



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN**

**“INSTRUMENTACIÓN DE UN SISTEMA
ULTRASÓNICO PARA MEDIR CONSTANTES
ELÁSTICAS Y DEFECTOS MESOSCÓPICOS EN
SÓLIDOS”**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO
DE:**

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA-
INGENIERIA INDUSTRIAL**

P R E S E N T A :

ERICK ALEJANDRO PÉREZ PÉREZ

ASESOR: DR. ELIGIO ALBERTO OROZCO MENDOZA

Nezahualcóyotl, Estado de México 2012.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Nacional Autónoma de México el apoyo brindado para la realización de la presente tesis a través de los proyectos:

“Transformaciones de Fase Inducidas por Ondas de Choque en Materiales Cerámicos” PAPIIT-IN 105810 UNAM.

“Estudio de las Estabilidad Térmica y Transformaciones de Fase en Materiales Cerámicos y Orgánicos” No 81700 CONACYT.

Agradezco a mi madre Virginia Irma Pérez Pérez que es el ejemplo de la paciencia y la perseverancia para lograr los objetivos planteados.

Al Dr. Eligio Alberto Orozco Mendoza por todo el apoyo y los conocimientos brindados para lograr este trabajo, así mismo al personal que labora en el laboratorio de metalurgia al otorgar las facilidades y el apoyo técnico necesario Ángel Osornio Basurto, Leticia Trejo Delgado, Gabriela García Rosales, Eréndira Martínez Acevedo.

A mis amigos y compañeros Osvaldo Gómez García, Irving Eduardo Parra Gómez, José Germaín Castro Aburto, Luis Alberto Vega Rivas y Álvaro Manuel López Rodríguez, con su amistad y asesoría fue posible concluir todos los proyectos planteados. Especialmente a Baltazar Velázquez Aparicio por la invitación para comenzar este proyecto. A Víctor Hugo Chávez Herrera y Alberto Muciño Vélez por el apoyo y comentarios otorgados.

“No te rindas, por favor no cedas,
aunque el frío queme,
aunque el miedo muerda,
aunque el sol se esconda,
y se calle el viento,
aún hay fuego en tu alma,
aún hay vida en tus sueños”.

Mario Benedetti

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	2
CAPÍTULO UNO GENERALIDADES	
1.1 Clasificación de materiales sólidos	3
1.1.1 Sólidos cristalinos	3
1.1.2 Sólidos amorfos	4
1.1.3 Sólidos orgánicos e inorgánicos	5
1.2 Propiedades mecánicas en sólidos	5
1.2.1 Constantes elásticas en sólidos	5
1.2.2 Módulo de Young o módulo de elasticidad	6
1.2.3 Coeficiente de Poisson	7
1.2.4 Módulo de corte o cizallamiento	7
1.2.5 Módulo volumétrico	8
1.3 Efecto piezoeléctrico	9
1.3.1 Materiales piezoeléctricos	10
1.4 Transductores piezoeléctricos	11
1.4.1 Construcción de los palpadores	12
1.5 Principios básicos sobre ultrasonidos	13
1.5.1 Ondas elásticas	13
1.5.2 Ondas longitudinales	14
1.5.3 Ondas transversales	14
Referencias	16
CAPITULO DOS DISEÑO Y ADAPTACIÓN DEL SISTEMA ULTRASÓNICO	
2.1 Equipo y características	17
2.1.1 Emisor de ondas ultrasónicas PANAMETRICS 5052PR	17
2.1.2 Transductores de contacto Olympus	19
2.1.3 Osciloscopio VISUALSCOPE	20
2.1.4 Cable coaxial	22
2.1.5 Acoplante	23
2.1.6 Muestras metálicas	24
2.1.7 Muestras de polímeros	25
2.1.8 Cristales (Cerámicos)	25
2.2 Parámetros para un sistema ultrasónico	27
2.2.1 Sensibilidad	27
2.2.2 Resolución	27
2.2.3 Frecuencia central	27
Referencias	28

CAPÍTULO TRES PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LAS CONSTANTES ELÁSTICAS DE SÓLIDOS

3.1 Enfoque industrial básico en el análisis operacional del sistema ultrasónico	29
3.1.1 Finalidad de la operación	29
3.1.2 Diseño de las piezas	29
3.1.3 Condiciones de trabajo y distribución del equipo	30
3.1.4 Preparación y mantenimiento del equipo	30
3.1.5 Análisis de métodos y movimientos en la operación	31
3.1.6 Aplicaciones hacia el mejoramiento	32
3.3 Procedimiento de medición	33
3.3.1 Preparación de muestras	34
3.3.2 Ajuste de parámetros de los instrumentos	35
3.3.3 Toma de lecturas	36
3.4 Cálculos y tablas de valores	37
3.5 Memoria de cálculos para la determinación de constantes elásticas	37
3.5.1 Metales	37
3.5.2 Polímeros	38
3.5.3 Cerámicos	38
3.6 Tablas comparativas	39
3.6.1 Metales	39
3.6.2 Polímeros	40
3.6.3 Cerámicos	41
Referencias	44

CAPÍTULO CUATRO APLICACIONES ESPECIALES DEL SISTEMA ULTRASÓNICO PARA LA MEDICIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS

4.1 Aplicaciones especiales del sistema ultrasónico para la medición de constantes elásticas	45
4.1.1 Aplicación a muestras de Cloruro de Sodio	45
4.1.2 Aplicación a muestras sinterizadas de acero 316L	47
4.1.3 Aplicación a soldadura por impacto de acero y cobre	48
Referencias	50

CAPITULO CINCO CONCLUSIONES	51
------------------------------------	----

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describe el proceso de instrumentación de un sistema de medición de constantes elásticas en materiales sólidos basado en el uso de ondas ultrasónicas, para esto, se recuperó y adaptó equipo que existía en el laboratorio de estado sólido del Instituto de Física de la UNAM.

