

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLAS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALURGICAS



“MEDICIONES ULTRASÓNICAS CON APLICACIONES
COMPUTACIONALES EN UN COMPÓSITO DE ALÚMINA-CIRCONIA”

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS
MATERIALES

PRESENTA:

ING. ALBERTO ZAVALA CERDA

ASESOR:

DR. HECTOR GUILLERMO CARREON GARCIDUEÑAS

Dedicatoria

A la memoria de Ursula Sánchez Alcocer (20/sep/1983 - 4/abr/2004).

Agradecimientos.

A Ursulita, por todo su amor y comprensión.

A los profesores del IIM, en especial al Dr. Carreon, asesor de esta tesis.

A mis compañeros del IIM.

A los compañeros de la Sección de Cálculo Electrónico, profesores y alumnos del servicio social.

A los Chanekes.

A mi familia.

Índice General

Dedicatoria	2
Agradecimientos.	3
Índice General	4
Índice de Figuras	6
Índice de Tablas	8
Resumen.	9
Objetivos.	10
Justificación.	11
Capítulo I. Fundamentos Teóricos.	13
<i>I.1. Oscilaciones y Ondas.</i>	14
<i>I.2. Unidades Físicas para Caracterización y Constantes Elásticas.</i>	19
<i>I.3. Incidencia Perpendicular Simple, Interfaces Planas.</i>	21
<i>I.4. Atenuación de Ondas Ultrasónicas en Sólidos</i>	25
I.4.1. Absorción y Dispersión.	25
<i>I.5. Método de Eco-Pulso.</i>	27
<i>I.6. Funcionamiento Básico de un Detector de Eco-Pulso.</i>	30
I.6.1. Diagrama de Bloques.	30
I.6.2. El Pulsador (Generador de Frecuencias) y la Línea Base de Voltaje.	31
I.6.3. El Transmisor.	32
I.6.4. El Receptor.	33
<i>I.7. Métodos Auxiliares para la Evaluación.</i>	35
Capítulo II. Desarrollo Experimental.	37
<i>II.1. Sistema Experimental Implementado.</i>	37
II.1.1. Muestras.	37

II.1.2. Pulsador.	37
II.1.3. Transductores.	37
II.1.4. Osciloscopio.	38
II.1.5. Caja de Inmersión.	38
II.1.6. Colocación del Transductor.	38
II.1.7. Control de Movimiento.	38
II.1.8. Equipo de Cómputo.	39
<i>II.2. Modelo Matemático.</i>	<i>40</i>
<i>II.3. Control de Movimiento de Motores a pasos.</i>	<i>40</i>
<i>II.4. Circuito de Potencia para Motores a pasos.</i>	<i>44</i>
<i>II.5. Operación del Osciloscopio.</i>	<i>45</i>
II.5.1. Configuración del Osciloscopio.	46
<i>II.6. Barrido de las Muestras.</i>	<i>48</i>
<i>II.7. Descripción del Programa de Barrido.</i>	<i>49</i>
<i>II.8. Cálculo Numérico de Tiempos y Amplitudes.</i>	<i>51</i>
<i>II.9. Interpretación de Gráficas.</i>	<i>53</i>
<i>II.10. Análisis Estadístico.</i>	<i>55</i>
<i>II.11. Obtención de la Velocidad Cortante.</i>	<i>56</i>
<i>II.12. Reconstrucción de Imágenes</i>	<i>56</i>
II.12.1. Procedimiento.	57
<i>II.13. Tratamiento de Imágenes</i>	<i>58</i>
Capítulo III. Resultados y Discusión.	60
<i>III.1. Velocidad Longitudinal y Atenuación.</i>	<i>60</i>
<i>III.2. Valores Estadísticamente Representativos.</i>	<i>60</i>
<i>III.3. Velocidad Cortante.</i>	<i>69</i>
<i>III.4. Modelo de Velocidad-Composición.</i>	<i>69</i>
<i>III.5. Propiedades Elásticas.</i>	<i>70</i>
<i>III.6. Software Desarrollado.</i>	<i>70</i>
<i>III.7. Imágenes Cuantitativas Obtenidas.</i>	<i>71</i>

Capítulo IV. Conclusiones.	79
Bibliografía.	80
Apéndice 1. Código Empleado.	83

Índice de Figuras

Figura 1.1 Modelo Masa-Resorte.	15
Figura 1.2. Modelo del Cuerpo Elástico.	15
Figura 1.3. Propagación de la Onda Longitudinal.	16
Figura 1.4. Propagación de la Onda Transversal.	17
Figura 1.5. Esquema de la Reflexión-Transmisión.	22
Figura1.6. Reflexión-Transmisión.	23
Figura 1.7. Principio del Eco-Pulso.	28
Figura 1.8. Tiempo de Vuelo.	28
Figura 1.9. Diferentes Comportamientos de la Señal.	29
Figura 1.10. Ecos de la Señal.	30
Figura 1.11. Generador de Frecuencia.	31
Figura 1.12. Variaciones de Voltaje a Través del Tiempo.	32
Figura 1.13. Principio del Amplificador.	34
Figura 1.14. C-Scan.	35
Figura 2.1. Arreglo Experimental Utilizado.	39
Figura 2.2. Principio de Funcionamiento de un Motor a Pasos.	41
Figura 2.3. Esquema de Control de Motor Bipolar.	42

Figura 2.4. Secuencia de la Señal de Excitación del Motor a Pasos. _____	43
Figura 2.5. Secuencia de Control para Modo de Paso Completo. _____	43
Figura 2.6. Esquema del Circuito de Potencia. _____	44
Figura 2.7. Fotografía del Circuito Utilizado. _____	45
Figura 2.8. Definición de Parámetros de Almacenaje. _____	47
Figura 2.9. Entorno Gráfico del Osciloscopio. _____	48
Figura 2.10. Interfaz Gráfica del Programa de Barrido. _____	50
Figura 2.11. Rutinas Dentro del Archivo “codigo.xls”. _____	51
Figura 2.12. Puntos Obtenidos de la Señal. _____	52
Figura 2.13. Gráfica Obtenida del Análisis Numérico. _____	54
Figura 2.14. Gráfica Característica de Ruido. _____	55
Figura 2.15. Planteamiento de la Ecuación de Regresión. _____	56
Figura 2.17. Representación de la Matrices. _____	58
Figura 2.18. Imagen Reconstruida. _____	59
Figura 2.19. Diferentes Tratamientos a una Misma Imagen. _____	59
Figura 3.1(a-d). Distribución de Frecuencias para Velocidad. _____	64
Figura 3.1(e-h). Distribución de Frecuencias para Velocidad. _____	65
Figura 3.2(a-d). Distribución de Frecuencias para Atenuación. _____	66
Figura 3.2(e-h). Distribución de Frecuencias para Atenuación. _____	67
Figura 3.3. Gráfica Velocidad-Composición _____	69
Figura 3.4. Modelo de Velocidad Ultrasónica en Función del Contenido de Alúmina. _____	70
Figura 3.5.(a-d). Imágenes Reconstruidas (continúa). _____	73

Figura 3.5.(e-h). Imágenes Reconstruidas (continuación).	74
Figura 3.5.(i-l). Imágenes Reconstruidas (continuación).	75
Figura 3.5.(m-p). Imágenes Reconstruidas.	76
Figura 3.6. Imágenes de Velocidad y Atenuación	77
Figura 3.7. Micrografías de las Muestras.	78

Índice de Tablas

Tabla I.1. Unidades Físicas Utilizadas.	19
Tabla II.1. Muestras Utilizadas.	37
Tabla II.2. Valores de los Espesores de las Muestras.	55
Tabla III.1. Mediciones de Velocidad.	61
Tabla III.2. Mediciones de Atenuación	62
Tabla III.3. Distribución de Frecuencias para Velocidad.	68
Tabla III.4. Distribución de Frecuencias para Atenuación.	68
Tabla III.5. Velocidades Cortantes Obtenidas.	69
Tabla III.6. Resumen de Resultados.	70

Resumen.

El presente trabajo es el resultado de una evaluación no destructiva por medio de ultrasonido. De esta evaluación se obtuvo directamente la velocidad y atenuación ultrasónicas de muestras con diferentes porcentajes (0, 10, 30, 50, 70, 85 y 100% de alúmina con respecto a circonia) contenidos en el compósito cerámico Alúmina-Circonia. A su vez, de estos parámetros se determinaron las propiedades elásticas: módulo de elasticidad (E) y relación de Poisson (ν). Estos resultados se basan en un análisis numérico exhaustivo de las señales obtenidas, que sin las herramientas de instrumentación, control y programación no sería posible. También se presentan imágenes cuantitativas reconstruidas a partir de la velocidad y atenuación ultrasónicas determinadas en las zonas de inspección, las que indican las variaciones en éstos parámetros a través de la muestra. Los filtros y tratamientos de imagen que se utilizaron no fueron hechos con paquetes comerciales de software, sino que se desarrollaron algoritmos específicos para esta evaluación. Los resultados obtenidos confirman la evidencia encontrada en investigaciones anteriores de la variación de las propiedades elásticas en función de las proporciones del compósito, y se muestran además los valores característicos, con evidencia estadísticamente significativa, de la velocidad y atenuación ultrasónicas en las muestras analizadas. Al analizar las imágenes, en específico la atenuación, se puede observar que existen variaciones y rangos más amplios de magnitudes en comparación con las de velocidad. Se desarrolló un modelo matemático a través del cual se puede determinar el porcentaje de la composición a partir de la velocidad longitudinal directamente. Se presentan también estadísticas y datos de referencia, así como código del software desarrollado que puede ser de gran ayuda en futuras evaluaciones.

Objetivos.

1. Realizar mediciones de velocidad y atenuación ultrasónicas en el compuesto Alúmina-Circonia con diferentes composiciones (0, 10, 30, 50, 70, 85 y 100% de alúmina con respecto a circonia).
2. Determinar valores estadísticamente significativos de velocidad ultrasónica, para cada una de las proporciones utilizadas.
3. Desarrollar un modelo matemático para determinar la proporción Alúmina-Circonia a partir de la velocidad longitudinal de la muestra.
4. Determinar las constantes elásticas: Módulo de elasticidad (E) y relación de Poisson (ν), de cada muestra.
5. Implementar un sistema automatizado de inspección a partir de medios de bajo costo.
6. Desarrollar software para:
 - Control de movimiento en la prueba de barrido (C-scan)
 - Adquisición de señales
 - Análisis numérico y estadístico de las señales
 - Reconstrucción de imágenes
 - Filtrado y tratamiento de imágenes
7. Obtener imágenes cuantitativas de velocidad y atenuación ultrasónicas de las muestras.

Justificación.

Es sabido que los materiales compósitos se distinguen por su capacidad de combinar las propiedades individuales de dos o más componentes, que varían en función del contenido de cada una de sus partes. Para el caso del sistema compósito Alúmina-Circonia, que se utiliza como material estructural, se ha visto que la incorporación de alúmina en circonia estabilizada modifica sus propiedades. Se tienen reportes de evidencia en las variaciones de velocidad y atenuación ultrasónicas, en función de los porcentajes que forman el compósito [1,2]. A partir de esta evidencia en las variaciones de velocidad a través de la muestra, se considera realizar mediciones tanto de velocidad como de atenuación para documentar su comportamiento.

Para obtener valores estadísticamente significativos, se requiere la cantidad suficiente de datos, de manera que los valores de tendencia central y desviación sean representativos de cada muestra.

Con la intención de lograr una aportación con fines prácticos, se propone obtener un modelo matemático para determinar el porcentaje de la relación alúmina-circonia del compósito, a partir de la velocidad longitudinal.

Las propiedades elásticas: módulo de elasticidad (E) y relación de Poisson (ν), se utilizan en el diseño de piezas para aplicaciones finales en ingeniería, es por esto que se plantea obtener los valores característicos para cada una de las composiciones utilizadas.

La automatización de las pruebas optimiza los recursos y permite obtener más y mejores resultados finales. El implementar un sistema automático de inspección permite lograr los resultados esperados. A esto se le agrega el empleo de recursos de bajo costo que pueden ser encontrados con facilidad en tiendas de electrónica. Con este ejercicio se pretende una implementación de un sistema automatizado de bajo costo.

Para satisfacer la necesidad de tener software específico se propone desarrollar algoritmos para cada una de las etapas del presente trabajo. El lenguaje a utilizar es Visual Basic por los siguientes motivos: es el lenguaje nativo de las computadoras utilizadas y del

sistema de adquisición de señales, por ser el lenguaje nativo no es necesario adquirir alguna licencia adicional, se pueden crear rutinas para ser ejecutadas sobre otros programas.

Con relación a la presentación de los resultados, se considera que las representaciones gráficas permiten tener una mejor idea de las características de las muestras, además de las gráficas de las estadísticas correspondientes, se pretende generar imágenes cuantitativas para describir visualmente la distribución de los valores a obtener.

Capítulo I. Fundamentos Teóricos.

En este capítulo se hace una síntesis de los fundamentos teóricos del ultrasonido, que se utilizaron como base para el presente trabajo.

La acústica, es la ciencia del sonido, la cual describe el fenómeno de las vibraciones mecánicas y su propagación en materiales sólidos, líquidos o gaseosos. Se sabe que en el espacio vacío no existe el sonido debido a que son las partículas de materia las que vibran y lo transmiten. En el aire las ondas de sonido mueven un volumen discreto de aire atrás y hacia delante alrededor de una posición de equilibrio.

En tal movimiento mecánico de materia, repetido periódicamente por un lapso dado de tiempo, está clasificado de acuerdo al número de ciclos por segundo, un rango que puede ser definido en el que el oído humano puede detectarlo.

Esto requiere, de cualquier forma, que estas frecuencias estén cerca, ni muy por debajo, ni muy altas. El sonido debajo de los 10 Hertz y por encima de los 15,000 Hertz es inaudible para el oído humano. Otras formas de vibración son resueltas por el oído dentro de los armónicos; estos se hacen audibles en forma de ruido y pulsos secuenciales.

Como en el caso de las ondas de luz, donde las altas frecuencias que son invisibles para el ojo, son llamadas ultravioleta, así el sonido, aproximadamente por encima de los 20,000 Hertz es llamado ultrasonido. Esto ha sido sugerido ya que al sonido por debajo de los 10 Hertz es llamado subsónico. Esta división es puramente arbitraria y depende del oído humano. Se utilizan demarcaciones completamente diferentes en el caso de otros métodos de generación y detección.

Es bastante común la ocurrencia de ondas ultrasónicas en la naturaleza y en la vida diaria, y son ocasionalmente de tal intensidad que el humano puede considerarse afortunado, porque nuestros oídos no pueden captar las ondas ultrasónicas, como por ejemplo los silbidos ocasionados por vapor.

Las diferentes aplicaciones técnicas de ondas de sonido y ultrasonido pueden dividirse en dos grupos, uno para actuar físicamente en un material dado y otro solamente para explorar sus condiciones físicas. En el primer caso la energía de la onda de sonido es utilizada, por ejemplo, para separar partículas de suciedad ocasionadas por fabricación durante un lavado, para separar cuerpos extraños de una superficie al efectuar una limpieza,

para remover pequeñas escorias de un maquinado, para eliminar superficies en tensión durante un emulsificado, para mezclado, entre otras aplicaciones.

En otros casos la energía del sonido es solamente utilizada para magnificar lo necesario y poder transmitir una señal lo suficientemente clara, por ejemplo, (en un sistema público de dirección), para localizar embarcaciones en el mar, para sondear la profundidad del mar, localizar bancos de peces y para revisar características de materiales, como detectar la presencia de fallas, medir espesores y determinar propiedades elásticas y metalúrgicas. La onda del sonido, en estos casos, acarrea información y usualmente uno es quien transmite una onda ultrasónica a través del espécimen y quien recibe una onda de respuesta para analizar la información que conlleva.

Para determinar las propiedades mecánicas de un material, lo que usualmente se hace es utilizar un método mecánico, que es lo que se tiene al alcance, por ejemplo para determinar la carga de fluencia de una probeta, ésta puede ser sometida a una prueba de tensión o flexión hasta que se manifieste la falla. Esta es una prueba mecánica destructiva. Por otro lado, el ultrasonido permite, para el mismo propósito, métodos de inspección no destructiva los cuales están basados principalmente en esfuerzos inducidos al material, por compresión, tensión, cortante, pero son de tan baja intensidad que no provocan daños en el material.

Haciendo a un lado el calificativo “ultra”, el sonido ordinario ha sido por mucho tiempo utilizado para la prueba de especímenes, como la uniformidad de piezas coladas, donde los defectos internos pueden ser detectados por el cambio de tono cuando la pieza es golpeada con un martillo; toda ama de casa sabe que en una taza de cerámica se puede encontrar una grieta al golpearla ligeramente y escuchar sus vibraciones. Se puede decir que las pruebas de sonido es uno de los métodos de ensayos no destructivos más antiguo. Por la implementación de dispositivos electrónicos se ha convertido en uno de los métodos más desarrollados y versátiles de la actualidad [3, 4].

1.1. Oscilaciones y Ondas.

Las pruebas de materiales por ultrasonido están basadas en la utilización de ondas mecánicas. Cualquier onda mecánica está compuesta de oscilaciones de partículas discretas de material.

El movimiento ocasionado por una masa sujeta a un resorte se modela como se muestra en la figura 1.1.

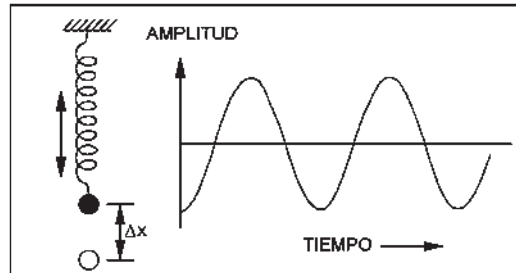


Figura 1.1 Modelo Masa-Resorte.

Si a la masa se le aplica una fuerza en dirección “x” el resorte se elongará una cantidad Δx . Al dejar de aplicar la fuerza sobre la masa, ésta tenderá a regresar a su posición inicial de equilibrio y estará en un movimiento de vaivén, antes y después de ésta posición de equilibrio, teniendo desplazamientos cada vez menores hasta que no exista tal movimiento. Al ciclo correspondiente desde que pasa por la posición de amplitud máxima y regresa a ese punto se le nombra oscilación. El comportamiento que tiene este sistema de masa-resorte, considerando la amplitud de movimiento respecto a la posición de equilibrio y el tiempo es de tipo senoidal. Conforme el tiempo va aumentando la amplitud va disminuyendo en cada oscilación.

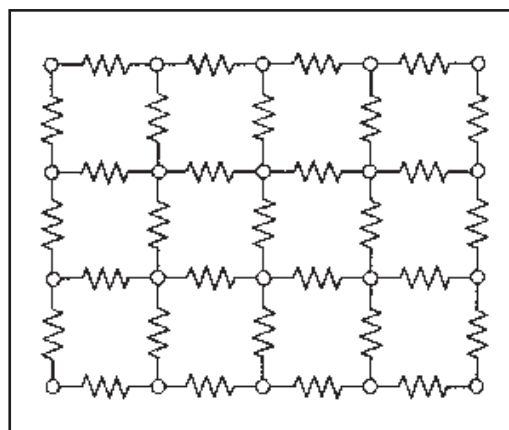


Figura 1.2. Modelo del Cuerpo Elástico.

Ahora, imaginémosle imaginar que un cuerpo está compuesto por partículas

individuales de masa sostenidas unas con otras por fuerzas elásticas. De una manera simple se puede modelar como se muestra en la figura 1.2. Considerando también que en este modelo no se presentan esfuerzos de compresión o tensión más allá del límite elástico para poder permitir el comportamiento masa-resorte en forma tridimensional.

Si todas las partículas de la pared del extremo libre izquierdo son empotradas a un diafragma y excitadas colectivamente con un movimiento senoidal, pudiendo ser con algún medio electromecánico, como un altavoz, todas las partículas en el primer plano son entonces forzadas a oscilar con la misma amplitud (ancho de oscilación) y frecuencia (número de oscilaciones por segundo). Las fuerzas elásticas transmiten las oscilaciones a las partículas en el segundo plano. Cuando las partículas del segundo inicien a oscilar las fuerzas elásticas transmitirán el movimiento al tercer plano, y así sucesivamente. Si todas las partículas son interconectadas rígidamente, comenzarían el movimiento simultáneamente y permanecería constante el mismo estado de movimiento (en la misma fase). Esto no ocurre en los materiales elásticos, ya que se requiere cierto periodo de tiempo para que se transmita el movimiento y los planos alcanzados subsecuentemente se retrasan en fase después de que son excitados. Mientras un plano en específico se mueve de derecha a izquierda cruzando por el punto de equilibrio, las partículas en un plano más allá a la derecha apenas han comenzado a moverse de izquierda a derecha.

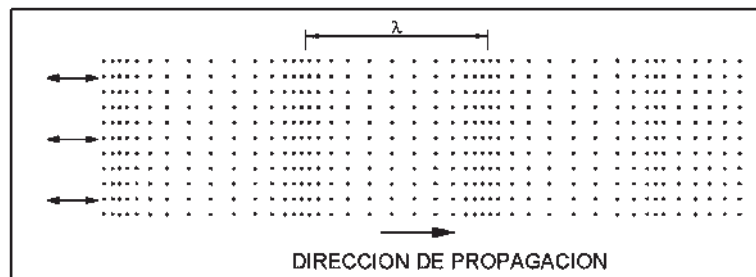


Figura 1.3. Propagación de la Onda Longitudinal.

En la figura 1.3 se muestra un esquema de una sección instantánea de un modelo en el cual una onda viaja de izquierda a derecha y no ha alcanzado la frontera del lado derecho. Se puede observar que algunos planos de partículas se acercan mientras que otros se separan, existiendo así cambios de fase. El patrón cronológico de la onda muestra que estas zonas se reproducen constantemente en el lado de excitación y que viajan a través del

cuerpo a velocidad constante e intervalos uniformes hacia la derecha. Esto es la representación de una onda elástica.

El modelo del cuerpo elástico, puede ser visualizado como la conformación de muchas partículas de material separadas solamente si éste es uniforme (homogéneo), y presenta el mismo comportamiento elástico en todas direcciones (isotrópico). Cada punto mostrado en la figura 1.3 representa la masa de un pequeño cubo.

El modelo de cuerpo elástico no se puede utilizar para sustancias líquidas o gaseosas, en donde las partículas individuales no están fijas con respecto a todo el resto, ya que están libres. Sin embargo estas sustancias ofrecen cierta resistencia cuando son comprimidas o expandidas.

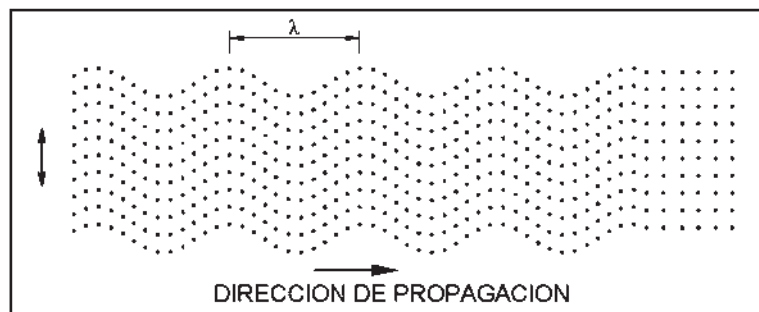


Figura 1.4. Propagación de la Onda Transversal.

Al observar las figuras 1.3 y 1.4 se puede comprender que cada plano de puntos representa una sección del modelo tridimensional, pero las fronteras de las superficies del cuerpo afectan considerablemente el movimiento de las ondas. Una onda representada como el modelo de cuerpo elástico sólo es válida al estar lejos de las fronteras.

Al observar la figura 1.3 se pueden definir algunos conceptos: la frecuencia de una onda, es el número de oscilaciones dadas por una partícula en un segundo. La longitud de onda, es la distancia entre dos planos en los cuales las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento, por ejemplo, dos zonas de compresión son inversamente proporcionales a la frecuencia, las altas frecuencias corresponden a longitudes de onda pequeñas y viceversa. La velocidad del sonido, es la velocidad de propagación para una condición dada. La velocidad de propagación, es una característica específica del material y es, en general, constante para cualquier frecuencia y longitud de onda. Otra magnitud importante en un campo de sonido es la presión de onda. En puntos de densidad alta de

partículas la presión es tan alta como la presión normal, mientras que en zonas dilatadas ésta es baja. Se coloca un transductor que mide pequeñas pérdidas de presión e inercia en la trayectoria de la onda de sonido, la cual indicará una alternancia de presión alta y baja en una secuencia senoidal. Esta presión alternada es la presión del sonido. La máxima variación de presión con respecto a la presión normal, sin la onda de sonido, se le conoce como amplitud de presión de sonido la cual está asociada con la amplitud de movimiento.

Para indicar longitudes de onda menores en el modelo de cuerpo elástico, es necesaria la presencia de partículas con masa menor y tener un mayor empaquetamiento; en otras palabras subdividir el material de una manera más fina.

La onda descrita en la figura 1.3 se le nombra onda longitudinal porque sus oscilaciones se presentan en dirección longitudinal. Ya que se presentan fuerzas de compresión y dilatación, también se le llama onda de presión o compresión, porque la densidad de partículas varía también; se le llama onda de densidad.

En los cuerpos sólidos también se presentan otro tipo de ondas, por ejemplo la onda transversal, la cual se representa esquemáticamente en la figura 1.4, en forma de imagen instantánea del movimiento de partículas.

La excitación se puede visualizar como el movimiento de las partículas de la superficie del lado izquierdo que se mueven con un comportamiento senoidal hacia arriba y hacia abajo por fuerzas cortantes periódicas. En cuerpos sólidos, al transmitir las fuerzas cortantes a planos adyacentes se presenta un retraso en el tiempo de oscilación. La longitud de onda se determina por la distancia entre partículas que presentan el mismo estado de movimiento.

