 (\%Cr) \quad (36)$$

Donde:

V = es la velocidad ultrasónica longitudinal

%Cr = es el porcentaje de cromo en la muestra de acero

La ecuación (36) fue estimada con un factor de correlación R^2 igual a 0.9776 % de aproximación. De esta ecuación se puede observar que cuando la concentración de cromo en el acero es cero, se obtiene el valor aproximado de la velocidad longitudinal en la muestra de acero al carbono. Por otro lado, se determinó que la velocidad de las ondas ultrasónicas es independiente de la frecuencia de la onda en los tres tipos de acero; las pequeñas variaciones observadas se encuentran dentro del error experimental. Esta propiedad se expresa mencionando que estos tres tipos materiales son medios no dispersivos para el ultrasonido en el rango de frecuencias investigado. En términos matemáticos esto se puede explicar de la siguiente manera:

$$\frac{\omega}{k} = C_s \quad (37)$$

Donde ω es la frecuencia angular de la onda, k es su número de onda, y C_s es una constante independiente de la frecuencia que representa la velocidad de las ondas ultrasónicas.

El hecho de que los aceros ensayados sean medios no dispersivos para el ultrasonido, implica que un pulso ultrasónico puede viajar dentro de estos aceros sin sufrir deformación debido a diferencias en las velocidades de propagación de sus componentes. Esta propiedad es importante en la inspección de materiales, pues las pruebas ultrasónicas requieren de pulsos bien definidos que permitan medir distancias y atenuación con precisión.

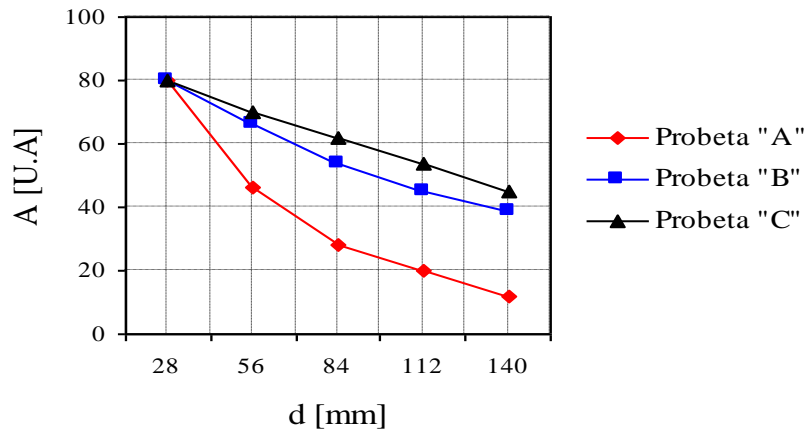
Una buena caracterización de velocidad permite una buena medición de espesor de materiales y de localización de discontinuidades, y en este estudio el valor de velocidad depende de las características del material y es independiente de las frecuencias utilizadas para dicha caracterización

5.4 ATENUACION DE LAS SEÑALES ULTRASONICAS

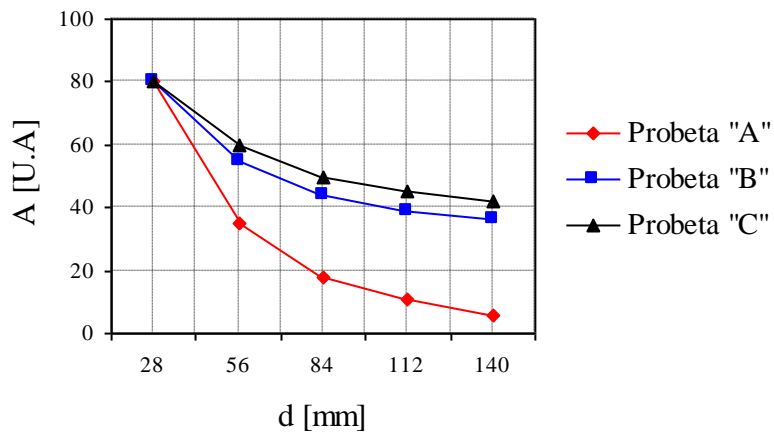
Debido a que la atenuación de una señal es una variable muy importante en la inspección ultrasónica de materiales, se realizaron mediciones de atenuación de las ondas longitudinales en los tres tipos de aceros para las frecuencias mencionadas en la tabla 8 de la sección 4.3.2. El propósito de estas mediciones es observar la disminución de amplitud que sufren las señales ultrasónicas a medida que viajan dentro del material. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

5.4.1 ATENUACION DE LAS SEÑALES CON FRECUENCIA CENTRAL DE 10 MHz

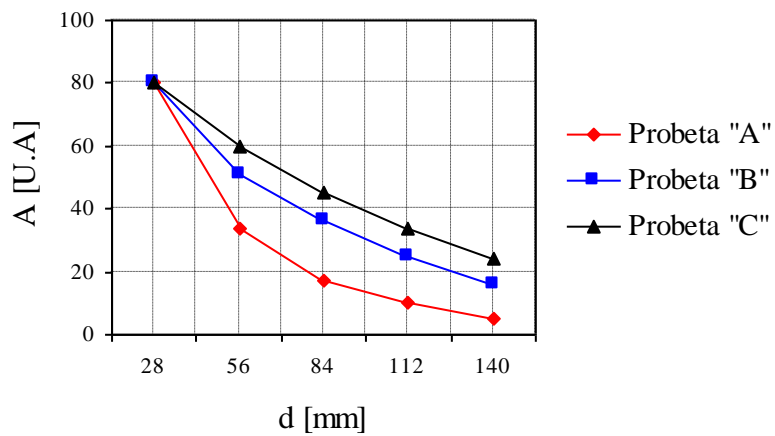
En esta sección se muestra la variación de la amplitud de los pulsos obtenidos mediante un transductor con frecuencia central de 10 MHz, a medida que las ondas viajan dentro de cada una de las muestras estudiadas. Para el análisis, disminuciones de la amplitud indican atenuación de la señal. En la Fig. 28 se presentan los resultados de las mediciones de pérdida de amplitud utilizando transductores de 0,5", 0,375" y 0,25" de diámetro. Las mediciones se realizaron con diferentes diámetros de transductor, con el propósito de observar su efecto en la atenuación de las señales. En este caso la pérdida de amplitud con transductores de menor diámetro es mayor debido a la divergencia del haz.



(a)



(b)



(c)

Fig. 28 Gráficas de amplitud vs. distancia recorrida por la onda ultrasónica empleando un transductor con frecuencia central de 10 MHz. (a) Diámetro del transductor 0,5", (b) Diámetro del transductor 0,375", (c) Diámetro del transductor 0,25"

En la Fig.28 se puede observar que existe una mayor disminución de amplitud en la Probeta “A”, que en las Probeta “B” y “C” para los tres tamaños de transductor. Esto indica que un pulso de 10 MHz puede penetrar mejor los aceros aleados con cromo que posean las características metalográficas de las muestras de estudio, a diferencia de lo que ocurre en el acero al carbono evaluado.

Las variaciones de amplitud observadas en las diferentes gráficas de la Fig. 28 se deben a las diferencias en cuanto a estructura granular que presenta la muestra de acero al carbono en comparación con las muestras aleadas con cromo. También se puede apreciar que a medida que se reduce el diámetro del transductor, la disminución de amplitud aumenta para los tres materiales. Por lo tanto, cualquier fórmula que pretenda determinar coeficientes de atenuación, deberá incorporar la divergencia del haz, de manera que se involucre el parámetro de tamaño del transductor. Al mismo tiempo se observa que las proporciones de reducción de las intensidades de las señales se mantienen aproximadamente constantes.

De los datos obtenidos de la señal emitida por el transductor de 0,375” de diámetro sobre las diferentes muestras, se obtuvieron las curvas que permiten mostrar una aproximación del comportamiento de la atenuación en cada una de ellas. Este comportamiento se puede apreciar en la gráfica mostrada en la Fig. 29, para la probeta “A” de acero al carbono. Dicho comportamiento puede ser expresado para todas las muestras de estudio, mediante las aproximaciones empíricas presentadas en la Tabla 13, las cuales se obtuvieron utilizando el programa Origin® versión 6.0. De estas aproximaciones se observa que la atenuación de la señal en las probetas “A” “B” y “C”, tiene un

comportamiento de tipo exponencial. De esta manera, si la atenuación “ α ” representa el coeficiente de la caída exponencial que describe la atenuación en un material [Schmerr, 1998], entonces a partir de las ecuaciones empíricas obtenidas se puede deducir el valor de α para las diferentes muestras.

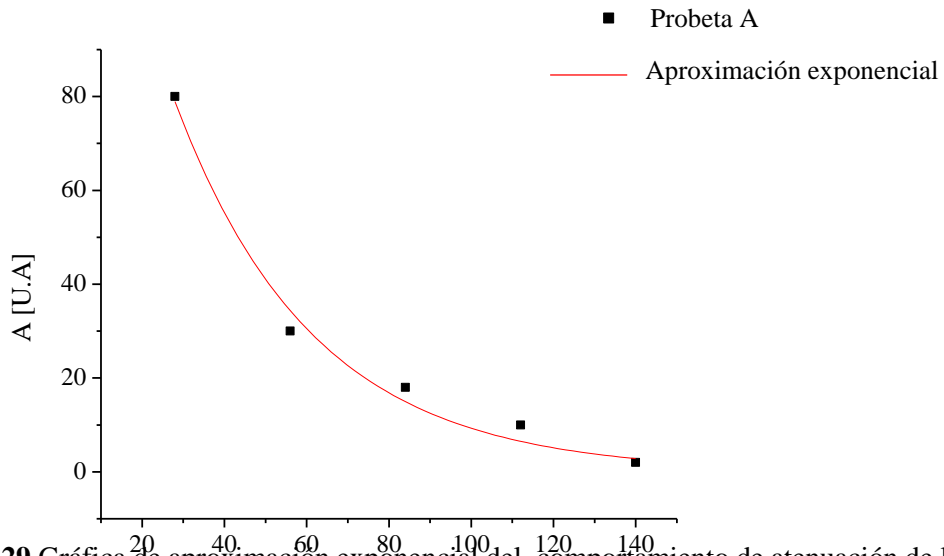


Fig. 29 Gráfica de aproximación exponencial del comportamiento de atenuación de la probeta “A” con un transductor de frecuencia central de 10 MHz y 0,375” de diámetro.

Tabla 13. Aproximaciones empíricas de la atenuación de la señal de frecuencia central de 10 MHz y 0,375” de diámetro

PROBETA	ECUACION	α (1/mm)	R^2
“A”	$A = 6 + 187,68e^{\left(-\frac{d}{30,08}\right)}$	0,03324	0,98
“B”	$A = 36 + 104,86e^{\left(-\frac{d}{32,35}\right)}$	0,03091	0,96
“C”	$A = 42 + 84,72e^{\left(-\frac{d}{35,21}\right)}$	0,02840	0,96

De la tabla se tiene que:

A = es la amplitud de la señal

d = es la distancia recorrida por la onda

α = es el coeficiente de atenuación

R^2 = es el factor de correlación

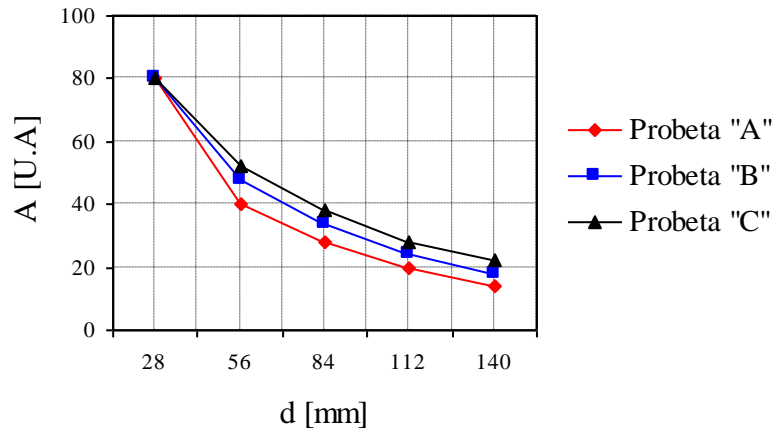
De las relaciones obtenidas, se puede apreciar que el coeficiente de atenuación es mayor para la muestra de acero al carbono.

5.4.2 ATENUACION DE LAS SEÑALES CON FRECUENCIA CENTRAL DE 7,5 MHz

En esta sección se presentan las gráficas correspondientes a la atenuación de las señales ultrasónicas utilizando dos transductores, ambos con frecuencia central de 7,5 MHz y diámetro de 0,375” y 0,25” respectivamente.

Comparando entre sí las gráficas (a) y (b) de la Fig. 30 se puede apreciar que las diferencias en pérdidas de amplitud para las tres probetas son muy pocas, lo cual indica que a esta frecuencia, la atenuación de la onda es similar en los tres aceros, aunque la atenuación en la probeta de acero al carbono es aún ligeramente mayor.

Por otro lado se observa, comparando las Figs. 28 y 30, que la variación de atenuación de la señal para la muestra de acero al carbono (Probeta “A”) es mayor a 10 MHz que a 7,5 MHz.



(a)

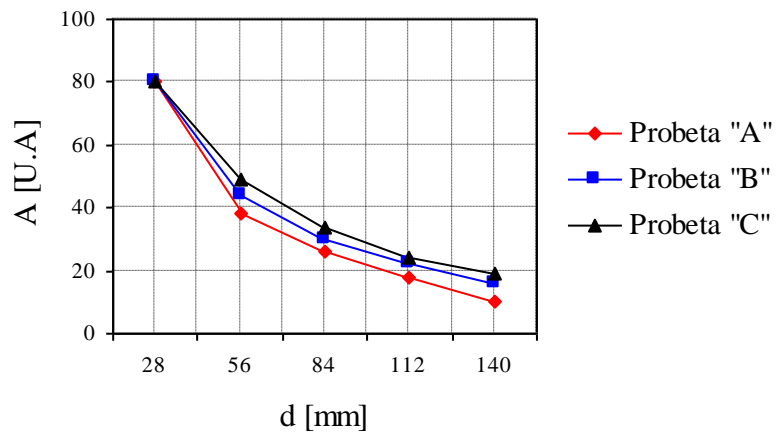


Fig. 30 Gráficas de amplitud vs. distancia recorrida por la onda ultrasónica empleando un transductor con frecuencia central de 7,5 MHz. (a) Diámetro del transductor 0,375", (b) Diámetro del transductor 0,25"

Tomando los datos originados de la señal con el transductor de 0,375" de diámetro, se obtuvieron las ecuaciones empíricas aproximadas del comportamiento de la atenuación para las tres probetas, las cuales se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Aproximaciones empíricas de la atenuación de la señal de frecuencia central de 7,5 MHz y 0,375” de diámetro

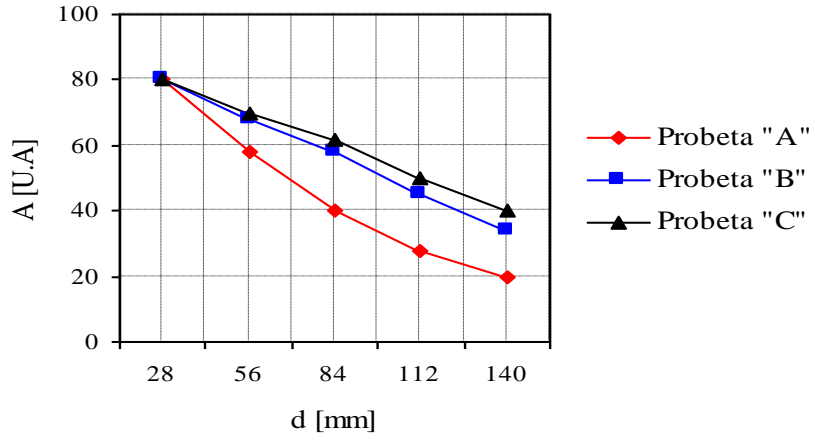
PROBETA	ECUACION	α (1/mm)	R ²
“A”	$A = 14 + 155,05e^{\left(-\frac{d}{32,57}\right)}$	0,03070	0,96
“B”	$A = 18 + 130,34e^{\left(-\frac{d}{37,90}\right)}$	0.02638	0,94
“C”	$A = 22 + 118,01e^{\left(-\frac{d}{39,92}\right)}$	0,02550	0,96

De las ecuaciones obtenidas se puede observar que en las tres muestras, la atenuación de la señal tiene un comportamiento de tipo exponencial, donde el coeficiente de atenuación es mayor en la probeta “A” y similar entre las muestras “B” y “C”.

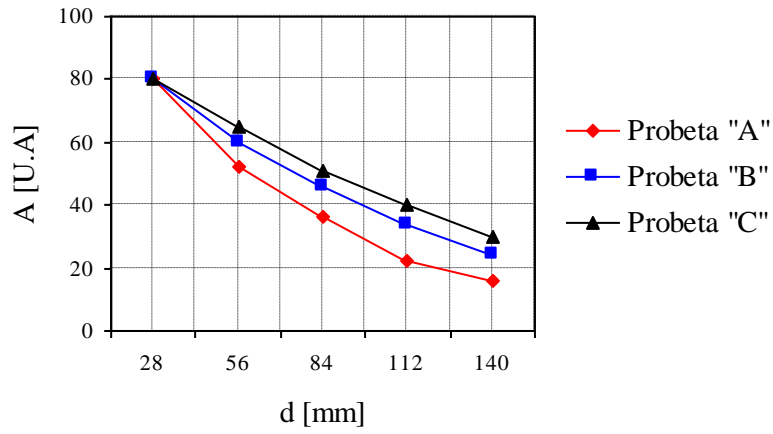
5.4.3 ATENUACION DE LAS SEÑALES CON FRECUENCIA CENTRAL DE 5 MHz

En el siguiente apartado se muestran las gráficas de atenuación de la señal, correspondientes a transductores con frecuencia central de 5 MHz y diámetros de 0,5”, 0,375” y 0,25”

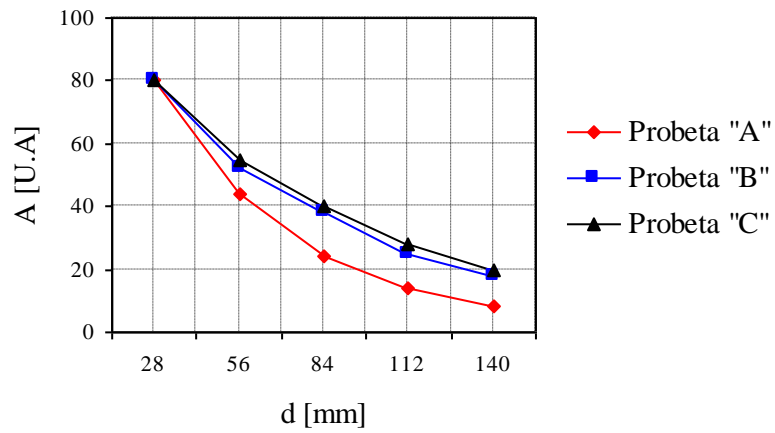
En la Fig. 31, se observa como la atenuación de las señales es muy similar para las tres muestras, sin embargo la muestra C se evidencia todavía con una menor pérdida de amplitud con respecto a las muestras A y B. También se aprecia, al igual que en los casos anteriores, que a medida que se reduce el diámetro del transductor, la atenuación de la señal se incrementa.



(a)



(b)



(c)

Fig. 31 Gráficas de amplitud vs. distancia recorrida por la onda ultrasónica empleando un transductor con frecuencia central de 5 MHz. (a) Diámetro del transductor 0,5", (b) Diámetro del transductor 0,375", (c) Diámetro del transductor 0,25"

Se emplearon los datos de las señales del transductor de 0,375” de diámetro en las diferentes muestras, a fin de obtener las ecuaciones empíricas aproximadas del comportamiento de atenuación, tales ecuaciones se muestran en la Tabla 15.

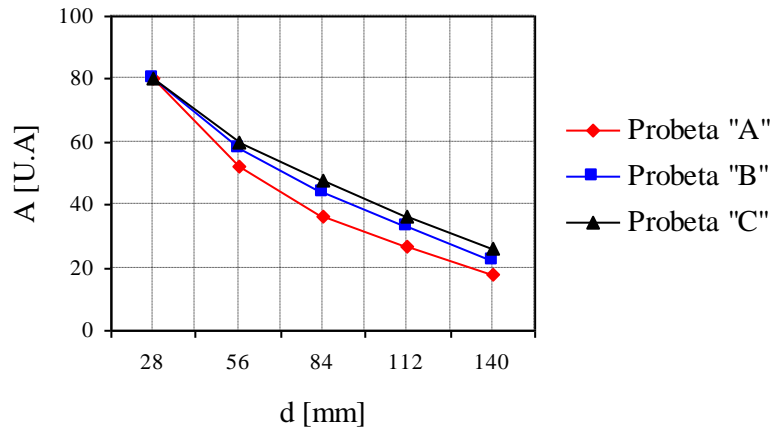
Tabla 15 Aproximaciones empíricas de la atenuación de la señal de frecuencia central de 5 MHz y 0,375” de diámetro

PROBETA	ECUACION	α (1/mm)	R^2
“A”	$A = 16 + 125,98e^{\left(-\frac{d}{42,45}\right)}$	0,02355	0,97
“B”	$A = 24 + 99,81e^{\left(-\frac{d}{50,94}\right)}$	0,01963	0,96
“C”	$A = 30 + 87,31e^{\left(-\frac{d}{54,26}\right)}$	0,01842	0,93

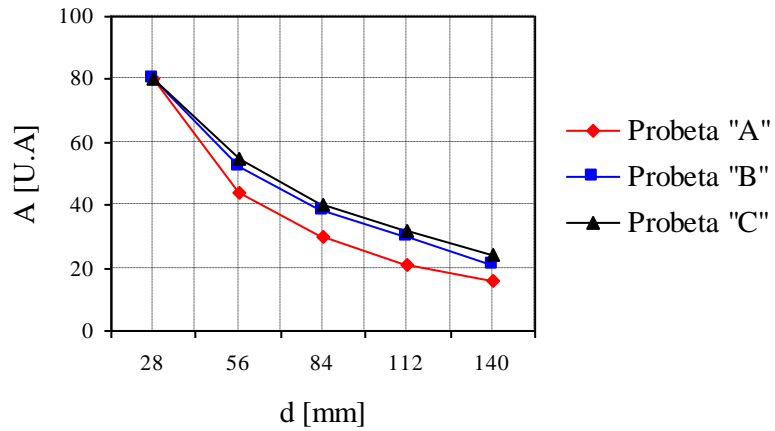
De las ecuaciones obtenidas, mostradas en la Tabla 15, se puede observar que el comportamiento de la atenuación en las tres muestras es de tipo exponencial, donde el coeficiente de atenuación es mayor en la probeta “A” y menor en la probeta “C”. Si se comparan los datos obtenidos de la Tabla 15 con los presentados en las Tablas 13 y 14, se observa que el menor coeficiente de atenuación se presenta con el transductor de frecuencia central de 5 MHz.