El sistema consiste en un emisor de ondas ultrasónicas, un par de transductores de contacto emisión-recepción de ondas longitudinales y transversales de 5MHz, y una tarjeta osciloscópica instalada en una computadora con entrada tipo ISA.

El sistema de inspección ultrasónica es un método no destructivo que permite realizar el análisis para determinar constantes elásticas sin tener que modificar las características físicas, químicas y estructurales de las muestras sometidas a inspección. Se conocen como ondas ultrasónicas a las ondas que sobrepasan los 20,000 Hz, dichas ondas requieren de un medio elástico para poder trasladarse.

En el capítulo número uno se mencionan de manera general que son las constantes elásticas que caracterizan a los materiales sólidos mono y policristalinos, también se menciona el principio de funcionamiento de los sistemas ultrasónicos, y se describe el efecto piezoeléctrico utilizado en los transductores ultrasónicos.

El capítulo dos describe el diseño del sistema ultrasónico adaptado para la determinación de constantes elásticas en materiales sólidos, así como las muestras que se utilizaron para realizar la inspección, las cuales tuvieron que ser preparadas para obtener una superficie adecuada para lograr un buen acoplamiento con los transductores. También se mencionan algunos parámetros básicos para llevar a cabo la inspección ultrasónica y las características de los elementos que intervienen en la toma de lecturas de la señal ultrasónica.

Una de las etapas básicas para la inspección ultrasónica consiste en la calibración del sistema empleado. En el capítulo tres se muestra un enfoque industrial básico realizado a este sistema, así como la calibración realizada. En esta inspección, las muestras metálicas se usaron como elementos de calibración debido a que se conocen valores para la comparación de datos, para llevar a cabo la calibración se utilizaron ambos transductores. Una vez realizada la calibración del sistema y teniendo listas las muestras se realiza la toma de lecturas de la señal emitida por el sistema, la señal es visualizada en el osciloscopio, así, es posible conocer el tiempo que tarda en viajar la señal a través de cada muestra.

En el capítulo cuatro, se presentan los cálculos realizados para los materiales seleccionados, así como tablas comparativas entre valores teóricos extraídos de literatura y los obtenidos en este trabajo.

Como un apartado especial se menciona el uso del Cloruro de Sodio (NaCl) o sal común para la determinación de constantes elásticas en materiales naturales y sintéticos, las muestras de sal tienen orígenes diferentes, una fue extraída de un domo salino natural, y la otra muestra empleada fue creada de manera sintética en el laboratorio. Se presenta también la aplicación realizada a muestras sinterizadas de acero 316L de interés para la industria nuclear, sometida a diferentes tratamientos. Por último, se presenta la aplicación a una muestra de soldadura de acero y cobre realizada por un cañón neumático del laboratorio de altas presiones del Instituto de Física de la UNAM.

En el capítulo cinco, se presentan las conclusiones y se hacen algunas recomendaciones acerca de las posibles aplicaciones de este dispositivo.

OBJETIVO

Adaptar un sistema de medición de constantes elásticas en sólidos basado en la propagación de ondas elásticas ultrasónicas transversales y longitudinales con instrumentos y sensores existentes en el almacén del departamento de Estado Sólido del IFUNAM.

El dispositivo consta de:

- ✓ Un emisor de ondas ultrasónicas PANAMETRICS 5052PR.
- ✓ Dos transductores emisores/receptores de ondas longitudinales y transversales Olympus
- ✓ Una tarjeta Osciloscópica digital tipo ISA, instalada en una PC con procesador de 486 MHz.

CAPÍTULO UNO

GENERALIDADES

1.1 Clasificación de materiales sólidos

Las propiedades físicas y químicas de los sólidos dependen de los tipos de fuerzas que mantienen juntos a los átomos. Los materiales sólidos se pueden clasificar según la regularidad con que se sitúan los átomos o iones, unos respecto de otros. Desde el punto de vista estructural, los materiales sólidos pueden ser monocristalinos, policristalinos, amorfos y amorfocristalinos [1].

1.1.1 Sólidos cristalinos

Los monocristales son disposiciones regulares de átomos, que pueden ser consideradas la repetición periódica en las tres dimensiones de una célula cristalina básica [2], para este tipo de monocristales se presentarán en el cristal ciertas imperfecciones en la repetición periódica de sus unidades estructurales (dislocaciones, vacantes, impurezas, etc.) que pueden modificar notablemente sus propiedades físicas.

En un material cristalino, los átomos se sitúan en una disposición repetitiva o periódica a lo largo de muchas distancias atómicas, es decir, existe un orden de largo alcance tal que, al solidificar o formarse el material, los átomos se sitúan según un patrón tridimensional repetitivo, en el cual cada átomo está enlazado con su vecino más próximo. De manera ocasional, cuando los átomos están en los puntos predichos se dice que el cristal contiene defectos. Los materiales policristalinos consisten en un gran número de pequeños cristales con orientaciones diversas y propiedades isotrópicas. Es el caso de los metales y las cerámicas. Los metales, muchas cerámicas y ciertos polímeros adquieren estructuras cristalinas en condiciones normales de solidificación o de formación. El orden de largo alcance no existe en los materiales que no cristalizan, denominados no cristalinos o amorfos [3].