En líquidos y gases no se pueden propagar ondas cortantes, porque estos medios no tienen la capacidad de resistir esfuerzos cortantes [5,6].

I.2. Unidades Físicas para Caracterización y Constantes Elásticas.

Las cantidades más utilizadas y sus símbolos se muestran en la tabla I.1:

Símbolo	Variable	Unidad
Ω	Frecuencia angular	rad/s
f	Frecuencia	Hz=s ⁻¹
λ	Longitud de onda	m
ξ	Desplazamiento de partícula	m
c	Velocidad del sonido	m/s
v	Velocidad de partícula	m/s
ρ	Densidad	kg/m ³
F	Fuerza	N=kg·m/s ²
p	Presión del sonido	Pa=N/m ²
μ	Relación de Poisson	
E	Módulo de Elasticidad (Módulo de Young)	Pa=N/m ²
G	Módulo Cortante	Pa=N/m ²
Z	Impedancia Acústica	Ns/m ³
P	Potencia Acústica	W
J	Intensidad de la Potencia Acústica	W/m ²

Tabla I.1. Unidades Físicas Utilizadas.

La siguiente ecuación es válida para cualquier onda [3]:

$$f \cdot \lambda = c \quad (1.1)$$

Por el orden de unidades utilizadas se puede emplear

$$(f)(\lambda) = c \quad (1.2)$$

$$(\text{MHz})(\text{mm}) = \frac{\text{Km}}{\text{s}}$$

Para el caso de ondas esféricas la presión del sonido y la amplitud de partícula están

relacionadas por:

$$p = \rho \cdot c \cdot \omega \cdot \xi = Z \cdot \omega \cdot \xi \quad (1.3)$$

El producto de velocidad por densidad es la impedancia acústica ($\rho \cdot c = Z$). Los materiales con alto impedancia acústica se les nombran acústicamente duros y a los que tienen impedancias acústicas bajas se les llama acústicamente suaves.

La presión del sonido o la amplitud para el caso de ondas planas o esféricas se relaciona con [5]:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{Z} = \frac{1}{2} \cdot Z \cdot \omega^2 \cdot \xi^2 \quad (1.4)$$

$$\frac{\xi}{\lambda} = \frac{J}{\sqrt{2 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot c^3}} \quad (1.5)$$

La velocidad de las diferentes clases de ondas se puede calcular a partir de las constantes elásticas del material en cuestión, estas son módulo de elasticidad (E), densidad (ρ) y la relación de Poisson (μ).

Para ondas longitudinales

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}} \quad (1.6)$$

Para ondas transversales

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.7)$$

Las dos velocidades de sonido están relacionadas por:

$$c_t = c_l \cdot \sqrt{\frac{1 - 2 \cdot \mu}{2 \cdot (1 - \mu)}} \quad (1.8)$$

Para todos los materiales sólidos la relación de Poisson varía entre 0 y 0.5, así que el valor numérico es

$$\sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \quad (1.9)$$

Es importante señalar que en materiales cristalinos las propiedades elásticas varían usualmente en las diferentes direcciones, por lo tanto variarán las velocidades de sonido. Además de que la velocidad del sonido cambia en cuerpos heterogéneos y usualmente se reduce por pequeñas mezclas de sustancias extrañas. También se produce un efecto similar por la presencia de poros de gas.

Para cuerpos sólidos el efecto de la temperatura puede ser despreciable, en el efecto de la variación de la velocidad del sonido.

Se observa también que en las ecuaciones (1.6) y (1.7) no se presenta en términos de frecuencia, por lo que la velocidad es independiente de la frecuencia.

1.3. Incidencia Perpendicular Simple, Interfaces Planas.

Al hacer el análisis del comportamiento de las ondas se supuso en un medio extendido infinitamente, pero esto no es posible ya que todo cuerpo tiene límites, entonces la propagación presenta perturbaciones. Si el material presenta bordes en un espacio vacío, la onda no se puede transmitir más allá de ese límite, porque necesita la presencia de partículas de material para poder propagarse. En una superficie libre la onda se propagará de algún modo; en superficies lisas, se presenta la reflexión y en superficies rugosas, la dispersión. En caso de que exista otro material después de esa frontera y es adherido al primer material, de manera que se puedan transmitir fuerzas, entonces la onda puede propagarse a través del segundo material, en donde se puede encontrar algún cambio de dirección, intensidad y modo.

Existen tres casos en donde las fronteras tienen una gran influencia en la propagación de la onda:

- 1 La onda tiene que penetrar límites cuando pasa de un emisor (transductor que emite) a un espécimen y viceversa, cuando es recibida (transductor que recibe la señal).
- 2 Los defectos dentro del espécimen se detectan por el efecto de sus fronteras en la

onda (reflexión o transmisión).

- 3 Otros límites o fronteras del material, ocasionan alteraciones en la propagación de la onda, por la influencia de la propagación de reflexiones internas u ondas guiadas intencionalmente, por ejemplo en placas o varillas.

Considerando el caso simple de una onda incidente en una frontera perpendicular y lisa. Calculando sus presiones de onda:

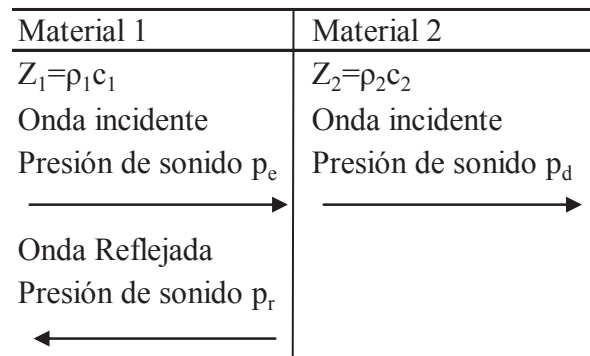


Figura 1.5. Esquema de la Reflexión-Transmisión.

Se hace referencia a las presiones de sonido reflejadas y transmitidas generadas a partir de la onda incidente en base a las relaciones:

$$\frac{p_r}{p_e} = R \quad (1.10 \text{ a})$$

$$\frac{p_d}{p_e} = D \quad (1.10 \text{ b})$$

“R” y “D” son los coeficientes de reflexión y transmisión, respectivamente, de la presión de onda. Estas relaciones son equivalentes a:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1.11 \text{ a})$$

$$D = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (1.11 \text{ b})$$

Como ejemplo, para obtener los coeficientes de reflexión (R) y transmisión (D) de

la interfase acero-agua se tiene:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad ; \quad D = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

$$Z_1 = 45 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3 \text{ (acero)}$$

$$Z_2 = 1.5 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3 \text{ (agua)}$$

$$R = \frac{1.5 - 45}{1.5 + 45} = -0.935 \quad ; \quad D = \frac{2 \cdot (1.5)}{1.5 + 45} = 0.065$$

Expresando como porcentaje la onda reflejada, se tiene que la presión de onda tiene un valor de -93.5% con respecto a la onda inducida, y la onda transmitida es 6.5%; el signo negativo indica el cambio de fase relativo a la onda incidente. Para un instante dado en el que la onda incidente se encuentra en un máximo positivo en la interfase, la onda reflejada será un máximo negativo, como se muestra en la figura 1.6a.

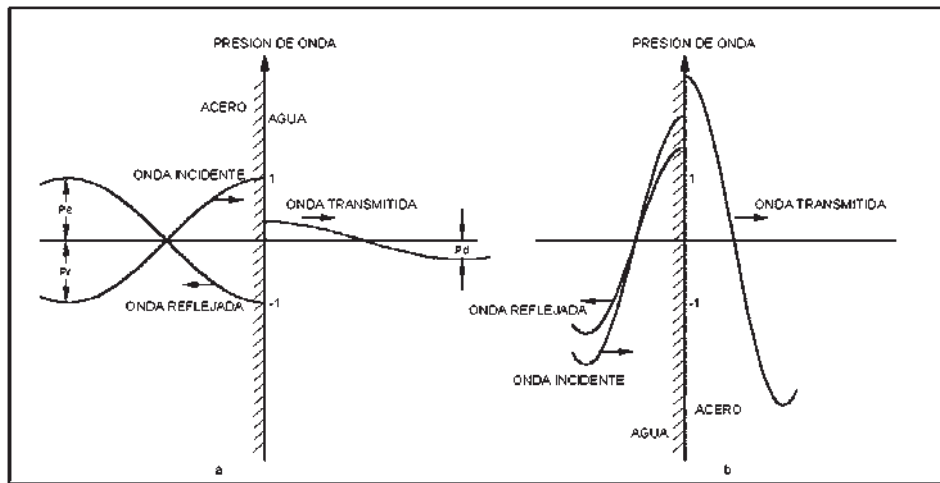


Figura 1.6. Reflexión-Transmisión.

Intensidades de la onda de presión en el caso de reflexión en la interfase acero-agua: onda incidente en acero (a) o en agua (b).

En el caso contrario de que la onda incidente va del medio agua hacia el acero, se obtienen los coeficientes:

$$R = +0.935 \quad ; \quad D = +1.935$$

Ya que “R” y “D” son positivos, las ondas se encuentran en fase. La onda

transmitida es 193.5% de presión con respecto a la onda inducida, como se muestra en la figura 1.6b.

En ultrasonido, las relaciones de amplitud e intensidad son medidas en decibeles (dB). Se aplica la siguiente definición para amplitudes de presión de sonido, “p”, o intensidades, J,

$$\text{Relacion en Decibeles} = 20 \cdot \lg \frac{p_1}{p_2} \text{ dB} \quad \text{ó} \quad 10 \lg \frac{J_1}{J_2} \text{ dB}$$

Al aplicar esto a los valores de reflexión y transmisión, para acero-agua:

$$|R| = -0.58 \text{ dB} \quad (\text{la onda reflejada decrece } 0.58 \text{ dB comparada con la incidente})$$

$$|D| = -23.81 \text{ dB} \quad (\text{la onda reflejada decrece } 23.81 \text{ dB comparada con la incidente})$$

Para la transmisión inversa de agua hacia acero:

$$|R| = -0.58 \text{ dB}$$

$$|D| = +5.77 \text{ dB} \quad (\text{la onda transmitida incrementa } 5.77 \text{ comparada con la incidente})$$

A primera vista, una presión de onda excede el 100%, lo que puede parecer contradictorio con la ley de la energía. De cualquier forma, de acuerdo con la ecuación (1.4) de la intensidad; la energía por unidad de tiempo y unidad de área, no se calcula a partir de la presión del sonido, sino a partir de la impedancia acústica del material en el cual viaja la onda. Por esto, ya que la impedancia en el acero es mucho mayor que en el agua, el cálculo muestra que la intensidad de la onda transmitida es mucho menor que en el agua a pesar de la alta presión de la onda.

El balance expresado en términos de intensidades para una frontera dada en el caso de incidencia perpendicular está dado por:

$$J_e = J_r + J_d \tag{1.12}$$

En el caso de presión de onda;

$$P_e + P_r = P_d \quad (1.13a)$$

$$1 + R = D \quad (1.13b)$$

La inversión de fase, caracterizada por un valor negativo de R, siempre ocurre en el caso de reflexión de un material sónicamente más suave.

Despreciando el signo, que indica el cambio de fase, la potencia reflejada es independiente de la secuencia de dos materiales, pero no de su transmisión.

1.4. Atenuación de Ondas Ultrasónicas en Sólidos

1.4.1. Absorción y Dispersión.

Se asume que en los materiales ideales la presión de la onda se reduce porque la onda se esparce. Una onda plana no debería entonces mostrar reducciones cualquiera que sea la dirección de la presión del sonido, y una onda esférica, o el haz de sonido de una probeta en su campo lejano, debería decrecer solamente de manera inversamente proporcional a la distancia de la fuente. Todos los materiales reales producen efectos en cierta medida que debilitan el sonido. Esto es ocasionado principalmente por dos razones; dispersión y absorción, los cuales se combinan en el término atenuación (algunas veces llamado extinción).

La dispersión resulta del hecho de que el material no es estrictamente homogéneo. Éste contiene límites en los cuales la impedancia acústica cambia abruptamente porque dos materiales de diferente densidad o velocidad sónica se encuentran en esas interfases. Tales inhomogeneidades pueden ser inclusiones, o poros de gas. Pueden ser fallas dentro del material o fallas intencionales. Aún cuando solamente esté presente un tipo simple de cristal, el material puede todavía ser inhomogéneo para las ondas ultrasónicas, si los granos están orientados aleatoriamente y el cristal tiene diferentes propiedades elásticas, por lo tanto diferentes velocidadesónicas en diferentes direcciones. En este caso es llamado anisotrópica.

En un material con granos muy grandes, de tamaño comparable con la longitud de onda, la dispersión puede ser visualizada geoméricamente. En una frontera oblicua la onda

es partida en varios tipos de onda reflejada y transmitida. Este proceso se repite para cada onda en el siguiente borde de grano. De esta manera la onda de sonido original es dividida constantemente en ondas parciales, las cuales a través de su longitud y ruta compleja son gradualmente convertidas en calor por la presencia constante de la absorción.

En el rango de frecuencias usadas para pruebas de materiales, el tamaño de grano es usualmente menor que la longitud de onda, y bajo esas condiciones, ocurre la dispersión en vez de la división geométrica. En el caso de tamaños de grano de 1/100 a 1/1000 de longitud de onda, la dispersión es para todos los propósitos prácticos despreciable.

La segunda causa de la atenuación es la absorción, es una conversión directa de la energía sónica en calor. La absorción puede ser visualizada como una especie de efecto de rompimiento de las oscilaciones de las partículas, lo cual puede observarse cuando una oscilación rápida pierde más energía que una oscilación lenta, la absorción usualmente incrementa con la frecuencia, pero a una rapidez mucho menor que la dispersión.

Ambas pérdidas ocasionan limitantes en la caracterización no destructiva ultrasónica de materiales, pero en diferentes maneras. La absorción debilita la energía transmitida y los ecos de las paredes frontal y posterior. Para contrarrestar este efecto se puede amplificar el voltaje transmitido y la amplificación, o se puede experimentar con la menor absorción a las frecuencias más bajas. La dispersión es más inconveniente, porque en el método de eco no solamente reduce el peso del eco de las paredes frontal y posterior, sino que adiciona numerosos ecos con diferentes tiempos de tránsito; esto se llama ruido, en donde se pueden perder los verdaderos ecos. La distorsión no puede ser contrarrestada por el aumento de voltaje o la amplificación, porque el ruido aumenta simultáneamente. El único remedio es usar frecuencias bajas, lo que permite reducir el efecto del haz de sonido e incrementar la longitud de las ondas y de los pulsos [7, 8].

La presión de sonido de una onda plana, la cual decrece solamente como resultado de la atenuación, para propósitos de cálculo puede ser escrita en la forma de función exponencial

$$p = p_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d} \quad (1.14)$$

“ p_0 ” y “ p ” son las presiones de sonido al principio y al fin respectivamente, de una sección de longitud “ d ” y “ α ” es el coeficiente de atenuación.

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d}$$

(1.15)

Ya que la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión de sonido se obtiene:

$$e^{-\alpha_1 \cdot d} = e^{-2 \cdot \alpha \cdot d} \quad (1.15a)$$

Por lo que

$$\alpha_1 = 2 \cdot \alpha \quad (1.15b)$$

El logaritmo natural de la ecuación (1.14) resulta:

$$\alpha \cdot d = \ln \frac{A_0}{A} \quad (1.15c)$$

Esto es propiamente la atenuación, o el total de atenuación a través de la distancia “d”, un número dimensional que se puede expresar en Nepers/metro (Np/m). También se puede dar en decibeles por metro, dB/m.

$$\alpha \cdot d = 20 \cdot \lg \frac{A_0}{A} \text{ dB} \quad (1.16)$$

1.5. Método de Eco-Pulso.

La figura 1.7, muestra el principio del método en el cual un pulso de onda ultrasónica, usualmente en forma de oscilación amortiguada, es generada por un transductor y propagada a través del espécimen con la velocidad ultrasónica correspondiente. Parte del ultrasonido se refleja si golpea un obstáculo en forma de inhomogeneidad y, si no es muy grande, el remanente seguirá viajando hasta la frontera del espécimen y será reflejada de regreso hacia el receptor, si la pared posterior y el receptor están en posición favorable. La señal obtenida del receptor, es desplegada como un pico en una línea base del osciloscopio. El recorrido horizontal es proporcional al tiempo, así que al paso del tiempo y del pulso desde y hasta el transductor, y desde y hasta la pared frontal, corresponden respectivamente a las distancias en la pantalla al pico inicial hasta el eco del pico, correspondiente al reflejo.

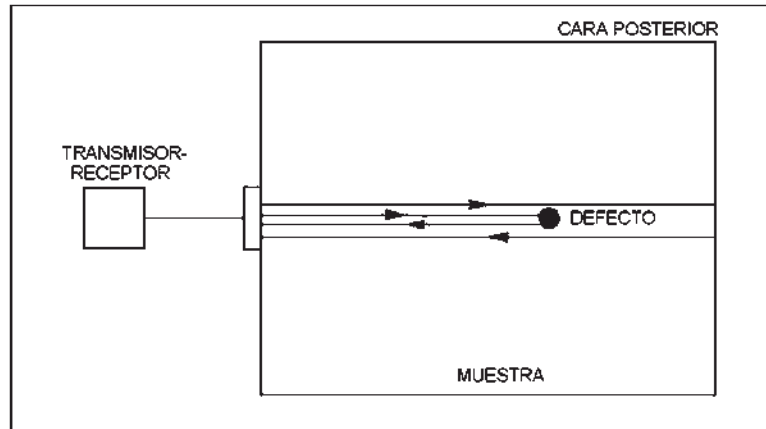


Figura 1.7. Principio del Eco-Pulso.

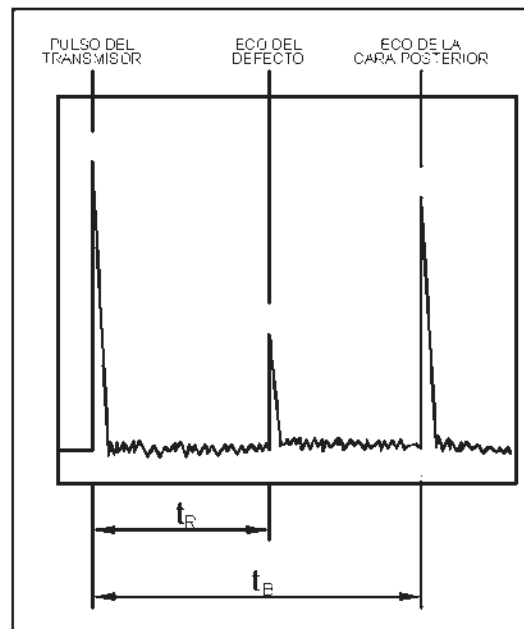


Figura 1.8. Tiempo de Vuelo.

Por la calibración de la línea base en tiempo por unidad de longitud, el tiempo transcurrido “ t_r ” y “ t_b ” al reflector y la pared posterior respectivamente pueden ser leídas de la pantalla y así obtener la distancia “ d ” a partir de cualquier reflejo, conociendo la velocidad del sonido “ c ”,

$$\frac{2 \cdot d}{t} = c \quad (1.17a)$$

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1.17b)$$

La amplitud del eco recibido depende de varios factores, algunos son:

- La potencia del pulso transmitido al entrar al espécimen.
- Dirección del transductor emisor.
- Tamaño del reflector.
- Calidad en la superficie del reflector.
- Posición del reflector.
- Tamaño y dirección del receptor.
- Pérdidas en el receptor por reflexión y acoplamiento.
- Atenuación de la onda por absorción y dispersión del material.
- Efecto de sombra de cualquier defecto en frente del reflector.

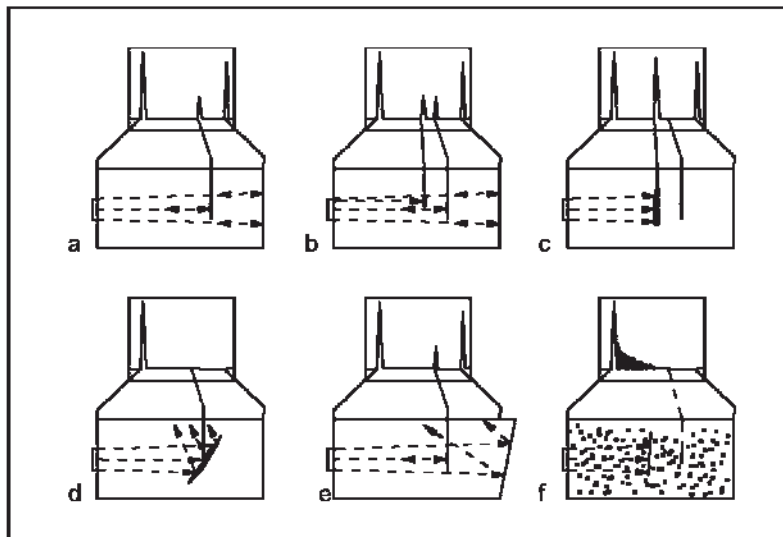


Figura 1.9. Diferentes Comportamientos de la Señal.

Algunos de estos efectos se muestran en la figura 1.9. Se pueden indicar simultáneamente varios defectos en la onda (figura 1.9b), ya que no es completamente ocultado por la sombra del otro. En algunos casos, incluso un defecto pequeño detrás de uno más grande puede ser mostrado por una onda difractada en los límites del primero y por supuesto, el eco posterior se puede desplegar (figura 1.9c).

De acuerdo a los aspectos geométricos simples de la onda de sonido y el eco de la

pared posterior podría desaparecer, cuando el efecto en frente cubra completamente el haz. En algunos casos a partir de este hecho se puede obtener una estimación aproximada del tamaño del defecto. El eco de la pared posterior también se puede llegar a perder por la oblicuidad de la pared o por una alta absorción o dispersión del material (figuras 1.9e y f).

El caso anterior se identifica usualmente por varios picos decreciendo con la distancia, también llamado ruido (grass).

Un espécimen de planos paralelos, usualmente permite observar varios ecos igualmente espaciados, visibles en la pantalla del osciloscopio, si el rango en tiempo es lo suficientemente grande (figura 1.10). Esto se debe al hecho de que el eco de la onda, cuando llega a la superficie de prueba se presentan pérdidas de esa energía, la mayor parte de esa energía es re-reflejada de nuevo, y así sucesivamente, hasta que es reducida a cero por absorción y el haz se esparce. El tiempo de tránsito entre dos ecos múltiples son iguales y de alta precisión [9, 5].

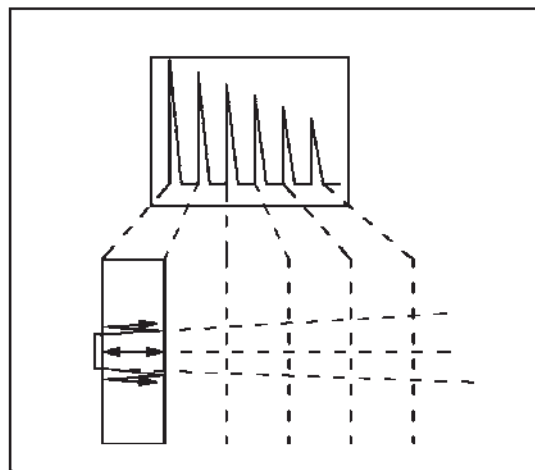


Figura 1.10. Ecos de la Señal.

1.6. Funcionamiento Básico de un Detector de Eco-Pulso.

1.6.1. Diagrama de Bloques.

Los detectores para inspección ultrasónica de eco-pulso son básicamente osciloscopios con dispositivos especiales. La figura 1.11 muestra esquemáticamente el generador de frecuencia (1), sincronización de recorrido (2) y el generador de pulso (3). Si solamente se utiliza en la transmisión y recepción el generador del pulso excita el

transductor (4) y los ecos son recibidos y magnificados por el amplificador (5), rectificadores (1 y 2), y enviados al osciloscopio (6).

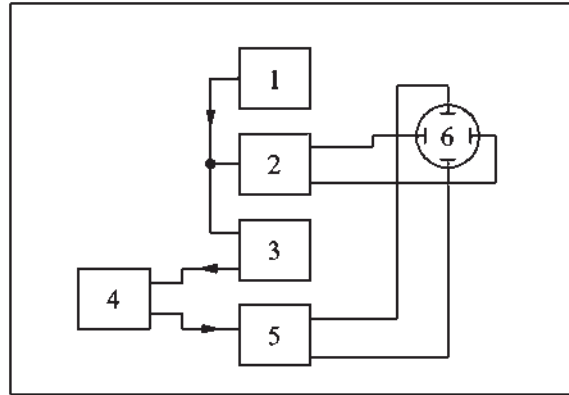


Figura 1.11. Generador de Frecuencia.

I.6.2. El Pulsador (Generador de Frecuencias) y la Línea Base de Voltaje.

Para obtener imágenes estacionarias en pantalla, el generador de frecuencias dispara los pulsos al transmisor y el inicio del generador de recorrido. Usualmente el pulso del transmisor es disparado un poco después que el barrido ya que es visible al lado izquierdo de la pantalla un poco hacia la derecha del inicio del recorrido, como se observa en la figura 1.12.

La figura 1.12 muestra las variaciones de voltaje a través de dos periodos en un caso general. El retraso " t_T " del transmisor después del disparo es más pequeño que el retraso del inicio del barrido " t_S ", y por lo tanto en este caso el pulsador principal no será visible durante el tiempo de recorrido y mientras el trazo es visible. Solamente pocos ecos serán visibles, pero en la mayoría de los casos " t_T " será un poco mayor que " t_S ".

Para medir una distancia inaccesible es suficiente medir la distancia de un eco pulso de un máximo al máximo principal. Para lecturas de más precisión, es necesario que exista cierto retraso entre el máximo del pulso eléctrico en la pantalla y la entrada del pulso ultrasónico dentro del espécimen, este efecto, es todavía más importante cuando se utilizan transductores ajustados con una zapata de plástico o plexiglass.