5.4.4 ATENUACIÓN DE LAS SEÑALES CON FRECUENCIA CENTRAL DE 2,25 MHZ

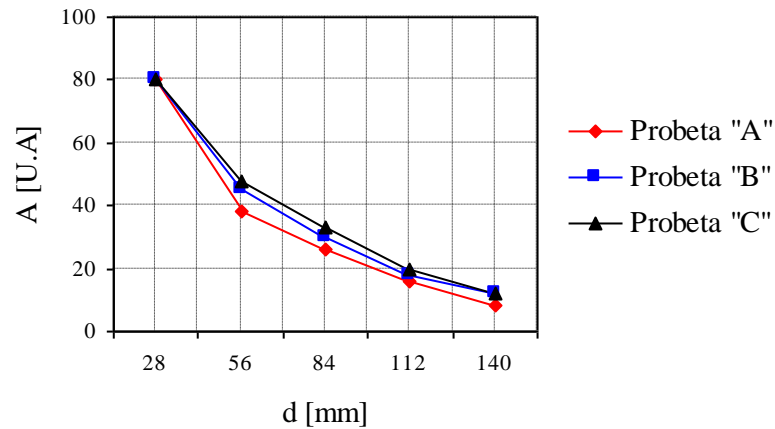
En la Fig. 32 se muestran las gráficas de atenuación de la señal, las cuales corresponden a transductores con frecuencia central de 2,25 MHz y diámetros de 0,5”, 0,375” y 0,25”.



(a)



(b)



(c)

Fig. 32 Gráficas de amplitud vs. distancia recorrida por la onda ultrasónica empleando un transductor con frecuencia central de 2,25 MHz. (a) Diámetro del transductor 0,5", (b) Diámetro del transductor 0,375", (c) Diámetro del transductor 0,25"

En la Fig. 32 se observa que aún cuando la atenuación de las señales es similar para las tres muestras, todavía la atenuación en acero al carbono es un tanto mayor que en las muestras de acero aleado con cromo (Probetas “B” y “C”), tal y como había sido apreciado en resultados anteriores. Tomando los datos de la señal con el transductor de 0,375” de diámetro, se obtuvieron las ecuaciones empíricas aproximadas del comportamiento de la atenuación para las tres probetas, las cuales se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16 Aproximaciones empíricas de la atenuación de la señal de frecuencia de 2,25 MHz y 0,375” de diámetro

PROBETA	ECUACION	α (1/mm)	R ²
“A”	$A = 16 + 145,27e^{\left(-\frac{d}{34,19}\right)}$	0,02924	0,95
“B”	$A = 21 + 115,015e^{\left(-\frac{d}{42,30}\right)}$	0.02364	0,93
“C”	$A = 24 + 109,1463e^{\left(-\frac{d}{42,75}\right)}$	0,02339	0,93

De estas ecuaciones se puede apreciar que la pérdida de amplitud de la señal sobre cada una de las muestras, presenta una caída exponencial, de donde se deducen los respectivos valores de coeficiente de atenuación, mostrados en la misma tabla.

5.4.5 ATENUACIÓN DE LAS SEÑALES CON FRECUENCIA CENTRAL DE 1,5 MHZ

En esta sección se muestra el comportamiento de atenuación que tienen las señales ultrasónicas cuando interaccionan con las muestras bajo estudio empleando un transductor con frecuencia central de 1,5 MHz y 0,375” de diámetro.

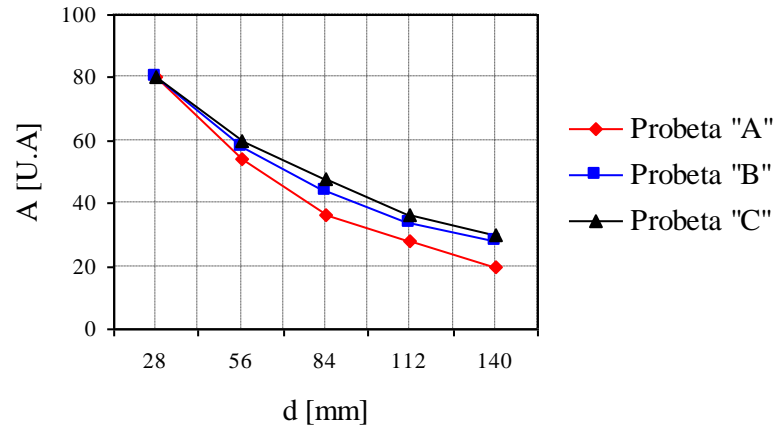


Fig. 33 Gráfica de amplitud vs. distancia recorrida por la onda ultrasónica empleando un transductor con frecuencia central de 1,5 MHz. y diámetro de 0,375” .

En la gráfica mostrada en la Fig.33 se observa que, la atenuación de las señales en las probetas “B” y “C” es prácticamente la misma, mientras que hay evidencia de una mayor pérdida de amplitud en acero al carbono.

Las ecuaciones empíricas que aproximan el comportamiento de la atenuación en las muestras de estudio se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Aproximaciones empíricas de la atenuación de la señal de frecuencia de 1,5 MHz y 0,375” de diámetro

PROBETA	ECUACION	α (1/mm)	R^2
“A”	$A = 20 + 118,68e^{\left(-\frac{d}{42,06}\right)}$	0,02377	0,96
“B”	$A = 28 + 101,03e^{\left(-\frac{d}{43,40}\right)}$	0,02304	0,94
“C”	$A = 30 + 93,67e^{\left(-\frac{d}{46,28}\right)}$	0,02160	0,93

Tal y como ocurre en los casos anteriores, el comportamiento de la atenuación es de tipo exponencial, y el menor coeficiente de atenuación corresponde a la probeta “C”.

En resumen, en esta sección se ha observado que para transductores con frecuencias entre 1,5 MHz y 7,5 MHz la atenuación de las señales ultrasónicas es semejante en las tres muestras bajo estudio. Para todo el intervalo de frecuencias evaluadas las ecuaciones empíricas obtenidas son del tipo exponencial, con pequeñas variaciones entre ellas. Para más altas frecuencias, como 10 MHz la atenuación sufrida en acero al carbono es considerablemente mayor que en los aceros de baja aleación. La semejanza que existe en el comportamiento de la atenuación particularmente en las muestras “B” y “C”, se debe a que su estructura metalográfica y su composición química es bastante similar entre ellas, lo que explica también las diferencias presentes con relación a la probeta “A”.

El coeficiente de atenuación obtenido a partir de las ecuaciones empíricas del comportamiento de atenuación tiene la tendencia a aumentar en la medida en que se incrementa la frecuencia central del transductor, salvo el caso de la frecuencia de 5MHz en donde se aprecia una pequeña disminución.

5.5 COEFICIENTE DE ATENUACION EXPERIMENTAL

Las fuentes de atenuación de las ondas ultrasónicas en los materiales son muy diversas, sin embargo, dado los resultados obtenidos en la sección 5.4 de este capítulo y basado en las teorías planteadas en la sección 3, se estableció un modelo teórico que permite estimar el coeficiente de atenuación, el cual se describe a continuación.

5.5.1 MODELO PROPUESTO PARA EL CALCULO DEL COEFICIENTE DE ATENUACION

Una vez demostrada la importancia que tiene el tamaño del transductor en las mediciones de atenuación, se propuso el modelo que se describe a continuación para el cálculo del coeficiente de atenuación experimental. Este modelo considera el tamaño del transductor, aunque los efectos del campo cercano han sido despreciados, así como también las pérdidas que se producen por el medio acoplante.

El modelo teórico empleado en la determinación del coeficiente de atenuación se muestra en la Fig. 34. En ella se enfatiza las pérdidas por divergencia del haz, las cuales pueden generar cálculos de coeficiente de atenuación errados. En la figura mostrada, el transductor emisor transmite ondas ultrasónicas hacia el material de espesor “ x ”, con una potencia “ P_0 ”, sin embargo el transductor receptor sólo capta por efectos de la divergencia del haz y de la atenuación en el material una potencia “ P_d ”.

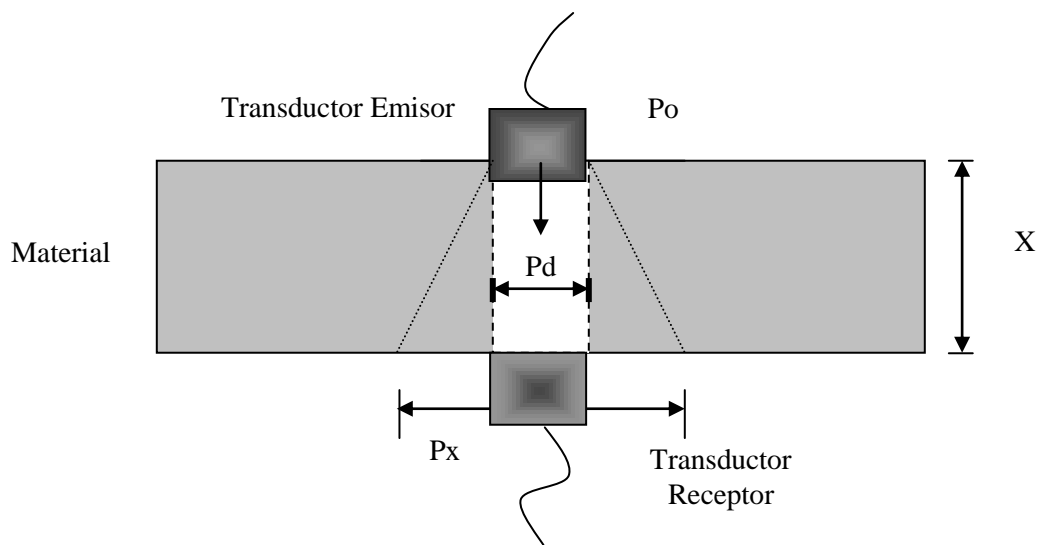


Fig. 34. Modelo teórico para el cálculo del coeficiente de atenuación experimental

A partir de la Fig. 34, se puede determinar que:

$$P_d = P_x - \delta P_x \quad (38)$$

Donde:

P_d = Es la potencia recibida por el receptor

P_x = Es la potencia que llega a superficie donde se encuentra el receptor.

δ = Es la fracción de pérdida de energía producto de la divergencia del haz ultrasónico.

De esto se deduce:

$$P_d = P_x (1 - \delta) \quad (39)$$

y basado en los planteamientos teóricos puede ser escrito como:

$$P_d = P_o (1 - \delta)e^{-\alpha x} \quad (40)$$

Donde

α = coeficiente de atenuación

x = espesor que de la muestra bajo estudio

P_o = potencia emitida por el transductor

Luego, por definición

$$P = B^2 \quad (41)$$

Donde:

B = Amplitud de la señal

P = Potencia de la onda

Sustituyendo (41) en la ecuación (40) se obtiene

$$B_d^2 = B_o^2 (1 - \delta)e^{-\alpha x} \quad (42)$$

La cual puede ser resuelta para el coeficiente de atenuación “ α ”, tomando el logaritmo en base 10 de la ecuación:

$$2 \log Bd = 2 \log Bo + \log (1 - \delta) - \alpha x \log e \quad (43)$$

Luego despejando α de (43):

$$\alpha = \frac{2 \log Bo + \log (1 - \delta) - 2 \log Bd}{x \log e} \quad (44)$$

Resultando

$$\alpha = \frac{2 \log \left(\frac{Bo}{Bd} \right) + \log (1 - \delta)}{0,43 x} \quad (45)$$

La fracción de pérdida “ δ ” viene representada mediante la siguiente figura

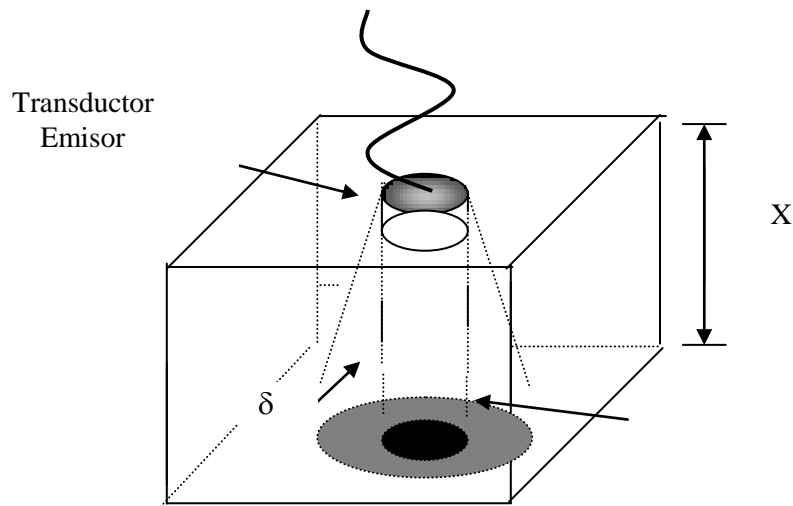


Fig. 35 Fracción de pérdida por divergencia del haz ultrasónico

Según el esquema presentado en la Fig. 35, δ corresponde a la fracción de pérdida, señalada anteriormente. Considerando que el área gris es A' y el área negra es A , que también corresponde al área de proyección de los haces del transductor, entonces δ puede ser definida como:

$$\delta = \frac{A'-A}{A'} \quad (46)$$

$$\delta = 1 - \frac{A}{A'} \quad (47)$$

Lo que modifica la ecuación (45) quedando:

$$\alpha = \frac{2\log\left(\frac{B_0}{B_d}\right) - \log\left(\frac{A'}{A}\right)}{0,43 x} \quad (48)$$

A continuación se define A' y A , cuyo cálculo depende directamente del ángulo de divergencia del transductor y del radio del transductor.

Del gráfico se tiene:

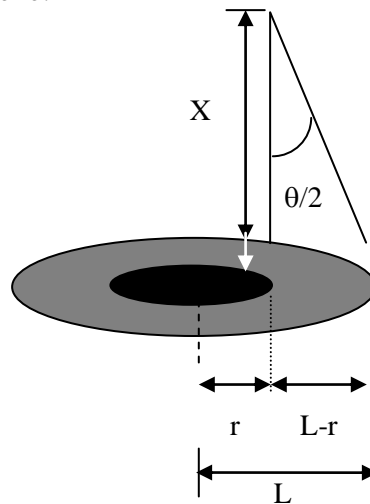


Fig. 36. Proyección del ángulo de divergencia del haz ultrasónico

Donde:

x = Distancia que recorre la onda.

$\theta/2$ = Angulo de divergencia del transductor.

r = Radio del transductor.

L= Corresponde al radio de la proyección

Por lo tanto:

$$A' = \pi * L^2 \quad (49)$$

$$A' = \pi * (x * \text{tg } \theta/2 + r)^2 \quad (50)$$

$$A = \pi * r^2 \quad (51)$$

Haciendo las sustituciones correspondientes en la ecuación (48) se obtiene:

$$\alpha = \frac{2\log\left(\frac{Bo}{Bd}\right) - \log\left(\frac{r + (x * \text{tg}\theta/2)}{r}\right)^2}{0,43 x} \quad (52)$$

Que a su vez puede ser escrita como:

$$\alpha = \frac{2\log\left(\frac{Bo}{Bd}\right) - 2\log\left(\frac{r + (x * \text{tg}\theta/2)}{r}\right)}{0,43 x} \quad (53)$$

Para obtener unidades correspondientes la ecuación (53) se multiplica por 10:

$$\alpha = \frac{20\log\left(\frac{B_o}{B_d}\right) - 20\log\left(\frac{r + (x * \text{tg } \theta/2)}{r}\right)}{4,3 x} \quad (54)$$

El coeficiente de atenuación permite cuantificar la atenuación sufrida por cada señal al atravesar el material. Para este caso, en la ecuación (54) se ha considerado el efecto del tamaño del transductor sobre este parámetro.

5.5.2 COEFICIENTE DE ATENUACION ESTIMADO EN LAS MUESTRAS

En vista de que el modelo propuesto en la sección 5.5.1 no contempla las alteraciones debidas al campo cercano del transductor, es necesario utilizar una reflexión del haz cuyo recorrido halla superado la longitud del campo cercano en todos los transductores utilizados, con el propósito de evitar esta incidencia en los resultados.

Utilizando la ecuación (54) planteada en la sección 5.5.1 del presente capítulo, se obtuvieron los datos correspondientes para el cálculo del coeficiente de atenuación. La relación de amplitud de la señal fue tomada a partir del segundo eco de reflexión, pues a partir de éste ya se ha superado la zona de campo cercano en todos los transductores empleados. Por otro lado, en vista de que la fórmula del modelo planteado involucra el término del ángulo de divergencia de haz ultrasónico, éste fue calculado según la ecuación (13) mostrada en la sección 3.3.3.3 [ASM Handbook. Vol 17,1994].

$$\theta = 2 \arcsen\left(0,5 * \frac{\lambda}{D}\right) \quad (13)$$

No obstante, en el caso de los transductores de 1,5 MHz y 2,25 MHz fue necesario medir en ángulo de divergencia del haz ultrasónico de forma experimental, utilizando el bloque de calibración de acero al carbono V1. Pues como se verá mas adelante, en la sección 5.6, las frecuencias de 1,5 MHz y 2,25 MHz son capaces de estimular dentro de las tres muestras bajo estudio, frecuencias mas altas, las cuales tienden a reducir el ángulo de divergencia, por lo que no es válida la aplicación directa de la ecuación (13).

Este comportamiento fue validado realizando mediciones del ángulo de divergencia a una frecuencia de 5 MHz. Debido a que el transductor de frecuencia central de 5 MHz no estimula modos normales a otras frecuencias, el ángulo de divergencia debería ser similar al calculado a través de la ecuación (13). Los resultados experimentales realizados a esta frecuencia confirmaron tal comportamiento. Esto indica que de hecho las diferencias existentes entre teoría y experimentación a las frecuencias de 1,5 MHz y 2,25 MHz son debidas a la estimulación de pulsos a alta frecuencia, como se verá mas adelante en la sección 5.6.

Aún cuando el ángulo de divergencia de los transductores de 1,5MHz y 2,25 MHz medido experimentalmente es válido para la muestra de acero al carbono, no es el valor más apropiado para las probetas “B” y “C”. Pero en vista de que no existe un bloque especial de acero aleado con 5% y 12% de cromo, con las características metalográficas de las muestras bajo estudio, para calcular el ángulo de divergencia, el valor del ángulo en acero al carbono fue utilizado para efectos de los cálculos como un primera aproximación.

La gráfica de la Fig. 37 muestra los valores del coeficiente de atenuación experimental “ α ” utilizando transductores de 0,25” de diámetro, tomados sobre el segundo y quinto eco de reflexión de la onda ultrasónica longitudinal durante su interacción con las diferentes muestras bajo estudio.

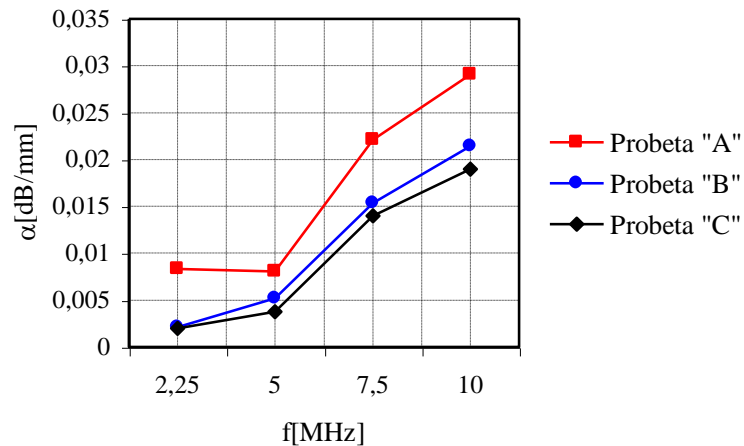


Fig. 37 Gráfica de coeficiente de atenuación experimental utilizando transductores de 0,25” de diámetro

Se puede apreciar en la figura que existe una marcada diferencia entre los valores del coeficiente de atenuación de las probetas “B” y “C” con respecto a la probeta “A”. Esta diferencia es independiente de la aproximación empleada para el ángulo de divergencia de las probetas “B” y “C” a las frecuencias de 1,5 MHz y 2,25 MHz, ya que la data incluye frecuencias mas altas.

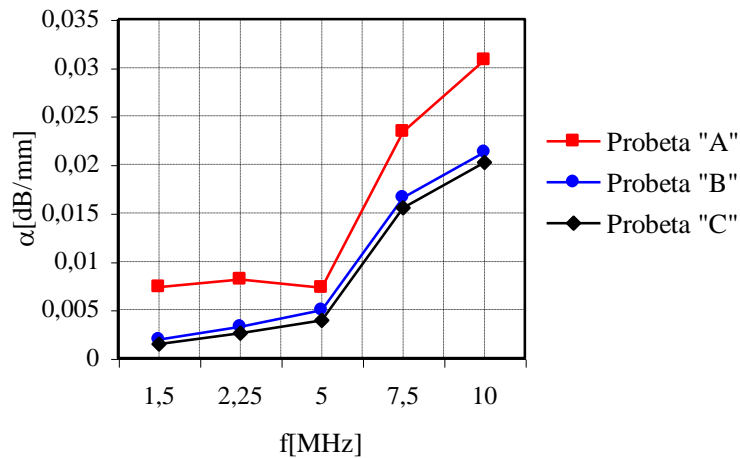


Fig. 38 Gráfica de coeficiente de atenuación experimental utilizando transductores de 0,375” de diámetro

La Fig. 38 presenta los valores de coeficiente de atenuación calculado, utilizando transductores de 0,375” de diámetro. Se puede apreciar que a medida que aumenta la frecuencia central del transductor, el valor del coeficiente de atenuación tiende a incrementarse, no obstante, para el caso de la frecuencia de 5 MHz, el coeficiente de atenuación tiende a disminuir un poco, y esto se debe a que ésta frecuencia corresponde a uno de los modos naturales de oscilación presente en las tres muestras de estudio, tal y como se explicará más adelante en la sección 5.6, por esto el transductor de 5 MHz tiende a no ceder energía para estimular otros modos naturales y puede propagarse mejor y por mas tiempo en el material. En la gráfica también se puede observar que la probeta “A” de acero al carbono muestra un coeficiente de atenuación alto a la frecuencia de 10 MHz, si se le compara con los valores obtenidos para las probetas de acero aleado con cromo (probetas “B” y “C”).

La similitud que existe entre los valores de coeficiente de atenuación para transductores de 0,25” y 0,375” de diámetro (Figs. 37 y 38) es evidencia de que la ecuación (54) corrige la influencia del diámetro del transductor sobre el coeficiente de atenuación.

Los datos obtenidos a partir de la ecuación (54), tienen poca semejanza con los valores de coeficiente de atenuación obtenidos a partir de la caída exponencial que describe la atenuación de las señales sobre las diferentes muestras discutidos en la sección 5.4. Esto se debe a que las aproximaciones obtenidas de las gráficas no consideran de ninguna manera el efecto del diámetro del transductor en la estimación de “ α ”.

5.6 ESPECTRO DE FRECUENCIA

Con el objeto de caracterizar el comportamiento espectral de las ondas ultrasónicas en los aceros aleados con cromo, se realizó un estudio en el dominio de las frecuencias de los pulsos ultrasónicos. Este estudio permitió determinar los modos normales de oscilación de los aceros y por lo tanto comprender las distorsiones de los pulsos ultrasónicos de baja frecuencia que frecuentemente se observan al inspeccionar aceros con características similares a las muestras seleccionadas en esta investigación.