Algunas propiedades de los sólidos cristalinos dependen de la estructura cristalina del material, es decir, del ordenamiento espacial de átomos, iones y moléculas [4]. Hay un número muy grande de estructuras cristalinas diferentes que tienen, todas ellas, orden atómico de largo alcance. Poseen la característica de que al romperse producen caras y planos definidos, así mismo presentan puntos de fusión definidos.

Estas estructuras varían desde las relativamente simples de los metales a las excesivamente complejas de los materiales cerámicos y poliméricos.

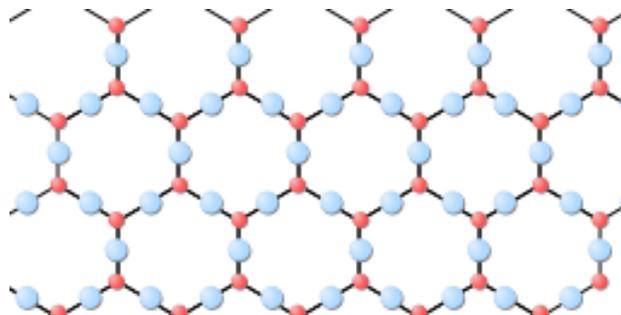


Figura 1.1 Arreglo de un sólido cristalino

1.1.2 Sólidos amorfos

Los materiales amorfos tales como el vidrio y muchos polímeros no exhiben una regularidad completa en la disposición de sus átomos o moléculas y esto es lo que los diferencia de los sólidos cristalinos. Como se mencionó anteriormente en un cristal los átomos están dispuestos como una cadena regular en una red, de forma que si se conoce la distribución de los átomos en una región del material es posible predecir donde deben estar los átomos de cualquier otra parte del cristal [1].

En los sólidos amorfos la posición de los átomos no tiene esta regularidad, esto no significa que los átomos se encuentren agrupados en forma caótica. Las fuerzas interatómicas y los enlaces entre los átomos serán aun análogos a los de los cristales y esto asegurará que las separaciones atómicas y el número y distribución de los vecinos más próximos de un átomo sean en promedio, los mismos en cualquier punto de la muestra, de forma que el medio que rodea a un átomo, será muy similar, aunque no necesariamente igual, al que rodea a cualquier otro. Teniendo en cuenta estas ligeras variaciones de espaciado y orientación a lo largo del material se dice que la posición exacta de los átomos distantes no puede predecirse [1].

Los materiales amorfos pueden dividirse en dos grupos principales. En primer lugar aquellos que, cuando se fabrican tienden a producirse en estado amorfo. Son los materiales que forman vidrios de manera natural [3]. Sin embargo, existen otros materiales que normalmente solidificarán con una estructura cristalina pero que se pueden hacer de forma amorfa, bien por enfriamiento rápido del material fundido o permitiendo que su vapor se condense sobre una superficie fría. La naturaleza amorfa de los que forman vidrio de manera natural es bastante estable aunque un calentamiento prolongado puede permitir a algunos de los materiales más sencillos su cristalización, pero los materiales que solo se pueden formar por enfriamiento muy rápido desde la forma fundida o desde el vapor, normalmente cristalizan con bastante rapidez cuando se les calienta por encima de una cierta temperatura [1].

Uno de los materiales más sencillos y comunes de entre los que forman vidrio de manera natural es la sílice amorfa, SiO_2 , que también existe en forma cristalina como, cristobalita y cuarzo. Existen además otras composiciones de vidrios para fines especiales que mediante la adición de otros materiales alteran sus propiedades ópticas, eléctricas, mecánicas y térmicas.

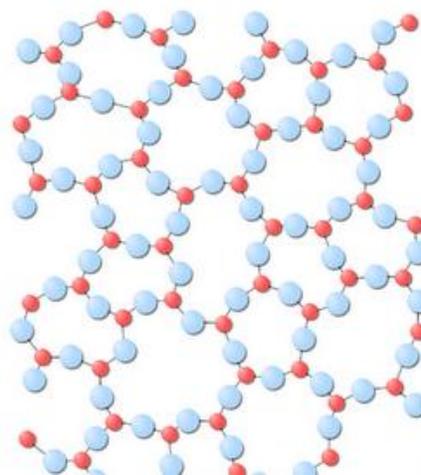


Figura 1.2 Arreglo de sólido amorfo

Los materiales amorfos exhiben una amplia variedad de comportamiento mecánico, por ejemplo, la elasticidad del caucho y la deformación plástica del Poliestireno, así como la fractura frágil del vidrio. A pesar de estas diferencias, comparten un rasgo común con los cristales, la tensión a la fractura es menor que la tensión teórica de cizalla del material.

A temperaturas suficientemente bajas (temperatura ambiente para muchos materiales) todos los materiales se vuelven frágiles, como el vidrio.