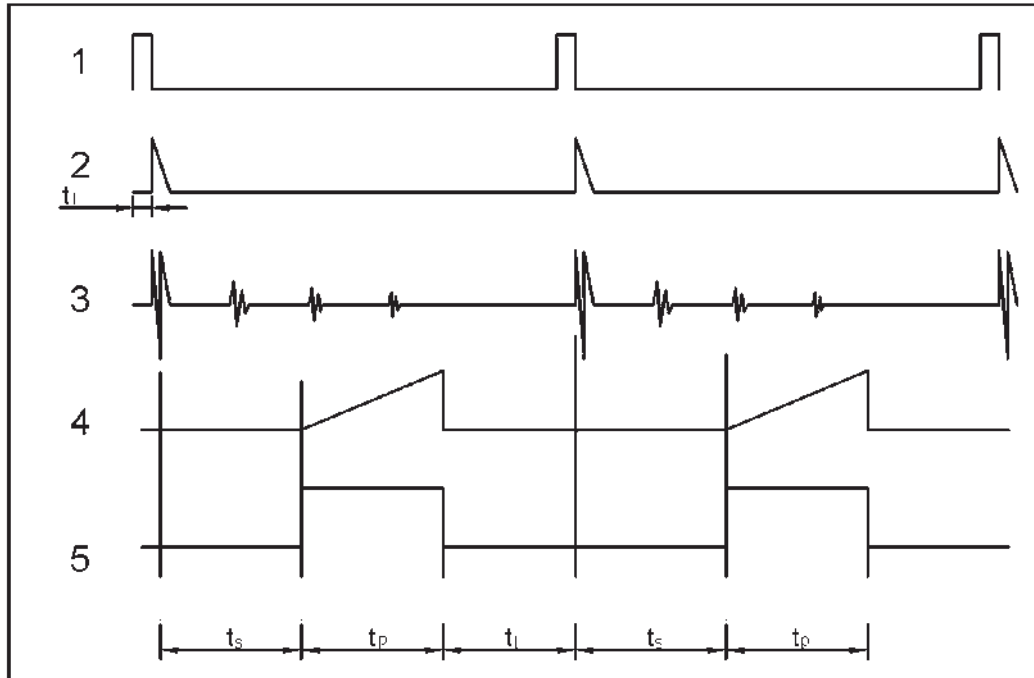


Figura 1.12. Variaciones de Voltaje a Través del Tiempo.

En los instrumentos asistidos por computadora, la precisión del tiempo base aumenta considerablemente, esto es posible por el uso de ciclos de fase fijos. El recorrido en el tiempo base es controlado por un oscilador de cuarzo.

Algunas veces se desea magnificar una pequeña parte de la imagen. Para lograr esto, se utiliza un circuito llamado “expansión de escala”, una sección del tiempo base se amplifica hacia toda la pantalla. La sección seleccionada con el rango inspeccionado para expansión puede ser movida en la misma forma como una lupa que se mueve sobre un objeto.

Cuando se inspeccionan componentes bajo agua, con la técnica de inmersión, el pulso de sonido primero tiene que viajar a través del agua y el rango de interés inicia con la entrada del eco. Ya que la distancia de la capa de agua puede variar durante la inspección es una ventaja usar el eco entrante para disparar el recorrido [10,11,12].

I.6.3. El Transmisor.

Para excitar el pulso del transmisor se utiliza un pulso de voltaje de algunos cientos de voltios; su amplitud y forma tienen grandes efectos en el pulso ultrasónico transmitido.

A pesar del uso de nuevos componentes electrónicos el principio básico con el que

se originó el transmisor se mantiene. El condensador es cargado algunos cientos de voltios, la señal de disparo cierra un circuito electrónico el cual descarga el condensador y hace aparecer su voltaje como un pico en la salida del transductor. El condensador es descargado vía el resistor y la bobina en paralelo con el transductor. Por el pulso eléctrico el transductor es excitado para producir un pulso mecánico en cual es transmitido como un pulso ultrasónico dentro del espécimen por medio de una capa de acoplante.

La forma del pulso eléctrico es influenciada en gran parte por el transductor y sus condiciones de acoplamiento. Ya que por lo menos algunos de los elementos definen la oscilación, por ejemplo la bobina, que usualmente está incorporada dentro del transductor, una oscilación eléctrica que no es generada antes de que sea conectado el transductor. Sin esta conexión el pulso es solamente un pico unilateral con caída exponencial

El límite superior de la frecuencia de pulsos depende del tiempo de aparición de la descarga del condensador y este depende del tiempo de contacto del conector electrónico. El límite de la frecuencia más baja está determinada por el tamaño del condensador.

La forma del pulso transmitido no es tan importante para el comportamiento del sistema de detección. Es de mayor importancia la forma de la señal del eco, la cual se forma después de que el pulso ha pasado a través de todos los elementos de transmisión encadenados al desplegado. Esto incluye la doble transformación por el cristal, las propiedades del material y el reflector. Así como las características de amplificación y rectificación. Todo esto tiene influencia en la forma del pulso final desplegado en la pantalla pero la influencia más importante usualmente nace de las propiedades acústicas del oscilador.

I.6.4. El Receptor.

Es evidente que se hacen altas demandas en el receptor-amplificador ya que el voltaje que tiene que ser desplegado en la pantalla va desde $30\mu\text{V}$ hasta 30V , esto es un rango de 120 dB.

Se requiere que el despliegue menor de voltaje de $30\mu\text{V}$ deba todavía estar por encima del ruido y niveles de interferencia. Por el otro lado, voltajes altos de 30V tienen que estar presentes sin distorsión o saturación, ya que en el corto intervalo de tiempo entre el pulso de transmisión y el primer eco, el amplificador debe además tener una rápida recuperación después de haber sido sobrecargado.

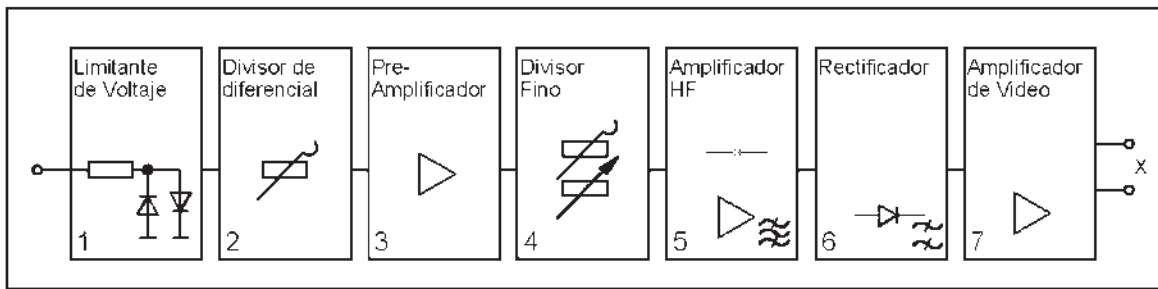


Figura 1.13. Principio del Amplificador.

En la figura 1.13, se muestra el principio de tal amplificador. En la entrada del amplificador se tiene un limitante de voltaje (figura 1.12.1) para prevenir daños por transmisión de alto voltaje en el amplificador. Sigue un divisor de diferencial grueso (figura 1.12.2), por el cual pueden ser reducidos ecos de alto voltaje a un rango de trabajo del amplificador, tiene usualmente varios pasos a cada 20 dB. Continúa con un pre-amplificador de bajo-ruido (figura 1.12.3), la amplificación máxima a la cual está limitada es su ruido térmico. Entonces sigue por un divisor-fino de potencial (figura 1.12.4) (calibrado con pasos de ganancia de 2 dB). La señal va dentro del amplificador HF (figura 1.12.5) para el cual puede ser una banda de frecuencia de 0.5 a 10 MHz en un detector simple. Unidades con alta resolución pueden tener un ancho de banda hasta 25 MHz o más.

Es esencial para alta resolución tener transductores con amortiguamiento alto y también un amplificador de ancho de banda con curvas de fase plana en la vecindad de la frecuencia del transductor. Estas son las condiciones para obtener en la pantalla pulsos sin oscilaciones transitorias. En el caso contrario un ancho de banda grande incrementa el ruido reduciendo así la sensibilidad para ecos pequeños.

Las señales después de haber sido amplificadas por el amplificador principal proceden a su rectificación (fig. 1.12.6). Hay rectificadores los cuales pueden ser conectados de onda completa a rectificación de media onda de cualquiera de las mitades positiva o negativa. Con otras unidades el rectificador puede entonces ser desconectado, para desplegar en pantalla señales no rectificadas.

Para obtener un despliegue claro de la señal, el límite superior del ancho de banda del video amplificador (después del rectificar), debe ser varias veces más grande que la frecuencia del transductor ya que esto es decisivo para la resolución en el sistema de

inspección.

1.7. Métodos Auxiliares para la Evaluación.

La documentación completa de todos los datos significativos obtenidos de una inspección de eco-pulso es posible con el uso de computadoras personales. Para este propósito el dato posicionado referido al barrido del transductor debe ser dirigido por un dispositivo mecánico en adición que las señales desplegadas en la pantalla del osciloscopio deben ser capturadas.

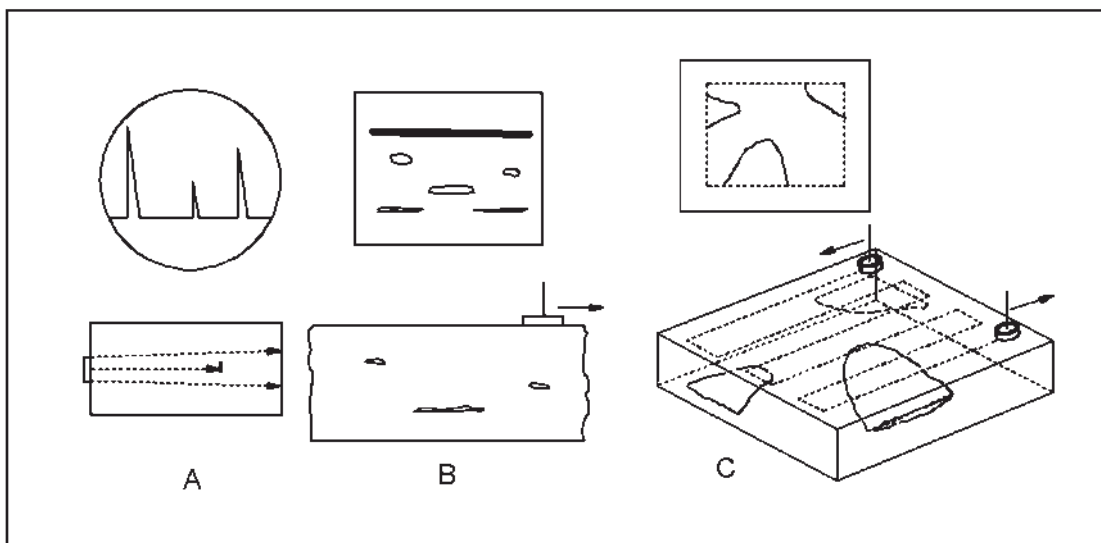


Figura 1.14. C-Scan.

La figura 1.14 muestra esquemáticamente varias posibilidades de documentación. El llamado A-scan consiste en hacer un recorrido en línea recta con el transductor guiado por medio de un dispositivo mecánico. Utilizando una computadora personal, de características comerciales actuales, se puede controlar éste movimiento, la posición y velocidad de barrido, así como la obtención de señales digitales del osciloscopio. Lo que se obtiene es un grupo de señales asociadas cada una a una posición "x" del recorrido que se hizo. Puede ser en tiempo real o post-procesamiento que se obtengan gráficas de intensidades, variación en tiempo de inicio de ecos, cambios de polaridad, velocidad, atenuación o cualquier otro tipo de dato que se obtenga de las señales.

El C-scan sigue el mismo principio de obtener un grupo de señales asociadas cada una a una coordenada, pero ahora en “x-y”, en función de las distancias que existan entre cada una de las lecturas se pueden formar imágenes que muestran variaciones significativas en algún parámetro medido en las señales de la muestra [12, 13].

Capítulo II. Desarrollo Experimental.

II.1. Sistema Experimental Implementado.

En este capítulo se presenta el procedimiento experimental seguido. Donde primeramente se describen las muestras utilizadas y equipo utilizado, después el sistema de muestre y por último el tratamiento numérico.

II.1.1. Muestras.

Se utilizaron ocho muestras [2] del compuesto Alúmina-Circonia con las siguientes proporciones:

	MUESTRA	PORCENTAJE ALUMINA	PORCENTAJE CIRCONIA
1	A0Z100	0	100
2	A10Z90	10	90
3	A30Z70	30	70
4	A50Z50	50	50
5	A70Z30	70	30
6	A85Z15	85	15
7	A95Z05	95	5
8	Z100Z0	100	0

Tabla II.1. Muestras Utilizadas.

II.1.2. Pulsador.

Se utilizó un pulsador marca Panametrics, modelo 5800. La función de este dispositivo es equivalente a la de una fuente de alimentación, dentro de un circuito eléctrico, el generador de señales está conformado por un circuito pulsador o generador de vibraciones, además de ser la fuente de alimentación. Controla la frecuencia y velocidad de repetición del pulso de voltaje, que a su vez excitan al transductor emisor.

II.1.3. Transductores.

El transductor es el elemento del sistema que genera y recibe las ondas ultrasónicas, este elemento está contenido dentro de un dispositivo de protección. También se le nombra sensor. Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra, para este trabajo en específico, el transductor funciona por medio del efecto piezoeléctrico;

convierte energía eléctrica en energía mecánica (ondas mecánicas en rango inaudible; ultrasonido) y viceversa. El transductor utilizado es de una frecuencia de 5MHz, tipo inmersión, un haz incidente focalizado, diámetro de 12.7 mm. También se utilizó un transductor de contacto de 20 MHz para medición de velocidad de corte.

II.1.4. Osciloscopio.

En el osciloscopio se muestran las señales eléctricas emitidas y recibidas en forma digital a través del material excitado por el transductor al realizar la inspección, las señales son digitalizadas y desplegadas en el osciloscopio. Estas señales pueden ser almacenadas y pueden ser analizadas posteriormente. Se utilizó un osciloscopio marca Lecroy, Modelo WaveSurfer 432, de 350 MHz, precisión de 5ps (picosegundos) en escala horizontal y 10 μ v en escala vertical.

II.1.5. Caja de Inmersión.

Es una caja que contiene un medio acoplante, para este trabajo agua. Dentro de la caja se sumerge la muestra por analizar. Esta caja tiene adaptaciones para colocar un sistema de husillos para sostener y posicionar el transductor.

II.1.6. Colocación del Transductor.

Al realizar las pruebas en la caja de inmersión, es necesario colocar el transductor sobre la muestra, que se sumerge en agua. Para esto se utilizó un arreglo de tres husillos, con un avance de 3 mm por revolución. Dos husillos controlan el movimiento en el plano de inspección, denominado x,y. Se colocó un tercer husillo para determinar la posición z, que es la distancia a la que se encuentra el transductor de la muestra. Esta distancia se conservó constante para todas las inspecciones: 23 mm.

II.1.7. Control de Movimiento.

Para controlar la posición del transductor sobre la muestra analizada al realizar los barridos, se adaptaron dos motores a pasos de 1.8°, uno en cada husillo correspondientes a las posiciones “x” y “y”, en modo ortogonal. Un motor a pasos de 1.8° realiza 200 pasos por revolución, por cada revolución se avanzan 3 mm del husillo; por cada paso de (1.8° de revolución) de un motor, se avanzan 0.015 mm (15 micrómetros) en dirección longitudinal. Los motores son de 4 hilos, 4 posiciones de pasos con corriente de alimentación de 12

voltios. Se utilizó un circuito electrónico de potencia para controlar los motores por medio de una PC, con una interfase de comunicación por medio del puerto paralelo DB25.

II.1.8. Equipo de Cómputo.

Se utilizó una computadora personal (PC) con procesador PIII de 800 MHz, disco duro de 30GB, con puerto DB25 y LAN (“Local Area Network”, por sus siglas en inglés), 128MB de memoria RAM, para automatizar el proceso de inspección. Desde esta PC, por medio de programas desarrollados específicamente para este trabajo, se controla:

- Despliegue la onda de ultrasonido en el osciloscopio.
- La adquisición y digitalización de señales.
- Posición del transductor; el transductor se coloca sobre el sistema de husillos, estos husillos se mueven por medio de los motores a pasos, y el movimiento de los motores se controla desde la PC.
- Procedimiento de barrido.

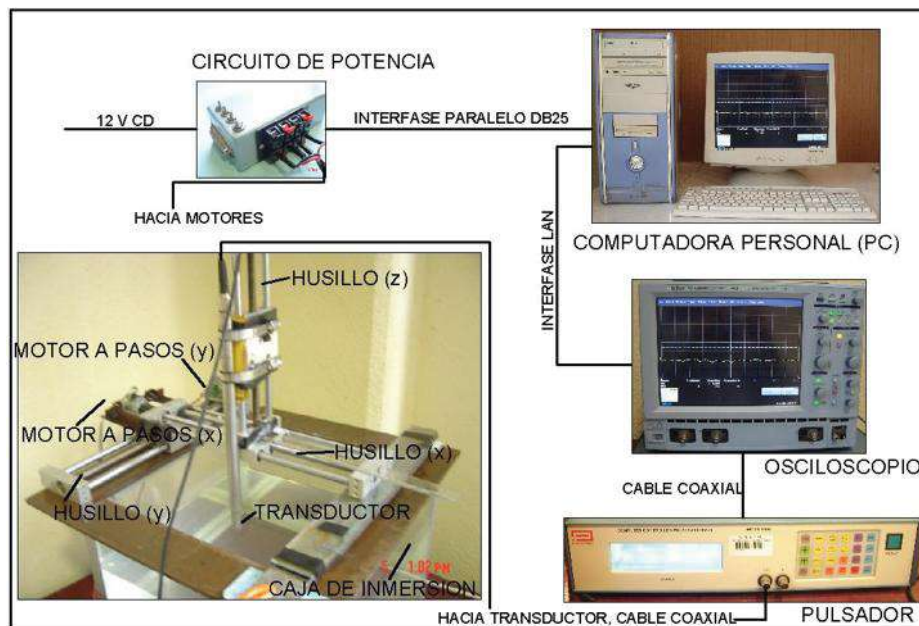


Figura 2.1. Arreglo Experimental Utilizado.

II.2. Modelo Matemático.

A partir de medir el espesor “d” de la muestra y el rango de tiempo en que la onda ultrasónica presenta un eco al recorrer el espesor mencionado se obtiene la velocidad con la relación:

$$c = \frac{2 \cdot d}{t}$$

También se presentó las velocidades longitudinal y transversal de la forma

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}} \quad (1.6)$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.7)$$

Resolviendo las ecuaciones para ν (relación de Poisson) y E (módulo de elasticidad) se obtiene [8]:

$$\nu = \frac{1 - 2 \left(\frac{c_s}{c_l} \right)^2}{2 - 2 \left(\frac{c_s}{c_l} \right)^2} \quad (2.1)$$

$$E = 2 \cdot \rho \cdot c_s^2 \cdot (1 + \nu) \quad (2.2)$$

De esta manera al disponer de los valores, c_l y c_s se obtiene la relación de Poisson y el Módulo de elasticidad.

II.3. Control de Movimiento de Motores a pasos.

Para el control del movimiento del transductor se utilizaron motores a pasos. La característica de estos motores es que el eje del rotor gira a intervalos regulares en lugar de hacerlo continuamente. Bajo el control del puerto paralelo DB25 de la PC se realizó la automatización y el control del barrido de las muestras. Estos procedimientos se implementaron básicamente para el osciloscopio y un par de motores a pasos.

Un motor a pasos gira en función de una secuencia de pulsos aplicados. El eje del motor gira un determinado ángulo por cada impulso de entrada. Cada pulso provoca la rotación del rotor del motor en un incremento de ángulo preciso, denominado paso. Los

incrementos de pasos de la rotación del rotor se traducen en el control de posicionamiento.

Los incrementos de rotación o pasos se miden en grados y es el parámetro fundamental de un motor de este tipo. También se puede expresar en números de pasos por revolución. Un motor a pasos puede girar un número determinado de grados en ambos sentidos.

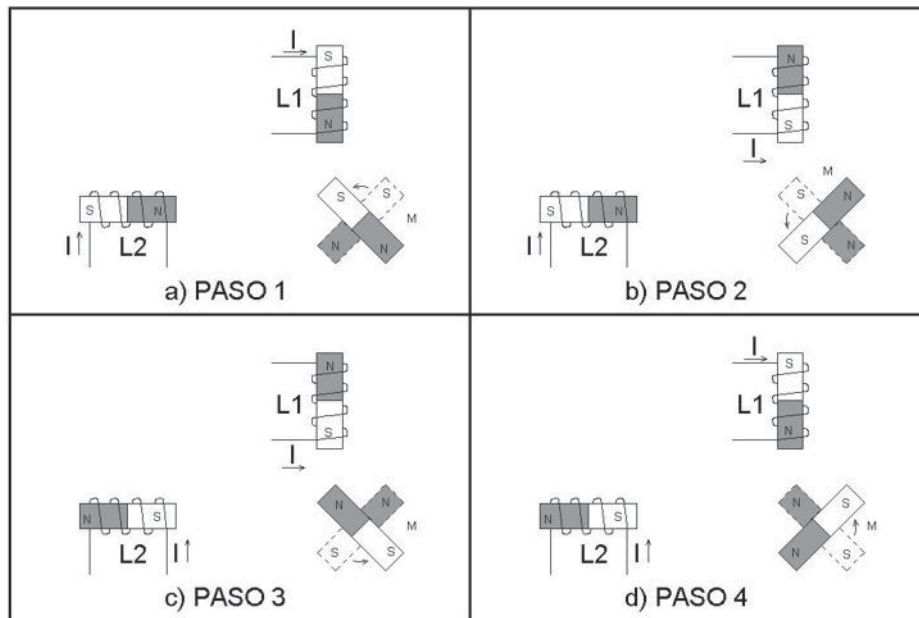


Figura 2.2. Principio de Funcionamiento de un Motor a Pasos.

La figura 2.2 muestra el modo de funcionamiento de un motor a pasos. Suponiendo que las bobinas L1 como L2 cuentan con un núcleo de hierro dulce capaz de magnetizarse cuando dichas bobinas son recorridas por una corriente eléctrica, esto es a lo que se le llama estator. Por otra parte, el imán M puede girar libremente sobre el eje de sujeción central, éste es el rotor.

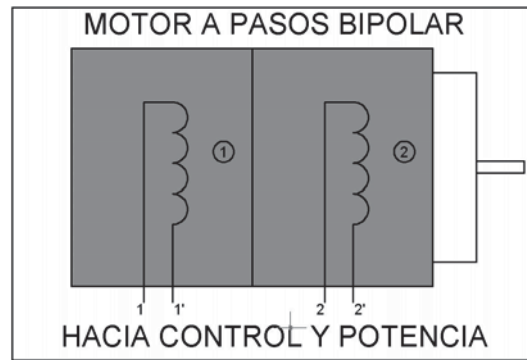


Figura 2.3. Esquema de Control de Motor Bipolar.

Inicialmente, sin aplicar ninguna corriente a las bobinas, o fases, y con el imán M en una posición cualquiera, el imán permanecerá en reposo si es que no se somete a una fuerza externa. Si se hace circular corriente por ambas fases se crearán dos polos magnéticos NORTE en la parte interna, bajo cuya influencia el imán M se desplazará hasta la posición indicada en la figura 2.2. Si se invierte la polaridad de la corriente que circula por la bobina L1 se obtendrá la situación magnética indicada en la figura 2.2 (b) y el imán M se verá desplazado hasta la nueva posición de equilibrio. Es decir, ha girado 90 grados en sentido contrario a las agujas del reloj.

Invirtiéndolo ahora la polaridad de la corriente que atraviesa la bobina L2, se llega a la situación de la figura 2.2(c) habiendo girado el imán otros 90 grados. Si se invierte de nuevo el sentido de la corriente en la bobina L1 el imán girará otros 90 grados y se habrá obtenido una revolución completa de dicho imán en cuatro pasos de 90 grados. Si se mantiene la secuencia de excitación expuesta para L1 y L2 y dichas corrientes son aplicadas en forma de pulsos, el rotor avanzará pasos de 90 grados por cada pulso aplicado. El modelo de motor a pasos que se ha analizado recibe el nombre de bipolar ya que para obtener la secuencia completa, se requiere disponer de corrientes de dos polaridades [14, 15].

En este tipo de motores las bobinas del estator se conectan formando dos grupos como se muestra en la figura 2.3.

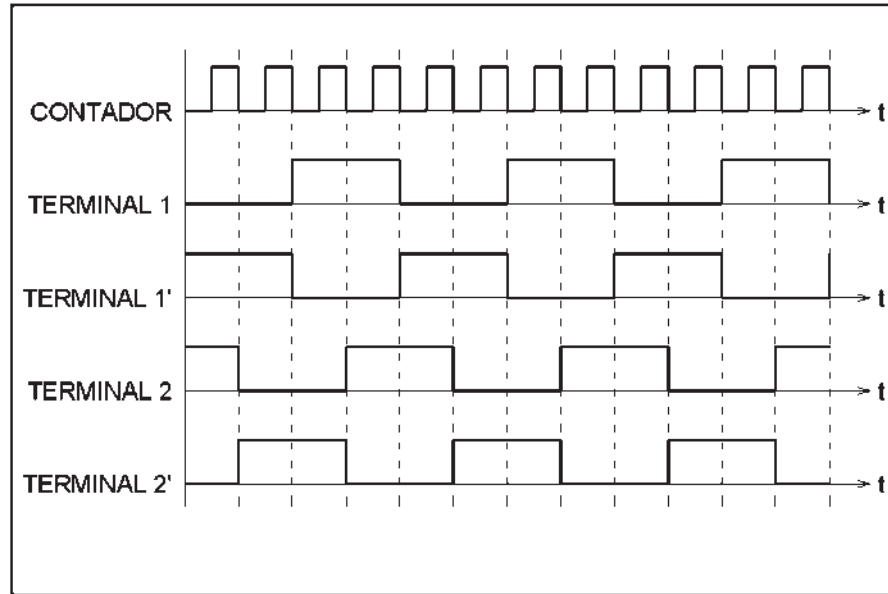


Figura 2.4. Secuencia de la Señal de Excitación del Motor a Pasos.