Los aceros son materiales ferrosos heterogéneos que contienen varias fases y que desde el punto de vista de ultrasonido pueden ser modelados como un conjunto de osciladores armónicos acoplados. La propagación de una onda ultrasónica en este tipo de materiales puede ser un fenómeno complejo; sin embargo, siempre es posible describir el movimiento de cualquier sistema oscilatorio en términos de sus coordenadas normales

[Marion, 1.970]. Estas coordenadas corresponden a los modos normales de oscilación que dependen de la frecuencia natural de cada oscilador y de la constante de acoplamiento entre ellos. Cada modo normal, además de oscilar a una frecuencia bien definida posee la característica de no presentar acoplamiento entre ellos. Esto quiere decir, que si el sistema es excitado externamente a la frecuencia de un modo normal, dicho sistema oscilará exclusivamente a esa frecuencia.

Un modelo gráfico sencillo que representa la propagación del ultrasonido en las muestras de estudio con tres modos normales de oscilación puede ser apreciado en la Fig. 39 mostrada a continuación.

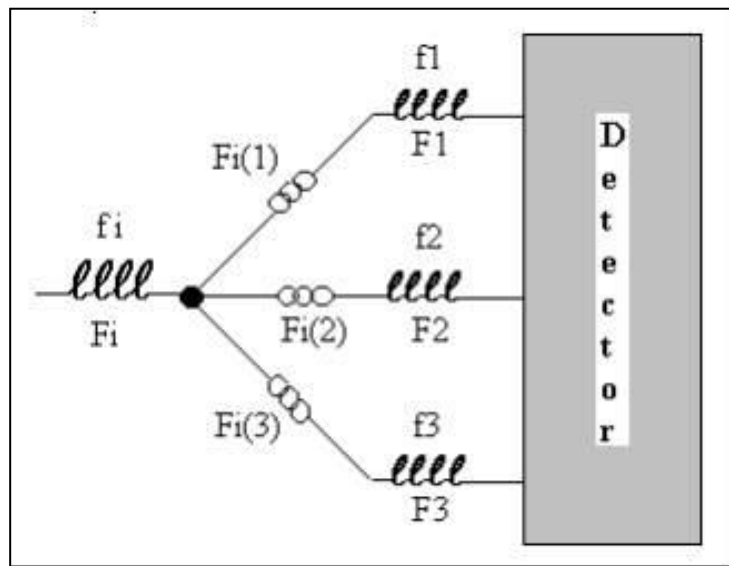


Fig. 39 Modelo gráfico de la propagación del ultrasonido en las muestras de estudio con tres modos normales de oscilación

De la Fig. 39 se define una fuerza impulsora F_i , con una frecuencia f_i , la cual estimula los modos normales F_1 , F_2 , F_3 a través de los sistemas de acoplamiento $F_i(n)$ ($n=1,2,3$), los cuales son una función de las frecuencias de los osciladores F_i y F_n ($n=1,2,3$).

En caso de que la frecuencia impulsora “ f_i ” corresponda, p.e. con la frecuencia f_1 del oscilador F_1 , entonces los coeficientes de acoplamiento $F_i(2)$ y $F_i(3)$ serán nulos, manteniéndose de esta manera la independencia oscilatoria de los modos normales de oscilación.

En el caso de la propagación de un pulso ultrasónico en muestras de aceros, el material es forzado a oscilar a la frecuencia impuesta por el transductor. Si esa frecuencia no corresponde a un modo normal de oscilación, dicho oscilador forzado estará acoplado con los modos normales a los cuales cederá energía a medida que el pulso se propaga dentro del material, en este caso el acero. El coeficiente de acoplamiento es una variable específica para cada modo normal de oscilación: el oscilador forzado puede estar acoplado fuertemente con algunos de los modos normales y débilmente acoplado con otros. Por lo tanto, un pulso, que inicialmente podría tener una distribución gaussiana de frecuencias, se distorsiona en el dominio temporal a medida que las frecuencias normales comienzan a ser excitadas. En este caso, la estimulación de estos modos normales serían los responsables de las deformaciones observadas generalmente a las frecuencias de 1,5 MHz y que el inspector lo justifica diciendo "el pulso no penetra".

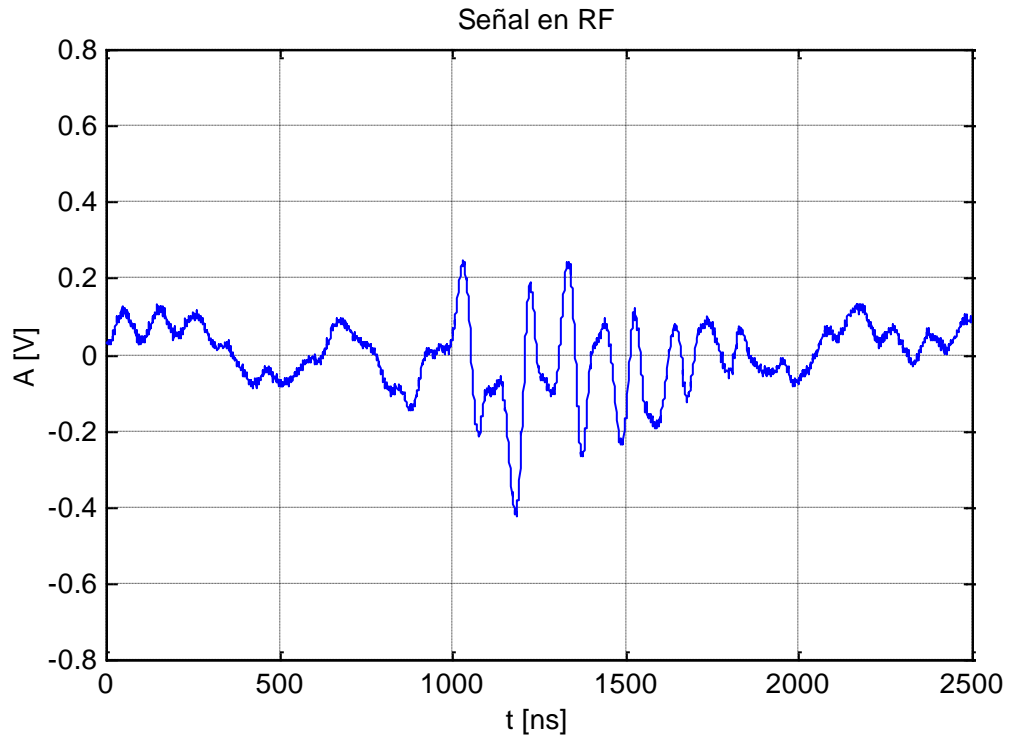
En esta sección se discute la estimulación de los modos normales de oscilación de los aceros correspondientes a las probetas “A”, “B” y “C” (acero al carbono, 5%Cr y 12%Cr). Se ha encontrado que en los tres tipos de acero, los modos normales de oscilación son excitados en tiempos más cortos que el tiempo de vuelo de la primera reflexión (primer rebote).

5.6.1 ESPECTROS DE FRECUENCIA DE LA PROBETA “A”

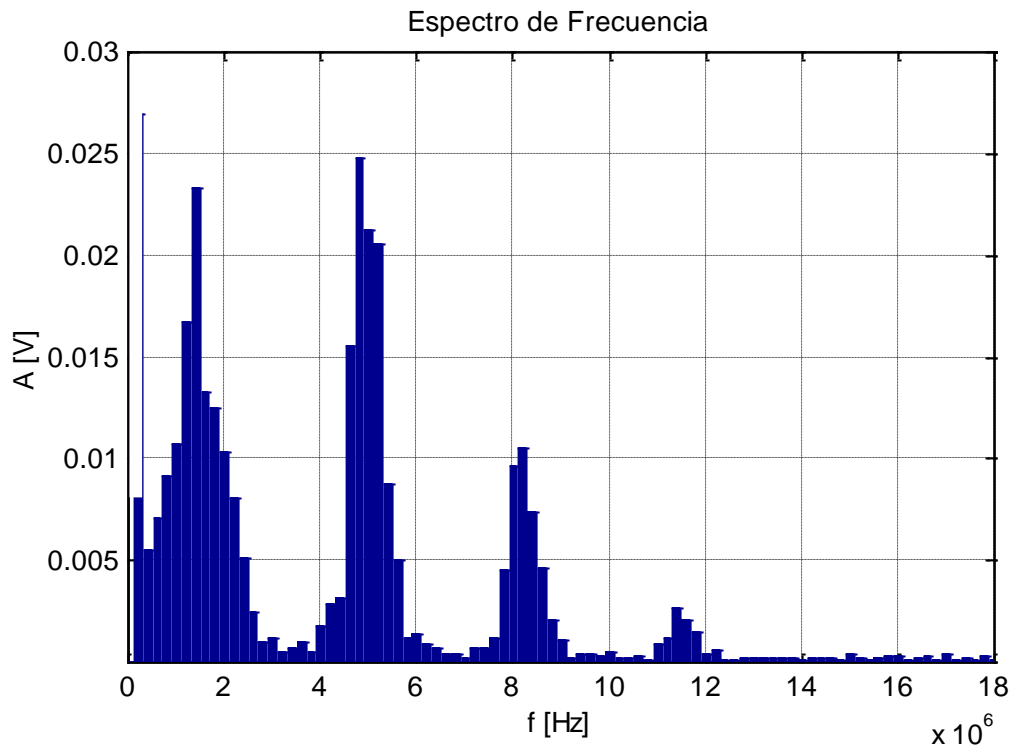
A continuación se presentan las gráficas correspondientes a las señales obtenidas de la probeta “A” en el dominio temporal y su respectivo espectro en el dominio de las frecuencias.

5.6.1.1 Transductor de frecuencia central de 1,5 MHz

El ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 1,5 MHz y de 0,375” de diámetro. Las señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 200 mV/div y un tiempo de barrido de 250 ns/div. El pulso mostrado corresponde al cuarto eco de reflexión.



(a)



(b)

Fig. 40 Transductor de 1,5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo
(b) Espectro de Frecuencia.

La Fig. 40 presenta en la gráfica (a) el pulso en el dominio temporal de la señal vista en el osciloscopio. De aquí es posible observar un pulso muy ancho y de poca definición. En la gráfica (b) se presenta el espectro de frecuencia del pulso ultrasónico y en él se puede apreciar la estimulación de pulsos alrededor de 4,8 - 8,4 y 11,8 MHz, siendo el pulso alrededor de 4,8 MHz el más intenso. Esta figura indica que la señal inicial de 1,4 MHz ha generado dentro del material pulsos a más altas frecuencias que probablemente corresponden a las frecuencias naturales de excitación del acero al carbono de muestra. Al mismo tiempo esto explica el hecho de que la señal en el dominio temporal no muestra un pulso bien definido, pues lo que en realidad se tiene es una combinación simultánea de pulsos a frecuencias alrededor de 1,5 - 4,8 - 8 y 11,6 MHz.

En la Fig. 41 se presenta una gráfica correspondiente a espectros de frecuencia de variados ecos de reflexión tomados sobre la muestra de acero al carbono (Probeta "A"), en donde es posible observar la aparición de las frecuencias estimuladas, aún cuando la señal ha sido detectada para las primeras reflexiones. Esto indica que los pulsos alrededor de 4,8 y 8 MHz son generados muy rápidamente y permanecen en el tiempo, lo que refuerza la idea de ser modos naturales de oscilación.

5.6.1.2 Transductor de frecuencia central de 2,25 MHz

Este ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 2,25 MHz y de 0,375" de diámetro. Las señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 500mv/div y un tiempo de barrido de 250 ns/div. El pulso corresponde al quinto eco de reflexión.

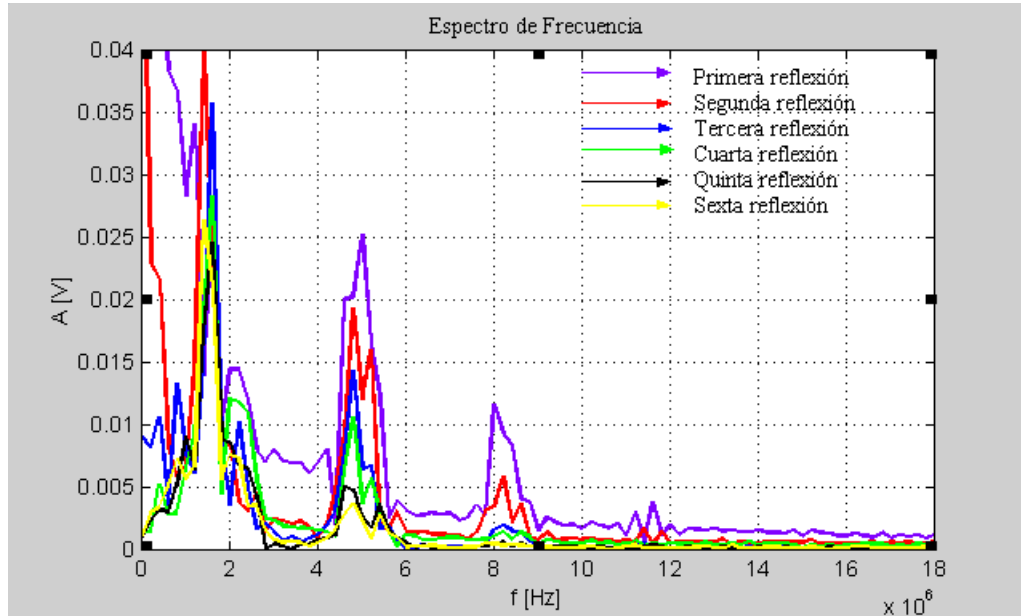
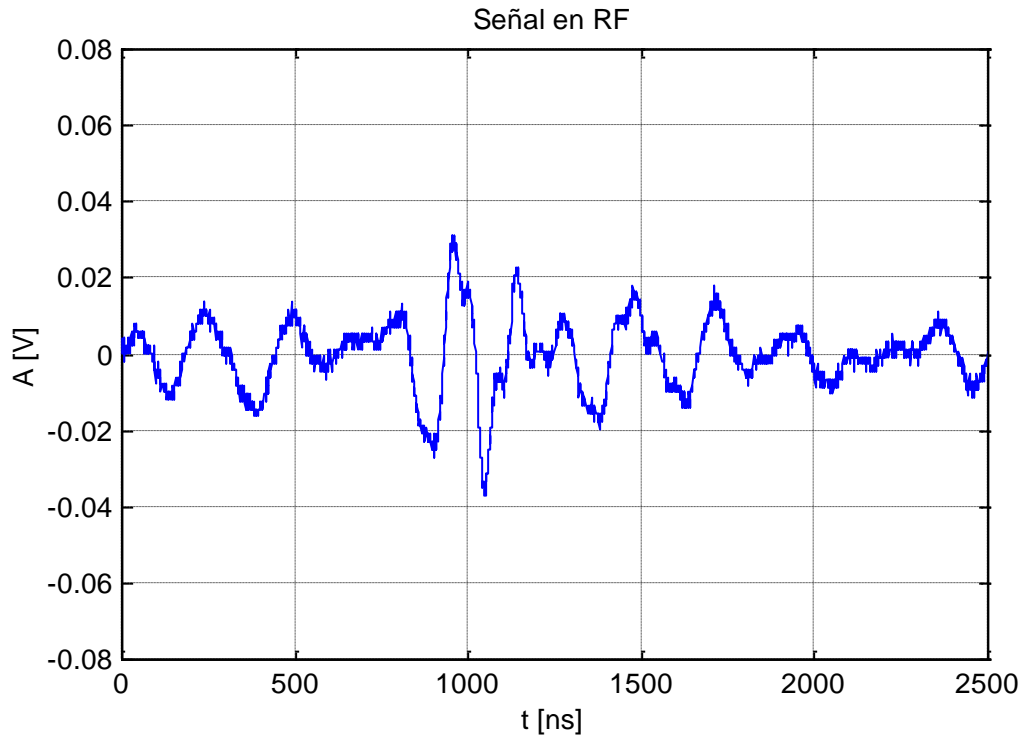


Fig. 41 Espectro de Frecuencia de diferentes ecos de reflexión utilizando un Transductor de 1,5 MHz de Frecuencia y 0,375” de Diámetro

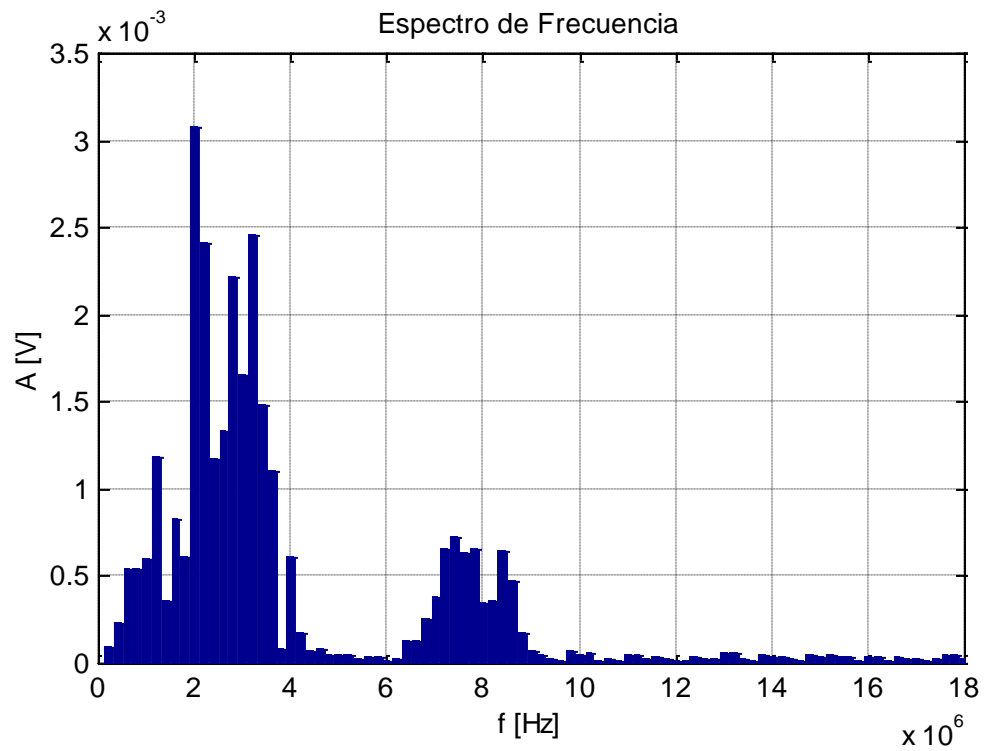
La gráfica (a) de la Fig. 42 presenta el pulso ultrasónico en el dominio temporal. De ésta se puede apreciar un pulso bastante distorsionado, aunque no tanto como el presentado en la Fig.40 (a). Por otro lado, la gráfica (b) de la figura representa el espectro de frecuencias del pulso. En éste se observa que la frecuencia de estimulación de 2,25 MHz ha generado un pequeño pulso alrededor de la frecuencia de 8 MHz. Sin embargo, pese a que estos pulsos son de baja amplitud, su presencia deforma el pulso original en el dominio de tiempo.

5.6.1.3 Transductor de frecuencia central de 5 MHz

El ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 5 MHz y de 0,375” de diámetro. Estas señales presentadas a continuación fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 2 V/div. y un tiempo de barrido de 250 ns/div. Así mismo, el pulso corresponde al sexto eco de reflexión.



(a)



(b)

Fig. 42 Transductor de 2,25 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.

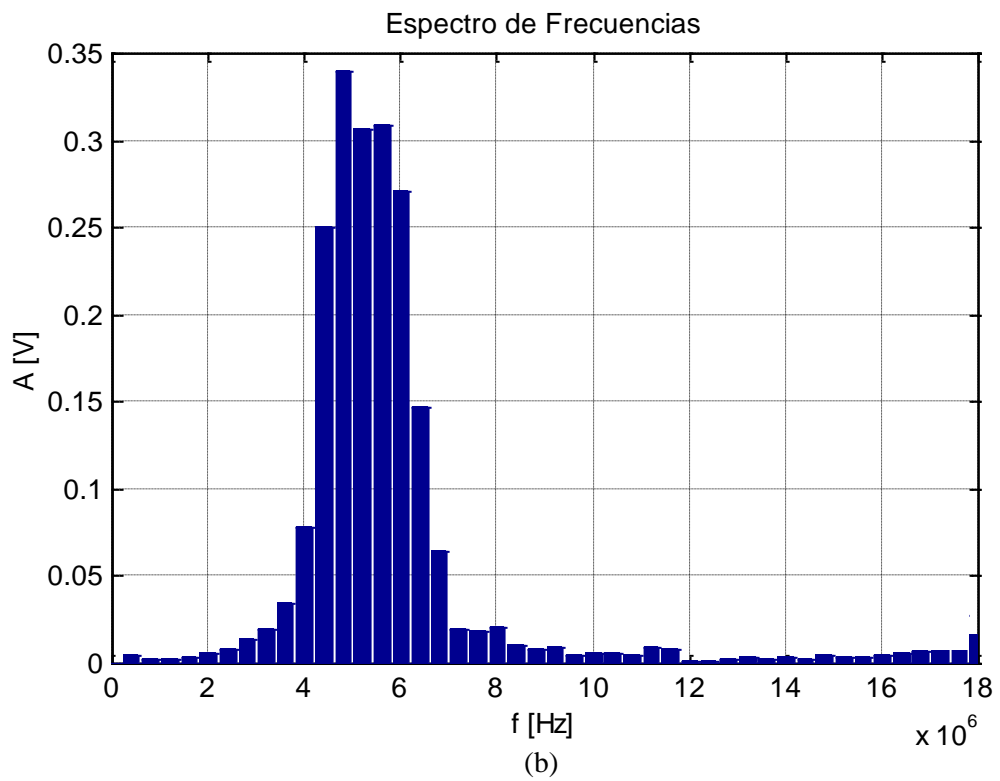
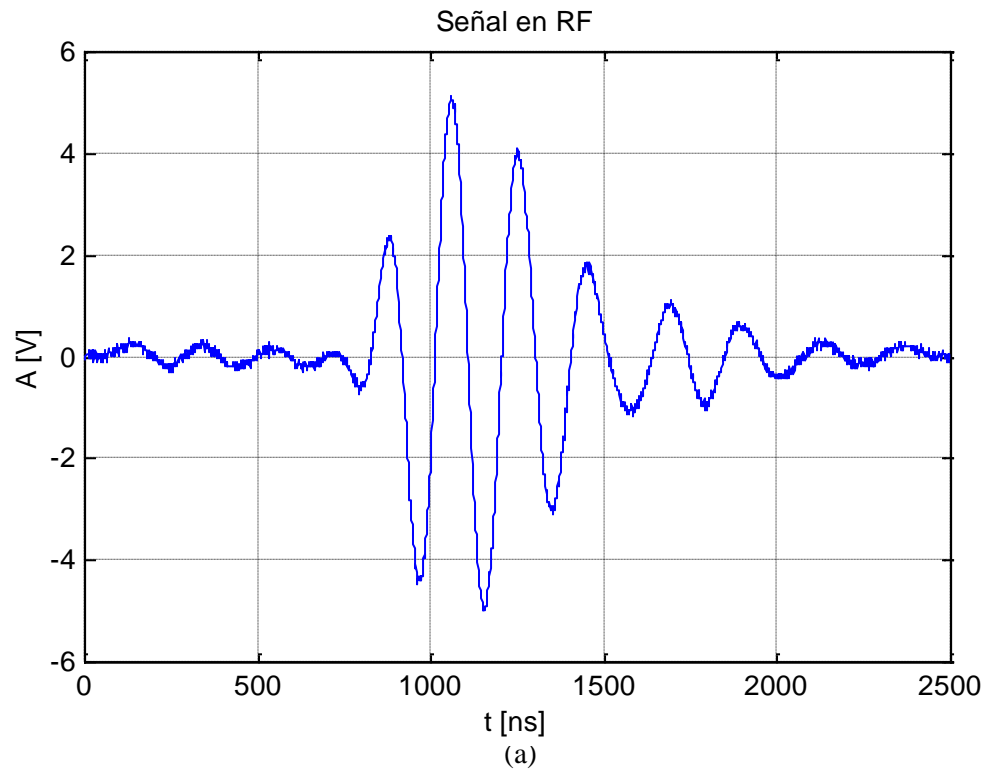


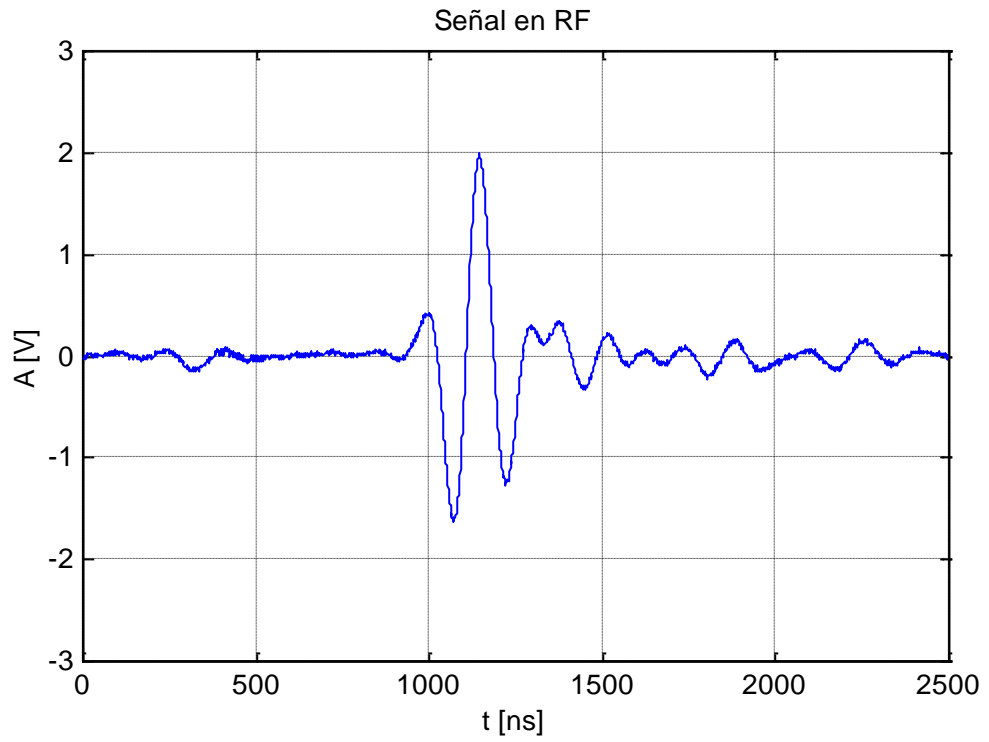
Fig. 43 Transductor de 5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.