El arreglo de átomos, iones y moléculas en un cristal se determina mediante la difracción de rayos X, una de las técnicas más útiles para determinar las estructuras de los sólidos [5]. Si un rayo de luz visible pasa a través de una lámina de vidrio, sobre cuya superficie se ha trazado un número relativamente grande de líneas paralelas, el rayo se desvía; dependiendo del ángulo de desviación, de la distancia entre las líneas y del largo de onda de luz. Siendo así, los rayos X de escala apropiada son capaces de determinar cuantitativamente la distribución de los átomos en la estructura de los cristales. Los estudios con rayos X dan espectros de difracción claros y precisos, lo que indica una orientación definida de los átomos o moléculas, los sólidos amorfos por su parte, dan normalmente espectros indefinidos, similares a los de los líquidos, lo que indica una distribución desorganizada.

1.1.3 Sólidos orgánicos e inorgánicos

Otra clasificación de los materiales sólidos sintéticos o artificiales se refiere a su origen orgánico o inorgánico. Los productos orgánicos tienen propiedades muy distintas de los inorgánicos; sus temperaturas de fusión son bajas o muy bajas, son casi todos combustibles y, en general, se descomponen a temperaturas poco altas. Estos materiales pueden usualmente disolverse en líquidos orgánicos como el alcohol, algunos ejemplos de estos materiales son la madera y el papel. Por otro lado tenemos la clasificación de materiales inorgánicos, estos materiales no provienen de células animales o vegetales o relacionadas con el carbón, resisten el calor mejor que las sustancias orgánicas, algunos de los materiales inorgánicos más utilizados son el cemento y la cerámica [5].

1.2 Propiedades mecánicas en sólidos

El estudio del comportamiento elástico es fundamental para el entendimiento de las propiedades mecánicas de los materiales. El módulo elástico es una característica de la fuerza del enlace químico en los materiales [6]. Entender las propiedades elásticas de un material es esencial para sus aplicaciones ingenieriles.

1.2.1 Constantes elásticas en sólidos

Las propiedades mecánicas resultan de aplicar fuerzas mecánicas a los materiales considerados. Las más importantes son la resistencia a la tracción y compresión, la resistencia a la flexión y la dureza [7].

Las constantes elásticas son parámetros macroscópicos que se pueden determinar a partir de ensayos mecánicos relacionados con las propiedades antes mencionadas. Así, tenemos el módulo de elasticidad o de Young (E) que se determina a partir de las pruebas de compresión o de tracción y la correspondiente a un ensayo de cizalladura se denomina módulo de corte o cizalladura (G). El cociente entre las deformaciones laterales y las axiales se denomina coeficiente de Poisson (μ) [8].

En materiales isotrópicos se cumple que $E=2G(1+\mu)$. En muchos metales G tiene un valor igual a 0.4E, por consiguiente, cuando un módulo es conocido los otros pueden ser calculados de forma aproximada [7].

Muchos materiales son anisotrópicos desde el punto de vista elástico; es decir, el comportamiento elástico (E) varía según la dirección cristalográfica. En estos materiales las propiedades elásticas están completamente caracterizadas solo mediante la especificación de varias constantes elásticas, y su número depende de las características de la estructura cristalina. Aún en el caso de materiales isotrópicos, para la caracterización completa de las propiedades elásticas, por lo menos deben conocerse dos constantes. El módulo de elasticidad será proporcional a la variación de fuerza (tensión) que se produce al desplazar un átomo o ion una distancia determinada (deformación).

En los materiales con un enlace fuerte como en los cerámicos son mayores los módulos que en los de enlace más débil como en materiales metálicos; o en los polímeros.

La elasticidad es la capacidad de un material para regresar a su forma original luego de experimentar una pequeña deformación. La ecuación general del movimiento de una partícula de material perfectamente elástico (es decir que cumple la Ley de Hooke) [9], de tamaño infinitesimal y para desplazamientos de primer orden está dada por la ecuación:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1.1) [9]$$

Donde, t es el tiempo, u es el desplazamiento de la partícula, x es la dirección de propagación de la onda, ρ es la densidad del material y c es la constante elástica.

La velocidad de propagación (V_l) de la onda longitudinal está dada por la ecuación:

$$V_l = \frac{\omega}{K_l} = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad (1.2) [10]$$

y la velocidad (V_t) de la onda transversal por:

$$V_t = \frac{\omega}{K_t} = \sqrt{\frac{C_{11} - C_{12}}{\rho}} \quad (1.3) [10]$$

Donde C_{11} y C_{12} son los módulos de elasticidad de la matriz de rigidez, en notación simplificada, para un material isotrópico, comúnmente llamadas módulos de elasticidad, E, y el coeficiente de Poisson.

1.2.2 Módulo de Young o módulo de elasticidad

El módulo de Young es una cantidad proporcional a la rigidez de un material cuando se somete a una tensión externa de tracción, se trata en forma básica de la relación entre la tensión aplicada y la tensión experimentada por el cuerpo cuando el comportamiento es lineal.

El módulo Young se basa en mediciones estáticas, mientras que la propagación del sonido depende de la respuesta del material a tensiones rápidamente alternativas. El empleo del módulo de Young supone que el material puede expandirse o contraerse lateralmente cuando la onda de compresión o de expansión pasa por él [8].

Por ejemplo, si en una goma y un metal aplicamos la misma tensión, se observara una deformación elástica mayor en la goma comparada con la deformación del metal. En este ejemplo se observa que el módulo de Young en el metal es más alto que en la goma y por lo tanto se requiere aplicar una tensión mayor para que sufra la misma deformación que la experimentada en la goma.