De este motor salen cuatro hilos conectados al circuito de potencia, que realiza la función de cuatro interruptores electrónicos dobles que permiten variar la polaridad de la alimentación de las bobinas. Con la activación y desactivación adecuada de dichos interruptores dobles, se pueden obtener las secuencias correctas para que el motor gire en un sentido o en otro.

En el modo de “paso completo” (full step) el rotor del motor avanza un paso por cada pulso de excitación.

La figura 2.5 muestra las secuencias para generar los movimientos en sentido horario y antihorario de un motor bipolar. Los términos “horario” y “antihorario” son relativos y dependen del punto de vista de observador y de la posición del motor, por lo que solamente se toman como una forma de indicar que gira en un sentido o en el contrario.

PASO		L1	L1'	L2	L2'
1	PASO COMPLETO 	-	+	+	-
2		-	+	-	+
3	HORARIO ANTIHORARIO	+	-	-	+
4		+	-	+	-

Figura 2.5. Secuencia de Control para Modo de Paso Completo.

El modelo de motor descrito es una forma simplista de explicar de manera

sintetizada el funcionamiento de los motores utilizados y no ofrece gran atractivo por la amplitud de cada paso. Una forma de conseguir motores de pasos más reducidos es aumentar el número de bobinas del estator. Otra forma de conseguirlo es la mecanización de los núcleos de las bobinas y el rotor en forma de hendiduras, creándose así micropolos magnéticos, tantos como dientes y estableciendo las situaciones de equilibrio magnético con avances angulares menores. De esta forma se pueden encontrar motores de hasta 500 pasos.

En el presente trabajo se utilizaron motores de 1.8° lo que equivale a 200 pasos por revolución. Los motores se alinearon a usillos con capacidad de movimiento de 3mm por revolución. Por lo que se tiene: $3\text{mm}/200 \text{ pasos} = 0.015 \text{ mm}$ por cada paso.

II.4. Circuito de Potencia para Motores a pasos.

Los pulsos que controlan el movimiento y posición de los motores se emiten desde el puerto paralelo de la PC. Estos pulsos emitidos tienen un voltaje que no es suficiente para mover los motores (0.5 volts), por lo que se elaboró un circuito que amplifica el voltaje de los pulsos del puerto paralelo a 10 volts y transmitirlos a los motores. En la figuras 2.6 y 2.7 se muestran esquemas del circuito utilizado [14-20].

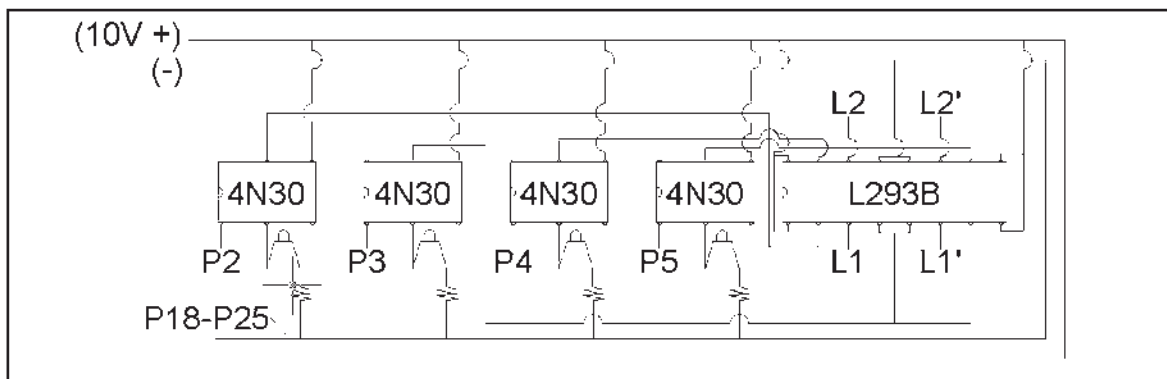


Figura 2.6. Esquema del Circuito de Potencia.

P2, P3, P4 y P5 corresponden a los pines del puerto paralelo de la PC. L1,L1', L2 y L2' corresponden a los cuatro hilos de un motor a pasos.

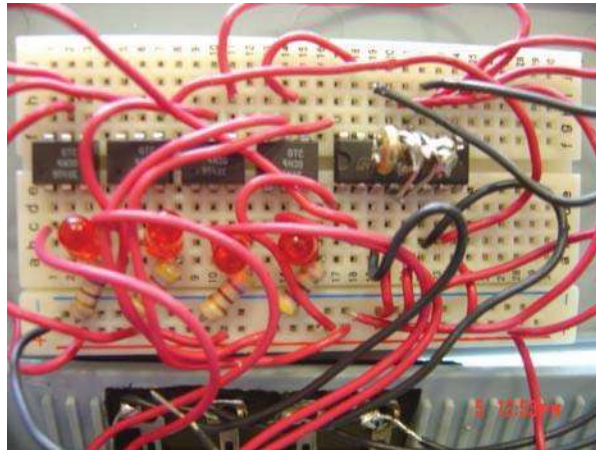


Figura 2.7. Fotografía del Circuito Utilizado.

El puerto de la PC tiene capacidad de emitir una señal de un byte de 8 bits. Este byte corresponde a los pines 2 al 9 del puerto. Para este trabajo se tienen dos motores, cada uno necesita cuatro hilos, lo que significa que se utilizaron los ocho pines disponibles. Cuando se manda un valor de 1 binario el pin genera una corriente de 0.5 voltios, cuando se envía la señal 0 en binario el pin no genera ningún voltaje. Los pulsos que se emiten al puerto paralelo se codifican en código binario. Por ejemplo para tener un motor posicionado en el paso 4, se requiere que L1 y L2 tengan corriente y L1' y L2' no tengan corriente. Acomodando los hilos L1, L1', L2 y L2' a los pines 2,3,4 y 5 respectivamente y emitiendo el número binario 10100000 por el puerto se obtiene el paso 4 de un motor. Para lograr el paso 4 en los dos motores se emite la señal 10101010.

II.5. Operación del Osciloscopio.

Un instrumento de gran utilidad para la realización del presente trabajo fue el osciloscopio. El que se utilizó tiene características de poder automatizarse y controlarse desde una PC, cuenta con una capacidad de almacenar hasta 5GB de información sin problema alguno dentro de la memoria del mismo osciloscopio antes de transferir los datos a otro medio de almacenamiento, permitiendo así incrementar la velocidad de muestreo. La interfase que se utilizó para la conexión de la PC al osciloscopio se hizo mediante un cable cruzado de LAN (“Local Area Network”, por sus siglas en inglés), con velocidad de transferencia de 100 kps.

Las tareas de control de los motores (manipulación del transductor) y de adquisición o digitalización de las señales, se tratan como operaciones aisladas y en realidad se realizan una independiente de la otra, pero se tienen que programar una serie de órdenes variadas, con intervalos de tiempo muy cortos, casi imperceptibles al sentido humano, pero que aparentan realizarse al mismo tiempo. Se procuró que el control del osciloscopio utilizara un mínimo de instrucciones para facilitar modificaciones o ampliaciones posteriores, así como una interpretación más fácil de alguien que no esté familiarizado con las instrucciones del osciloscopio incluso si no tiene experiencia programando. Por esto se debe configurar el osciloscopio con parámetros estandarizados antes de utilizar el programa de automatización.

II.5.1. Configuración del Osciloscopio.

Primeramente se determinan los parámetros de almacenaje de señales, en el menú FILE/SAVE WAVEFORM... se invoca un cuadro de diálogo similar al que se muestra en la figura 2.8. Se hace clic sobre el cuadro TRACE TITLE y aparece un teclado virtual en donde se asigna el nombre que llevarán las señales adquiridas. Para este ejemplo se muestra A0Z100 (que significa Alúmina 0%, Circonia 100%). Es importante tomar en cuenta todas las recomendaciones correspondientes al número de letras utilizadas, orden alfabético que toman con respecto al orden de las muestras y demás, porque se debe recordar que todas las señales tendrán que ser buscadas y programadas en algún momento y no es muy agradable perder el orden con que fueron adquiridas las señales. Se tecléa OK y se regresa al cuadro de diálogo anterior.

En la opción de “Save To” se selecciona “File”. “Source” se refiere a la fuente, o de donde se va a obtener la señal, para este caso por ser eco-pulso elegir “C1” que es el canal 1. La opción “Trace Title” ya se mencionó. En “Data Format”, se elige el formato ASCII, con los datos de “Time & Amplitud” que es tiempo y amplitud, y en “Delimiter” se define “Tab”, esto es que se van a almacenar las señales en código ASCII (archivos de texto con extensión .txt) en dos columnas, una con el tiempo y la otra con amplitud, separadas estas señales con un tabulador. En la parte correspondientes a “Auto save”, se selecciona “Wrap”, en el directorio C:\ZZ, esto significa que dentro de la carpeta ZZ que se encuentra en la raíz de la memoria del osciloscopio se van a grabar las señales adquiridas y va a comenzar desde la numeración 0, y muestra el nombre que se le dará al siguiente

archivo, en la figura 2.8 se indica C1A0Z10000000.txt. Se observa que se antepone C1 porque se está grabando la señal del canal 1 al nombre que se haya definido, y después del nombre se tienen 5 ceros, 00000, que se reservan para dar una numeración continua a los archivos grabados, la extensión “.txt” completa el nombre del archivo. También se puede observar en la parte inferior derecha que nos indica el espacio disponible. Con los controles propios del osciloscopio se ajusta el rango de la señal que sea de nuestro interés hasta visualizarla en la pantalla y esa será la parte de la señal que se va a adquirir [10,11].

Estas son las únicas consideraciones que se deben tomar en cuenta antes de iniciar el barrido de alguna muestra. El osciloscopio permite la automatización y control a distancia a través de diversas plataformas de programación. Como plataforma de desarrollo se utilizó el lenguaje de Visual Basic.



Figura 2.8. Definición de Parámetros de Almacenaje.

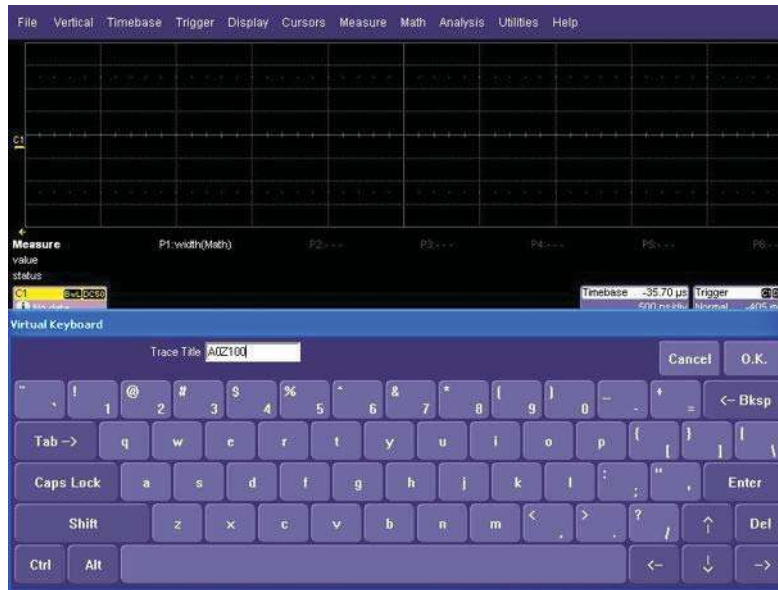


Figura 2.9. Entorno Gráfico del Osciloscopio.

II.6. Barrido de las Muestras.

Las lecturas que se tomaron de las muestras fueron hechas por medio de un “barrido”. Este barrido consiste en colocar el transductor en una posición inicial x, y sobre la muestra, almacenar en un archivo la señal que el osciloscopio capta. Esta señal tiene el rango de interés para obtener la velocidad y atenuación ultrasónicas, que son dos ecos consecutivos, cuya señal está formada por aproximadamente 4000 puntos discretos que forman la señal. El nombre que se le da al archivo, que contiene estos puntos que están en el rango de la señal de interés, se asocia al nombre de la muestra y se numera consecutivamente. El manipulador mueve el transductor a otra posición “ x_1 ” y “ y_1 ” se captura la señal, es decir se digitaliza. Este procedimiento se repite hasta completar todos los puntos x_i, y_i especificados antes de iniciar el barrido. Como resultado se obtiene una serie de archivos que corresponde a cada una de las señales obtenidas de cada punto, también se genera, en una secuencia paralela, un archivo con las coordenadas que corresponden a cada una de las lecturas. Este procedimiento tiene varias tareas que se ejecutan una después de la otra, controlando básicamente los motores y el osciloscopio. Este barrido se puede comparar con el funcionamiento de un escáner comercial al obtener

una imagen.

El control simultáneo del movimiento de motores, disparo de la onda ultrasónica, adquisición y almacenamiento de la misma se hace mediante un programa desarrollado especialmente para este trabajo de investigación.

II.7. Descripción del Programa de Barrido.

El programa tiene una interfaz gráfica. Cuenta con tres cuadros combinados, el que se encuentra en la parte superior izquierda nos permite especificar el número de lecturas que se tomarán en sentido “x”, debajo de él se especifica el número de lecturas en sentido “y”. Los valores que se muestran son 4, 12, 24, 48, 72, 100, 160, 200, 300, 400 y 3000 para sentido “x” y sentido “y”. Las distancias predeterminadas entre cada uno de los puntos en donde se toman lecturas son 15, 30, 60, 120, 240, 480, 600, 1200 y 2400 micrómetros. En la parte inferior izquierda se indica que se realizará un barrido en forma de rectángulo, con las dimensiones del mismo y el número de lecturas que se realizarán por total. En la parte media a la izquierda se encuentra un botón que dice “Iniciar Barrido”, este botón da inicio al barrido. En la parte superior derecha se encuentra cuatro flechas, las que se indican izquierda-derecha controlan el motor “x” y las flechas arriba-abajo controlan el moviendo en “y”. Se pueden mover los motores para colocar el transductor sobre algún punto de la muestra con estos botones sin adquirir datos o dar alguna orden al osciloscopio.

Debajo de los botones de las flechas se encuentra un cuadro con el valor predeterminado 2'000,000 (dos millones de cuentas). La onda de ultrasonido es un fenómeno físico que requiere de cierto tiempo para que pueda ser captado por el osciloscopio y estabilizarse, a esta consideración se debe aumentar que el transductor es movido por un par de usillos y éstos a su vez por los motores. Además que cuando se adquiere una señal cualquiera en el osciloscopio y se requiere almacenarla toma un instante en hacer la grabación sobre el disco interno del osciloscopio. Todo esto nos conduce a considerar un breve lapso de tiempo entre cada paso que de alguno de los motores y después indicará al osciloscopio que almacene los datos. Lo que se está indicando con esta variable es una cuenta que va a realizar la máquina desde 1 hasta 2000000 o el valor que se determine. El tiempo va a variar en función del procesador de la PC que se utilice, por ejemplo la máquina que se utilizó tiene una frecuencia de 800 MHz.

$$\text{Tiempo} = \frac{\text{Cuenta}}{\text{Frecuencia}} = \frac{2000000}{800\text{MHz}} = \frac{2'000,000}{800'000,000} = 0.0025 \text{ seg}$$

Este es el tiempo mínimo recomendado para que funcione adecuadamente el control de los motores y de adquisición de datos en específico para el sistema montado de este trabajo. En caso de que se utilice una PC con otro procesador simplemente se ajusta el valor de la cuenta para que de un valor de 0.0025 segundos o ligeramente mayor.

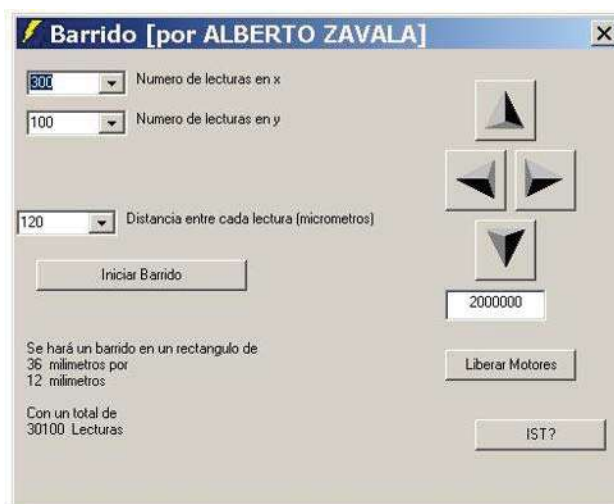


Figura 2.10. Interfaz Gráfica del Programa de Barrido.

Debajo de la cuenta se encuentra el botón de “liberar motores”. Este botón pone en ceros el puerto paralelo, esto es que no hay ninguna señal y por lo tanto se pueden mover los motores manualmente. Al terminar un barrido en el puerto se indica la salida de un número binario que fija los motores, si se mueven manualmente los motores a la vez que se indica un paso con el control de movimiento se puede dañar.

Por último se encuentra el botón IST, este botón manda una señal al osciloscopio “preguntando” el estado en que se encuentra y el osciloscopio “responde” con un mensaje de texto indicando sus características. En caso de que no se responda o se responda con un mensaje de error es que no hay una conexión adecuada con el osciloscopio.

El tiempo total de barrido es variable, y está en función del número de lecturas y en especial del espacio entre cada una de ellas. El barrido más pequeño es de 4 lecturas en “x” por 4 lecturas en “y” a cada 15 micrómetros, puede ser hecho en menos de medio minuto.

Un barrido de 300 lecturas en “x” por 100 lecturas en “y” a cada 60 micrómetros, durará aproximadamente 25 minutos [21,22].

II.8. Cálculo Numérico de Tiempos y Amplitudes.

Una vez que las ocho muestras fueron inspeccionadas, como resultado de estas tareas se tiene una lista con las coordenadas y un conjunto de archivos correspondientes a cada una de los especímenes inspeccionados. Las lecturas se graban en la PC dentro de una carpeta por cada muestra, junto con una copia del archivo *Codigo.xls*, la lista de coordenadas se graba en una carpeta diferente.

Al tener la carpeta con los archivos (señales y *Codigo.xls*) se ejecuta el programa comercial Excel®. Se abre el archivo *Codigo.xls* desde el Excel, como se tienen ocho copias del código, una por cada muestra en este caso, se inicia con la muestra A0Z100. Es muy importante que se ejecute primero el programa Excel y después se abra el archivo con el código que esté en la misma carpeta que las señales a analizar. Al abrir el archivo se debe especificar que se permita ejecutar las macros.

Para iniciar el programa de cálculo numérico de tiempos y amplitudes se selecciona Herramientas/Macro/Macros..., dentro del programa Excel® y aparecerá un cuadro de diálogo similar al de la figura 2.11.



Figura 2.11. Rutinas Dentro del Archivo “codigo.xls”.

La primer rutina que se va a ejecutar es “A_ListaArchivos”, y después “B_Busquedas_Polaridad_Invertida”.

La búsqueda “B_Polaridad_Normal” se utiliza cuando se hace una inspección de

contacto en vez de inmersión y la “B_Polaridad_Combinada” cuando se tiene alguna inspección que muestra cambio de fase del segundo eco en relación al primero. Estas dos búsquedas no se utilizaron en específico para este trabajo, pero se agregan como opción para otro de comportamiento de señales; muestras de compuestos tipo “sandwich” o señales adquiridas por la técnica de contacto.

Al iniciar la búsqueda aparece un cuadro de diálogo que solicita un valor aproximado después del máximo negativo y otro después el valor aproximado del delta x (tiempo de vuelo). Estos valores se pueden obtener al momento de hacer el barrido directamente del osciloscopio o se puede abrir alguna de las señales y obtener los valores. Se teclean los valores en segundos.

La búsqueda lo que hace en términos generales es: encuentra el máximo y mínimo del primer y segundo ecos, estos son cuatro puntos. De cada uno de estos cuatro puntos se obtienen tres datos. Para el primer máximo se tiene abscisa (PosMax), ordenada (ValMax) y número de renglón de la matriz(ValMax); Para el segundo máximo se tiene abscisa (PosMax1), ordenada (ValMax1) y número de renglón de la matriz(ValMax1); para el primer mínimo abscisa (PosMin), ordenada (ValMin) y número de renglón de la matriz(ValMin), para el segundo mínimo abscisa (PosMin1), ordenada (ValMin1) y número de renglón de la matriz(ValMin1). Luego en la columna N se tiene el tiempo de vuelo de, que es diferencia de tiempo del primero al segundo máximo. Las columnas “O” y “P” se dejan vacías.

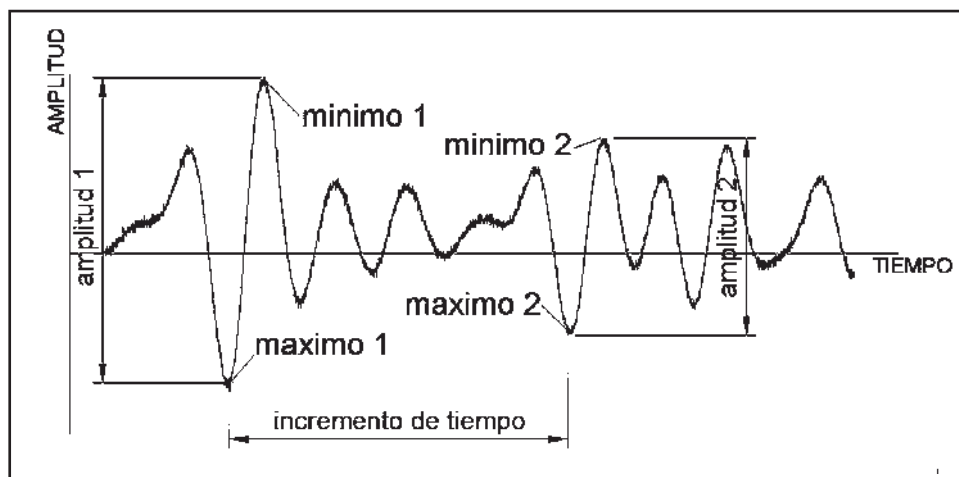


Figura 2.12. Puntos Obtenidos de la Señal.

A partir de estos cuatro puntos, correspondientes a los cuatro picos de los dos ecos, se hace una interpolación para encontrar los máximos y mínimos de curvas ajustadas a los picos de la señal, y se colocan en las columnas de la Q a la Z en el mismo orden de máximo1, máximo 2, mínimo1 y mínimo2, abscisa y ordenada para cada punto. Se observa que en una inspección por inmersión los valores máximos son negativos y los valores mínimos son positivos. Como existe la probabilidad de tener ruido en las señales el programa no efectúa las operaciones necesarias para obtener los tiempos de vuelo y valores de amplitudes para evitar operaciones que dividan entre cero. Estas operaciones se recomienda que se hagan de manera manual. La búsqueda genera una imagen de cada señal, marcando los cuatro puntos de interés. Al terminar la rutina aparece un cuadro de texto [23-28].

Con la matriz de datos obtenida se hacen dos copias y se eliminan las columnas que no sean de nuestro interés. Para este caso se conserva el tiempo de vuelo en una copia y atenuación en la otra. En estas copias se insertan dos columnas y se insertan las coordenadas “x” y “y” correspondientes, que se obtienen del archivo que generó el programa de barrido.

II.9. Interpretación de Gráficas.

Por cada punto del barrido (x_i, y_i) se tiene una señal, a partir de ésta señal se obtiene el tiempo de vuelo y relación de amplitudes entre dos ecos consecutivos. Los resultados se presentaron en tablas y se generaron gráficas de cada una de las señales. Dentro de las señales, que representan la onda ultrasónica, se pueden encontrar muy probablemente señales no deseables, o puntos que no fueron captados apropiadamente. El programa de búsquedas no es capaz de distinguir esta situación, por lo tanto, cuando se tiene estas señales los datos que se presenten en las tablas no son representativos, a esto es lo que se le nombra ruido. Estos datos falsos se eliminan con dos criterios. El primero fue el mencionado anteriormente, en donde no se consideran los datos que numéricamente presentan valores negativos, divisiones entre cero o rangos disparados. El segundo criterio de discriminación es examinar visualmente las gráficas y eliminar las lecturas que no logren una gráfica representativa de la onda ultrasónica.

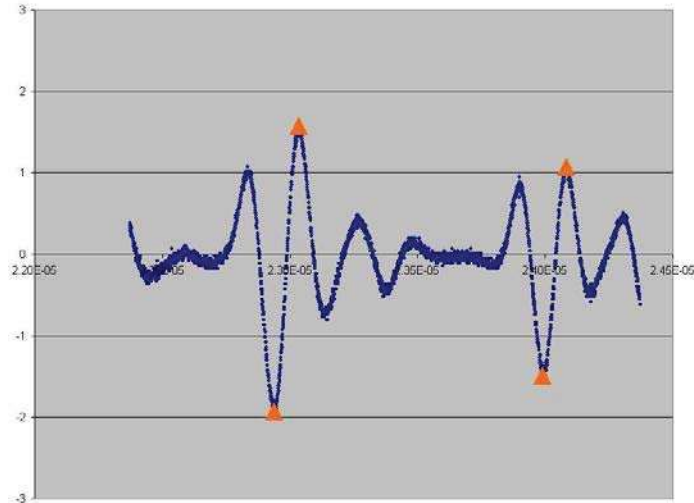


Figura 2.13. Gráfica Obtenida del Análisis Numérico.

Los cuatro triángulos representan de izquierda a derecha al primer máximo, primer mínimo, segundo máximo y segundo mínimo respectivamente.