La gráfica (a) de la Fig. 43 muestra un pulso bien definido en el dominio de tiempo. De la gráfica (b) se puede observar que el espectro del pulso se mantuvo alrededor de 4,8 MHz sin generar pulsos a más altas frecuencias. Esto indica que, como se mencionó en la discusión de la Fig. 40, la frecuencia alrededor de 4,8 MHz coincide con un modo natural de oscilación del acero al carbono. Cuando un modo natural de oscilación es estimulado dentro del material este tiene la tendencia de mantener su energía sin cederla a otros modos y esto se hace evidente en esta gráfica.

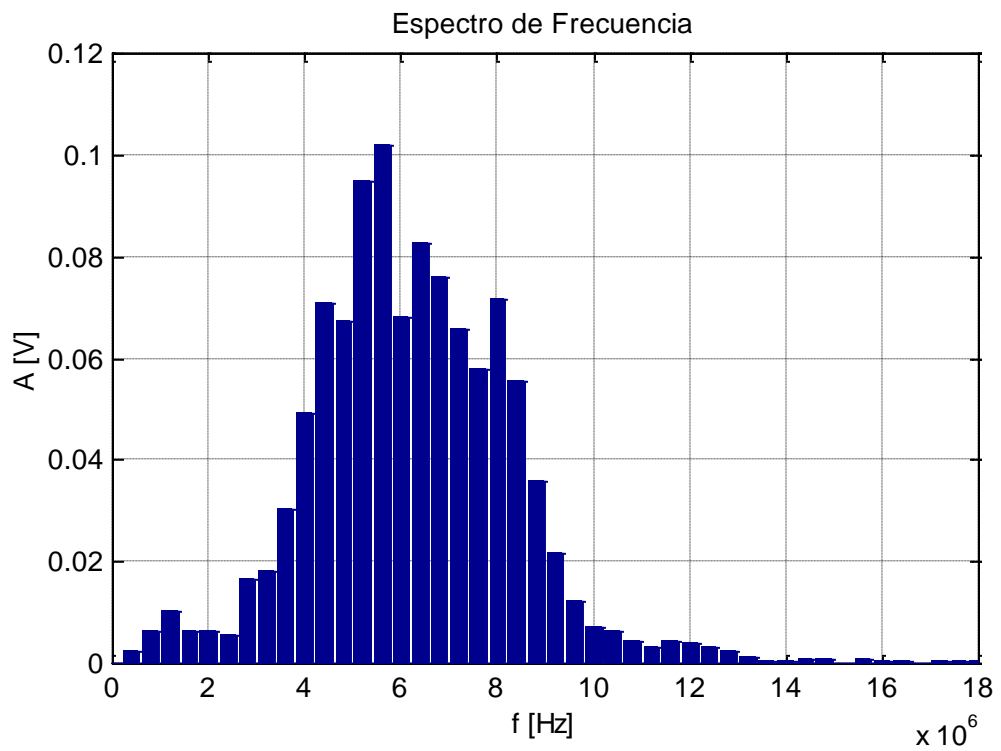
5.6.1.4 Transductor de frecuencia central de 7,5 MHz

Las señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 500 mV/div. y un tiempo de barrido de 250 ns/div utilizando un transductor de frecuencia central de 7,5 MHz y de 0,375" de diámetro. El pulso corresponde al sexto eco de reflexión.

La gráfica (a) de la Fig. 44 presenta un pulso bien definido en el dominio de tiempo. La gráfica (b), por otro lado, muestra el espectro de frecuencia del mismo pulso. En ésta se puede observar que el ancho de banda del espectro se ha agrandado y su frecuencia dominante se ha desplazado hacia 5,8 MHz. Este desplazamiento concuerda en parte con el espectro de frecuencia presentado por el fabricante del transductor, el cual señala que éste, probado en plexiglass™, posee una frecuencia central de 6,71 MHz y una frecuencia pico de 7,81 MHz. (Ver Anexo 2). Por otro lado se observó la estimulación del pulso alrededor de 8 MHz, el cual coincide aproximadamente con uno de los pulsos estimulados con 1,5 MHz aislados a otras frecuencias.



(a)



(b)

Fig. 44 Transductor de 7,5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo
(b) Espectro de Frecuencia.

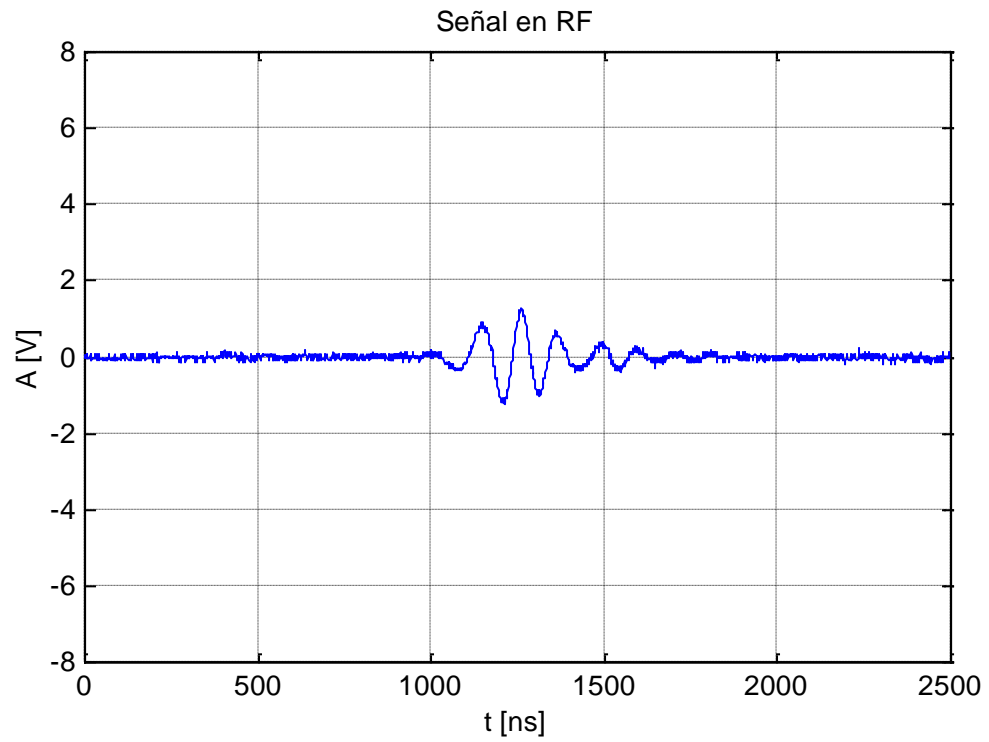
5.6.1.5 Transductor de frecuencia central de 10 MHz

Ensayo realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 10 MHz y de 0,375” de diámetro. Las señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 2 V/div y un tiempo de barrido de 250 ns/div. El pulso corresponde al quinto eco de reflexión.

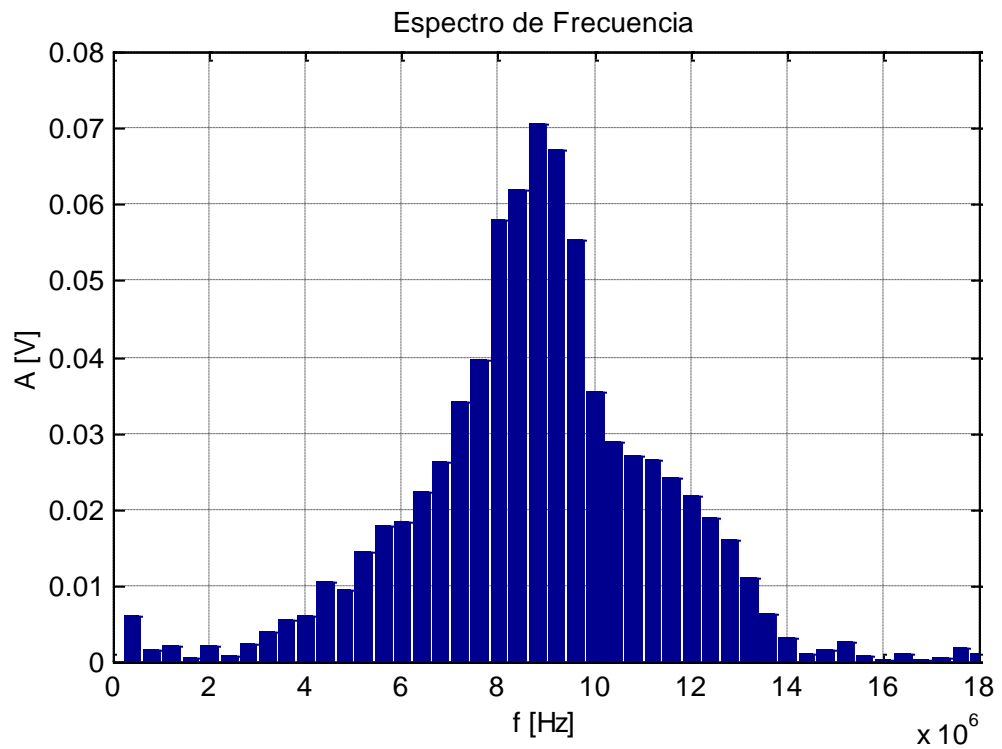
En la gráfica (a) de la Fig. 45 se muestra un pulso en el dominio de tiempo de baja amplitud y buena definición. Por otro lado en la gráfica (b) de la misma figura es posible apreciar un espectro de frecuencias con una forma cercana a una distribución gaussiana, con un pequeño ancho de banda y frecuencia central de 9 MHz. No se observó la generación de pulsos aislados a otras frecuencias. Puede observarse un ensanchamiento del pulso a su lado derecho que indica una estimulación débil de frecuencias alrededor de 11 y 12 MHz.

5.6.2 ESPECTROS DE FRECUENCIA DE LA PROBETA “B”

A continuación se presentan las gráficas correspondientes a las señales en el dominio de tiempo y su espectro de frecuencia obtenidos de la Probeta “B”, la cual corresponde a un acero de baja aleación con una composición aproximada del 5% de cromo.



(a)



(b)

Fig. 45 Transductor de 10 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia.

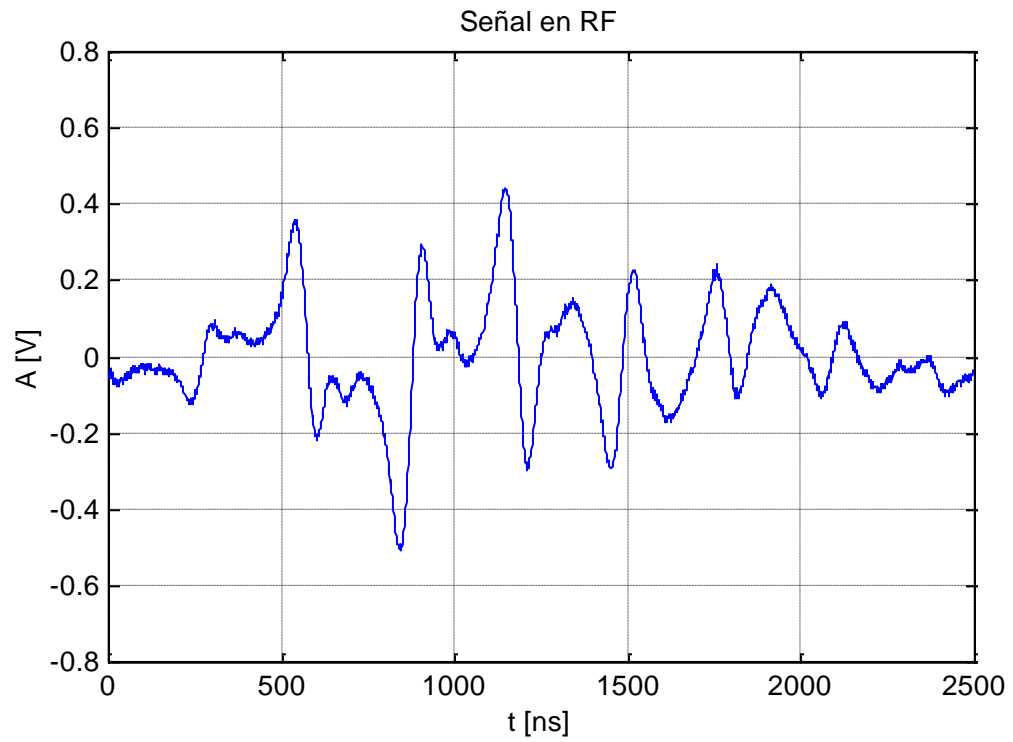
5.6.2.1 Transductor de frecuencia central de 1,5 MHz

El ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 1,5 MHz y de 0,375” de diámetro. Las señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 200 mV/div y un tiempo de barrido de 250 ns/div. Así mismo, el pulso corresponde al cuarto eco de reflexión.

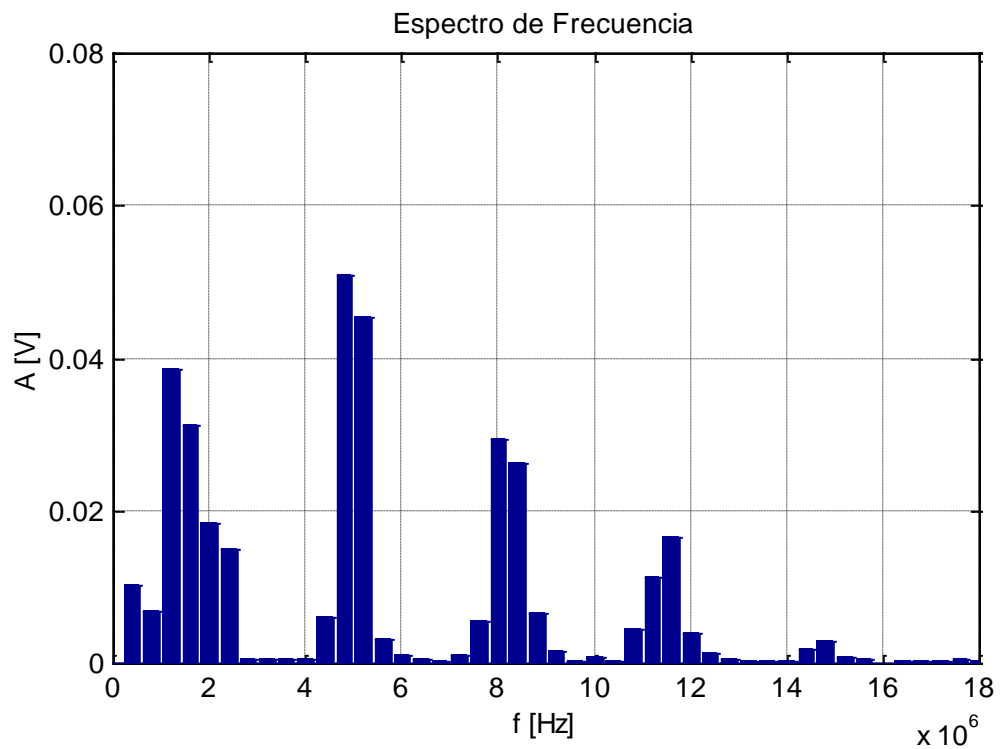
En la gráfica (a) de la Fig. 46 se presenta el pulso en el dominio de tiempo. Este corresponde a un pulso sin definición, tal y como ocurre en la señal adquirida con el mismo transductor sobre la Probeta “A” y que fue discutido con la Fig. 40. En la gráfica (b) se aprecia la estimulación de las frecuencias alrededor de 4,8 MHz, a 8 MHz, 11,8 MHz y 15 MHz aproximadamente, las cuales representan modos normales de oscilación del material y son los causantes de la poca definición del pulso original en el tiempo. Estos modos corresponden con los encontrados en la muestra de acero al carbono tal como se muestra en la Fig. 40. En el caso de la probeta “B”, estos modos fueron excitados con más facilidad que en la probeta “A”.

5.6.2.2 Transductor de frecuencia central de 2,25 MHz

El ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 5 MHz y de 0,375” de diámetro. Estas señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 500 mV/div y un tiempo de barrido de 250 ns/div. El pulso corresponde al quinto eco de reflexión.



(a)



(b)

Fig. 46 Transductor de 1,5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo
(b) Espectro de Frecuencia

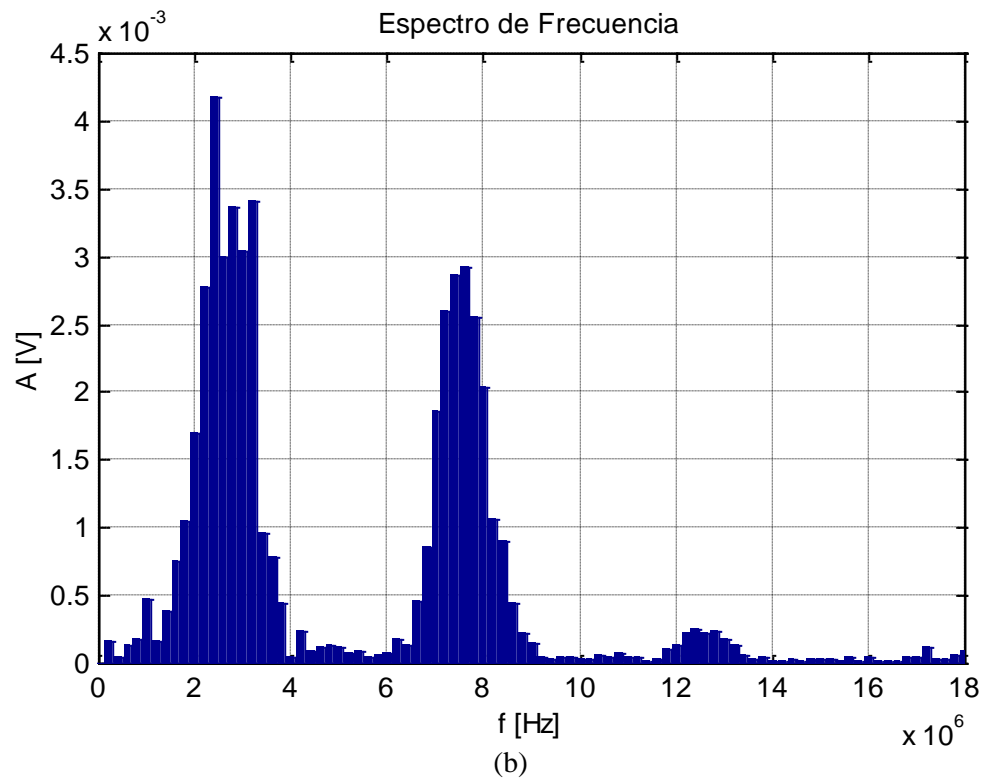
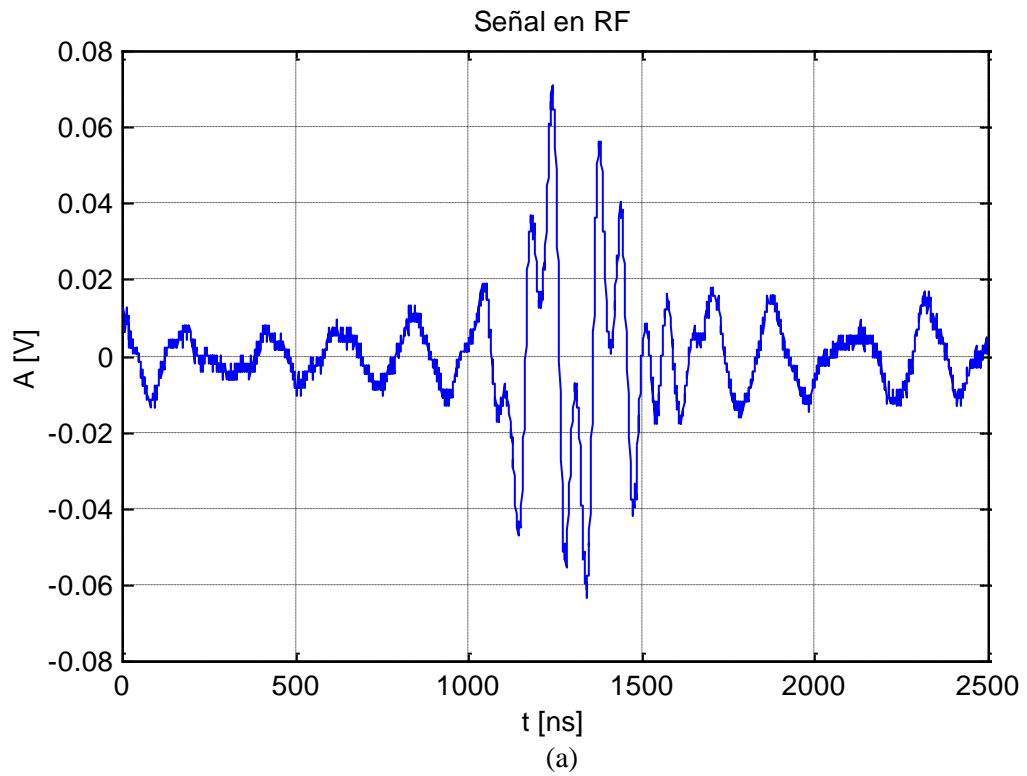


Fig. 47 Transductor de 2,25 MHz (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo
(b) Espectro de Frecuencia

La gráfica (a) de la Fig.47 muestra un pulso distorsionado, sin embargo en comparación con el pulso obtenido en acero al carbono (Fig. 42) la señal con el transductor de frecuencia de 2,25 MHz posee mejor definición sobre la probeta “B”. En la gráfica (b) de la figura se presenta el espectro de frecuencia de la señal, en la cual se puede observar la generación de pulsos alrededor de 7,8 y 12,8 MHz a partir del pulso original de 2,25 MHz. Esto corresponde parcialmente con los pulsos estimulados en la Probeta “A” tal como se muestra en la Fig. 40. También se observa que el pulso de mayor amplitud corresponde a la frecuencia de 2,5 MHz.