En la siguiente ecuación se muestra la relación entre la tensión aplicada y la tensión experimentada:

$$E = \frac{F}{\varepsilon} \quad (1.4) [8]$$

Donde

E= Módulo de Young o módulo de elasticidad

F= Tensión aplicada

ε = Deformación elástica longitudinal del material

Esta relación es muy útil cuando se calculan las deformaciones producidas por una carga en un sólido de comportamiento lineal.

1.2.3 Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson mide la deformación transversal (en relación a la dirección longitudinal de aplicación de la carga) de un material homogéneo e isotrópico [8]. En el caso del coeficiente de Poisson, la relación establecida no es entre tensión y deformación, la relación se establece entre deformaciones ortogonales mediante la siguiente ecuación

$$\sigma = \frac{-\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = \frac{-\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (1.5) [8]$$

Donde

σ = Coeficiente de Poisson

ε_x = Deformación en la dirección x, que es transversal

ε_y = Deformación en la dirección y, que es transversal

ε_z = Deformación en la dirección z, que es la longitudinal

El signo negativo en la ecuación del coeficiente de Poisson se adoptó debido a que las deformaciones transversales y longitudinales tienen signos opuestos. En la práctica el coeficiente de Poisson varía entre 0 y 0.5. No se conocen sustancias para las cuales $\sigma < 0$, es decir, sustancias que se dilatan transversalmente cuando se las estira longitudinalmente. Valores de σ cercanos a 0.5 como el caucho, corresponde a un módulo de rigidez pequeño en comparación con el módulo de compresión [9].

1.2.4 Módulo de corte o cizallamiento

Esta definido por la ecuación

$$G = \frac{T}{Y} \quad (1.6) [8]$$

Donde

G= Módulo de corte

T= Tensión cortante

Y= Deformación elástica de corte del material a prueba

La tensión de corte se relaciona con una fuerza aplicada paralelamente a una superficie, con el objetivo de causar el deslizamiento de planos paralelos unos en relación a otros (8). En la figura 1.3 se muestran los módulos elásticos descritos anteriormente.

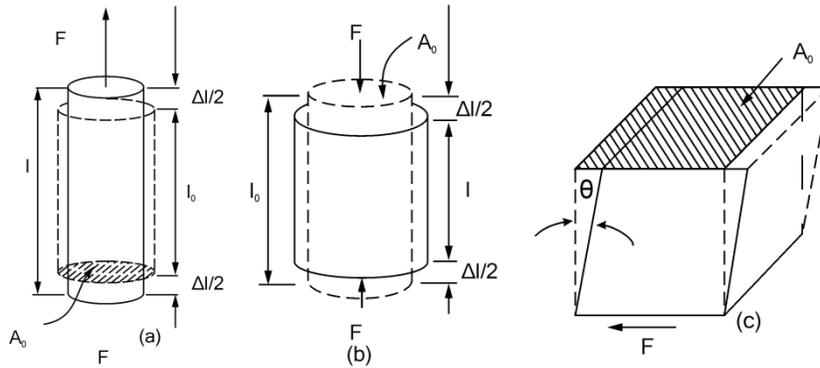


Figura 1.3 Módulo de Young (a), coeficiente de Poisson (b) y módulo de corte (c).

Las ecuaciones que determinan las constantes elásticas antes descritas relacionando la velocidad de las ondas son:

$$\sigma = \frac{1-2\left(\frac{V_t}{V_l}\right)^2}{2-2\left(\frac{V_t}{V_l}\right)^2} \quad (1.7) [11]$$

$$E = \frac{V_l^2 \rho (1+\sigma)(1-2\sigma)}{(1-\sigma)} \quad (1.8) [11]$$

$$G = V_t^2 \rho \quad (1.9) [11]$$

Donde

σ = Coeficiente de Poisson
 V_l = Velocidad longitudinal
 V_t = Velocidad transversal
 ρ = Densidad del material
 E = Módulo de Young
 G = Módulo de corte

Por lo tanto el comportamiento elástico del material isotrópico puede determinarse midiendo la velocidad de propagación de las ondas longitudinal y transversal. Como, en general, la rigidez de un material a cizallamiento es menor que a compresión, la velocidad de la onda transversal es menor que la velocidad de la onda longitudinal. En la mayoría de los metales la velocidad de la onda transversal es aproximadamente la mitad de la longitudinal [12]. La velocidad de propagación de la onda sonora (velocidad del sonido) depende de las características del medio en el que se transmite dicha propagación; presión, temperatura, humedad, entre otros.

Otro de los módulos que caracterizan a los materiales sólidos corresponde al módulo volumétrico el cual no fue calculado en este trabajo. Sin embargo es importante mencionarlo para complementar las constantes elásticas de los materiales sólidos

1.2.5 Módulo volumétrico

El módulo volumétrico caracteriza la respuesta de una sustancia a la compresión. Cuando un sólido está bajo presión uniforme, experimenta un cambio de volumen pero no de forma [19]. Esto ocurre cuando un objeto se sumerge en un fluido.

Es posible caracterizar una compresión de volumen en términos del módulo volumétrico B, el cual se define como:

$$B = -\frac{\frac{\Delta F}{A}}{\frac{\Delta V}{V}} = -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}}$$

El esfuerzo volumétrico ΔP se define como la razón entre la magnitud de cambio de la fuerza aplicada ΔF y el área superficial A. La deformación de volumen es igual al cambio del volumen ΔV dividido entre el volumen original V [19].