La Figura 2.13 es una gráfica válida. Representa la onda ultrasónica en un rango que contiene dos ecos consecutivos. Se observa que el valor máximo absoluto es 2, y que se presenta en la parte negativa de las ordenadas. Este es el primer máximo. Después del primer máximo se encuentra un pico en la parte positiva que se considera el primer negativo. Después se observa una especie de reproducción de la misma forma de la señal pero más pequeña, esto es lo que se nombra un eco. Se identifica nuevamente un segundo máximo absoluto que se encuentra en la parte negativa y después otro pico que se le llama segundo mínimo. Estos cuatro puntos son los encontrados en la búsqueda numérica, que se marcan con triángulos rojos. Es relativamente fácil identificar una señal que no haya sido tratada adecuadamente al ver la gráfica que resulta, porque los triángulos se encuentran fuera de los picos máximos y mínimos o porque la señal no representa una onda ultrasónica, tal como se muestra en la Figura 2.14.

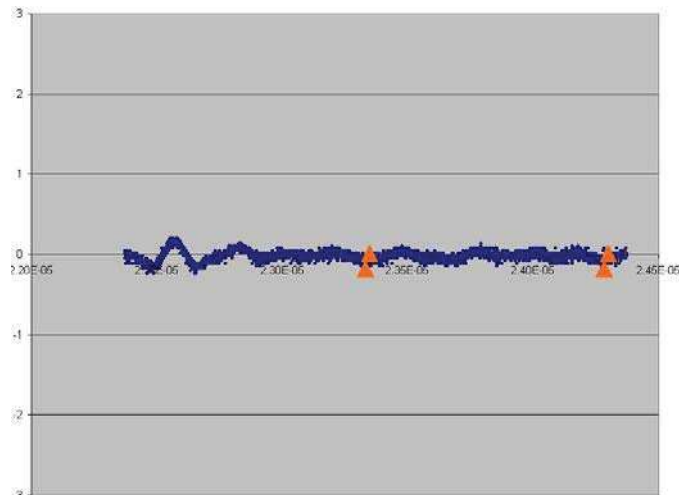


Figura 2.14. Gráfica Característica de Ruido. Todas las gráficas se realizaron en escala de -3 a 3. En específico esta gráfica representa un punto que no fue captado adecuadamente y se considera ruido. Se observa que la señal está prácticamente sobre la amplitud cero. Los triángulos a pesar de que se grafican no indican los puntos de interés.

II.10. Análisis Estadístico.

Ya que se cuentan con 16 matrices (8 de velocidad y 8 de atenuación) con los datos de posición “x,y,tiempo de vuelo” y “x,y,relación de amplitudes” se obtienen los valores numéricos de velocidad y atenuación a partir de las ecuaciones 1.16 y 1.17. Después se eliminan los valores que presenten resultados no válidos o que sus gráficas no representen una señal característica.

MUESTRA	ESPESOR (mm)	ESPESOR (%)
A0Z100	4.914	99.07
A10Z90	3.278	66.09
A30Z70	3.864	77.90
A50Z50	4.084	82.34
A70Z30	4.96	100.00
A85Z15	5.35	107.86
A95Z05	4.825	97.28
A100Z0	4.96	100.00

Tabla II.2. Valores de los Espesores de las Muestras.

Es importante señalar que los resultados obtenidos para cada muestra se tomaron en cuenta más de 4000 señales por muestra y que en cada muestra no se tiene la presencia de moda lo que se ve reflejado en los valores obtenidos de los coeficientes de variación. De las matrices de valores obtenidos se obtienen los modelos de velocidad y coeficiente de

atenuación en función del porcentaje de alúmina contenido en cada muestra según el arreglo de la figura 2.15 [26].

$$\begin{array}{r}
 n \cdot b_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_3 \sum_{i=1}^n x_i^3 + b_4 \sum_{i=1}^n x_i^4 + b_5 \sum_{i=1}^n x_i^5 = \sum_{i=1}^n y_i \\
 b_1 \sum_{i=1}^n x_i + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_3 \sum_{i=1}^n x_i^3 + b_4 \sum_{i=1}^n x_i^4 + b_5 \sum_{i=1}^n x_i^5 - \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \\
 b_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_3 \sum_{i=1}^n x_i^3 + b_4 \sum_{i=1}^n x_i^4 + b_5 \sum_{i=1}^n x_i^5 - \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot y_i \\
 b_3 \sum_{i=1}^n x_i^3 + b_4 \sum_{i=1}^n x_i^4 + b_5 \sum_{i=1}^n x_i^5 - \sum_{i=1}^n x_i^3 \cdot y_i \\
 b_4 \sum_{i=1}^n x_i^4 + b_5 \sum_{i=1}^n x_i^5 - \sum_{i=1}^n x_i^4 \cdot y_i \\
 b_5 \sum_{i=1}^n x_i^5 - \sum_{i=1}^n x_i^5 \cdot y_i
 \end{array}$$

Figura 2.15. Planteamiento de la Ecuación de Regresión.

La velocidad ultrasónica de corte de cada una de las muestras con diferentes composiciones (dos fases) se midió por medio de la técnica de contacto con el método de eco-pulso para ello se utilizó un transductor con una frecuencia de 20 Mhz con línea de retardo de 7 μ seg con la finalidad de minimizar la atenuación debido al material cerámico empleado en este trabajo de investigación. Este tipo de transductores hacen incidir normalmente ondas de corte directamente sobre la pieza a inspeccionar sin el uso de una zapata angular. El diseño de dicho transductor produce una mínima contaminación de la onda longitudinal. La relación entre el componente de la onda longitudinal a componente de la onda transversal es generalmente debajo de -30dB.

II.11. Obtención de la Velocidad Cortante.

La velocidad cortante de las muestras se midió por contacto con el método de eco-pulso, con un transductor de 20 MHz.

II.12. Reconstrucción de Imágenes

La formación de la imagen parte de la matriz que contenga una serie de datos ordenados en tres columnas, posición "x", posición "y" y el valor correspondiente a

velocidad o atenuación ultrasónicas.

Al proceso de formar una imagen a partir de esta serie de datos, con pixeles cuadrados se designa reconstrucción de imagen. La imagen se presenta en series de grises con valores extremos negro y blanco. Dentro del archivo Codigo.xls se encuentra la macro que ejecuta el procedimiento que da como resultado un script que se ejecuta en CAD y forma una imagen vectorial, en vez de una imagen digital como suelen obtenerse por otros medios.

II.12.1. Procedimiento.

Se hace una copia del archivo Codigo.xls y se ejecuta. Se copian las tres columnas “x,y,valor”, en las correspondientes “A,B,C”. Se ejecuta la macro C_CreaScript (ver Figura 2.11). Por último aparece un cuadro de diálogo que nos pregunta el número de rangos que se requieren. Como resultado se obtiene un archivo en la raíz de la PC en la que se contiene la script. La script se corre en el programa AutoCAD y se genera un conjunto de cuadros en 3D correspondientes a cada punto, se agrupan por capas de acuerdo al número de rangos y se agregan sombreados en grises para obtener la imagen. Es importante señalar que en esta imagen vectorial de tres dimensiones se pueden hacer mediciones, ampliaciones, filtrados y una serie de operaciones numéricas, que en una imagen digital de dos dimensiones no es posible por la naturaleza de los datos con que se genera.

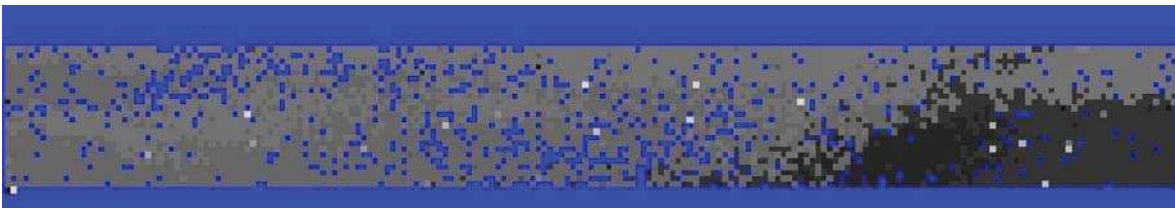


Figura 2.16. Imagen Reconstruida.

A partir de la matriz de datos x,y,z. El fondo azul indica que en esos puntos no se tienen lecturas.

La imagen reconstruida muestra los datos que se obtienen y que son válidos. Los puntos azules se consideran como vacíos o que no se tienen datos. Para el procedimiento numérico solamente se tomaron en cuenta los valores válidos, lo que nos arroja datos representativos y estadísticamente significativos, pero al observar la imagen nos puede dar una sensación o engaño visual de que la descripción de la imagen no representa las características de la muestra.

II.13. Tratamiento de Imágenes

Para resolver el problema visual del ruido dentro de la imagen y tener una idea más concreta de las propiedades de la muestra se utilizaron procedimientos de minería de datos para la obtención de datos.

6954.93362	6942.03189	6949.64579	6946.39096	6944.26172	6944.71314	6951.56858	6956.31
6950.28926	6952.11768	6947.33553	6998.62878	6946.40216	6959.52696	6942.82123	6945.60
6906.88497	6941.59253	6942.25591	6937.44087	6946.60594	6960.61666	7054.52066	6933.08
6930.72799	6937.6411	6932.27357	6966.05496	6945.52879	6925.31404	6962.5185	6942.11
6948.2001	6945.83036	6933.63796	6938.6264	6837.04538	6924.55401	6928.55605	6951.19
6930.96308	6939.02791	6962.54427	10668.0505	6930.78025	6927.72518	6934.22445	6109.17
690.34443	6917.05391	6918.69701	6802.25488	6921.11848	6928.72432	6937.3166	6914.98
6216.62824	6897.97902	6915.51248	6942.83628	6934.37174	6926.34841	6915.53354	6927.04
6936.65	7135.27538	6931.3423	7014.26378	6901.68442	6924.87752	6945.68974	6953.04

Figura 2.17. Representación de la Matrices.

Las posiciones marcadas con rojo y verde, antes del filtrado se encontraban sin valores asignados.

Suponiendo que en vez de tener tres columnas con los datos “x,y,z” se tiene una matriz de “m” x “n”, y que como valor de cada posición “x,y” se coloca el valor “z”. Como nuestra imagen se forma de pixeles cuadrados se tiene la misma distancia entre dos puntos adyacentes horizontales y dos adyacentes verticales, la posición está en función del número de fila y columna representado en la matriz. La primera operación que realiza el filtro es buscar todas las posiciones que no tengan un valor asignado, que es el ruido, y que además las celdas adyacentes sí estén asignadas. La figura 2.17 muestra gráficamente lo anterior. Los valores marcados con rojo se obtuvieron del promedio de sus adyacentes horizontales y verticales en un primer filtro. Las marcadas de verde se obtienen en un segundo filtro, que busca todas las posiciones que no tengan valor asignado y le asigna el promedio de todas las adyacentes que sí tengan valor asignado [11,21,27,28,40,41].

De este modo se completa la matriz para formar nuevamente la imagen, teniendo como resultado de la imagen reconstruida algo similar a la figura 2.18.

Las imágenes obtenidas recibieron otro tratamiento estadístico más, que es ajustar el rango de observación y el número de clases lo que equivale a hacer un ventaneo y determinar el número de rangos. Después de varias combinaciones se definió el de 20 rangos con un ventaneo de 6000 a 11300 m/s, para el factor velocidad y de 0.4 a 10 dB en

atenuación. Es importante señalar que para la atenuación, se trabajó con este valor como tal y no con el coeficiente de atenuación, ya que de este modo se pueden apreciar los contrastes de variación en las muestras.

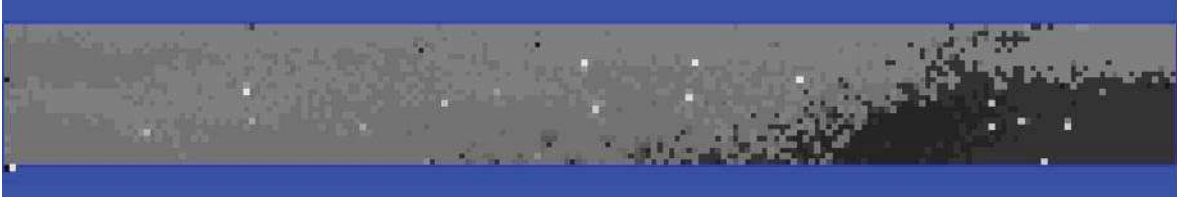


Figura 2.18. Imagen Reconstruida.

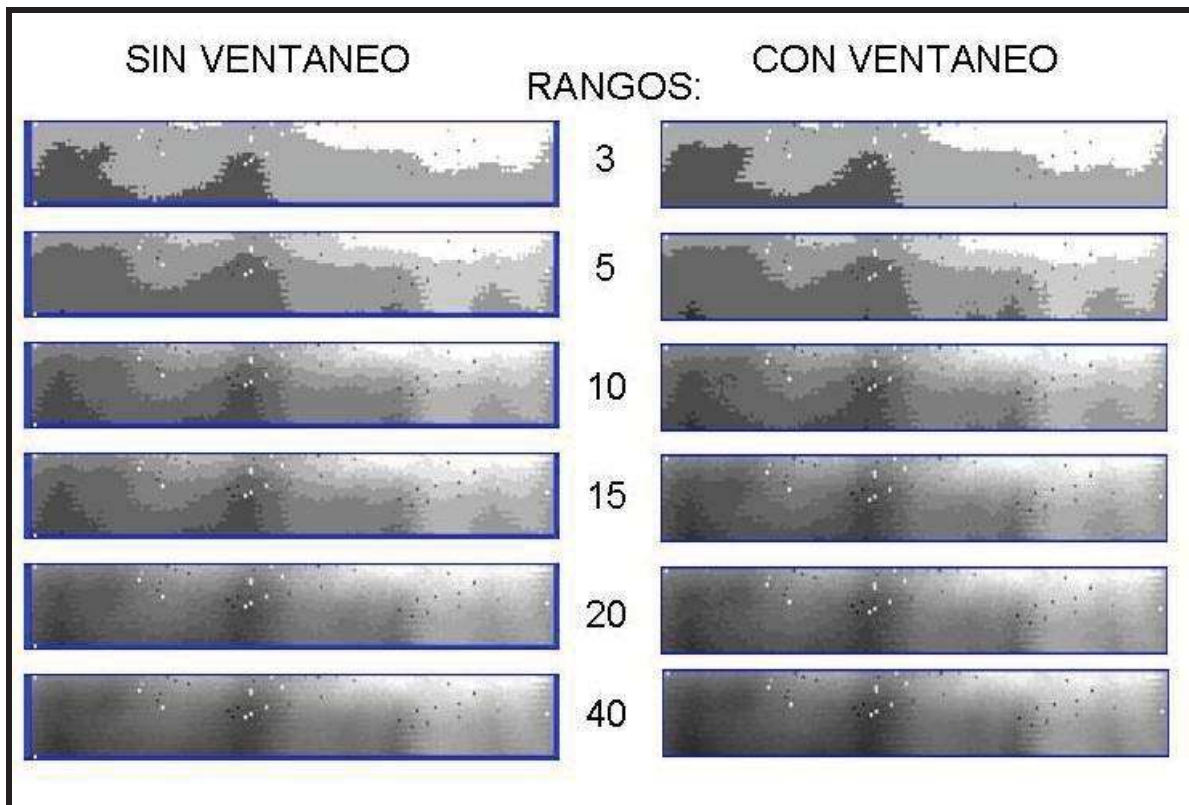


Figura 2.19. Diferentes Tratamientos a una Misma Imagen.

Capítulo III. Resultados y Discusión.

III.1. Velocidad Longitudinal y Atenuación.

Se obtuvieron las mediciones correspondientes a los parámetros determinados inicialmente; velocidad y atenuación ultrasónicas. Los valores de velocidad presentados consideran las correcciones por pérdidas de acuerdo al espesor de la muestra [5.] La atenuación se presenta como tal, no como coeficiente de atenuación, esto debido a que las magnitudes empleadas son más sensibles al corregir por las pérdidas correspondientes, resultando valores con menos contraste al formar gráficas e imágenes [8,13,18,27,29,].

III.2. Valores Estadísticamente Representativos.

De cada una de las ocho muestras se obtuvieron entre 4,142 y 6,904 puntos por inspección, lo que permitió obtener valores significativamente estadísticos [23,24,26,27,29,30], tanto de velocidad como de atenuación. Para los valores obtenidos de velocidad se tiene que varía desde 6,993.35 (para alúmina 0%, circonia 100%), hasta 10,816.65 m/s (alúmina 100%, circonia 0%), en orden creciente. Es importante señalar que a pesar del número de lecturas utilizadas, las medidas de tendencia y dispersión son estrechas, lo que se refleja en los coeficientes de variación obtenidos; en las muestras A30Z70, A70Z30, A85Z15, A95Z05 y A 100Z0, coeficiente de variación es de 0.01, para A0Z100 es de 0.05 y en A50Z50 es de 0.08.

Por lo que se refiere al análisis estadístico de los valores de atenuación se observa que tanto las medidas de tendencia central como las de dispersión son más amplias en comparación con las de velocidad, esto es porque la velocidad ultrasónica de un material está en función primordialmente de las constantes elásticas y la atenuación de su morfología. En la tabla III.2 se muestran los resultados estadísticos obtenidos. Los valores corresponden a atenuación (no es coeficiente de atenuación).

RESUMEN ESTADISTICO DE MEDICIONES DE VELOCIDAD										
DATO	MUESTRA									
	A0Z100	A10Z90	A30Z70	A50Z50	A70Z30	A85Z15	A95Z05	A100Z0		
Media	6993.35	7624.31	8346.25	8563.99	9446.99	10118.97	10654.76	10816.65		
Mediana	6953.97	7602.38	8337.07	8902.62	9431.98	10128.54	10649.52	10842.83		
Moda	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A		
Desviación estándar	358.07	151.10	124.90	666.74	124.91	121.43	89.84	114.05		
Varianza de la muestra	128216.98	22831.76	15598.84	444542.14	15603.35	14746.40	8071.27	13006.38		
Rango	5278.11	3833.11	4956.53	4286.73	3815.91	3405.45	2114.32	2215.04		
Mínimo	6005.58	6297.70	6318.55	6839.43	7369.46	7853.89	8763.84	8888.99		
Máximo	11283.68	10130.80	11275.09	11126.17	11185.37	11259.35	10878.16	11104.03		
Suma	48282064.86	35201453.90	39118887.09	35472056.00	41972980.62	45363359.95	48010342.11	48242240.73		
Cuenta	6904.00	4617.00	4687.00	4142.00	4443.00	4483.00	4506.00	4460.00		
Mayor (1)	11283.68	10130.80	11275.09	11126.17	11185.37	11259.35	10878.16	11104.03		
Menor(1)	6005.58	6297.70	6318.55	6839.43	7369.46	7853.89	8763.84	8888.99		
Nivel de confianza(95.0%)	8.45	4.36	3.58	20.31	3.67	3.56	2.62	3.35		
Cofeficiente de Variacion	0.05	0.02	0.01	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01		

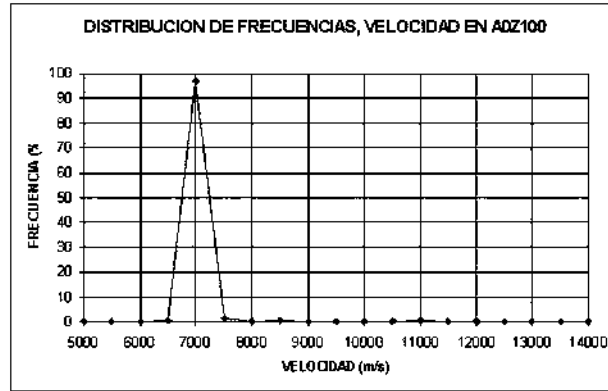
Tabla III.1. Mediciones de Velocidad.

DATO	RESUMEN ESTADISTICO DE MEDICIONES DE ATENUACION									
	MUESTRA									
	A0Z100	A10Z90	A30Z70	A60Z50	A70Z30	A85Z15	A95Z05	A100Z0		
Media	2.35	1.48	2.23	4.19	5.35	6.12	4.77	5.67		
Mediana	2.25	1.41	2.13	4.04	5.00	6.08	4.55	5.65		
Moda	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A		
Desviación estándar	0.78	0.62	0.65	0.98	1.76	1.25	1.36	1.37		
Varianza de la muestra	0.60	0.38	0.43	0.95	3.11	1.55	1.84	1.87		
Rango	9.53	8.82	9.06	9.36	9.31	9.04	9.48	8.98		
Mínimo	0.47	0.40	0.57	0.51	0.68	0.95	0.52	0.99		
Máximo	10.00	9.22	9.64	9.87	9.99	9.99	9.99	9.97		
Suma	16198.44	6829.56	10450.64	17340.00	23779.18	27426.94	21511.23	25303.93		
Cuenta	6904.00	4617.00	4687.00	4142.00	4443.00	4483.00	4506.00	4460.00		
Mayor (1)	10.00	9.22	9.64	9.87	9.99	9.99	9.99	9.97		
Menor(1)	0.47	0.40	0.57	0.51	0.68	0.95	0.52	0.99		
Nivel de confianza(95.0%)	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04		
Cofeciente de Variacion	0.33	0.42	0.29	0.23	0.33	0.20	0.28	0.24		

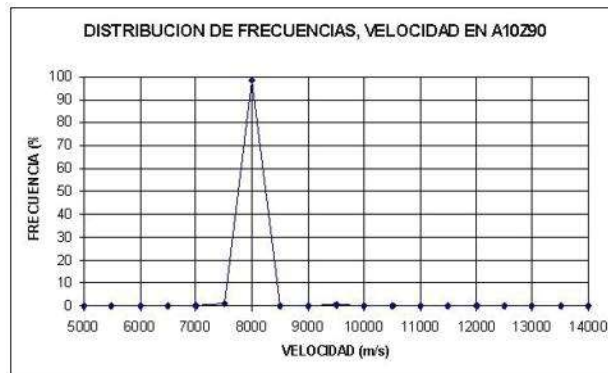
Tabla III.2. Mediciones de Atenuación

Se hizo un análisis de distribución de frecuencias de velocidad para cada una de las muestras (figura 3.3 a-h); se observa que se las curvas de Gauss son cerradas y gráficamente se perciben como un pico, los valores pico son mayores al 90% a excepción de la muestra A50Z50. En la muestra A50Z50 se presentan dos picos, el primero se encuentra en el rango 7,500 m/s con un 22.02% y el segundo en el rango 9,000 m/s con 72.65%, esto es debido a que existen variaciones considerables en las propiedades elásticas de la muestra, la variación de la morfología se observa también en la micrografía correspondiente (figura 3.8d). Por ser la composición 50% alúmina-50% circonia, se encuentra dentro de la clasificación de compósitos intermedios, que muestran una morfología de aglomerados bien sinterizados de partículas distribuidas de ambas fases; como no se presenta el dominio de una matriz de una fase sobre la otra se observan los dos picos correspondientes a las dos fases.

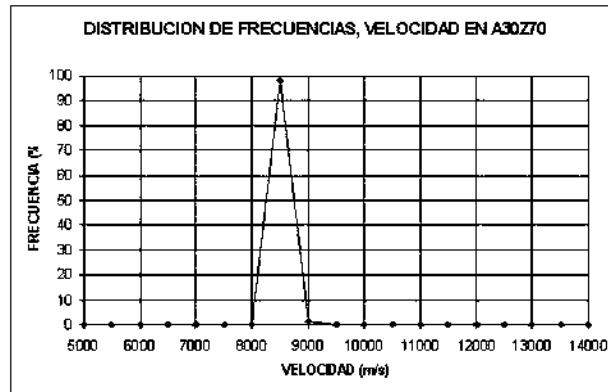
Con respecto a distribución de frecuencias se observan dos tendencias en las gráficas: la primera que el valor de la atenuación va aumentando conforme al contenido de alúmina respecto a la circonia, esto está asociado directamente a la morfología de las muestras al compararlas con las micrografías, se observa que el tamaño de grano aumenta con esa misma tendencia; y segundo, que la campana de Gauss se va abriendo con la misma tendencia, esto es que además de tener una mayor atenuación conforme aumenta la relación alúmina/circonia se tiene un rango más amplio de valores.



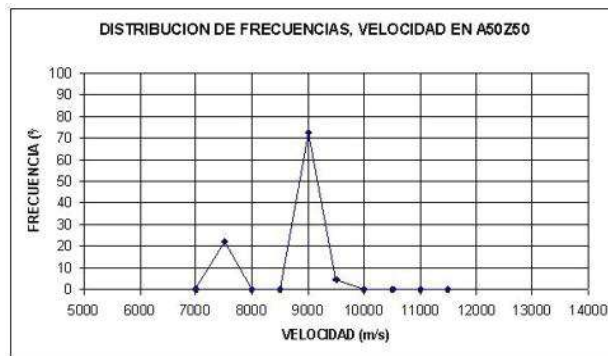
a)



b)

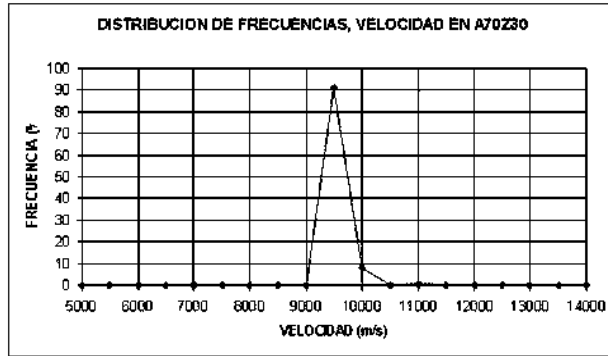


c)

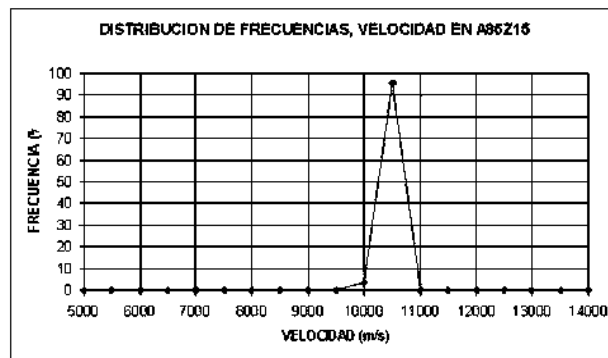


d)

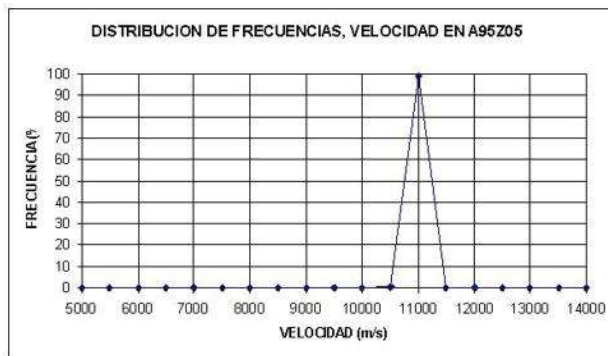
Figura 3.1(a-d). Distribución de Frecuencias para Velocidad.