5.6.2.3 Transductor de frecuencia central de 5 MHz

El ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 5 MHz y de 0,375” de diámetro. Las señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 2V/div y un tiempo de barrido de 250ns/div. El pulso corresponde al quinto eco de reflexión.

La gráfica (a) de la Fig. 48 muestra un pulso bien definido en el dominio de tiempo. De la gráfica (b) se puede observar que el espectro del pulso se mantuvo alrededor de 5 MHz sin generar pulsos a más altas frecuencias. Esto indica que, como se mencionó en la discusión de la Fig. 40, la frecuencia de 5 MHz coincide con un modo natural de oscilación de la Probeta “B” correspondiente a 5% de Cromo. Este mismo resultado se obtuvo en la Probeta “A” de acero al carbono cuando fue estimulada con un transductor de frecuencia central de 5 MHz.

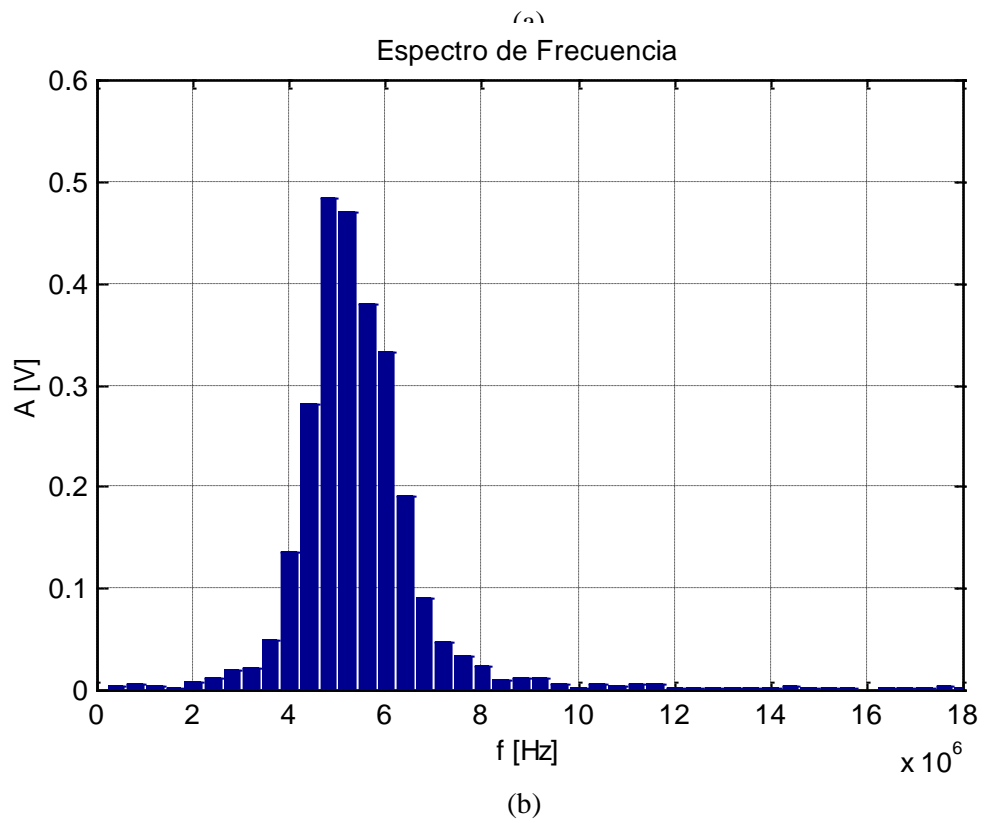
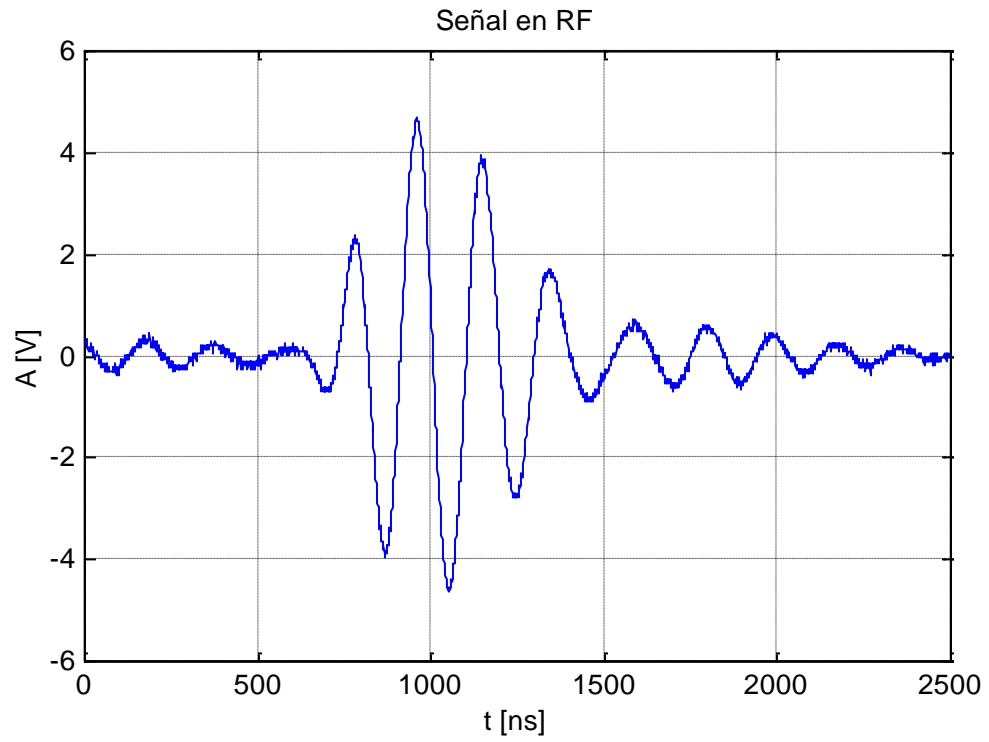


Fig. 48 Transductor de 5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia

5.6.2.4 Transductor de frecuencia central de 7,5 MHz

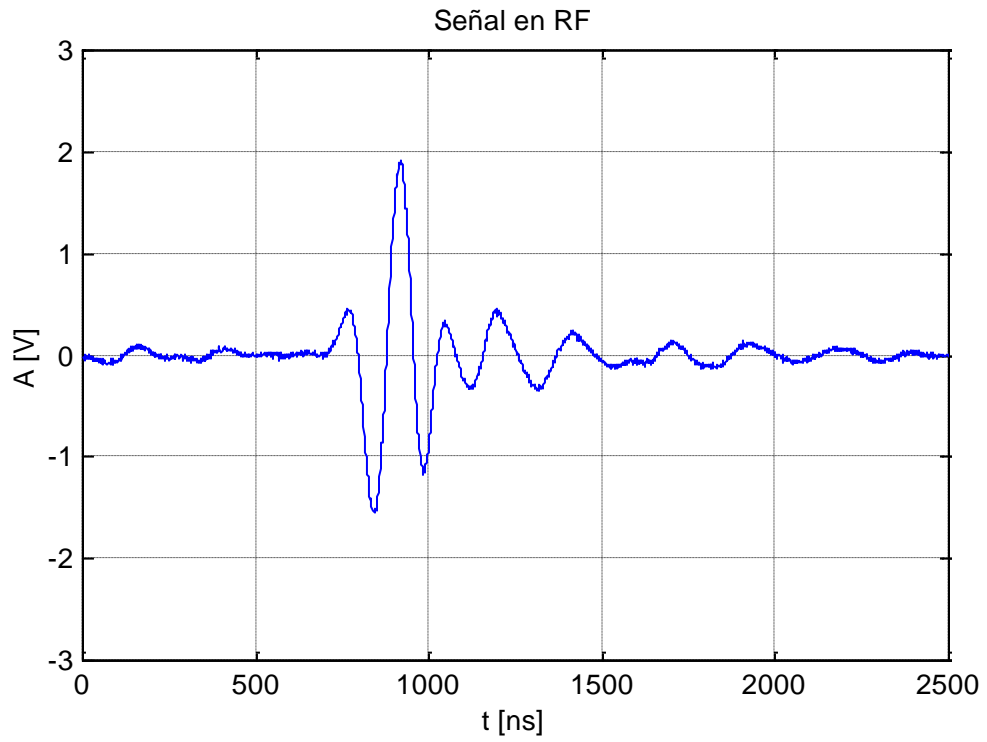
El ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 7,5 MHz y de 0,375" de diámetro. Las señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 500 mV/div y un tiempo de barrido de 250 ns/div. El pulso corresponde al sexto eco de reflexión.

En la gráfica (a) de la Fig.49 se muestra un pulso poco distorsionado y con poco ruido. En la gráfica (b) la máxima amplitud se presenta a 6,4 MHz de frecuencia, con un ancho de banda que abarca los modos normales alrededor de 5 MHz y 8 MHz. El hecho de que el pulso conserve una forma cercana a una distribución gaussiana, después de su ensanchamiento, permite que se obtenga una buena definición del pulso en el dominio temporal.

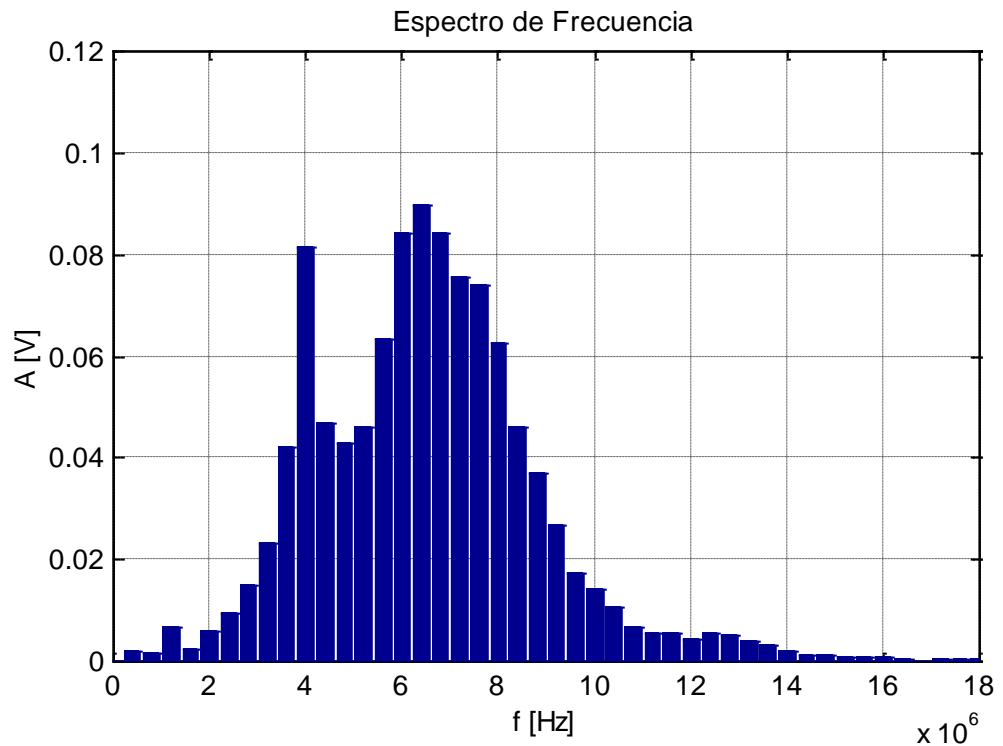
5.6.2.5 Transductor de frecuencia central de 10 MHz

El ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 10 MHz y de 0,375" de diámetro. Las señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 2V/div y un tiempo de barrido de 250 ns/div. Al mismo tiempo, el pulso corresponde al quinto eco de reflexión.

En la Fig.50, la gráfica (a) permite apreciar un pulso ultrasónico con una muy buena definición en el dominio de tiempo. El espectro de frecuencia correspondiente a esta señal se observa en la gráfica (b) de la misma figura. En esta gráfica se puede notar que el pulso original con frecuencia central de 10 MHz, estimuló de una manera selectiva frecuencias alrededor de 12 MHz.

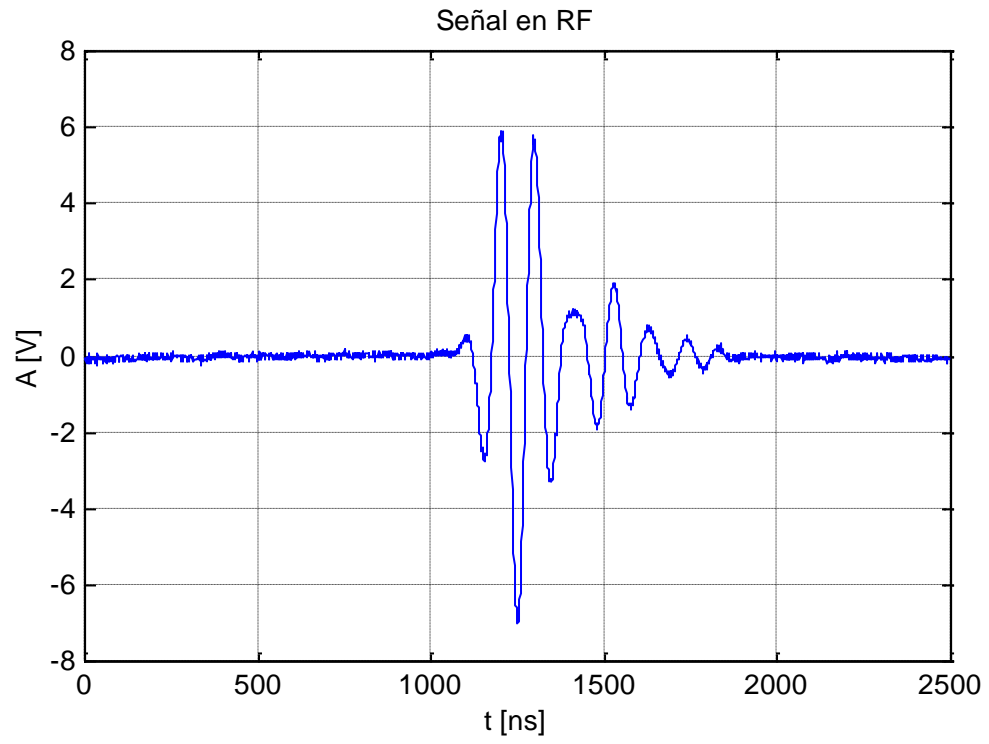


(a)

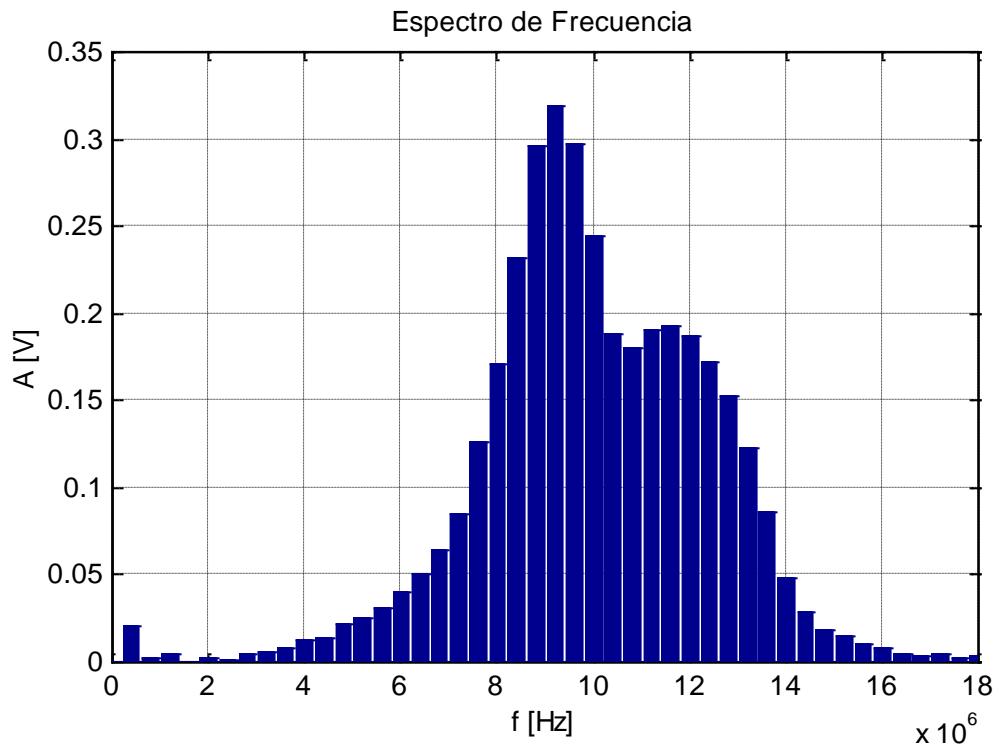


(b)

Fig. 49 Transductor de 7,5 MHz(a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia



(a)



(b)

Fig. 50 Transductor de 10 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia

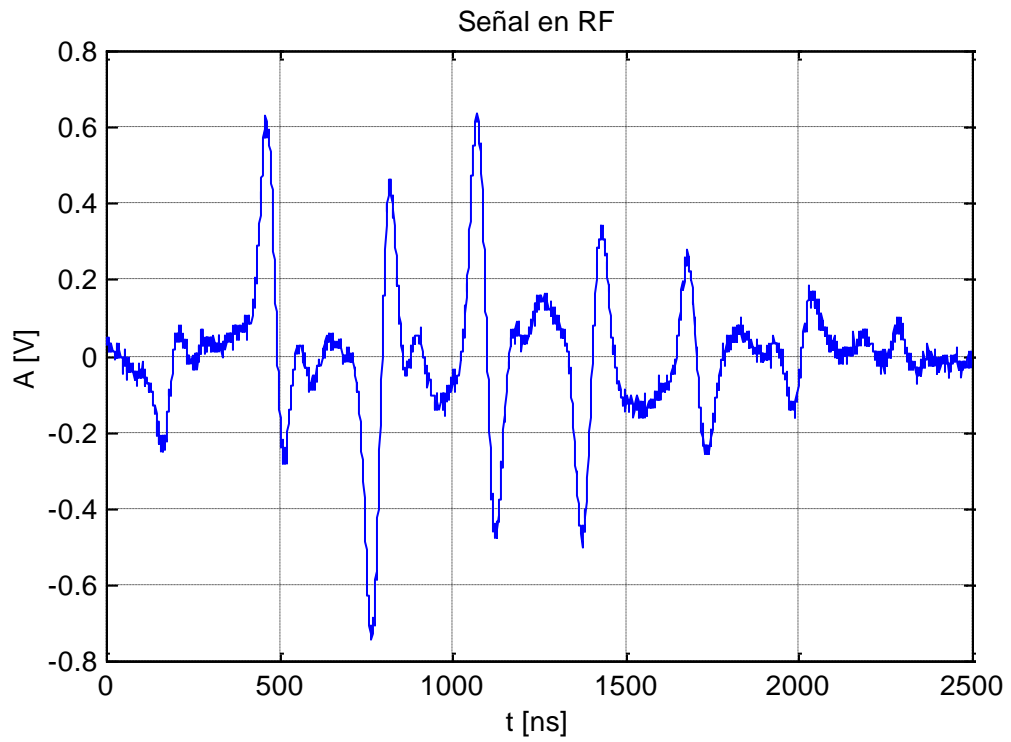
Comparando la gráfica (b) de la Fig. 50 con la Fig. 45 correspondiente al acero al carbono, se puede apreciar que la estimulación de frecuencias alrededor de 12 MHz es más fuerte en aceros con 5% Cr que en aceros al carbono. También puede observarse comparando estas dos figuras que el lado izquierdo del pulso se debilita más en el acero con 5% Cr que en el acero al carbono, indicando una transferencia de energía de estas frecuencias hacia 12 MHz. En la gráfica (b) de la Fig. 50 también se aprecia un corrimiento de frecuencias, el cual se debe a una superposición de dos modos normales que han sido estimulados alrededor de 11 MHz y 13 MHz, los cuales pudieron ser observados en las Figs. 46 y 47, y debido a la proximidad de estos modos se aprecia un crecimiento del pulso a estas frecuencias.

5.6.3 ESPECTROS DE FRECUENCIA DE LA PROBETA “C”

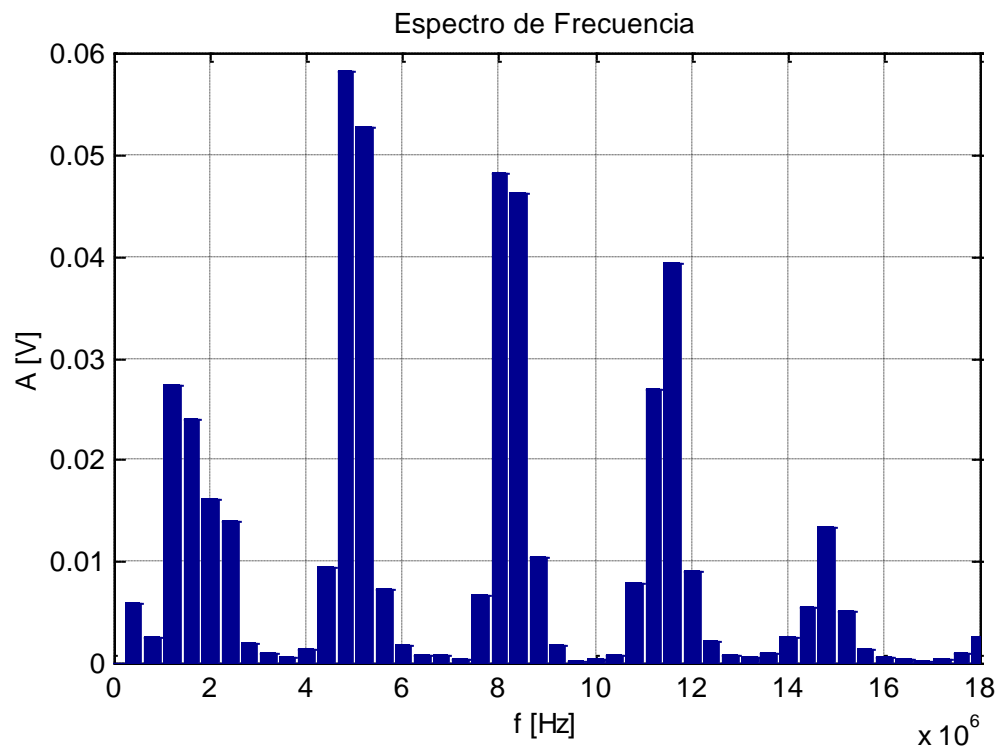
A continuación se presentan las gráficas correspondientes a las señales en el dominio de tiempo y su respectivo espectro en el dominio de las frecuencias.