Un material que tenga un elevado módulo volumétrico no se comprime con facilidad. Un aumento de presión (ΔP positiva) ocasiona un decremento de volumen (ΔV negativo), y viceversa.

En la figura 1.4 se observa que el cubo se comprime en todos sus lados por fuerzas normales a sus seis caras.

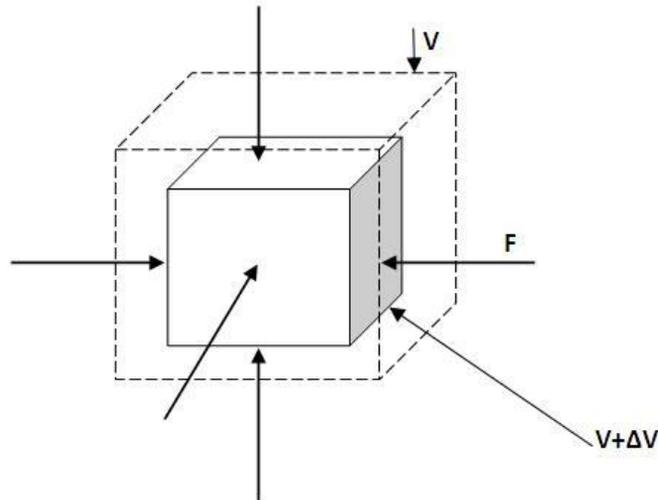


Figura 1.4 Módulo volumétrico en un sólido

1.3 Efecto piezoeléctrico

La piezoelectricidad es un fenómeno que consiste en la aparición de cargas eléctricas en las caras de determinados cristales cuando se ejerce sobre ellos una presión o tracción mecánica.

Si determinadas estructuras cristalinas se deforman por una fuerza externa pueden adquirir un momento dipolar neto. Este momento produce cargas de polarización superficiales, que se pueden detectar midiendo el potencial que se desarrolla en caras opuestas del cristal que actúa como si fuese un capacitor cargado. Para tensiones moderadas la polarización es proporcional a la tensión aplicada de manera que si éste se invierte, el potencial cambia de signo. Estos materiales también exhiben el efecto inverso [1]. En la figura 1.5 se puede apreciar lo descrito anteriormente.

Todos los materiales ferroeléctricos presentan el efecto de piezoelectricidad. Un material piezoelectrico debe de experimentar una distorsión espontánea antes de que se pueda convertir en ferroeléctrico y esto solo ocurre en casos muy especiales [1].

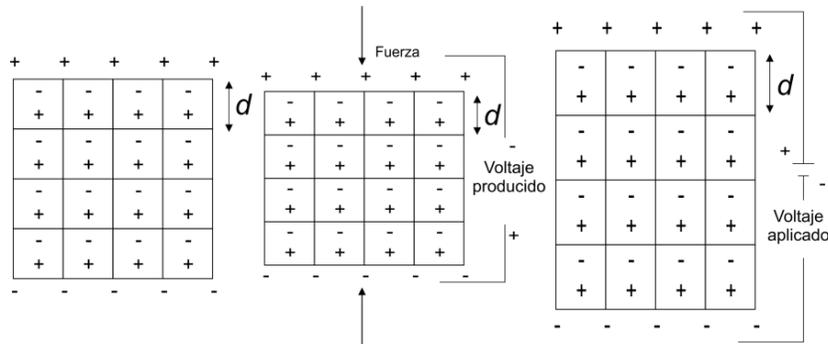


Figura 1.5 Efecto piezoelectrico

Los transductores ultrasónicos funcionan en base a este mismo principio de transformación de energías, la idea básica para generar estos ultrasonidos consiste en la emisión de una señal eléctrica transformándola en una onda ultrasónica. La importancia del efecto piezoelectrico reside en relación con los ultrasonidos que proporcionan la conversión de las oscilaciones eléctricas en oscilaciones mecánicas y viceversa.

1.3.1 Materiales piezoelectricos

Cuando a ciertos materiales piezoelectricos se les impone un cambio dimensional, ocurre polarización, creándose un voltaje o un campo. Los dieléctricos que presentan este comportamiento reversible son piezoelectricos. El cuarzo, el Titanato de bario y una solución sólida de $PbZrO_3-PbTiO_3$ (o PZT), y productos cerámicos más complejos como el $(Pb, La)-(Ti, Zr)O_3$ (o PLTZ) están permanentemente polarizados y presentan este comportamiento [13]. Todos estos cristales se caracterizan por tener ciertos ejes fundamentales: óptico, eléctrico y mecánico, careciendo todos ellos de centro de simetría (14). Las reacciones que suceden en los materiales piezoelectricos se describen con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Campo producido por esfuerzo} = \xi = g\sigma \quad (1.10)$$

$$\text{Deformación producida por el campo} = \epsilon = d\xi \quad (1.11)$$

Donde

ξ = Campo eléctrico (V/m)

σ = Esfuerzo aplicado (Pa)