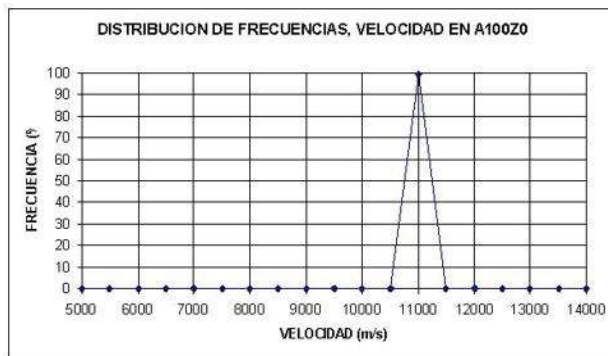
e)



f)

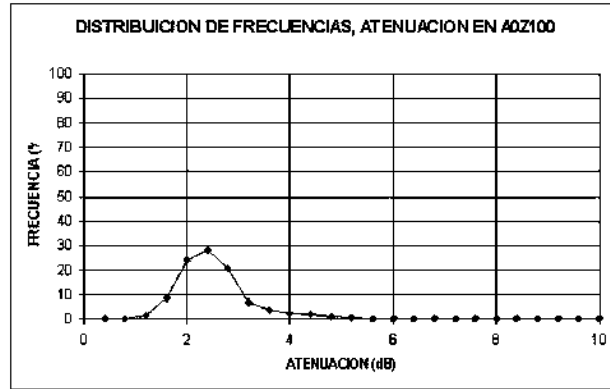


g)

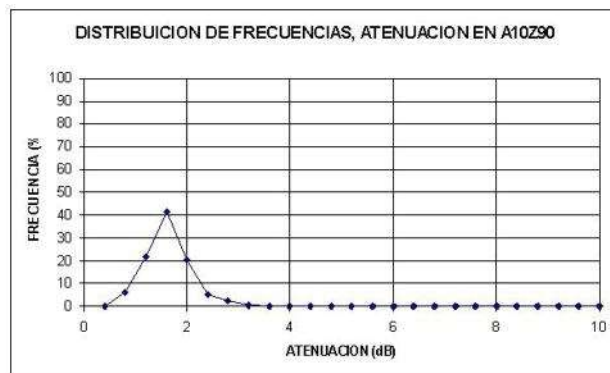


h)

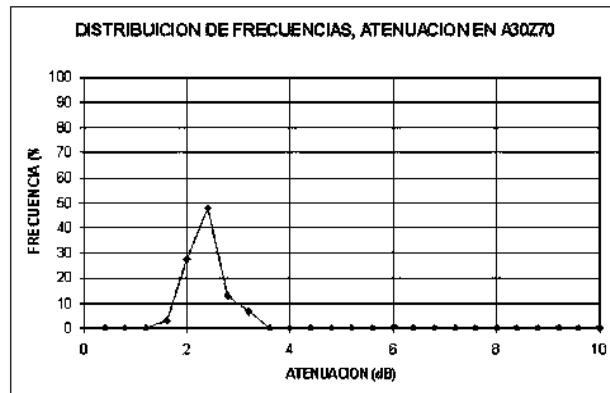
Figura 3.1(e-h). Distribución de Frecuencias para Velocidad.



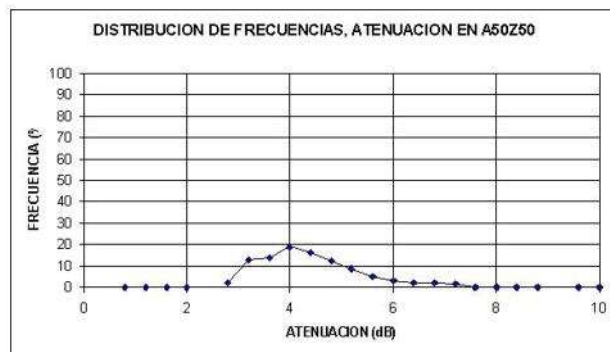
a)



b)

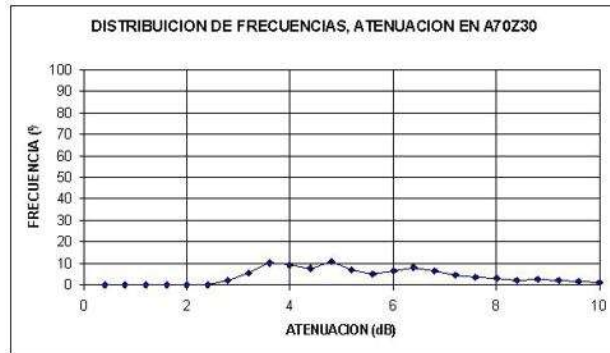


c)

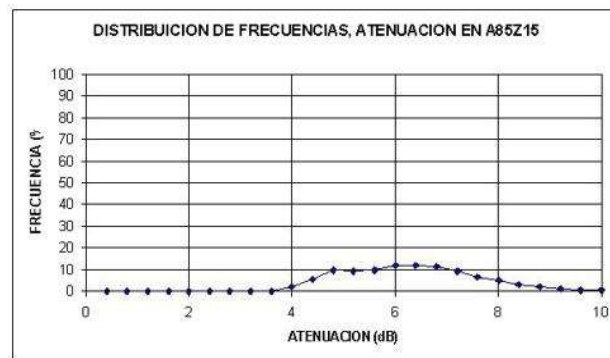


d)

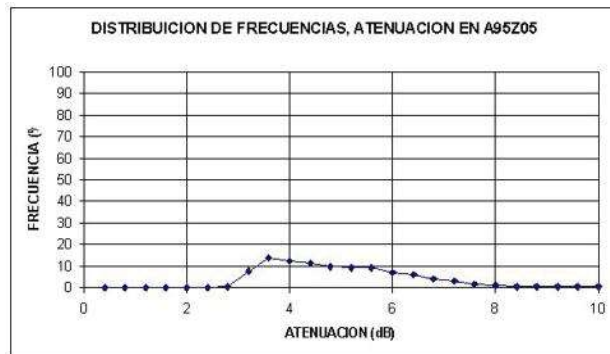
Figura 3.2(a-d). Distribución de Frecuencias para Atenuación.



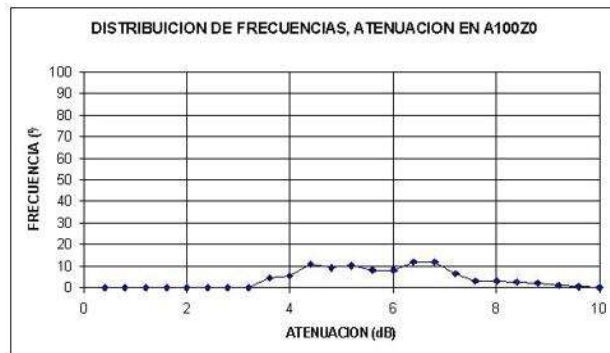
e)



f)



g)



h)

Figura 3.2(e-h). Distribución de Frecuencias para Atenuación.

Una vez obtenida la distribución de frecuencia, de velocidad y atenuación de cada muestra, se realizaron las tablas III.3 y III.4, en donde se comparan los valores de las distribuciones correspondientes. En la tabla III.3 se observa la tendencia al aumento de la velocidad longitudinal con relación a la relación alúmina/circonia, así como la reducción del ancho de la campana. En la tabla III.4 se observa igualmente el aumento de la atenuación con respecto a la relación alúmina/circonia, y un aumento en el ancho de la campana de distribución.

TABLA DE DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS PARA VELOCIDAD (%)									
		MUESTRA							
		A0Z100	A10Z90	A30Z70	A50Z50	A70Z30	A85Z15	A95Z05	A100Z0
VELOCIDAD (m/s)	5000	-	-	-	-	-	-	-	-
	5500	-	-	-	-	-	-	-	-
	6000	-	-	-	-	-	-	-	-
	6500	0.362	0.022	0.021	-	-	-	-	-
	7000	96.756	0.022	-	0.048	-	-	-	-
	7500	1.289	0.758	0.021	22.042	0.023	-	-	-
	8000	0.159	98.592	0.213	0.024	-	0.022	-	-
	8500	0.275	0.108	98.272	0.193	-	0.245	-	-
	9000	0.174	0.022	1.301	72.646	0.023	0.067	0.111	0.135
	9500	0.203	0.303	0.021	4.684	91.357	-	-	0.135
	10000	0.116	0.152	0.021	0.048	8.058	3.658	0.022	-
	10500	0.145	0.022	-	0.097	-	95.963	0.732	0.112
	11000	0.406	-	0.107	0.121	0.293	0.022	99.134	99.596
	11500	0.116	-	0.021	0.097	0.248	0.022	-	0.022
	12000	-	-	-	-	-	-	-	-
	12500	-	-	-	-	-	-	-	-
13000	-	-	-	-	-	-	-	-	
13500	-	-	-	-	-	-	-	-	
14000	-	-	-	-	-	-	-	-	
y mayor...	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla III.3. Distribución de Frecuencias para Velocidad.

TABLA DE DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS PARA ATENUACION (%)									
		MUESTRA							
		A0Z100	A10Z90	A30Z70	A50Z50	A70Z30	A85Z15	A95Z05	A100Z0
ATENUACION(Db)	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.8	0.101	6.151	0.021	0.072	0.023	-	0.022	-
	1.2	1.159	21.594	0.021	0.048	0.045	0.022	-	0.045
	1.6	8.517	41.759	3.072	0.024	0.045	0.022	0.067	0.022
	2	24.160	20.468	27.587	0.169	0.068	-	0.089	0.045
	2.4	28.259	5.480	47.920	-	0.180	-	0.111	0.067
	2.8	20.843	2.577	12.865	2.076	2.183	0.045	0.577	0.112
	3.2	6.735	0.563	6.486	12.651	5.514	0.022	7.856	0.202
	3.6	3.824	0.152	0.171	13.906	10.286	-	13.937	4.619
	4	2.477	0.195	0.149	19.266	9.048	1.874	12.162	5.583
	4.4	1.753	0.217	0.128	16.610	7.833	5.577	11.318	10.628
	4.8	0.941	0.195	0.171	12.603	10.646	9.569	9.765	9.081
	5.2	0.507	0.130	0.171	8.667	7.270	9.034	9.498	10.448
	5.6	0.203	0.130	0.171	5.118	4.929	9.793	9.410	8.072
	6	0.130	0.130	0.277	3.114	6.550	11.867	7.102	8.318
	6.4	0.043	0.087	0.128	1.980	8.080	12.112	6.170	11.726
	6.8	0.029	0.087	0.149	1.811	6.797	11.421	4.061	11.861
	7.2	0.116	-	0.085	1.521	4.479	9.525	3.129	6.502
	7.6	0.029	-	0.128	0.145	3.511	6.513	1.332	3.341
	8	0.029	-	0.043	0.097	2.971	4.930	0.866	3.206
	8.4	0.029	0.022	0.085	0.024	2.161	3.279	0.710	2.691
	8.8	0.043	0.022	0.021	0.024	2.566	2.253	0.688	1.816
9.2	0.014	0.022	0.107	-	2.183	1.115	0.422	1.099	
9.6	-	0.022	0.021	0.048	1.463	0.625	0.333	0.426	
10	0.058	-	0.021	0.024	1.170	0.402	0.377	0.090	
y mayor...	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla III.4. Distribución de Frecuencias para Atenuación.

III.3. Velocidad Cortante.

La velocidad cortante obtenida para cada una de las muestras se presenta en la tabla III.5

MUESTRA	VELOCIDAD CORTANTE (m/s)
A0Z100	3606.3
A10Z90	3985.1
A30Z70	4414.8
A50Z50	4856.1
A70Z30	5256.9
A85Z15	5721.3
A95Z05	6036.6
A100Z0	6183.1

Tabla III.5. Velocidades Cortantes Obtenidas.

En la figura 3.3 se muestra una gráfica con las velocidades longitudinal y cortante obtenidas, en relación al contenido de alúmina con respecto a la circonia. Se observa el aumento de magnitud en función al porcentaje del compósito y la relación aproximada 2:1 de velocidad longitudinal respecto a velocidad cortante.

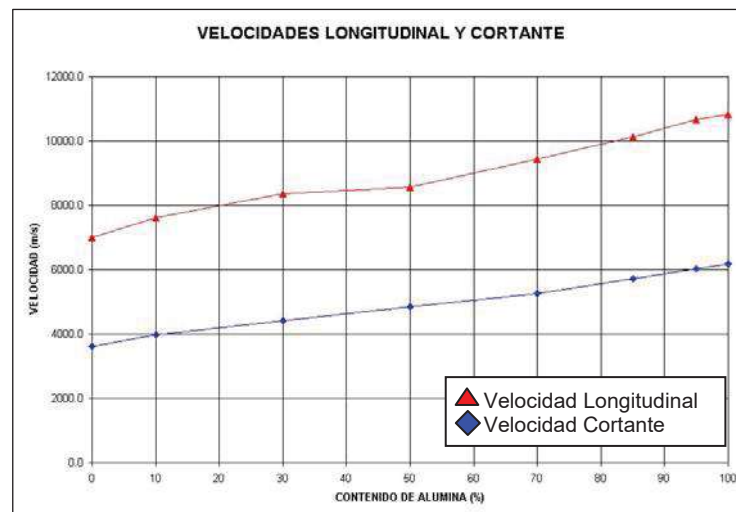


Figura 3.3. Gráfica Velocidad-Composición

III.4. Modelo de Velocidad-Composición.

En la figura 3.4 se muestra la gráfica del comportamiento de la velocidad longitudinal en relación a la proporción alúmina/circonia. Se grafica también la línea correspondiente al modelo matemático desarrollado. Se observa que el modelo se ajusta a la

forma de los datos experimentales.

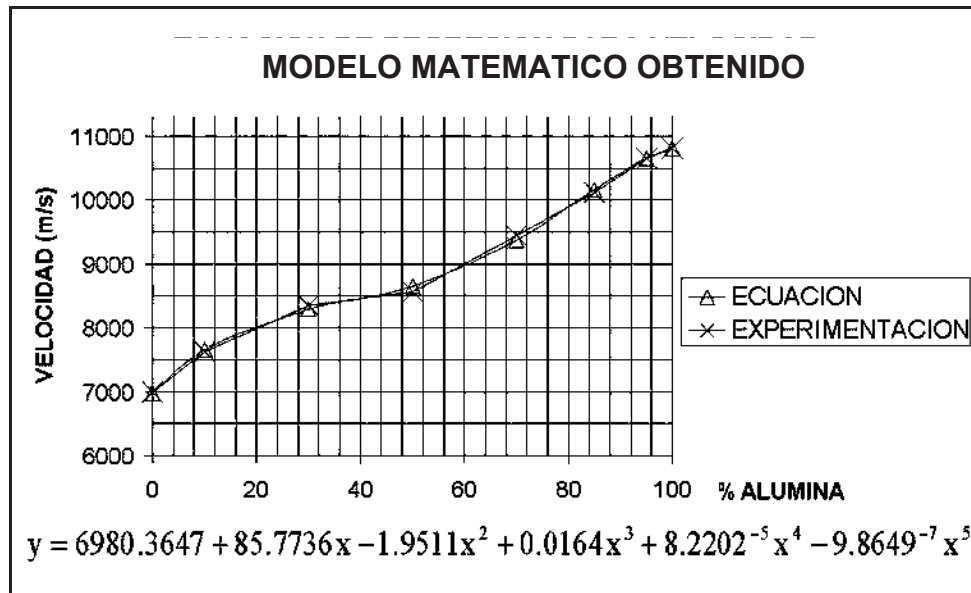


Figura 3.4. Modelo de Velocidad Ultrasónica en Función del Contenido de Alúmina.

III.5. Propiedades Elásticas.

Con respecto a las propiedades elásticas, relación de Poisson (ν) y módulo de elasticidad (E) se muestran en las dos últimas columnas de la tabla III.5.

MUESTRA	VELOCIDAD LONGITUDINAL (m/s)	VELOCIDAD CORTANTE (m/s)	ATENUACION (dB)	DENSIDAD (gr/cm ³)*	RELACION DE POISSON	MODULO DE ELASTICIDAD (GPa)
A0Z100	6993.3	3606.3	2.35	6.1000	0.319	209.3
A10Z90	7624.3	3985.1	1.48	5.7396	0.312	239.2
A30Z70	8346.3	4414.8	2.23	5.2204	0.306	265.7
A50Z50	8564.0	4856.1	4.19	4.7873	0.263	285.2
A70Z30	9447.0	5256.9	5.35	4.4206	0.276	311.7
A85Z15	10119.0	5721.3	6.12	4.1804	0.265	346.2
A95Z05	10654.8	6036.6	4.77	4.0343	0.264	371.5
A100Z0	10816.6	6183.1	5.67	3.9600	0.257	380.7

* Tomado de la referencia [2]

Tabla III.6. Resumen de Resultados.

III.6. Software Desarrollado.

Se implementó un sistema de inspección para realizar barridos en A-Scan y C-Scan, (muestrados en una línea y en un plano, respectivamente), con la técnica de inmersión, y el

método de eco-pulso. Los motores utilizados fueron reutilizados y el circuito de potencia para ellos mismos fue elaborado con componentes fáciles de conseguir y de bajo costo.

El software desarrollado presentó un buen comportamiento y estabilidad. El control de movimiento de motores se puede realizar con una precisión de 0.015 mm (15 micras), para este trabajo se utilizaron mediciones de 0.06 mm (60 micras). La adquisición de señales se obtuvo sobre el entorno y con aplicaciones del osciloscopio, y el control del mismo se realizó con un PC, lo que el fabricante del equipo menciona como “control remoto”. El análisis numérico, estadística, reconstrucción, filtrado y tratamiento de imágenes se realizó en una etapa posterior al barrido. La cantidad total de datos es aproximadamente 5GB. Los programas mostraron estabilidad y capacidad para manejar esta cantidad considerable de información.

La combinación de implementar herramientas de bajo costo y desarrollo de programas específicos, demuestra una alternativa para realizar pruebas experimentales así obtener resultados representativos, así como su implementación en la industria.

III.7. Imágenes Cuantitativas Obtenidas.

A continuación se muestran las imágenes cuantitativas de los 2 parámetros ultrasónicos analizados en este trabajo de investigación para el material compuesto alúmina-circonia con diferentes proporciones. Las figura 3.5 muestra la imagen filtrada obtenida del valor correspondiente a la velocidad y atenuación ultrasónica para cada una de las muestras analizadas después del tratamiento de filtrado y reconstrucción de las imágenes. Se puede observar contraste considerable de variación de tonalidad en las muestras, esto es de suma importancia debido a que en el área de los ensayos no destructivos y en particular en el campo de probabilidad de detección de defectos (POD) se ha visto que es de vital importancia distinguir entre los parámetros microestructurales del material, con los posibles defectos que se pueden encontrar en el mismo.

También se puede observar una variación gradual en el contraste de las imágenes de velocidad, esto se debe a que existe un cambio en la velocidad ultrasónica debido a la variación de las propiedades elásticas y densidad de cada una de las muestras analizadas. Por otro lado, en las imágenes de atenuación se puede observar de manera poco nítida, la influencia de la microestructura de las muestras analizadas sobre la imagen final, ya que la

atenuación ultrasónica esta directamente relacionada con la morfología microestructural y defectos cristalinos de los materiales, aquí cabe hacer mención que fue de gran ayuda para obtener este tipo de imágenes las técnicas de filtrado, tratamiento y reconstrucción utilizadas. Las imágenes mostradas y las gráficas estadísticas están formadas por los mismos valores, esto es que nos muestran los mismos parámetros, sólo que presentados en diferente forma. Las gráficas de distribución nos permiten apreciar las curvas de distribución, si tienden hacia un pico o se abre la campana, esto nos indica los valores representativos de una muestra, que es más evidente en las gráficas e imágenes de velocidad para las muestras en donde el contenido de circonia domina sobre el contenido de alúmina, para el caso de la composición 50%-50%, se observan dos campanas en la gráfica de distribución de frecuencias de velocidad, lo que también está representado en su correspondiente imagen, mostrando dos zonas dominantes bien definidas con relación a la zona de barrido en la muestra. Las imágenes de atenuación presentan en general mayores contrastes, tanto al comparar una muestra con otra y todas en conjunto, como en diferentes zonas del área inspeccionada de una muestra.

Los datos estadísticos descriptivos, las gráficas y las imágenes, se complementan entre sí para tener una mejor percepción de las propiedades elásticas del compuesto, en las diferentes proporciones analizadas.

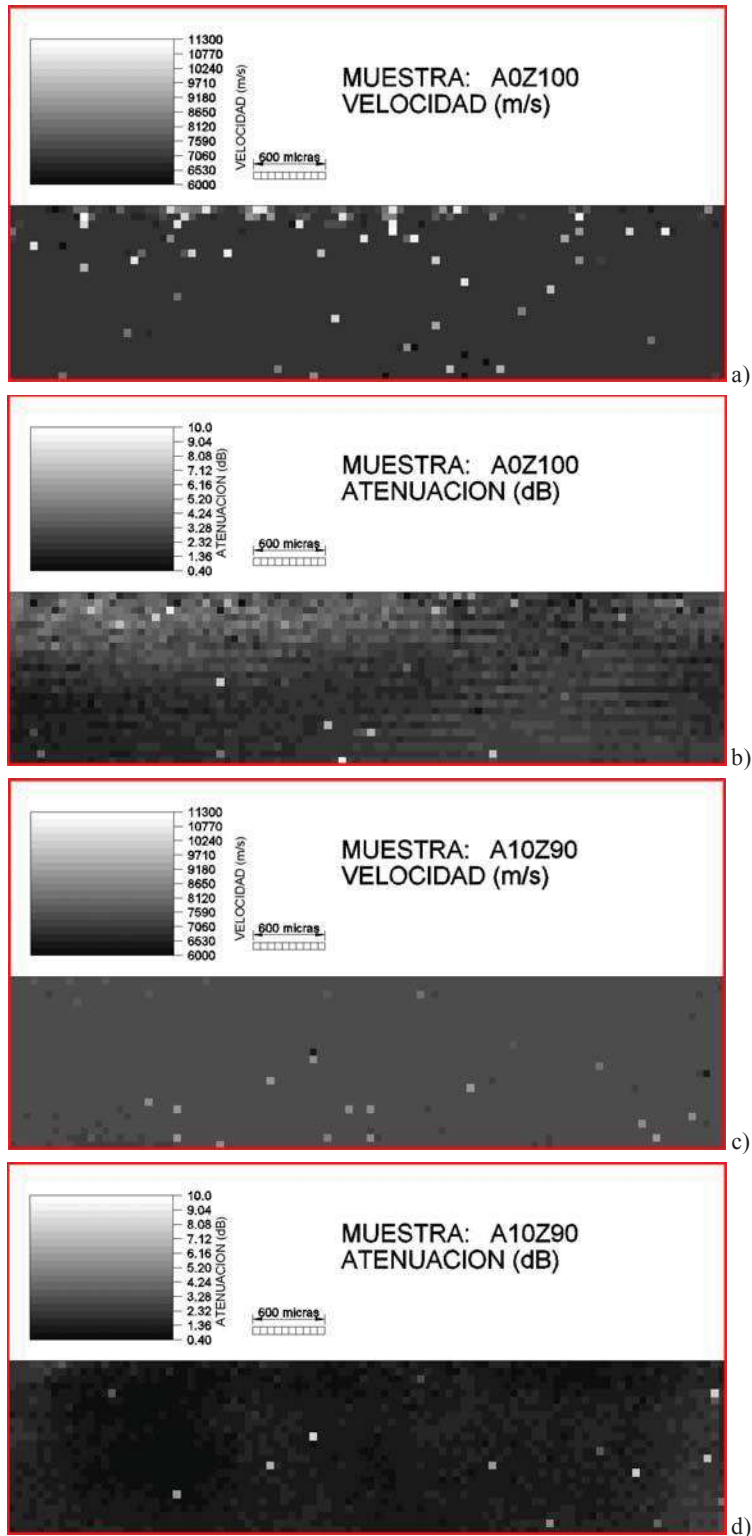


Figura 3.5.(a-d). Imágenes Reconstruidas (continúa).