5.6.3.1 Transductor de frecuencia central de 1,5 MHz

El ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 1,5 MHz y de 0,375” de diámetro. Las señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 200 mV y un tiempo de barrido de 250 ns/div. Además el pulso corresponde al cuarto eco de reflexión.



(a)



(b)

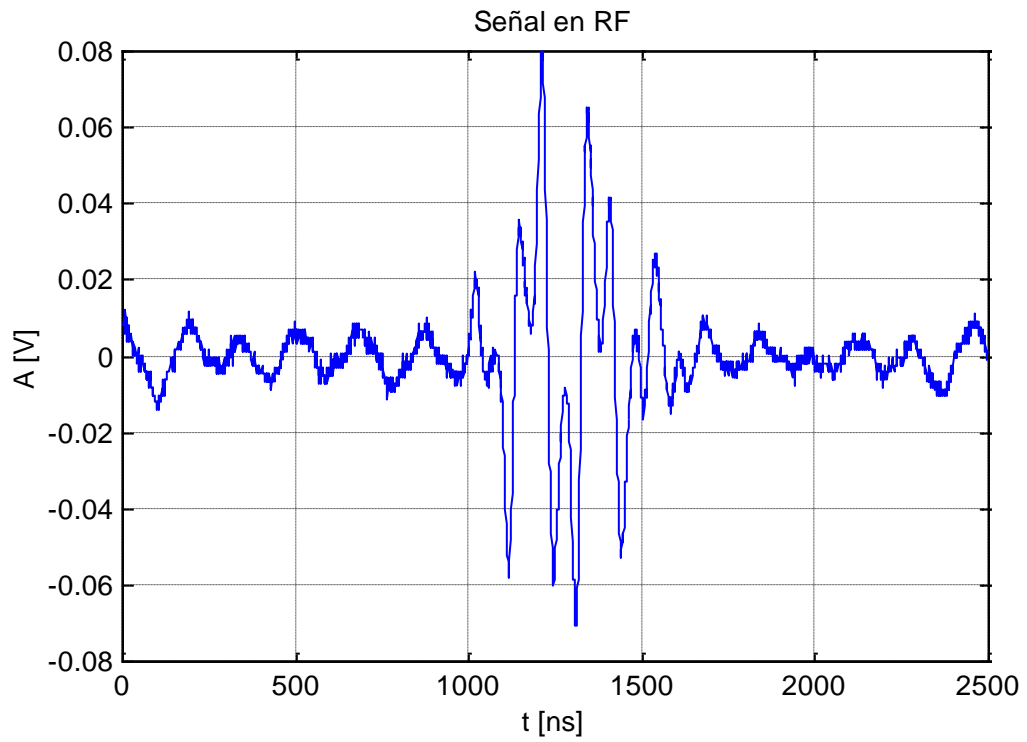
Fig. 51 Transductor de 1,5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo
(b) Espectro de Frecuencia

En la gráfica (a) de la Fig. 51 se presenta el pulso en el dominio de tiempo. Este corresponde a un pulso sin definición, tal y como ocurre en la señal adquirida con el mismo transductor sobre la probeta “A” y “B”, que fue discutido con las Figs. 40 y 46. En la gráfica (b) de misma figura, se presenta un espectro de frecuencias en donde claramente se aprecia la estimulación de las frecuencias alrededor de 4,8 MHz, 8 MHz, 11,8 MHz y 14,8 MHz aproximadamente, las cuales al igual que en los casos anteriores con la misma frecuencia, pueden representar modos de oscilación natural del material. Estos modos corresponden con los encontrados en la muestra de acero al carbono tal como se muestra en la Fig. 40 y en la muestra con 5% de cromo (probeta “B”) de la Fig. 46. En el caso de la probeta “C”, se hace evidente la facilidad con que estos modos fueron estimulados, dada la amplitud con que se presentan, que corresponden aproximadamente al doble de la encontrada en acero al carbono.

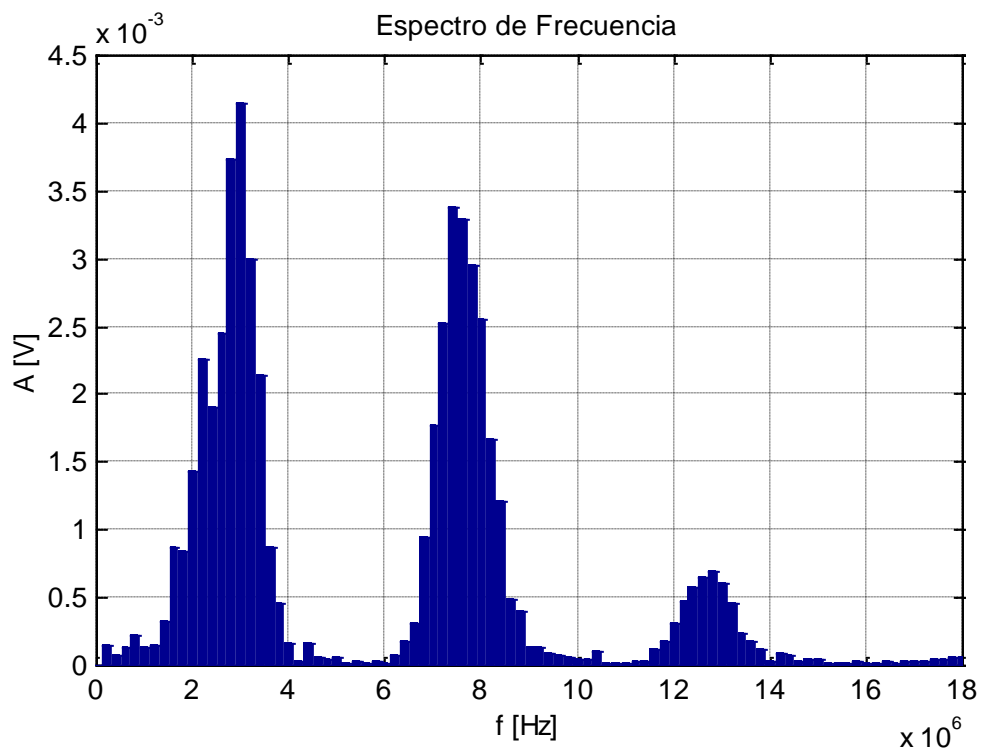
Por otro lado, comparando las Figs. 40, 46 y 51 se puede observar que la transferencia de energía a los modos normales de oscilación se facilita a medida que aumenta la concentración de cromo en el acero.

5.6.3.2 Transductor de frecuencia central de 2,25 MHz

El ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 2,25 MHz y de 0,375” de diámetro. Estas señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 200mV y un tiempo de barrido de 250 ns/div. Al mismo tiempo, el pulso corresponde al quinto eco de reflexión.



(a)



(b)

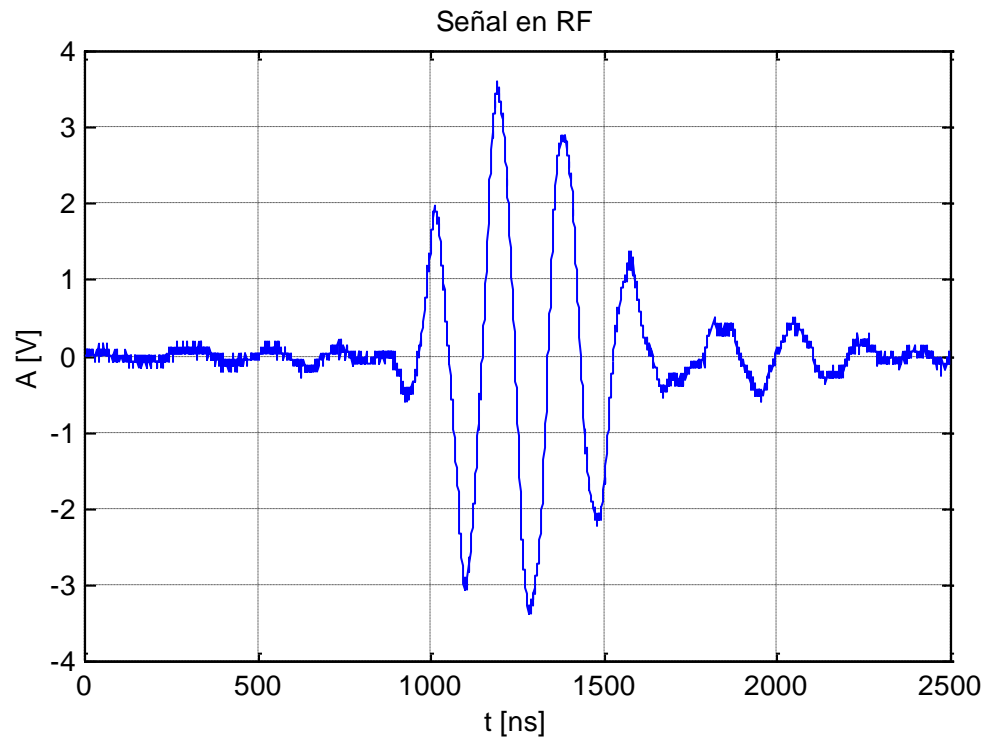
Fig. 52 Transductor de 2,25 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo
(b) Espectro de Frecuencia

La gráfica (a) de la Fig. 52 muestra un pulso de poca definición en el dominio temporal. Por otro lado, en la gráfica (b) de la figura se presenta el espectro de frecuencia de la señal, en la cual se puede observar la generación de pulsos alrededor de 7,8 MHz y 12,8 MHz aproximadamente, a partir del pulso original de 2,25 MHz. Esto corresponde en parte con los pulsos estimulados en las probetas “A” y “B”, tal como se muestra en la Figs. 42 y 47. Así mismo, a partir de las Figs. 51 y 52 se puede apreciar que los pulsos estimulados de una frecuencia de 2,25 MHz coinciden parcialmente con aquellos estimulados a partir de 1,5 MHz. Para evaluar esto mejor se requiere de un estudio mas detallado de las variables elásticas del material, a fin de poder comprender este comportamiento, no obstante hay que considerarlas diferencias entre los coeficientes de acoplamiento de los osciladores naturales para 1,5 MHz y para 2,25 MHz.

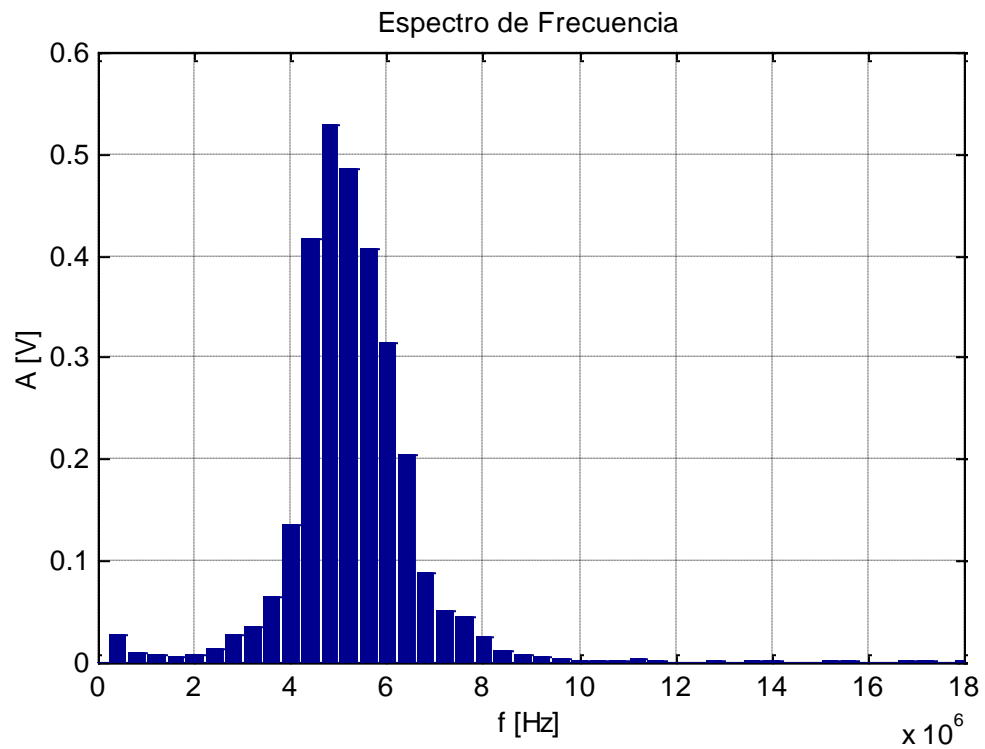
5.6.3.3 Transductor de frecuencia central de 5 MHz

El ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 5 MHz y de 0,375” de diámetro. Estas señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 2V/div y un tiempo de barrido de 250 ns/div. De igual manera el pulso corresponde al sexto eco de reflexión.

La gráfica (a) de la Fig. 53 muestra un pulso muy bien definido en el tiempo y poco distorsionado. Al mismo tiempo, en la gráfica (b) se aprecia que la frecuencia de mayor amplitud corresponde con 5 MHz. Al igual que en los espectros de las probetas “A” y “B”, este presenta una forma similar a una distribución gaussiana.



(a)



(b)

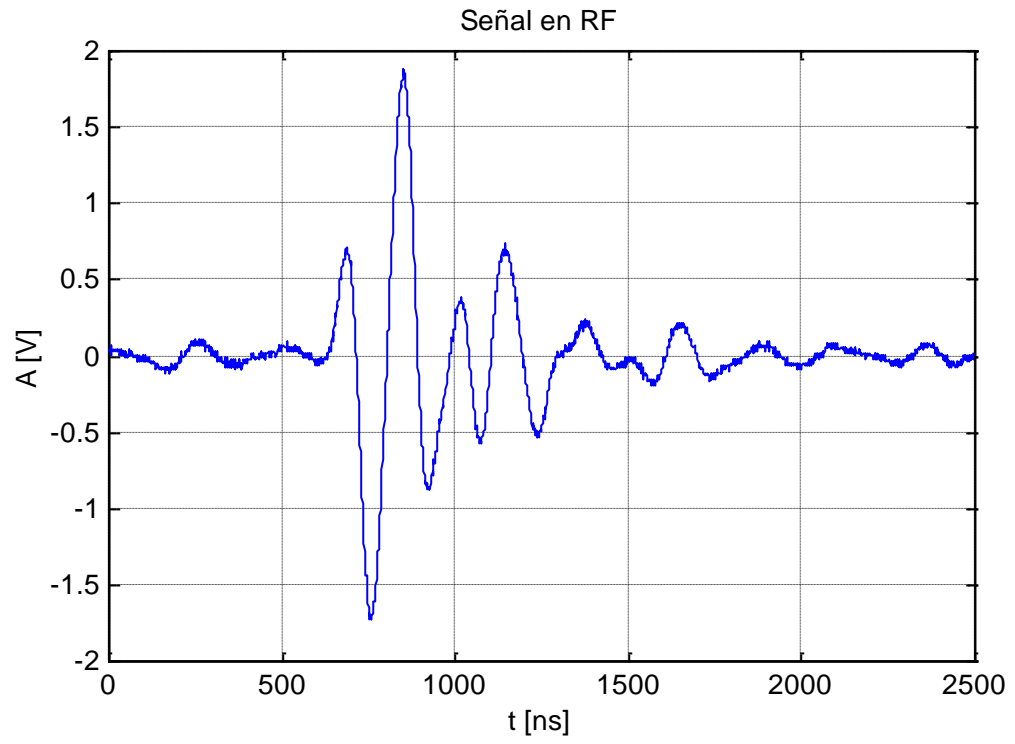
Fig. 53 Transductor de 5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia

También se puede observar en la Fig. 53 que este pulso corresponde con uno de los modos estimulados con 1,5 MHz, el hecho de que el pulso de 5 MHz no halla estimulado otras frecuencias fortalece la idea de que esta frecuencia corresponde a un modo de oscilación natural del material, tal como se discutió en la sección 5.6.3.1

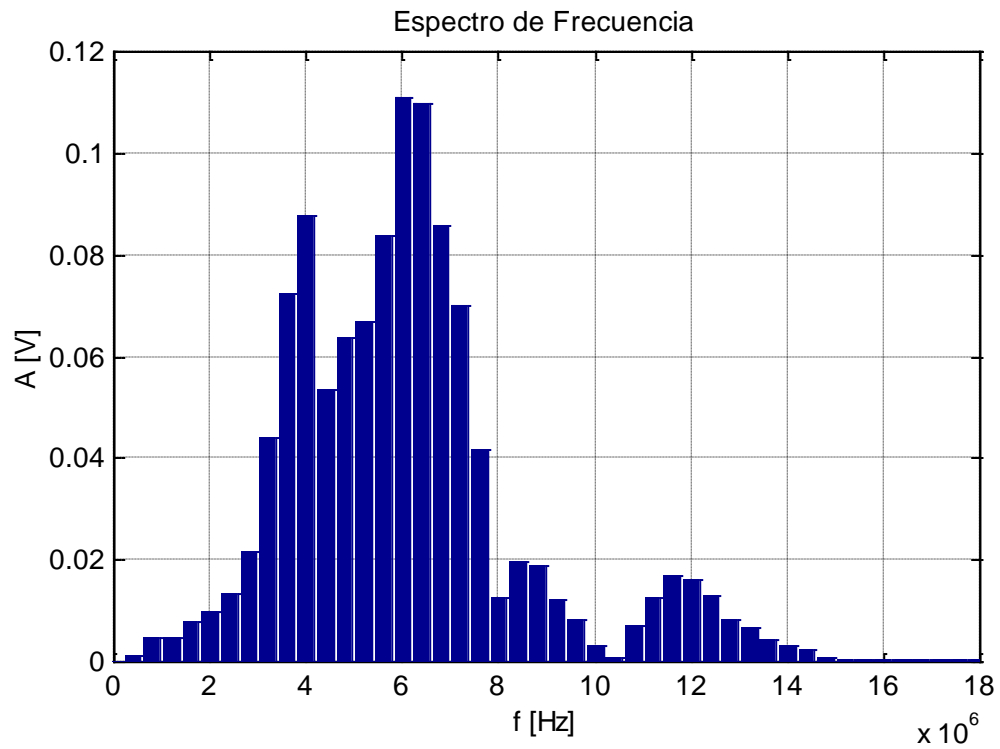
5.6.3.4 Transductor de frecuencia central de 7,5 MHz

El ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 7,5 MHz y de 0,375" de diámetro, además las señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 500 mV/div y un tiempo de barrido de 250 ns/div. En este caso el pulso corresponde al séptimo eco de reflexión.

La gráfica (a) de la Fig. 54 muestra un pulso en el dominio de tiempo con una pequeña distorsión, al igual como se aprecia en las Figs. 44 y 49. Esta distorsión proviene de la estimulación de frecuencias a 12 MHz y a un ensanchamiento asimétrico del pulso en el dominio de frecuencia tal y como se observa en la gráfica (b) de la Fig. 54. La estimulación del pulso alrededor de 12 MHz corresponde a uno de los modos de oscilación estimulados con 1,5 MHz tal como se muestra en la Fig. 40. También se puede apreciar en la gráfica (b) de la figura, que la frecuencia de máxima amplitud corresponde al pulso de 6 MHz, el corrimiento presentado por la frecuencia central del pulso es un efecto del diseño del transductor y no del medio de propagación, esto se puede comprobar observando el espectro de frecuencias emitido por el fabricante y que puede ser visto en el Anexo 1.



(a)



(b)

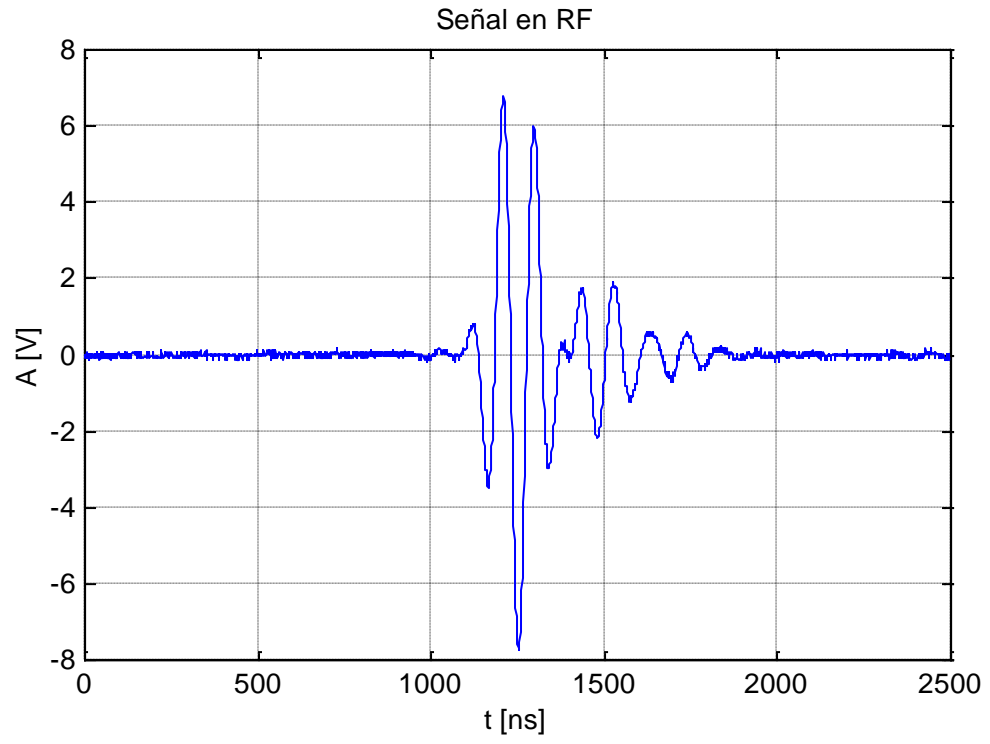
Fig. 54 Transductor de 7,5 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo
(b) Espectro de Frecuencia

5.6.3.5 Transductor de frecuencia central de 10 MHz

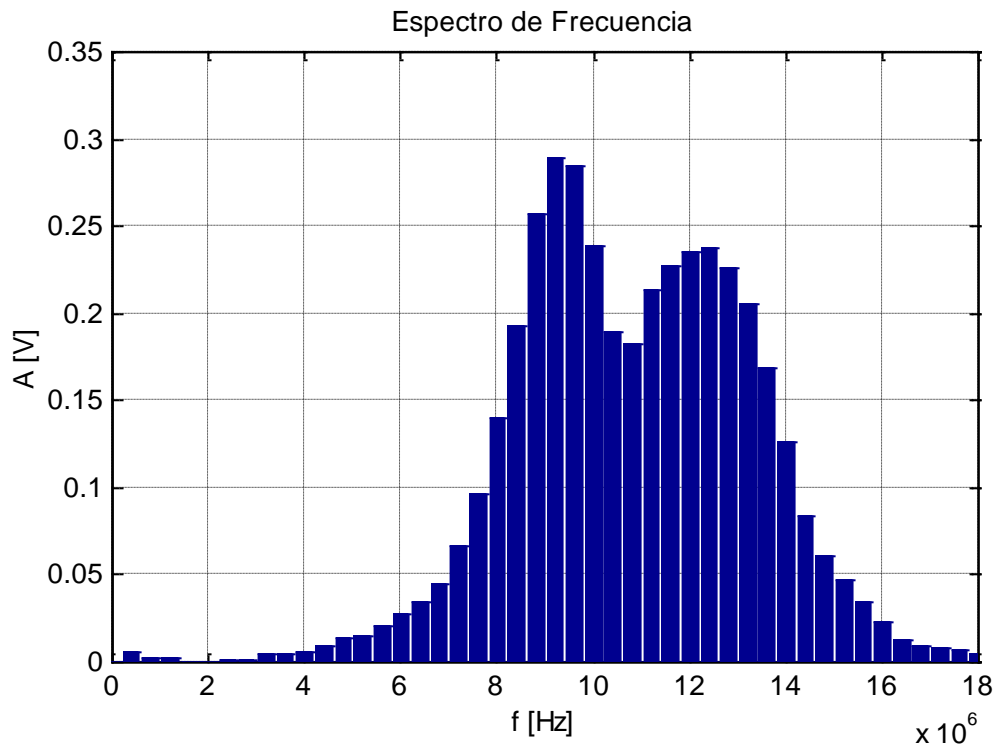
El ensayo fue realizado utilizando un transductor de frecuencia central de 10 MHz y de 0,375" de diámetro. Estas señales fueron adquiridas del osciloscopio con un voltaje de 2 V/div y un tiempo de barrido de 250 ns/div. El pulso corresponde al quinto eco de reflexión.