ϵ = Deformación

d y g= Constantes características del material

La constante g esta relacionada con d a través de la elasticidad E como se muestra:

$$E = \frac{1}{gd} \quad (1.12)$$

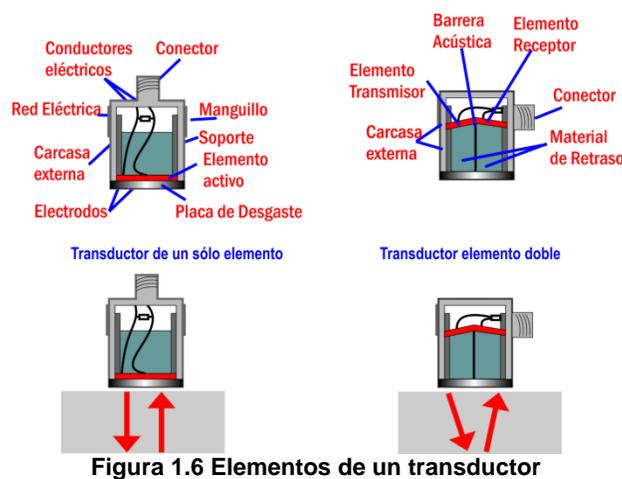
Aunque todos los materiales ferroeléctricos son piezoelectricos, existen materiales que pueden ser piezoelectricos y no ferroeléctricos, el cuarzo es el ejemplo comúnmente citado.

1.4 Transductores piezoeléctricos

Un transductor es un dispositivo que convierte un tipo de energía como vibración o sonido en otra diferente generalmente eléctrica. Para una transformación de un tipo de energía de A a B, la conversión inversa de B a A, se realiza con el mismo transductor operando en sentido opuesto.

Un transductor ultrasónico contiene un elemento piezoeléctrico que es excitado por un impulso eléctrico corto para generar ondas ultrasónicas [11]. En la figura 1.6 es posible observar los elementos que componen un transductor, se observa que la composición es muy similar ya sea de un solo elemento piezoeléctrico o un elemento dual, del mismo modo se observa el traslado que realiza la señal en el transductor.

Las ondas de sonido se juntan en el material de prueba y viajan a través de él hasta que encuentran la interface con otro material de diferente densidad. Las reflexiones entonces viajan de regreso al transductor, que convierte la energía del sonido en energía eléctrica. En esencia, el medidor escucha el eco del lado opuesto. En general el intervalo de tiempo empleado es de millonésimas de segundo [15].



Para conseguir que el palpador sirva a la vez como excitador y como receptor se utilizan excitaciones por impulsos de corta duración. Concretamente la corriente se aplica durante un tiempo muy corto (3×10^{-6} seg), con un intervalo de silencio de 10^{-2} seg durante el cual una vez amortiguada su inercia de vibración puede captar las ondas ultrasónicas que le lleguen del material a investigar [15].

Algunas características que pueden considerarse como deseables en los transductores son:

- Exactitud

La exactitud de la medición debe ser tan alta como sea posible. Se entiende por exactitud que el valor verdadero de la variable se pueda detectar sin errores sistemáticos positivos o negativos en la medición. Sobre varias mediciones de la variable, el promedio de error entre el valor real y el valor detectado tendera a ser cero.

- Precisión

La precisión de la medición debe ser tan alta como sea posible. La precisión significa que existe o no una pequeña variación aleatoria en la medición de la variable. La dispersión en los valores de una serie de mediciones será mínima.

- Rango de funcionamiento

El sensor debe tener un amplio rango de funcionamiento y debe ser exacto y preciso en todo el rango.

- Velocidad de respuesta

El transductor debe ser capaz de responder a los cambios de la variable detectada en un tiempo mínimo. Lo ideal sería una respuesta instantánea.

- Calibración

El sensor debe ser fácil de calibrar. El tiempo y los procedimientos necesarios para llevar a cabo el proceso de calibración deben ser mínimos. Además, el sensor no debe necesitar una recalibración frecuente. El término desviación se aplica con frecuencia para indicar la pérdida gradual de exactitud del sensor que se produce con el tiempo y el uso, lo cual hace necesaria su recalibración.

- Fiabilidad

El sensor debe tener una alta fiabilidad. No debe estar sujeto a fallos frecuentes durante el funcionamiento.

1.4.1 Construcción de los palpadores

Como se mencionó en el apartado 1.3.1, existen varios materiales que pueden ser utilizados para la construcción de palpadores. Cada uno de ellos tiene distintas características y en cada caso se escogerá aquel que mejor se adapte a las condiciones del ensayo [16]. Los más utilizados junto con sus ventajas e inconvenientes son:

Cuarzo. Estabilidad, homogeneidad, dureza y resistencia al desgaste, resiste altas temperaturas pero es un mal emisor. Muy utilizado para la producción de frecuencias altas.

Sulfato de litio. Tiene baja impedancia acústica lo que le proporciona una buena amortiguación y capacidad de acoplamiento. Es el mejor receptor pero tiene baja resistencia a la temperatura.

Titanato de bario. Es el mejor emisor, pero tiene una impedancia acústica elevada. Restringido a frecuencias inferiores a 15MHz.

Metaniobato de plomo. Es un buen emisor y resiste altas temperaturas. Es el mejor material para generar impulsos cortos lo que le da un excelente poder de resolución.

La tabla 1.1 muestra las características de los materiales piezoeléctricos más habituales.