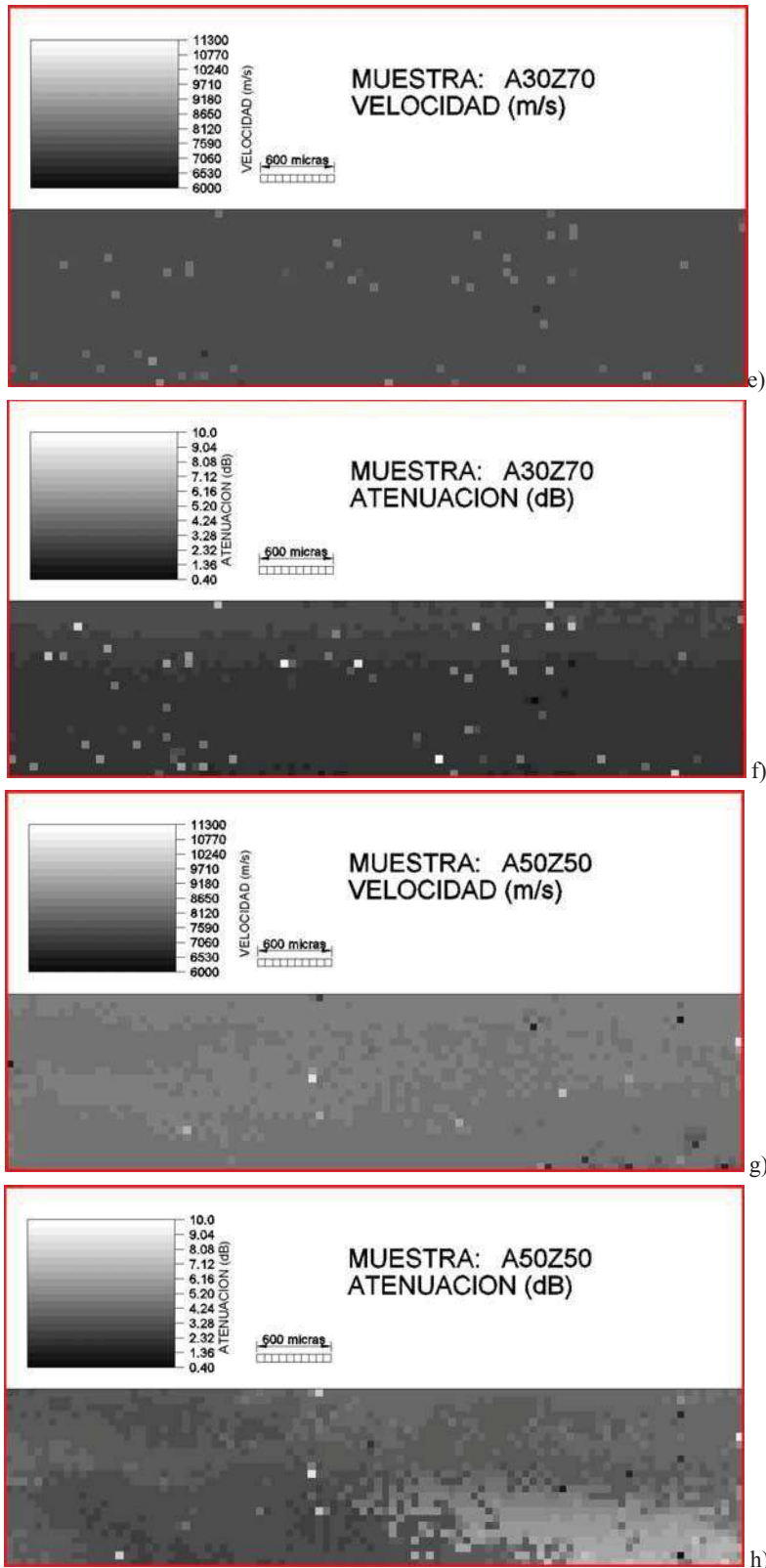


Figura 3.5.(e-h). Imágenes Reconstruidas (continuación).

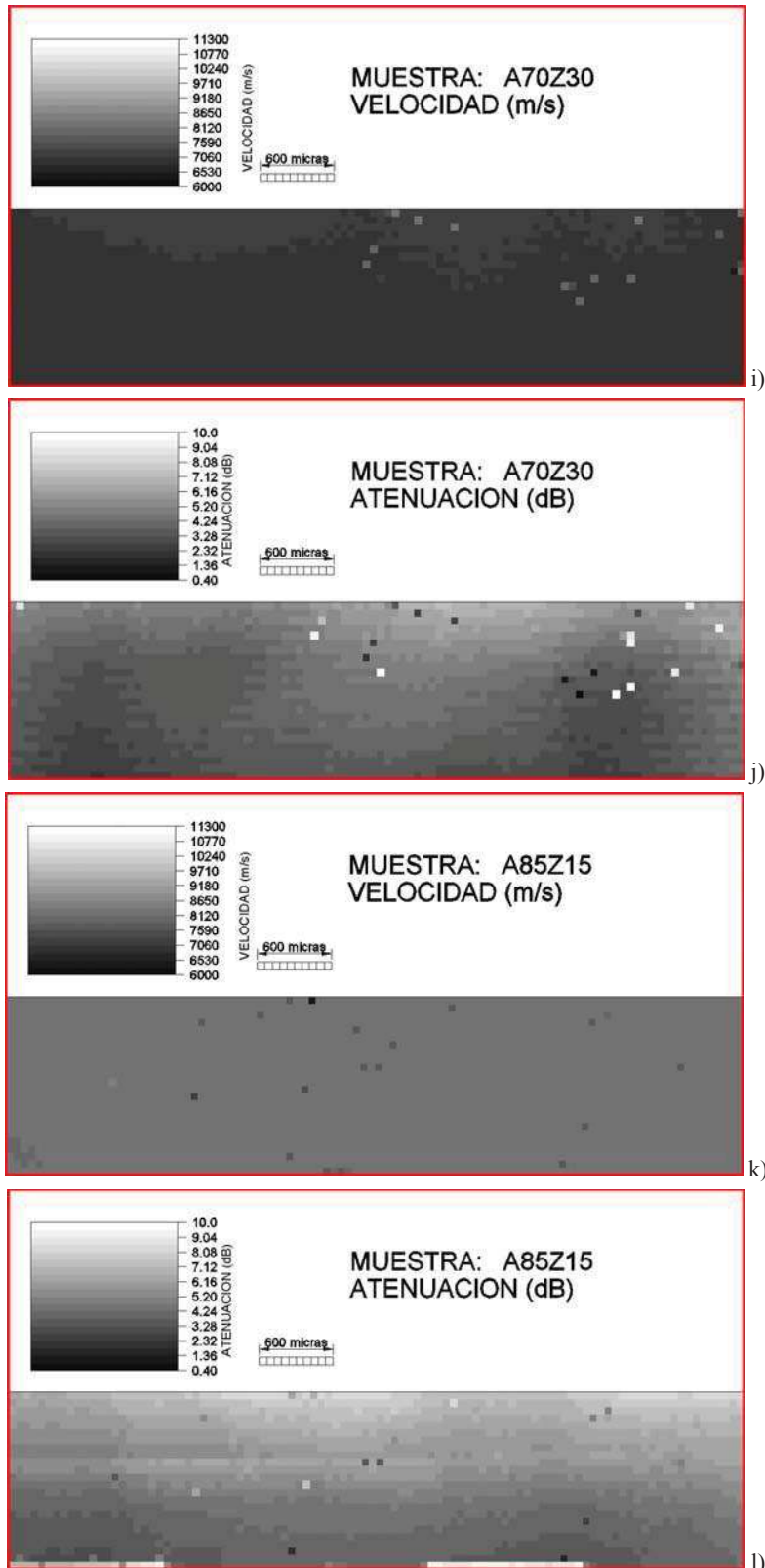


Figura 3.5.(i-l). Imágenes Reconstruidas (continuación).

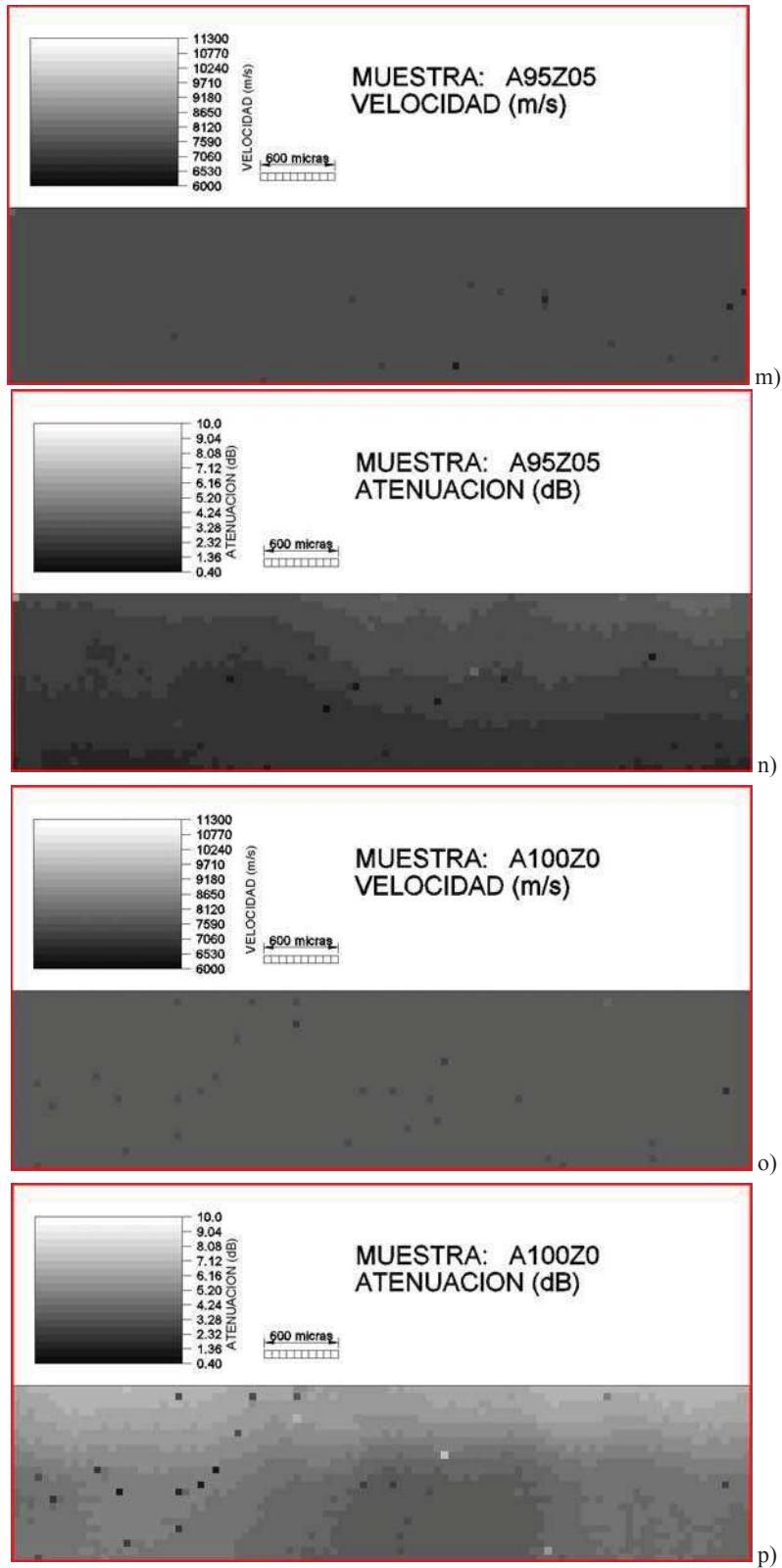


Figura 3.5.(m-p). Imágenes Reconstruidas.

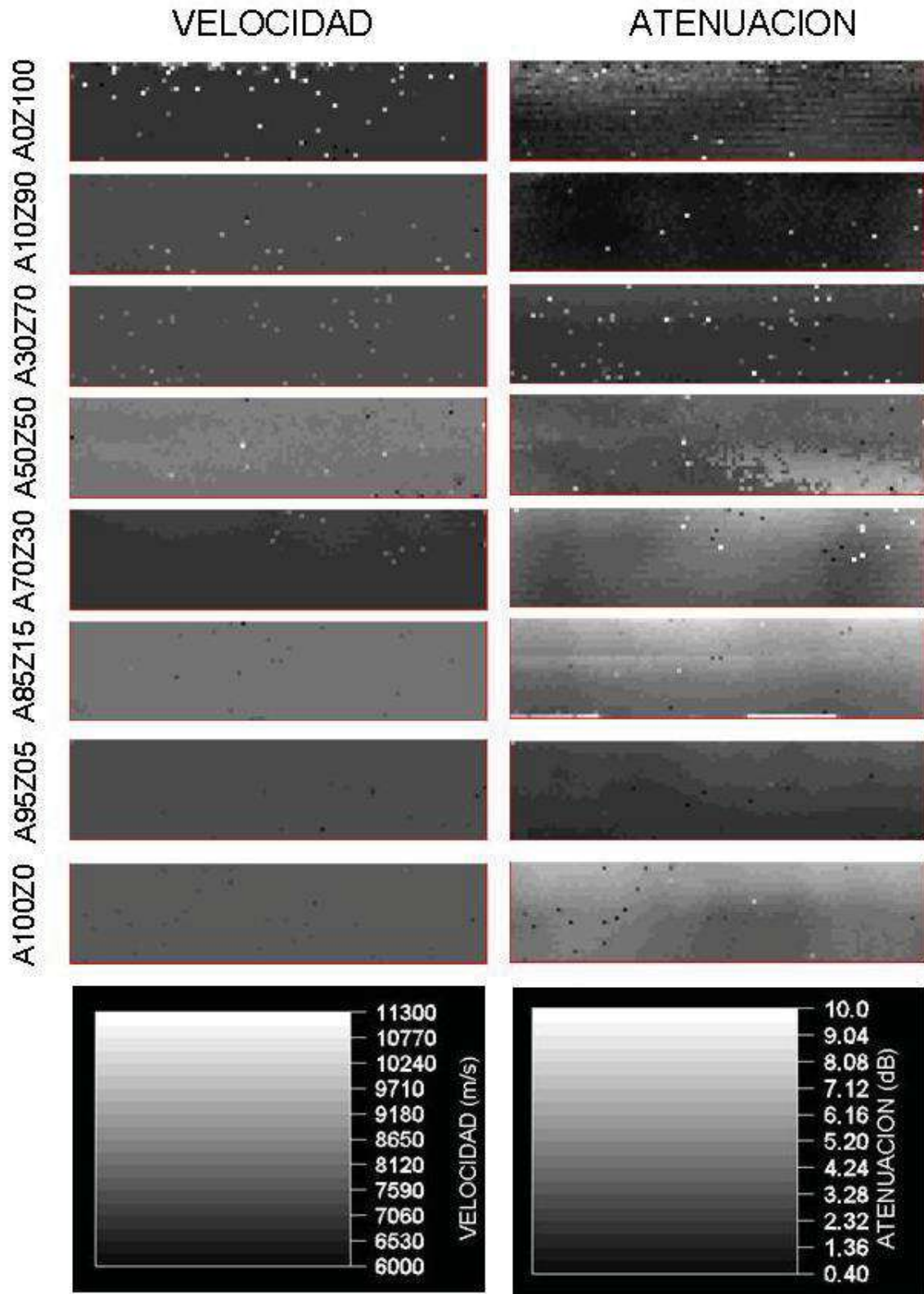


Figura 3.6. Imágenes de Velocidad y Atenuación

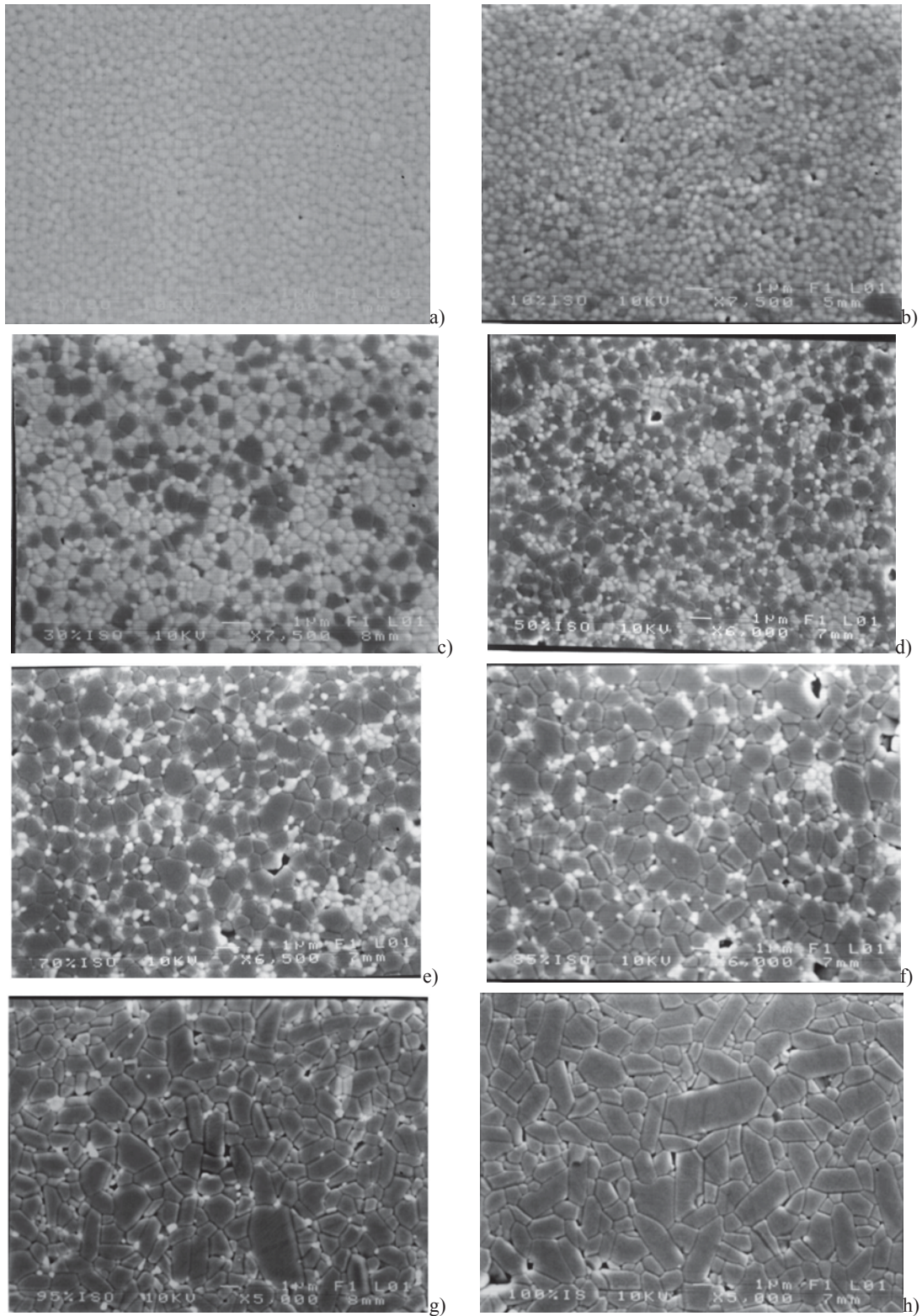


Figura 3.7. Micrografías de las Muestras.

a)A0Z100, b)A10Z90, c)A30Z70, d)A50Z50, e)A70Z30, f)A85Z15, g)A95Z05, h)A100Z0.

Capítulo IV. Conclusiones.

Los resultados obtenidos muestran que la variación de las propiedades elásticas están asociadas directamente a la velocidad ultrasónica.

Se pueden obtener los valores de las propiedades elásticas por medio de la evaluación no destructiva, partiendo de conocer la densidad, velocidad y atenuación ultrasónica del compuesto estudiado, en sus diversas proporciones.

Se puede determinar el porcentaje que conforma un compuesto Alúmina-Circonia en cualquier proporción de una manera estadísticamente confiable a partir del modelo obtenido.

Las imágenes de atenuación ultrasónica asociadas a las micrografías, confirman que este parámetro se ve afectado principalmente por la morfología del material y que las propiedades elásticas afectan en proporción menor a estas variaciones.

Las imágenes cuantitativas generadas así como los valores de los parámetros ultrasónicos de velocidad y atenuación se obtienen básicamente de un rango de la señal que se adquiere del osciloscopio. Esta señal contiene datos que se deben analizar cuidadosamente para poder encontrar valores de nuestro interés. La capacidad de adquisición y almacenaje de señales de los equipos disponibles, así como la automatización de los mismos incrementa de manera significativa la información disponible en comparación con hacerlo de manera manual. Esta acumulación de información puede llegar a ser hasta inservible si no es posible manejarla y tratarla adecuadamente. Para obtener los datos de interés basados en medidas estadísticamente significativas en un tiempo razonable es de ayuda imprescindible apoyarse en métodos de programación y análisis numérico.

Bibliografía.

- [1.] H. Carreon, A. Ruiz. and Barrera G., Ultrasonic Velocity Measurements in Alumina-Circonia Ceramic Composite System. 16th World Congress of Non Destructive Testing. August 2004.
- [2.] Zárate Medina Juan. Procesamiento Selectivo del Compósito ZrO_2 -3% Y_2O_3/Al_2O_3 y su Caracterización. Tesis Doctoral Facultad de Química U.N.A.M. Julio 2002.
- [3.] W. W. Seto. Vibraciones Mecánicas. Mc Graw Hill.
- [4.] R. K. Nagle y E. B. Saff. Ecuaciones Diferenciales. Addison Wesley Longman. 1992.
- [5.] Peter B. Nagy. Course Notes, Ultrasonics. University of Cincinnati. 2001. www.uc.edu.
- [6.] S. Ahmed, R.B. Thompson and P.D. Panetta. Ultrasonic Attenuation as Influenced by Elongated Grains. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation Vol 22. 2003.
- [7.] Badidi Bouda, S. Lebaili and A. Benchaala. Grain Size Influence on Ultrasonic Velocities and Attenuation. NDT&E International. June 2002.
- [8.] MCEN. Measurement of Elastic Constants Using Ultrasound. MCEN 3027. 2001.
- [9.] S. Ahmed, B. J. Trucker and P.D. Panetta. Characterization of Solid Liquid Suspensions Utilizing Ultrasonic Measurements. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 2002.
- [10.] Lecroy. Wavemaster Serial Data Analyzer. July 2003.
- [11.] Lecroy. X-Stream Oscilloscopes Remote Control Manual. May 2004.
- [12.] Dong Fei, David k. Hsu and Mark Warchol. Simultaneous Velocity, Thickness and Profile Imaging by Ultrasonic Scan. Journal of Nondestructive Evaluation. Vol. 20, No 3, September 2001.
- [13.] M. S. C. Chan, L. Upda and S. S. Upda. Design of an NDE Integrated Data Acquisition System (NIDAS). Review of Progress in QNDE 2002.
- [14.] SGS-Thompson. Datasheet L293C. April 1993.

- [15.] Senet. Interfacing the Serial /RS-232 Port. August 2004.
- [16.] Microchip. Datasheet PIC12C67X. 1999.
- [17.] National Semiconductor. Datasheet LM35. November 2000.
- [18.] National Semiconductor. Datasheet ADC08031. June 2000.
- [19.] Fairchild Semiconductor. Datasheet DM74LS245. March 2000.
- [20.] Dallas Semiconductor. Datasheet DS1307. April 2004.
- [21.] M. BirnosVB. Visual Basic.Net. MP Ediciones. 2002.
- [22.] G. Perry. Visual Basic. Prentice Hall. 1999.
- [23.] P. Afonso Lopes. Probabilidad y Estadística. Prentice Hall. 1ª ed 2000.
- [24.] Walpole, Myers y Myers. Probabilidad y Estadística. Prentice Hall. 6ª ed 1999.
- [25.] R. Castillo y R. Gonzáles. Ecuaciones Diferenciales. Trillas. 1990.
- [26.] A. Nieves y F. C. Domínguez. Métodos Numéricos Aplicados a la Ingeniería. CECSA.1998.
- [27.] F. J. Jaufred, A. Moreno y J. J. Acosta. Métodos de Optimización. Representaciones y Servicios de Ingeniería.
- [28.] J. Sutphin. Autocad 2004 VBA. Press. 2004.
- [29.] G. W. Johnson y R. Jennings. LabView Graphical Programming. Mc Graw Hill 3ª ed 2001.
- [30.] A. Li, R. Roberts, P. Haldipur, F.J. Margetan and R. B. Thompson. Computational Study of Grain Scattering Effects in Ultrasonics Measurements. Review of Progress in QNDE 2002.
- [31.] Zarate J., Juarez H., Contreras M.E., Tartaj J. and Balmori H., Influence of α -Alumina Seeding on the Sinterability of Sol-Gel Derived Circonia-Alumina Composite. ATM, Vol.3 (2001) pp. 19-26.
- [32.] Gerd-Rudiger Tillack, Ulazimir Samadurau1, Valentin Artemiev, and Alexander Naumov Statistical Characterization of Multi-Phase Flow by Dynamic Tomography. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. July 2002.
- [33.] L. Yang and J. A. Turner. Ultrasonic Detetction of Damage in Heterogeneous Media. Review of Progress in QNDE 2002.
- [34.] E. L. Roetman. Waves in Anisotropic Elastic Media. Review of Progress in

QNDE 2002.

- [35.] M. Kitahara and T. Takahashi. Calculation and Measurement of Ultrasonic Attenuation for Distributed Cracks in a Solid. Review of Progress in QNDE 2002.
- [36.] P. D. Panetta, B. J. Tucker, R. A. Pappas and S. Ahmed. Characterization of Solution Annealing Behavior in Titanium Alloys by Ultrasonic Velocity Measurements. Review of Progress in QNDE 2002.
- [37.] Microchip. Datasheet 24AA256. 1998.
- [38.] Jeffrey Travis. LabView For Everyone. Prentice Hall. 2a ed 2002.
- [39.] P. Palanichamy, M. Vasudevan, T. Jayakumar, S. Venugopal and B. Raj. Ultrasonic Velocity Measurements for Characterizing the Annealing Behavior of Cold Worked Austenitic Stainless Steel. NDT&E International. August 1999.
- [40.] D. B. Stang, I. A. Salem and E. R. Generazio. Ultrasonic Imaging of Textured Alumina. NDT&E International. December 1990.
- [41.] Stanislav I., Rokhlin and T. E. Makitas. Ultrasonic Characterization of Surfaces and Interphases. MRS Bulletin. October 1996.
- [42.] A. Badidi Bouda, A. Benchaala and K. Alem. Ultrasonic Characterization of Materials Hardness. Note 38(2000)224-227 Elsevier.
- [43.] Y. D. Huang, L. Froyen and M. Wevers. Quality Control and Nondestructive Tests in Metal Matrix. Journal of Nondestructive Evaluation. September 2001.
- [44.] K. S. Tan and P. Hing. On the Elastic Modulus of Alumina-Circonia Composite Using Ultrasonic Through Transmission. WCNDT 1996.
- [45.] Ph. Dumas, J. Poguet and G. Fleury. New Piezocomposite Transducers for Improvement of Ultrasonic Inspections. Review of Progress in QNDE 2003.