En la Fig. 55 puede observarse en la gráfica (a) un pulso ultrasónico con una muy buena definición en el dominio de tiempo. El espectro de frecuencia que corresponde a esta señal se observa en la gráfica (b). En esta gráfica se puede observar que el pulso original con frecuencia central de 10 MHz, estimuló de una manera selectiva el pulso alrededor de 12 MHz. Así mismo comparando las Figs. 45, 50 y 55, puede observarse que el pulso alrededor de 12 MHz es más fácilmente estimulable a medida que aumenta la concentración de cromo. Este corrimiento de frecuencias que también se observa se debe a una superposición de diferentes modos normales de oscilación, uno por debajo de 12 MHz, que se pudo apreciar en la Fig.51 y otro alrededor de 13 MHz que también se pudo apreciar en la Fig.52, de manera que estos modos se encuentran muy próximos el uno del otro, lo que hace que el pulso alrededor de estas frecuencias se haga más ancho.

Los modos naturales de oscilación se observaron en las tres muestras en estudio alrededor de las frecuencias de 5 MHz, 8 MHz, 11 MHz, 13 MHz y 15 MHz, y estas se pudieron apreciar cuando fueron estimulados con los transductores de frecuencia central de 1,5 MHz, 2,25 MHz, 7,5 MHz y 10 MHz.



(a)



(b)

Fig. 55 Transductor de 10 MHz. (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia

Para determinar que los modos de oscilación estimulados corresponden a una respuesta de las muestras de acero en estudio, se compararon los resultados de los experimentos realizados con los espectros de frecuencia obtenidos sobre plexiglass. Algunos de ellos fueron emitidos por el fabricante de los transductores y otros adquiridos mediante evaluaciones experimentales realizadas sobre el bloque de calibración V1. Se demostró que solamente en la presencia de las probetas A, B y C, utilizadas en esta investigación, se pueden estimular tales modos de oscilación. Los espectros de frecuencia característicos de algunos transductores se pueden observar en los Anexos 1 y 2.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del análisis de los resultados obtenidos en el estudio y caracterización de aceros aleados con 5% y 12% de cromo se puede concluir lo siguiente:

- Tanto la muestra de acero aleado con 5% y 12% de cromo, así como la muestra de acero al carbono de referencia, son medios no dispersivos para el ultrasonido, en el intervalo de frecuencias empleadas para el estudio, puesto que para cada una de estas, el valor de la velocidad de la onda ultrasónica longitudinal resulta independiente de la frecuencia del transductor empleado en su medida.
- Los valores de velocidad ultrasónica longitudinal en los aceros aleados con cromo fueron de 6015 m/s para la muestra con 5% de cromo y 6140 m/s para la muestra con 12% de cromo
- Mediante un estudio de la pérdida de amplitud en las señales ultrasónicas es posible establecer de manera empírica el comportamiento de la atenuación para cada frecuencia empleada en las muestras estudiadas, permitiendo obtener valores aproximados del coeficiente de atenuación, sin considerar las pérdidas generadas por la divergencia del haz ultrasónico. El error cometido con esta aproximación es pequeño a altas frecuencias, pero es considerable a bajas frecuencias.

- El modelo propuesto para el cálculo de coeficiente de atenuación es apropiado para estimar el valor de esta variable acústica, ya que toma en cuenta las pérdidas producidas por el diámetro del transductor.
- La fórmula que predice el ángulo de divergencia del haz ultrasónico es confiable a frecuencias mayores a 5 MHz. Esta fórmula debe ser modificada a bajas frecuencias, para considerar el efecto de los modos normales excitados.
- La técnica de análisis espectral permitió detectar los modos normales de oscilación de cada una de las muestras, los cuales fueron estimulados al utilizar transductores con frecuencia central de 1,5 MHz, 2,25 MHz, 7,5 MHz y 10 MHz.
- En todas las muestras de este estudio, la señal producida por el transductor con frecuencia central de 5MHz, presentó la menor atenuación, un pulso ultrasónico bien definido en el dominio temporal y un espectro de frecuencia con una distribución similar a una curva gaussiana. Esto es debido a que 5 MHz es un modo normal de oscilación y por lo tanto no pierde energía estimulando otros modos normales.
- Los modos normales fueron más fuertemente estimulados a medida que la concentración de cromo en las probetas aumentó.
- Los modos normales de oscilación se observaron en las tres muestras en estudio alrededor de las frecuencias de 5 MHz, 8 MHz, 11 MHz, 13 MHz y 15 MHz

Como aporte a otras investigaciones que involucren la caracterización ultrasónica de aceros es importante tener presente:

- La necesidad que existe de fabricar bloques de calibración con características similares a los materiales de prueba, que permitan calcular experimentalmente el ángulo de divergencia de los transductores, en vista de que no siempre es válido utilizar algunas expresiones establecidas.
- Desarrollar un modelo físico que simule las constantes elásticas de cada una de las muestras empleadas, a fin de predecir la eficiencia de la transferencia de energía a los modos normales de oscilación.

REFERENCIAS

- ASM International. ASM Handbook, Formerly Ninth edition, Metals handbook, Volume 17: Nondestructive Evaluation and quality Control. EE.UU. (1.994)
- American Society of Testing Materials. Norma ASTM E 1316-96: Standard terminology for nondestructive examinations. (1.996)
- Avner. INTRODUCCION A LA METALUGIA FISICA. Mc Graw Hill. Pag.348 (1.990).
- Bongyoung A., Seung S. EFFECT OF MICROSTRUCTURE OF LOW CARBON STEELS ON ULTRASONIC ATTENUATION. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. Vol 47. Nro. 3. Pag. 620 – 628. 2000.
- Cracknell A.P.. ULTRASONIDO. Editorial Paraninfo. Pag. 9, 44-58 (1.983)
- Ferreira A.R., Santos M., Fernandes N., Velho J. Y Perdigao J.M. ULTRASONIC CONTROL OF QUARTZITES:ATTENUATION AND VELOCITY DISCREPANCES INTERPRETATION. Materials Evaluation. Pag. 779 – 782. 2001.

- Gaete L, Y. Vargas Hernández, Pettorino A. MEDIDA DE LOS PARAMETROS ACÚSTICOS EN SÓLIDOS. II Jornadas Iberoamericanas en Ultrasonido e Imagen Ultrasónica. España. (2001).
- Green R. ADVANCES IN NONDESTRUCTIVE MATERIALS CHARACTERIZATION. International Symposium on NDT. Pag. 22-26. (1.999).
- Hanspeter L, Bartos A., Strycek Jan. DIGITAL SIGNAL PROCESSING FOR ULTRASONIC TESTING. 15th WCNDT. Roma. (2000)
- Hayakawa Y., Wagai T., Yosioka K., Inada T., Suzuki T., Yagami H., Fujii T. MEASUREMENT OF ULTRASOUND ATTENUATION COEFFICIENT BY A MULTIFREQUENCY ECHO TECNIQUE – THEORY AND BASIS EXPERIMENT. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. Vol 33. Nro.6. Pag. 759-763. (1986)
- Irarrázaval P. ANALISIS DE SEÑALES. Mc Graw Hill. (1999)
- Jiménez G., Pessolano J. ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DE LA CARACTERIZACION DE DEFECTOS EN UNIONES SOLDADAS MEDIANTE UN ANÁLISIS ESPECTRAL CON ULTRASONIDOS. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. (2000)
- Krautkramer J. Y Krautkramer H. ULTRASONIC TESTING OF MATERIALS. Pag. 522 Springer – Verlag. Berlin. 1969

- Kruger S., Damasceno Sérgio, Dos Santos Flavio. ANÁLISE ESPECTRAL ULTRA-SÔNICA APLICADA A DETECCAO DE DANOS POR FLUÊNCIA. XV Congresso Nacional de Ensaio Nao Destrctivos. Sao Paulo. Pag. 39-47. (1.996).
- Krüger S., Rebello J.M.A, de Camargo P.C. HYDROGEN DAMAGE DETECTION BY ULTRASONIC SPECTRAL ANALYSIS. NDT & E International. Volumen 32. Pag. 275-281(1.999).
- Kumar A., Jayakumar T., Palanichamy P and Raj B. INFLUENCE OF GRAIN SIZE ON ULTRASONIC SPECTRAL PARAMETERS IN AISI TYPE 316 STAINLESS STEEL. Scripta Materialia. Volumen 40. Numero 3. Pag. 333-340. (1.999)
- Kwun S., Hong S., ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF MICROSTRUCTURE AND STRENGTH OF CARBON STEEL. Journal of Materials Science Letter. Volumen 19. Pag. 1453-1456. (2000)
- Loertscher H., Bartos A., Strycek J. DIGITAL SIGNAL PROCESSING FOR ULTRASONIC TESTING. 15th WCNDT. Roma . (2000)
- Marion J. CLASSICAL DYNAMICS OF PARTICLES AND SYSTEMS. Academic Press. Pag. 408-451 (1970)
- McClements D. ULTRASONIC MEASUREMENTS IN PARTICLE SIZE ANALYSIS. Enciclopedia de Química Analítica. (1.984)

- Morgner W. FUNDAMENTALS OF NONDESTRUCTIVE MATERIAL CHARACTERIZATION. NDT & E International. Volumen 27. Numero 5. Pag. 263-268 (1.994).
- Palanichamy P., Joseph A., Jayakumar T and Baldex Raj. ULTRASONIC VELOCITY MEASUREMENTS FOR ESTIMATION OF GRAIN SIZE IN AUSTENITIC STAINLESS STEEL. NDT & E International. Volumen 25. Numero 2. Pag. 179- 185 (1.995).
- Petculescu P. INVESTIGATION OF THE AUSTENITIC STRUCTURES BY ULTRASONIC SPECTRAL ANALYSIS. NDT.net. Noviembre. Vol.3 Nro.11. (1998).
- Tucker J. ULTRASONIC SPECTROSCOPY FOR CORROSION DETECTION AND MULTIPLE LAYER BOND INPECTION. Southern Research Institute. (2000)
- Sachse W., Pao Y. ON THE DETERMINATION OF PHASE AND GROUP VELOCITIES OF DISPERSIVE WAVES IN SOLIDS. Journal Appl. Physics. Vol. 49. Nro. 8 (1978)
- Schmerr Lester. FUNDAMENTALS OF ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE EVALUATION. (1998)
- Selfridge A. APPROXIMATE MATERIAL PROPERTIES IN ISOTROPIC MATERIALS. IEEE Transaction on Sonics and Ultrasonics, Vol 32. Nro.3. Pag. 381-393. (1985)

- Singh G.P. THE APPLICATION OF DSP AND PATTERN RECOGNITION TO UT AND ELECTROMAGNETIC NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION. Southwest Research Intitute. Texas. (1991)
- Ullate G., Martinez O., Izquierdo M., Parrila M. PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES ULTRASÓNICAS EN END. Instituto de Automática Industrial, Madrid, España. (1999)
- Valdecantos C. INTRODUCCION A LOS METODOS DE END DE CONTROL DE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES. Ed. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial 'Esteban Terradas'. 3ª Edición. (1984).
- Wei W. CHARACTERIZATION OF DISCONTINUITY TIP SHARPNESS USIG ULTRASONIC SPECTRAL ANALYSIS. Materials Evaluation. Pag. 195-199. (1998)
- White R.A. y Ehmke E.F.. MATERIALS SELECTION FOR REFINERIES AND ASSOCIATED FACILITIES. NACIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. Pag. 9, 93, 131. (1991)

BIBLIOGRAFIA

- American Society of Testing Materials. NORMA ASTM E 494-95: STANDARD PRACTICE FOR MEASURING ULTRASONIC VELOCITY IN MATERIALS. (1.995)
- Cherrouf Z., Ouali N., Ouallam S., Kamel G. THE STEEL GRAIN MAGNIFICATION INFLUENCE ON THE ULTRASOUND WAVE ATTENUATION. 15th WCNDT. Roma (2000)
- Cowan M.L. VELOCITY FLUCTUATIONS IN FLUIDIZED SUSPENSIONS PROBED BY ULTRASONIC CORRELATION SPECTROSCOPY. Physical Review Letters. Vol. 85. Numero 2. Pag. 453-456. (2000)
- Donohue K. SPECTRAL CORRELATION IN ULTRASONIC PULSE ECHO SIGNAL PROCESSING. IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. Volumen 40. Numero 4. Pag. 330-337. (1.993)
- Gallego J. TRANSDUCTORES ULTRASONICOS DE POTENCIA. Instituto de Acústica. CSIC. España. (1999)
- Ganhao L. JUNTAS SOLDADAS DE 5 DE DIÁMETRO PERTENECIENTES AL HORNO B-4401 DE XILENO. Reporte de Resultados. PDVSA – Intevep. 1999

- Gordon G. MEASURING THE FRECUENCY DEPENDENT ATTENUATION IN LOSSY MATERIAL USING LARGE TIME BANDWIDTH PRODUCT ULTRASONIC SIGNAL. Conference on Ultrasonic Transducer Engeneering. San Diego. Pag. 20-26. (1999)
- Gwire S., Ferdeghini F., Comastri A., Lupi D., SENSORES ULTRASONICOS:RESPUESTA A DISTINTAS FORMAS DE ONDA DE EMISIÓN. Centro de Investigación y Desarrollo en Electrónica e Informática. Buenos Aires. Argentina. (1999)
- Hsu, Hwei. ANALISIS DE FOURIER. Addison Wesley Iberoamericana.
- Ingo A., Lellinger D., ULTRASONIC METHODS FOR CHARACTERIZATION POLYMERIC MATERIAL. Chemical Innovation. Vol. 30. Numero 2. Pag. 12-18. (2000)
- Izquierdo M., Anaya J., Martínez O., Sánchez T. MODELADO DE RUIDO DE GRANO EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDOS. Instituto de Automática Industrial. Madrid. España. (1998)
- Katchadjian P. CARACTERIZACION DE TRANSDUCTORES ULTRASONICOS. Comisión Nacional de Energía Atómica. Buenos Aires. (2000)
- Li P., Chu L., Chou P and Chen F. USE OF ULTRASONIC VELOCITY FOR NONDESTRUTIVE EVALUATION OF FERRITE CONTENT IN DUPLEX FE-MN-AL ALLOY STEELS. Scripta Metallurgica. Vol 26. Pag. 127-132. (1992)

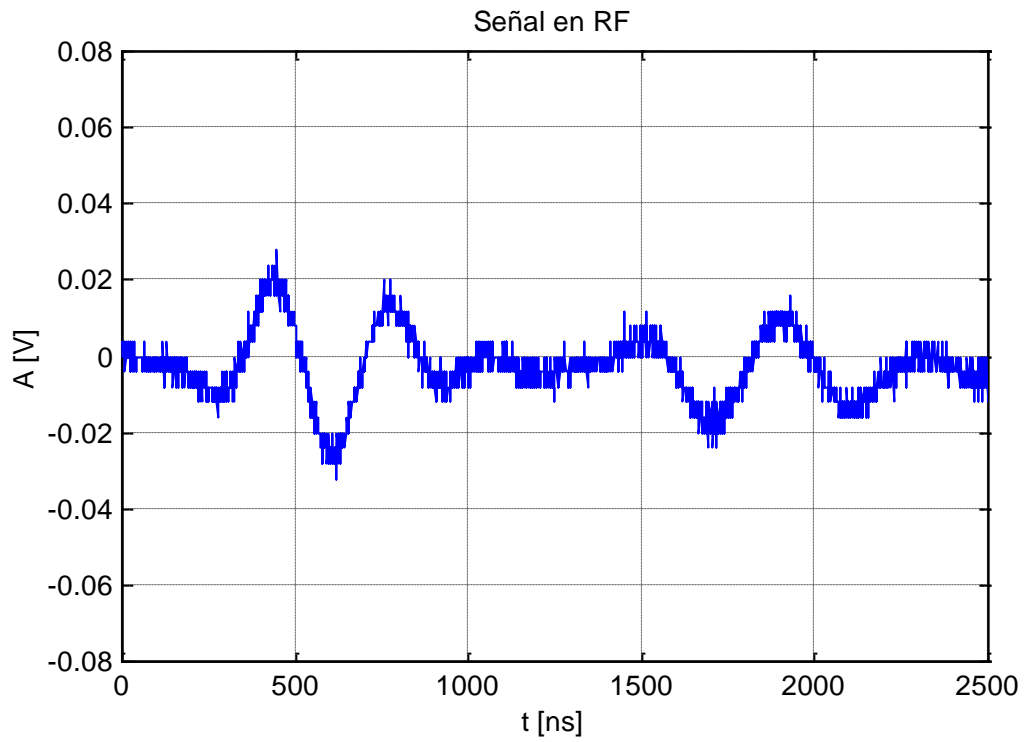
- Moreno E. PROPAGACION DE ONDAS MECANICAS Y APLICACIONES DE LOS ULTRASONIDOS. Centro de Ultrasonica. ICIMAF. Cuba. (1998)
- Panakkal J., LONGITUDINAL ULTRASONIC VELOCITY AS A PREDICTOR OF YOUNG'S MODULUS IN POROUS MATERIALS. Materials Evaluation. Pag. 1367-1371. (1997)
- Petculescu P., Oprea C. COMPARISON OF TWO ULTRASONIC METHODS FOR MATERIALS CHARACTERIZATION. 15th WCNDT. Roma (2000).
- Udaya B., Reynold F. FATIGUE CRACK DETECTION IN METALLIC MEMBERS USING ULTRASONING RAYLEIGH WAVES WITH TIME AND FREQUENCY ANALYSES. Materials Evaluation. Pag. 424 – 431. (2001)
- Vaca A. BREVES COMENTARIOS ACERCA DE LA EXTRACCION DE INFORMACIÓN CONTENIDA EN UNA SEÑAL DE ULTRASONIDOS. Instituto de Automática – Facultad de Ingeniería. Universidad nacional de San Juan. Argentina (1999)
- Wang H., Cao W. IMPROVED ULTRASONIC SPECTROSCOPY METHODS FOR CHARACTERIZATION OF DISPERSIVE MATERIALS. IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. Vol. 48. Numero 4. Pag. 1060-1065. (2001).