Apéndice 1. Código Empleado.

A continuación se muestra el código de la aplicación. El objeto principal es mostrar la forma en que se realiza cada paso del programa y que además sea entendible para alguien que no esté familiarizado con las secuencias de los motores y/o las órdenes del osciloscopio, incluso que sea entendible por alguien que no sea programador.

```

Dim i, j, k, L, m, n           'SE DECLARAN ESTAS VARIABLES PARA USARLAS COMO ENTEROS
Dim Espera                    'ES LA CUENTA QUE SE HACE PARA CREAR 0.0025 SEGUNDOS DE ESPERA
Dim NumLecturasX              'NUMERO DE LECTURAS EN SENTIDO "x"
Dim NumLecturasY              'NUMERO DE LECTURAS EN SENTIDO "x"
Dim Distancia                  'DISTANCIA ENTRE CADA LECTURA EN MICRÓMETROS
Dim PasoActual As Integer     'INDICA EN EL PASO EN QUE SE ENCUENTRA EL BARRIDO

Private Sub cmdEscaneo_Click() 'ES EL BOTON DE INICIO DEL BARRIDO
NumLecturasX = Val(Combo1.Text) 'CONVIERTE EL TEXTO DEL CUADRO COMBINADO EN VALOR
NumLecturasY = Val(Combo3.Text) 'CONVIERTE EL TEXTO DEL CUADRO COMBINADO EN VALOR
Distancia = Val(Combo2.Text)    'CONVIERTE EL TEXTO DEL CUADRO COMBINADO EN VALOR
Espera = Val(Text1.Text)        'CONVIERTE EL TEXTO DEL CUADRO EN VALOR

Dim PosX As Double              'DECLARA LA VARIABLE COMO VALOR DE DOBLE PRECISION
Dim PosY As Double              'DECLARA LA VARIABLE COMO VALOR DE DOBLE PRECISION
Dim Pre                          'DECLARA LA VARIABLE Pre PARA UTILIZARLA POSTERIORMENTE
Dim Pos As Integer              'DECLARA LA VARIABLE COMO VALOR ENTERO
Dim Estado As Boolean           'DECLARA LA VARIABLE COMO VALOR BOOLEANO

PosX = 0                        'INICIA EL BARRIDO EN POSICION 0,0
PosY = 0

Pre = 100000                    'NUMERO DE CEROS ESCRITOS QUE VA A LLEVAR EL NOMBRE DEL ARCHIVO
Pos = 5                          'NUMERO DE CEROS QUE TIENE PRES

A = A + Pre                      'ESTA PARTE SE UTILIZA
B = B + Pre                      'PARA PODER TENER UNA CADENA DE TEXTO
                                'QUE INICIE CON CEROS, Y MANTENGA EL MISMO NUMERO DE CARACTERES
A = Right(A, Pos)                'POR EJEMPLO
B = Right(B, Pos)                ' 00010

Set o = CreateObject("LeCroy.ActiveDSOctrl.1") 'ESTABLECE AL OSCILOSCOPIO COMO UN OBJETO
                                'Y PODER TRATARLO COMO TAL
Call o.MakeConnection("IP: 175.25.1.7")      'HACE CONEXION CON EL OSCILOSCOPIO A TRAVES DEL IP 175.25.1.7

'EL PRIMER CASO DEL IF ES PARA QUE SE TOME UNA LECTURA
'POR CADA CICLO DE PASOS DEL MOTOR
If Distancia = 15 Then

    lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf 'LA LISTA SE REFIERE A LA LISTA CON
                                                'LAS COORDENADAS DEL BARRIDO
    Call o.writestring("**TRG", True)           'ESTA ES LA INSTRUCCION PARA QUE EL OSCILOSCOPIO
                                                'ALMACENE LA SEÑAL ACTUAL
    PasoActual = 160                            'EL NUMERO 160 DECIMAL EQUIVALE AL 10100000 BINARIO
    For L = 1 To NumLecturasY
        For j = 1 To NumLecturasX
            Outport 888, 10 + PasoActual        'EL NUMERO 10 DECIMAL EQUIVALE AL 00001010 BINARIO
                                                'AL SUMAR 160 + 10 = 170 DECIMAL SE OBTIENE LA POSICION 10101010
                                                'QUE ES EL EQUIVALENTE AL PASO 4 EN FULL STEP (VER FIGURA 2.4)
            For i = 1 To Espera                  'AL CONTAR DESDE 1 HAST Espera SE LOGRA UN LAPSO DE 0.0025 SEGUNDOS
                Next i
            Call o.writestring("**TRG", True)     'SE ALMACENA LA SEÑAL
            For i = 1 To Espera
                Next i
        Next j
    Next L

```

```

X = X + Distancia      'LA POSICION X AUMENTA EN X+DISTANCIA ESTABLECIDA
A = X                  'EL VALOR "A" SE IGUALA CON EL VALOR NUMERICO X
B = Y                  'EL VALOR "B" SE IGUALA CON EL VALOR NUMERICO Y
A = A + Pre            'A 100000 SE SUMA EL VALOR X
B = B + Pre            'A 100000 SE SUMA EL VALOR Y
A = Right(A, Pos)     'AL VALOR DE "A" SE LE QUITAN LOS CARACTERES QUE ESTÉN FUERA DE
B = Right(B, Pos)     'LOS 5 CARACTERES DE LA DERECHA, ASI SE LOGRA UNA CADENA DE TEXTO
                        'QUE EMPIECE CON CEROS
                        'LO MISMO PARA "B"

lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf
                        'AL VALOR LISTA SE LE AUMENTAN LAS NUEVAS COORDENADAS Y SE
                        'BRINCA UN RENGLON

j = j + 1              'SE SIGUE LA CUENTA HASTA TERMINAR LOS CICLOS
  Outport 888, 9 + PasoActual  'EL PUERTO 888 ES EL PUERO PARALELO, 9+160=169 DECIMAL
                              'EQUIVALE A 10101001 EN BINARIO,
                              'ESTO ES EL PASO 3 EN FULL STEP, SIGUIENDO LA SECUENCIA
                              'SE OBSERVA QUE ESTA EN SENTIDO HORARIO
  For i = 1 To Espera      'SE CREA UN LAPSO DE 0.0025 SEGUNDOS ANTES DE CONTINUAR
  Next i
  Call o.writestring("**TRG", True)
  For i = 1 To Espera
  Next i

X = X + Distancia
A = X
B = Y
A = A + Pre
B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf

j = j + 1
  Outport 888, 5 + PasoActual  '5+160=165 DECIMAL EQUIVALE A 10100101 BINARIO, PASO 2
  For i = 1 To Espera
  Next i
  Call o.writestring("**TRG", True)
  For i = 1 To Espera
  Next i

X = X + Distancia
A = X
B = Y
A = A + Pre
B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf

j = j + 1
  Outport 888, 6 + PasoActual  '6+160=166 DECIMAL EQUIVALE A 10100110 BINARIO, PASO 1
  For i = 1 To Espera
  Next i
  Outport 888, 10 + PasoActual  'SE REGRESA A LA POSICION 4, 10101010 PARA INICIAR Y TERMINAR
                              'TODOS LOS CICLOS EN ESTA POSICION Y EVITAR PASOS INTERMEDIOS

Call o.writestring("**TRG", True)
  For i = 1 To Espera
  Next i

X = X + Distancia
A = X
B = Y
A = A + Pre
B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf

```

```

Next j

k = L / 4 - Int(L / 4)      'SE UTILIZAN MULTIPLOS DE 4, PORQUE SE TIENEN MOTORES DE
                            '4 POSICIONES, AQUI SE OBTIENE LA POSICION DEL MOTOR QUE
                            'CONTROLA EL MOVIENTO EN "y"

If k = 0.25 Then
  Outport 888, 144 + 10
  PasoActual = 144
  For i = 1 To Espera * 10
  Next i

Elseif k = 0.5 Then
  Outport 888, 80 + 10
  PasoActual = 80
  For i = 1 To Espera * 10
  Next i

Elseif k = 0.75 Then
  Outport 888, 96 + 10
  PasoActual = 96
  For i = 1 To Espera * 10
  Next i

Elseif k = 0 Then
  Outport 888, 160 + 10
  PasoActual = 160
  For i = 1 To Espera * 10
  Next i

Else
  MsgBox ("Algo anda mal")      'MENSAJE DE ERROR EN CASO DE QUE SE TENGA ALGUN PARAMETRO
                                'MAL DEFINIDO EN LA CUENTA DE LA POSICION "y"

End If
L = L + 1

Call o.writestring("**TRG", True)
For i = 1 To Espera
Next i
Y = Y + Distancia
A = X
B = Y
A = A + Pre
B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf

For j = 1 To NumLecturasX
  Outport 888, 10 + PasoActual  'SE INICIA EL MOVIENTO EN "x" PERO EN SENTIDO CONTRARIO
  For i = 1 To Espera
  Next i
Call o.writestring("**TRG", True)
  For i = 1 To Espera
  Next i
X = X - Distancia
A = X
B = Y
A = A + Pre
B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf
j = j + 1
  Outport 888, 6 + PasoActual
  For i = 1 To Espera
  Next i

```

```

Call o.writestring("**TRG", True)
  For i = 1 To Espera
    Next i

X = X - Distancia      'COMO SE VA DE REGRESO EN POSICION "x" SE DESCUENTA EL VALOR DE
A = X                  'LA DISTANCIA
B = Y
A = A + Pre
B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf
j = j + 1
  Outport 888, 5 + PasoActual
  For i = 1 To Espera
    Next i
Call o.writestring("**TRG", True)
  For i = 1 To Espera
    Next i
X = X - Distancia
A = X
B = Y
A = A + Pre
B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf
j = j + 1
  Outport 888, 9 + PasoActual
  For i = 1 To Espera
    Next i
  Outport 888, 10 + PasoActual
Call o.writestring("**TRG", True)
  For i = 1 To Espera
    Next i
X = X - Distancia
A = X
B = Y
A = A + Pre
B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf

Next j

k = L / 4 - Int(L / 4)

If k = 0.25 Then
  Outport 888, 144 + 10
  PasoActual = 144
  For i = 1 To Espera * 10
    Next i

Elseif k = 0.5 Then
  Outport 888, 80 + 10
  PasoActual = 80
  For i = 1 To Espera * 10
    Next i

Elseif k = 0.75 Then
  Outport 888, 96 + 10
  PasoActual = 96
  For i = 1 To Espera * 10
    Next i

Elseif k = 0 Then
  Outport 888, 160 + 10
  PasoActual = 160

```

```

    For i = 1 To Espera * 10
    Next i

Else
    MsgBox ("Algo anda mal")
End If

Call o.writestring("**TRG", True)
For i = 1 To Espera
Next i
Y = Y + Distancia
A = X
B = Y
A = A + Pre
B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf

Next L
'
'EL SEGUNDO CASO ES PARA TOMAR LECTURAS POR CADA DOS
'CICLOS DE MOTOR

Elseif Distancia = 30 Then
    lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf
    Call o.writestring("**TRG", True)
    PasoActual = 160
    For L = 1 To NumLecturasY
    For j = 1 To NumLecturasX

        Outputport 888, 10 + PasoActual
        For i = 1 To Espera
        Next i
        Outputport 888, 9 + PasoActual
        For i = 1 To Espera
        Next i
        Call o.writestring("**TRG", True)
        For i = 1 To Espera
        Next i
        X = X + Distancia
        A = X
        B = Y
        A = A + Pre
        B = B + Pre
        A = Right(A, Pos)
        B = Right(B, Pos)
        lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf

        j = j + 1

        Outputport 888, 5 + PasoActual
        For i = 1 To Espera
        Next i
        Outputport 888, 6 + PasoActual
        For i = 1 To Espera
        Next i
        Outputport 888, 10 + PasoActual

        Call o.writestring("**TRG", True)
        For i = 1 To Espera
        Next i
        X = X + Distancia
        A = X
        B = Y
        A = A + Pre
        B = B + Pre
        A = Right(A, Pos)
        B = Right(B, Pos)

```

```

    lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf
Next j

k = L / 4 - Int(L / 4)

If k = 0.25 Then
    Outport 888, 144 + 10
    PasoActual = 144
    For i = 1 To Espera * 10
        Next i
'Elseif k = 0.5 Then
    Outport 888, 80 + 10
    PasoActual = 80
    For i = 1 To Espera * 10
        Next i

Elseif k = 0.75 Then
    Outport 888, 96 + 10
    PasoActual = 96
    For i = 1 To Espera * 10
        Next i

Elseif k = 0 Then
    Outport 888, 160 + 10
    PasoActual = 160
    For i = 1 To Espera * 10
        Next i

Else
    MsgBox ("Algo anda mal")
End If
Call o.writestring("**TRG", True)
For i = 1 To Espera
    Next i
Y = Y + Distancia
A = X
B = Y
A = A + Pre
B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf

L = L + 1

    For j = 1 To NumLecturasX
        Outport 888, 10 + PasoActual
        For i = 1 To Espera
            Next i

            Outport 888, 6 + PasoActual
            For i = 1 To Espera
                Next i
            Call o.writestring("**TRG", True)
            For i = 1 To Espera
                Next i
            X = X - Distancia
            A = X
            B = Y
            A = A + Pre
            B = B + Pre
            A = Right(A, Pos)
            B = Right(B, Pos)
            lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf

            j = j + 1
            Outport 888, 5 + PasoActual
            For i = 1 To Espera
                Next i

```

```

    Outport 888, 9 + PasoActual
    For i = 1 To Espera
    Next i

    Outport 888, 10 + PasoActual
    Call o.writestring("**TRG", True)
    For i = 1 To Espera
    Next i
    X = X - Distancia
    A = X
    B = Y
    A = A + Pre
    B = B + Pre
    A = Right(A, Pos)
    B = Right(B, Pos)
    lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf

    Next j

k = L / 4 - Int(L / 4)

If k = 0.25 Then
    Outport 888, 144 + 10
    PasoActual = 144
    For i = 1 To Espera * 10
    Next i

Elseif k = 0.5 Then
    Outport 888, 80 + 10
    PasoActual = 80
    For i = 1 To Espera * 10
    Next i

Elseif k = 0.75 Then
    Outport 888, 96 + 10
    PasoActual = 96
    For i = 1 To Espera * 10
    Next i

Elseif k = 0 Then
    Outport 888, 160 + 10
    PasoActual = 160
    For i = 1 To Espera * 10
    Next i

Else
    MsgBox ("Algo anda mal")
End If
Call o.writestring("**TRG", True)
For i = 1 To Espera
Next i
Y = Y + Distancia
A = X
B = Y
A = A + Pre
B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf

Next L

'
'PARA CUALQUIER OTRO CASO SE TOMARAN MULTIPLOS DE CUATRO
'PASOS, PARA COMPLETAR CICLOS, SIEMPRE SE EMPIEZA Y TERMINA
'EN LA POSICION 1010, DE LAS DOS PARTES DEL BYTE
Else
Dim CiclosPasos As Integer

```

CiclosPasos = Distancia / 60

```

lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf
Estado = o.writestring("IST?", 1)
Do Until Estado = True
  For i = 1 To Espera
  Next i
  Estado = o.writestring("IST?", 1)
Loop

Call o.writestring("**TRG", True)
PasoActual = 160
For L = 1 To NumLecturasY
  For j = 1 To NumLecturasX
    For n = 1 To CiclosPasos
      Outputport 888, 10 + PasoActual
      For i = 1 To Espera
      Next i
      Outputport 888, 9 + PasoActual
      For i = 1 To Espera
      Next i
      Outputport 888, 5 + PasoActual
      For i = 1 To Espera
      Next i
      Outputport 888, 6 + PasoActual
      For i = 1 To Espera
      Next i
      Outputport 888, 10 + PasoActual
    Next n
  Call o.writestring("**TRG", True)
  For i = 1 To Espera
  Next i
  X = X + Distancia
  A = X
  B = Y
  A = A + Pre
  B = B + Pre
  A = Right(A, Pos)
  B = Right(B, Pos)
  lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf
Next j

```

'aqui va un ciclo para mover el motor y

```

For n = 1 To CiclosPasos
  Outputport 888, 160 + 10
  For i = 1 To Espera
  Next i

  Outputport 888, 144 + 10
  For i = 1 To Espera
  Next i

  Outputport 888, 80 + 10
  For i = 1 To Espera
  Next i

  Outputport 888, 96 + 10
  For i = 1 To Espera
  Next i

  Outputport 888, 160 + 10
Next n
Call o.writestring("**TRG", True)
For i = 1 To Espera
Next i
Y = Y + Distancia
A = X
B = Y

```

```

A = A + Pre
B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf
L = L + 1

```

```

For j = 1 To NumLecturasX
For n = 1 To CiclosPasos
  Outport 888, 10 + PasoActual
  For i = 1 To Espera
  Next i

```

```

  Outport 888, 6 + PasoActual
  For i = 1 To Espera
  Next i

```

```

  Outport 888, 5 + PasoActual
  For i = 1 To Espera
  Next i

```

```

  Outport 888, 9 + PasoActual
  For i = 1 To Espera
  Next i

```

```
Next n
```

```
  Outport 888, 10 + PasoActual
```

```
Call o.writestring("**TRG", True)
  For i = 1 To Espera
  Next i

```

```
X = X - Distancia
```

```
A = X
```

```
B = Y
```

```
A = A + Pre
```

```
B = B + Pre
```

```
A = Right(A, Pos)
```

```
B = Right(B, Pos)
```

```
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf
```

```
Next j
```

```
For n = 1 To CiclosPasos
  Outport 888, 160 + 10
  For i = 1 To Espera
  Next i

```

```
  Outport 888, 144 + 10
  For i = 1 To Espera
  Next i

```

```
  Outport 888, 80 + 10
  For i = 1 To Espera
  Next i

```

```
  Outport 888, 96 + 10
  For i = 1 To Espera
  Next i

```

```
  Outport 888, 160 + 10
Next n
```

```
Call o.writestring("**TRG", True)
For i = 1 To Espera
Next i

```

```
Y = Y + Distancia
```

```
A = X
```

```
B = Y
```

```
A = A + Pre
```

```

B = B + Pre
A = Right(A, Pos)
B = Right(B, Pos)
lista = lista & "X" & A & "Y" & B & vbCrLf

```

```
Next L
```

```
End If
```

```
Open "c:\PRUEBA.txt" For Output As #1
Write #1, lista, 234
```

```
'ABRE EL ARCHIVO PARA OPERACIONES DE SALIDA
'ESCRIBE LOS DATOS EN EL ARCHIVO
```

```
Close #1
```

```
'CIERRA EL ARCHIVO
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command1_Click() 'ESTE BOTON GENERA UN CICLO DE 4 PASOS HACIA LA PARTE
'SUPERIOR DEL SENTIDO "y"
```

```
Espera = Val(Text1.Text)
```

```
Outport 888, 160 + 10
For i = 1 To Espera
Next i
```

```
Outport 888, 144 + 10
For i = 1 To Espera
Next i
```

```
Outport 888, 80 + 10
For i = 1 To Espera
Next i
```

```
Outport 888, 96 + 10
For i = 1 To Espera
Next i
```

```
Outport 888, 160 + 10
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command2_Click() 'ESTE BOTON GENERA UN CICLO DE 4 PASOS HACIA LA PARTE
'IZQUIERDA DEL SENTIDO "x"
```

```
Espera = Val(Text1.Text)
```

```
Outport 888, 10 + 160
For i = 1 To Espera
Next i
```

```
Outport 888, 6 + 160
For i = 1 To Espera
Next i
```

```
Outport 888, 5 + 160
For i = 1 To Espera
Next i
```

```
Outport 888, 9 + 160
For i = 1 To Espera
Next i
```

```
Outport 888, 10 + 160
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command3_Click() 'ESTE BOTON GENERA UN CICLO DE 4 PASOS HACIA LA PARTE
'DERECHA DEL SENTIDO "x"
```

```
Espera = Val(Text1.Text)
```

```

Outport 888, 10 + 160
For i = 1 To Espera
Next i

```

```

Outport 888, 9 + 160
For i = 1 To Espera
Next i

```

```

Outport 888, 5 + 160
For i = 1 To Espera
Next i

```

```

Outport 888, 6 + 160
For i = 1 To Espera
Next i

```

```

Outport 888, 10 + 160

```

```

End Sub

```

```

Private Sub Command4_Click() 'ESTE BOTON GENERA UN CICLO DE 4 PASOS HACIA LA PARTE
                              'INFERIOR DEL SENTIDO "y"

```

```

Espera = Val(Text1.Text)

```

```

Outport 888, 160 + 10
For i = 1 To Espera
Next i

```

```

Outport 888, 96 + 10
For i = 1 To Espera
Next i

```

```

Outport 888, 80 + 10
For i = 1 To Espera
Next i

```

```

Outport 888, 144 + 10
For i = 1 To Espera
Next i

```

```

Outport 888, 160 + 10

```

```

End Sub

```

```

Private Sub Command5_Click() 'SE REFIERE AL BOTON "LIBERAR MOTORES"
                              'INDICA LA SALIDA DEL VALOR 0 DECIMAL EN EL
Outport 888, 0                'PUERTO PARALELO, EQUIVALE A 00000000 BINARIO

```

```

End Sub

```

```

Private Sub Command6_Click() 'SE REFIERE AL BOTON "IST?"
Set o = CreateObject("LeCroy.ActiveDSOCtrl.1") 'ESTABLECE AL OSCILOSCOPIO COMO UN OBJETO
Call o.MakeConnection("IP: 175.25.1.7") 'REALIZA LA CONEXION CON EL OSCILOSCOPIO

```

```

Call o.writestring("**TRG", True) 'ACTUALIZA LA PANTALLA DEL OSCILOSCOPIO
Call o.writestring("IST?", True) 'PREGUNTA LOS DATOS DEL OSCILOSCOPIO

```

```

End Sub

```

```

Private Sub Form_MouseMove(Button As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
                              'ACTUALIZA LOS DATOS
                              'AL MOVER
                              'EL RATON

```

```

Label1.Caption = "Se hará un barrido en un rectangulo de " _
& vbCrLf & Val((Val(Combo1.Text) * Val(Combo2.Text)) / (1000)) & " milímetros" & " por" _
& vbCrLf & Val((Val(Combo3.Text) * Val(Combo2.Text)) / (1000)) & " milímetros" _
& vbCrLf & vbCrLf & "Con un total de " & vbCrLf & _
Val(Combo1.Text) * Val(Combo3.Text) + Val(Combo3.Text) & " Lecturas"

```

```

End Sub

```

```

Private Sub Combo1_Click()
    'ACTUALIZA LOS DATOS
    'DEL CUADRO COMBINADO 1
    Label1.Caption = "Se hará un barrido en un rectangulo de " _
    & vbCrLf & Val((Val(Combo1.Text) * Val(Combo2.Text)) / (1000)) & " milimetros" & " por" _
    & vbCrLf & Val((Val(Combo3.Text) * Val(Combo2.Text)) / (1000)) & " milimetros" _
    & vbCrLf & vbCrLf & "Con un total de " & vbCrLf & _
    Val(Combo1.Text) * Val(Combo3.Text) + Val(Combo3.Text) & " Lecturas"
End Sub

Private Sub Combo2_Click()
    'ACTUALIZA LOS DATOS
    'DEL CUADRO COMBINADO 2
    Label1.Caption = "Se hará un barrido en un rectangulo de " _
    & vbCrLf & Val((Val(Combo1.Text) * Val(Combo2.Text)) / (1000)) & " milimetros" & " por" _
    & vbCrLf & Val((Val(Combo3.Text) * Val(Combo2.Text)) / (1000)) & " milimetros" _
    & vbCrLf & vbCrLf & "Con un total de " & vbCrLf & _
    Val(Combo1.Text) * Val(Combo3.Text) + Val(Combo3.Text) & " Lecturas"
End Sub

Private Sub Combo3_Click()
    'ACTUALIZA LOS DATOS
    'DEL CUADRO COMBINADO 3
    Label1.Caption = "Se hará un barrido en un rectangulo de " _
    & vbCrLf & Val((Val(Combo1.Text) * Val(Combo2.Text)) / (1000)) & " milimetros" & " por" _
    & vbCrLf & Val((Val(Combo3.Text) * Val(Combo2.Text)) / (1000)) & " milimetros" _
    & vbCrLf & vbCrLf & "Con un total de " & vbCrLf & _
    Val(Combo1.Text) * Val(Combo3.Text) + Val(Combo3.Text) & " Lecturas"
End Sub

Private Sub Form_Load()
    'AQUI ESTAN ESTABLECIDOS LOS VALORES QUE SE TOMAN
    'COMO PREDETERMINADOS EN LOS CUADROS COMBINADOS
    Combo1.AddItem (4)
    Combo1.AddItem (12)
    Combo1.AddItem (24)
    Combo1.AddItem (48)
    Combo1.AddItem (72)
    Combo1.AddItem (100)
    Combo1.AddItem (160)
    Combo1.AddItem (200)
    Combo1.AddItem (300)
    Combo1.AddItem (400)
    Combo1.AddItem (3000)

    Combo2.AddItem (15)
    Combo2.AddItem (30)
    Combo2.AddItem (60)
    Combo2.AddItem (120)
    Combo2.AddItem (240)
    Combo2.AddItem (480)
    Combo2.AddItem (600)
    Combo2.AddItem (1200)
    Combo2.AddItem (2400)

    Combo3.AddItem (4)
    Combo3.AddItem (12)
    Combo3.AddItem (24)
    Combo3.AddItem (48)
    Combo3.AddItem (72)
    Combo3.AddItem (100)
    Combo3.AddItem (200)
    Combo3.AddItem (400)
End Sub

```