ANEXO 1:
COMPARACION DEL ANGULO DE DIVERGENCIA CALCULADO POR FORMULA
CON EL MEDIDO EXPERIMENTALMENTE EN ACERO AL CARBONO

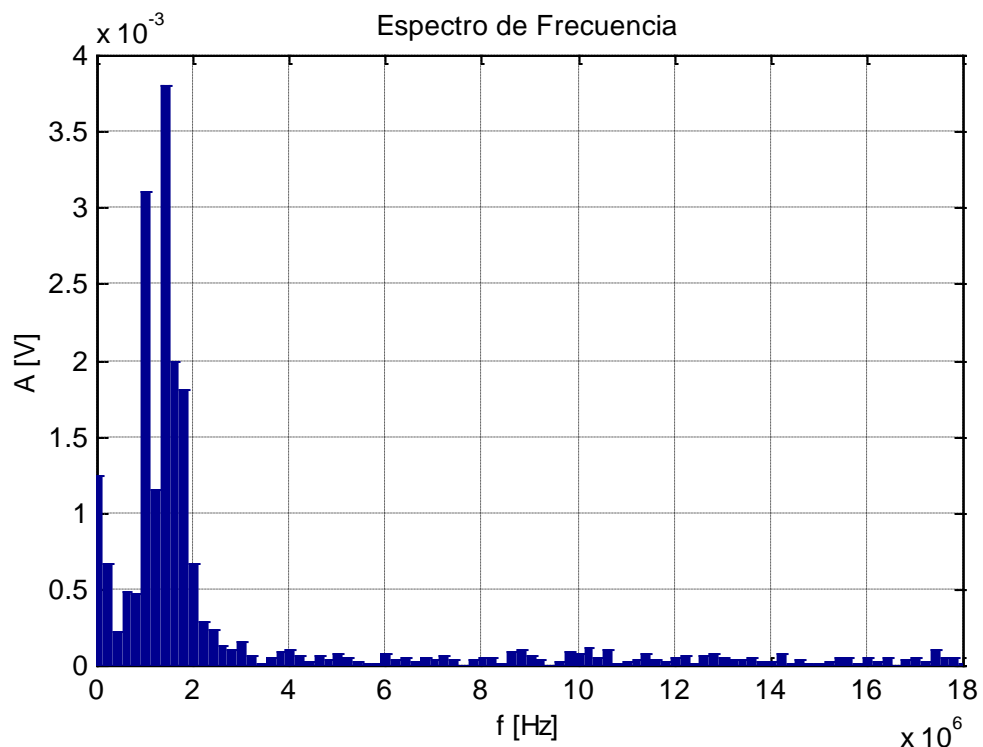
Tabla 18. Angulo de divergencia en acero al carbono

FRECUENCIA [MHz]	DIAMETRO [Pulgadas]	ANGULO DE DIVERGENCIA CALCULADO [°]	ANGULO DE DIVERGENCIA MEDIDO EXPERIMENTALMENTE[°]
1,5	0,375	12,07	7,65
2,25	0,375	8,01	7,86
2,25	0,25	16,33	9,21
5	0,375	3,59	4,06

ANEXO 2:
ESPECTRO DE FRECUENCIA DE LA SEÑAL SOBRE PLEXIGLASS DE LOS
TRANSDUCTORES DE 1,5 MHz, 2,25 MHz, 5 MHz Y 10 MHz OBTENIDOS
EXPERIMENTALMENTE

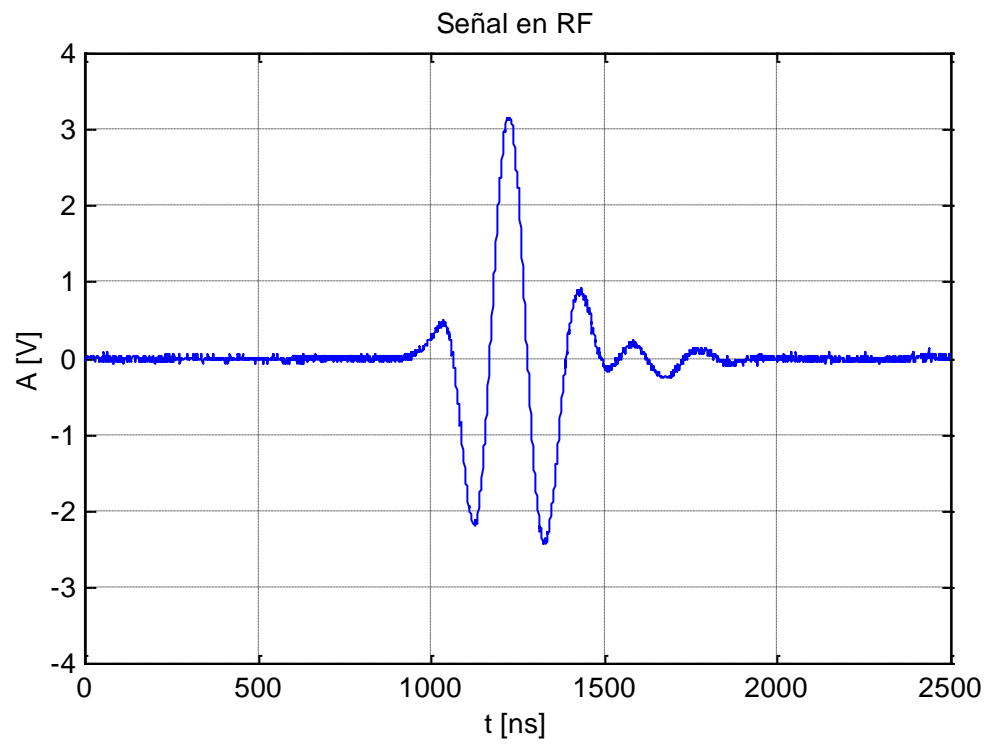


(a)

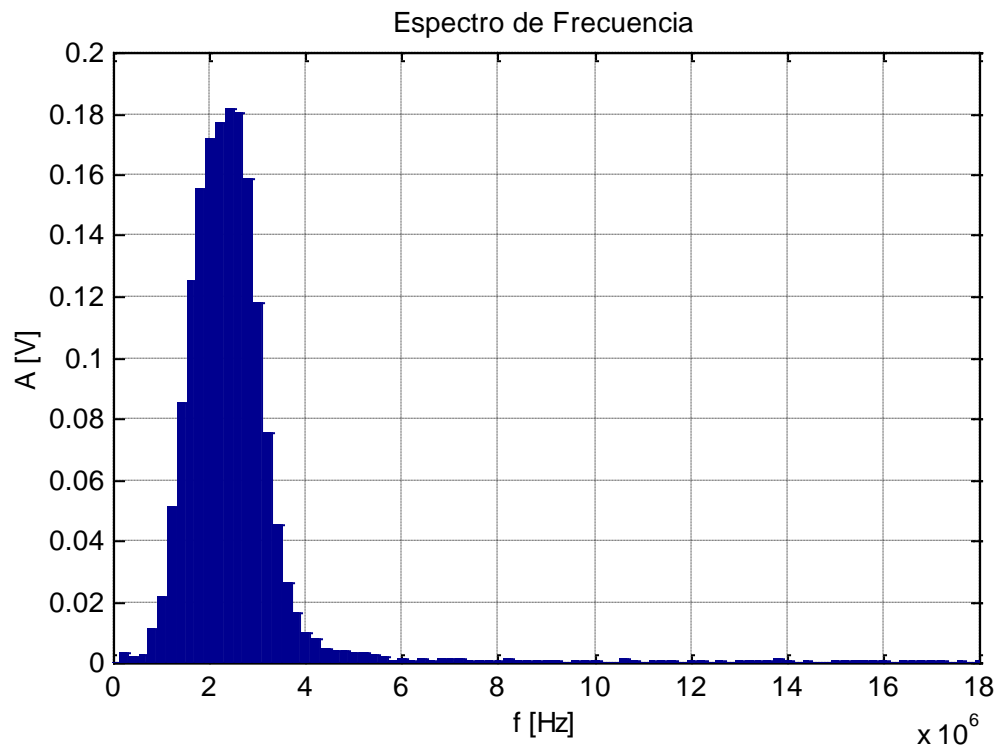


(b)

Fig. 56 Transductor de 1,5 MHz. sobre plexiglass (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia

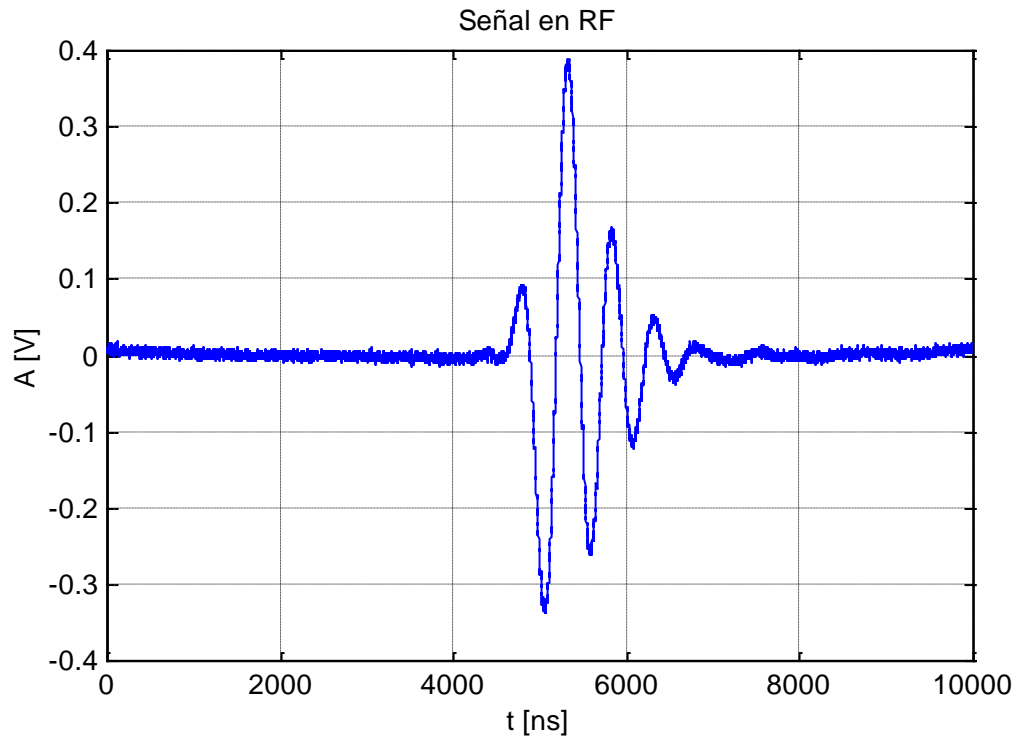


(a)

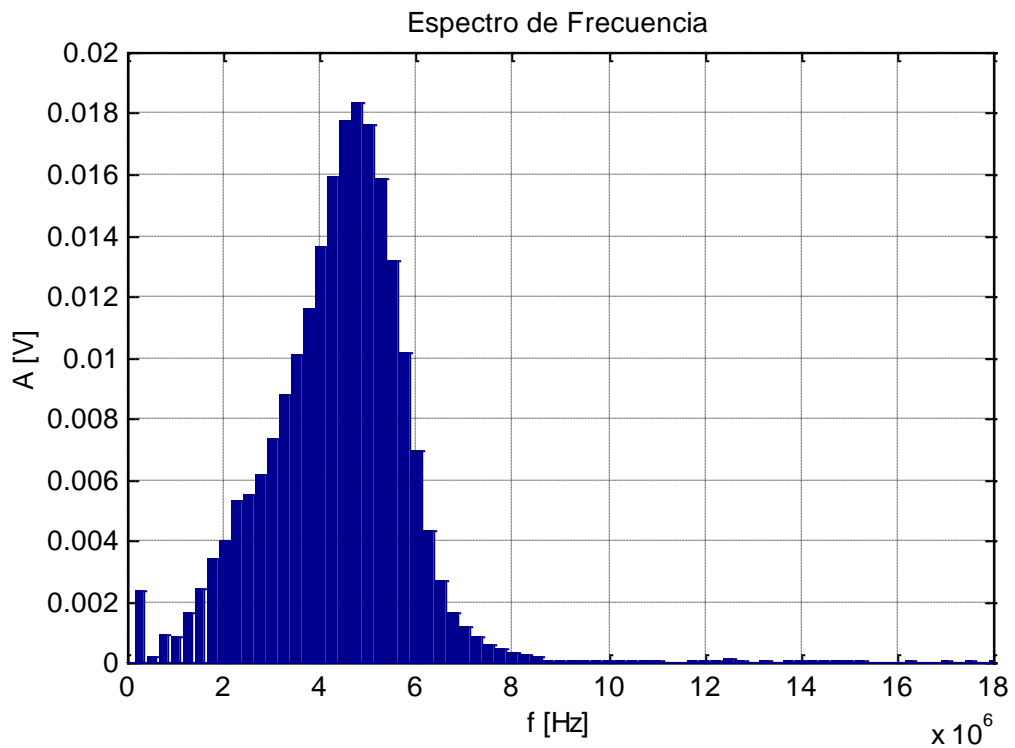


(b)

Fig. 57 Transductor de 2,25 MHz. sobre plexiglass (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia



(a)



(b)

Fig. 58 Transductor de 5 MHz. sobre plexiglass (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia

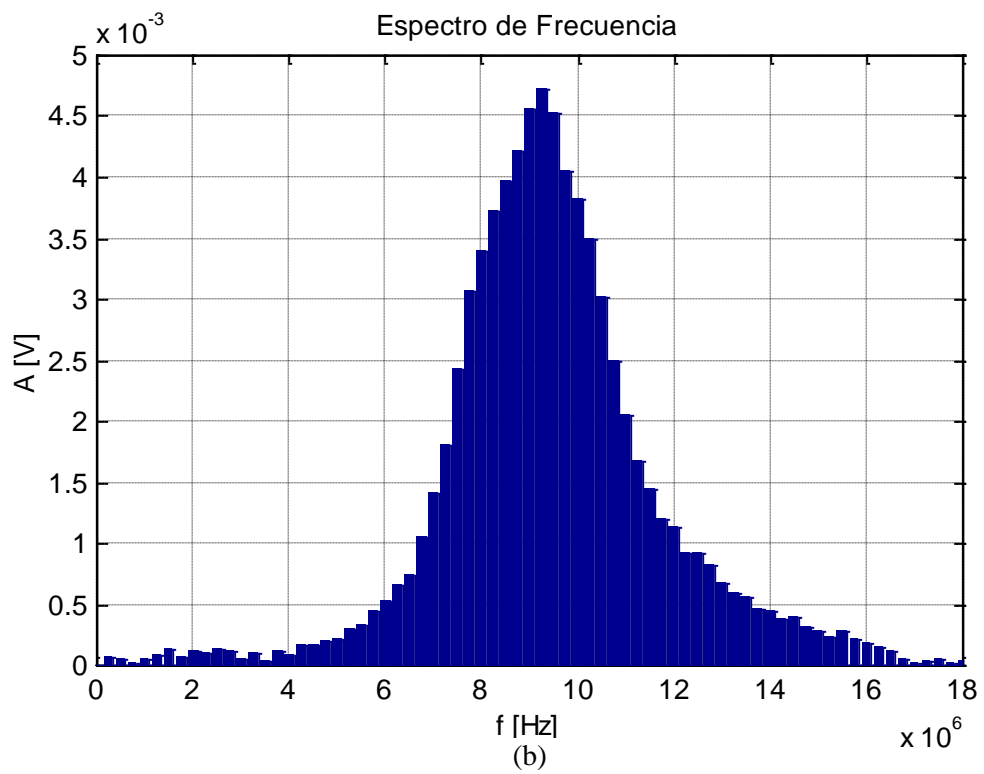
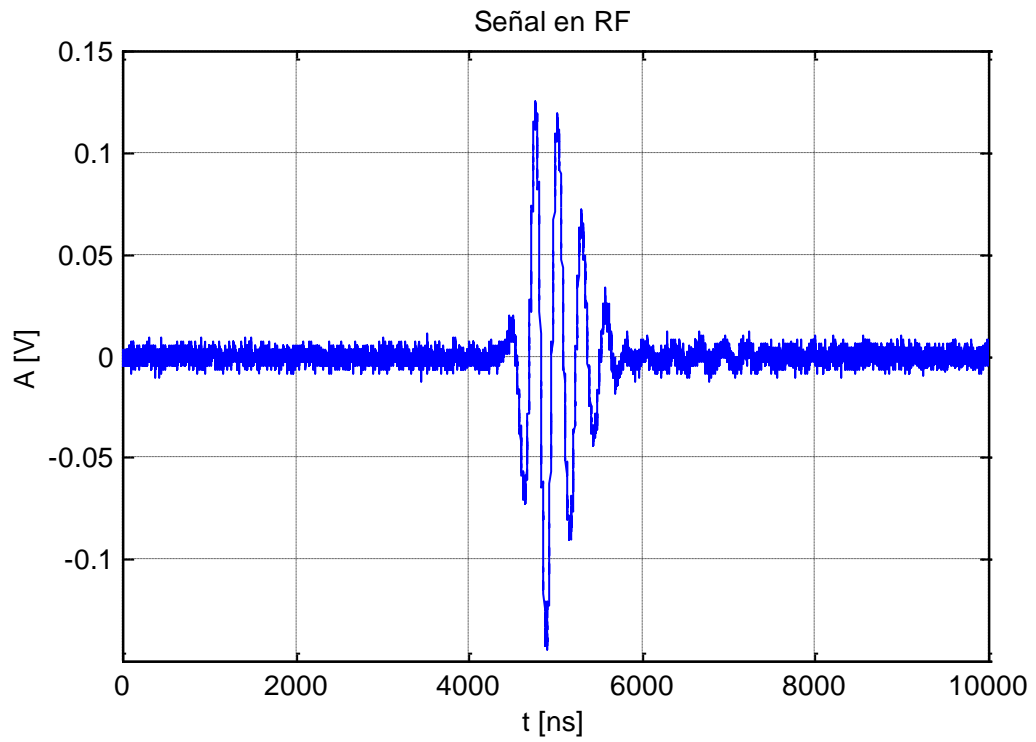


Fig. 59 Transductor de 10 MHz. sobre plexiglass (a) Señal en RF de amplitud vs. tiempo de muestreo (b) Espectro de Frecuencia

ANEXO 3:
COPIA DEL CERTIFICADO EMITIDO POR KRAUTKRAMER DE ALGUNOS
TRANSDUCTORES EMPLEADOS

ANEXO 4:
PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICION DE VELOCIDAD ULTRASONICA
LONGITUDINAL

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICION DE VELOCIDAD ULTRASONICA LONGITUDINAL

La medición de velocidad ultrasónica longitudinal se llevo a cabo empleando un procedimiento sencillo como el que se explica brevemente a continuación.

Equipos e Instrumentos:

- Detector de fallas ultrasónico modelo USN 52 L de Krautkramer
- Transductores de diferente frecuencia
- Pesa
- Vernier

Para este estudio es necesario considerar las dimensiones de las probetas, por lo que la velocidad se midió a través de la sección de 14 mm de espesor.

Procedimiento:

En todas las mediciones efectuadas, la pesa de 250 gramos se colocó sobre cada uno de los transductores empleados, con el fin de mantener la misma presión en cada una de las pruebas. Luego se siguió el siguiente procedimiento.

1. Medir el espesor de la probeta
2. Encender el equipo.

3. Conectar el transductor al instrumento y colocar una pequeña gota de glicerina sobre la muestras, de manera de acoplar el transductor a la superficie de la probeta.
4. Colocar el transductor sobre la probeta y variar el rango de manera tal de obtener por lo menos dos (2) ecos de reflexión. No se debe preocupar por el valor de velocidad de onda que aparezca en el equipo, pues es justamente lo que va a ser medido.
5. Ajustar el control de retardo, de manera tal que el pulso de salida del transductor quede fuera de la pantalla.
6. Activar en el equipo de ultrasonido el modo de calibración
7. Ajustar la amplitud del primer eco utilizando el control de ganancia, llevándolo al 80% de la pantalla.
8. Con la ventana de medición del equipo ubicar el primer eco de reflexión e introducir el valor correspondiente a la distancia recorrida por la onda ultrasónica en esa reflexión (S1).
9. Ajustar la amplitud del segundo eco utilizando el control de ganancia llevándolo al 80% de la pantalla.
10. Ubicar un segundo eco de reflexión e introducir el valor correspondiente a la distancia recorrida por la onda para esa reflexión (S2).
11. Al presionar el botón correspondiente a CAL aparecerá el valor respectivo de la velocidad ultrasónica longitudinal.

Este procedimiento debe aplicarse varias veces con el fin de disminuir el error experimental. El valor de velocidad correspondiente vendrá dado por el promedio de las velocidades medidas.

ANEXO 5:
PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE ATENUACIÓN ULTRASÓNICA

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE ATENUACIÓN ULTRASÓNICA

La atenuación de la señal ultrasónica se midió en términos de pérdida de amplitud de los diferentes ecos de reflexión cuando la onda ultrasónica fue recorriendo el espesor de la probeta. Para ello se empleo el siguiente procedimiento.

Equipos e Instrumentos:

- Detector de fallas ultrasónico modelo USN 52 L de Krautkramer
- Transductores de diferente frecuencia
- Pesa
-

Procedimiento:

En todas las mediciones efectuadas la pesa de 250 gramos se coloco sobre cada uno de los transductores empleados, con el fin de mantener la misma presión en cada una de las pruebas. Luego se siguió el siguiente procedimiento.

1. Encender el equipo.
2. Conectar el transductor al instrumento y colocar una pequeña gota de glicerina sobre la muestras, de manera de acoplar el transductor a la superficie de la probeta.
3. Ajustar el control de retardo, de manera tal que el pulso de salida del transductor quede fuera de la pantalla.

4. Calibrar a distancia con los valores de velocidad obtenidos
5. Colocar el transductor sobre la probeta y variar el rango de manera tal de obtener por lo menos cinco (5) ecos de reflexión.
6. Ajustar a través del control de ganancia, la altura del primer eco de reflexión al 80% de la pantalla.
7. Tomar nota de los valores relativos de altura de pantalla correspondientes a los siguientes cuatro ecos de reflexión, tal y como se muestra en la siguiente figura, con el fin de construir la gráfica de atenuación.

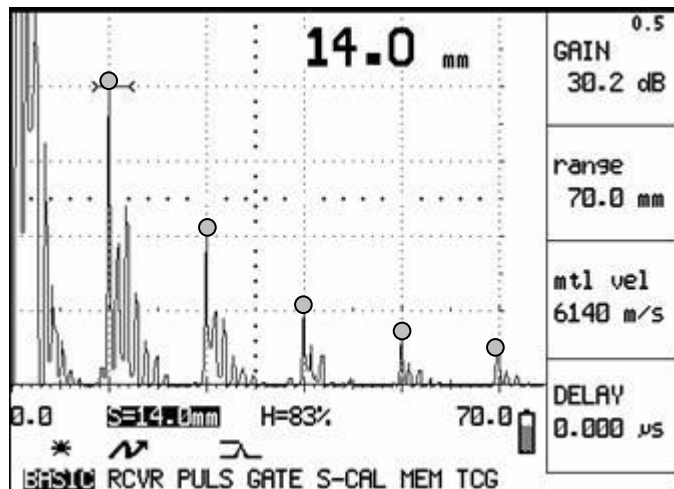


Fig. 60 Representación gráfica de la estimación de atenuación ultrasónica

Este procedimiento se aplicó utilizando todos los transductores en cada una de las muestras bajo estudio.

ANEXO 6:
PROCEDIMIENTO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATA PARA ANÁLISIS
ESPECTRAL DE LAS SEÑALES ULTRASÓNICAS

PROCEDIMIENTO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATA PARA ANÁLISIS ESPECTRAL DE LAS SEÑALES ULTRASÓNICAS

Con el fin de obtener los espectros de frecuencia de cada uno de los transductores sobre las muestras bajo estudio, se aplicó la siguiente metodología.

Equipos e Instrumentos:

- Detector de fallas ultrasónico modelo USN 52 L de Krautkramer
- Osciloscopio digital Tektronix con su programa de digitalización.
- Computador personal
- Transductores de diferente frecuencia

Procedimiento:

En todas las mediciones efectuadas la pesa de 250 gramos se colocó sobre cada uno de los transductores empleados, con el fin de mantener la misma presión en cada una de las pruebas. Luego se siguió el siguiente procedimiento.

1. Encender el equipo de ultrasonido.
2. Conectar el transductor al instrumento y colocar una pequeña gota de glicerina sobre la muestras, de manera de acoplar el transductor a la superficie de la probeta.
3. Ajustar el control de retardo, de manera tal que el pulso de salida del transductor quede fuera de la pantalla.
4. Calibrar a distancia con los valores de velocidad obtenidos.

5. Ajustar el rango de manera de obtener un solo eco de reflexión.
6. Conectar en paralelo el osciloscopio al equipo de ultrasonido.
7. Conectar el osciloscopio al computador, en donde previamente debe estar instalado el programa para adquisición de data.
8. Encender el osciloscopio y el computador, e iniciar el programa para digitalizar señales.
9. Ubicar en el osciloscopio una reflexión que tenga una buena definición, utilizando los controles de voltaje y tiempo de barrido de la señal.
10. Digitalizar la señal del osciloscopio, empleando para ello el programa Wave Star 2.2 de Tektronix Inc. Es importante que se digitalice solo un eco de reflexión, de manera tal de aprovechar al máximo la longitud de registro del osciloscopio, para ello utilice el control de tiempo de muestreo.
11. Debe tenerse en cuenta que el ancho de banda del osciloscopio debe estar muy por encima de la frecuencia del transductor (Por lo menos diez veces mas) con el fin de evitar posibles problemas en el muestreo de la señal.
12. Una vez digitalizada la señal, ésta se convierte en un archivo de texto y es procesada mediante un programa de aplicaciones matemáticas con el fin de obtener el respectivo espectro de frecuencia de la señal original en dominio temporal.