Tabla1.1 Características de materiales piezoeléctricos

	Cuarzo	Sulfato de litio	Titanato de bario	Metaniobato de plomo
Temperatura crítica	576 °C	75 °C	115-150 °C	550 °C
Modulo piezoeléctrico, d	2.3	15	190	80
Constante presión, g	57	165	11	37
Coefficiente amortiguación interna	1	1.2	1	1.3
Impedancia acústica o longitud $Z \cdot 10^6$ $Km^2 \text{ seg}$	15.3	11.2	35	16
Frecuencia característica para 1mm de espesor	2.88	2.36	2.2	1.4

Se define como módulo piezoeléctrico a la deformación por unidad de voltaje. Mientras que la constante de presión piezoeléctrica se refiere al cambio de voltaje por unidad de deformación es decir la inversa del módulo. El coeficiente de amortiguación interna es la capacidad para amortiguar la oscilación del propio material [16].

Todos los transductores que se utilizan como medidores de espesor tienen incorporado un elemento vibratorio de cerámica, dichos transductores se dividen en cuatro categorías generales:

1. Transductores de contacto
2. Transductores de línea de retraso
3. Transductores de inmersión
4. Transductores de doble elemento.

Para el caso de los transductores para la medición de espesores se encuentran en una amplia variedad de tamaños, frecuencias y estilos, pero la mayoría tiene una estructura interna común.

1.5 Principios básicos sobre ultrasonidos

El sonido se transmite por medio de ondas a través de un medio elástico, las ondas sónicas se caracterizan por su frecuencia que es el número de ondas que pasan en cada segundo por un punto. La variación de esta frecuencia es la que distingue los sonidos graves (baja frecuencia) de los sonidos agudos (alta frecuencia) [11].

1.5.1 Ondas elásticas

Las ondas elásticas pueden ser de dos tipos: una (u_x), el desplazamiento es en la dirección de propagación; esta es una onda longitudinal que se propaga con velocidad c_l . En la otra onda (u_y, u_z), el desplazamiento es en un plano perpendicular a la dirección de propagación; esta es una onda transversal que se propaga con velocidad c_t . La velocidad de propagación de las ondas longitudinales es siempre mayor que la de las ondas transversales [17].

Las ondas sonoras son ondas elásticas, las cuales pueden ser llevadas a través de sólidos, líquidos y gases, sin embargo no pueden ser transmitidas a través del vacío esto es debido a que en el vacío no hay partículas para hacerlas vibrar.

Una onda de tensión es una perturbación que se propaga en el material. Si los valores de la tensión no superan el límite elástico del material se habla de una onda elástica. Las ondas de tensión y deformación son proporcionales y además las deformaciones son recuperables, haciendo que una vez que la onda haya terminado de pasar por un punto del material, éste se encuentre en las mismas condiciones en que se encontraba antes del paso de la onda [10].

Todo tipo de ondas elásticas al pasar de un material a otro, en parte se refleja, en parte se transmite y en parte es absorbida. Si además, hay un movimiento relativo entre la fuente de radiación y reflector, se produce un cambio en la frecuencia de la radiación [18].

No todas las ondas llegan a ser detectadas o apreciadas por el oído humano. Cuando la frecuencia es inferior a 16 Hz (16 ciclos/seg) las ondas son infrasónicas no son audibles. Del mismo modo si la frecuencia de una onda es superior a los 20,000 Hz (20kHz) las ondas son ultrasónicas y producen lo que se llaman ultrasonidos [11].

Las frecuencias utilizadas varían para las distintas aplicaciones desde 10-100kHz para el control de hormigones, hasta 25MHz. Las ondas ultrasónicas utilizadas para el control de los materiales metálicos y uniones soldadas se encuentran en la zona de frecuencias comprendida entre 0.5 MHz y 25MHz. En aplicaciones en las cuales se desea utilizar el sonido para localizar objetos, las longitudes de onda deben ser pequeñas en comparación con el tamaño de los objetos. En la figura 1.7 pueden observarse algunos ejemplos de distintos tipos de frecuencias.

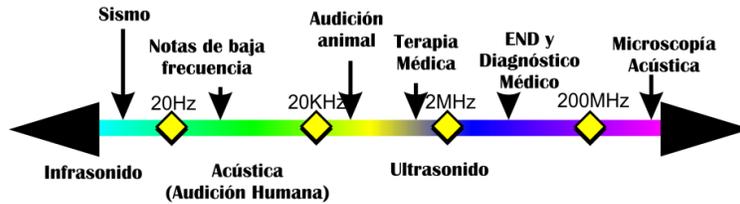


Figura 1.7 Tipos de frecuencias

La teoría de ondas elásticas indica que la propagación se realiza en dos tipos de ondas, longitudinales y transversales.

1.5.2 Ondas longitudinales

Si se aplica una vibración en el extremo de un cuerpo elástico, se comunicará esa misma vibración a las moléculas del cuerpo, la cual se irá alejando de dicho extremo. En el caso de este tipo de ondas se producen dos tipos de movimiento. El de las moléculas que vibran sobre su posición original y el de los sucesivos estados de compresión que se irán alejando del extremo en donde se ha aplicado la vibración [16]. En la figura 1.8 se puede observar el recorrido que hacen este tipo de ondas a través del material en inspección.



Figura 1.8 Recorrido de una onda longitudinal

1.5.3 Ondas transversales

En este caso la vibración se produce perpendicularmente a la cara del extremo del cuerpo elástico y aunque la vibración se transmite longitudinalmente alejándose del extremo sometido a “frotación”, las moléculas vibran transversalmente a la propagación de la onda [16]. En la figura 1.9 es posible observar el recorrido de una onda transversal a través del bloque en estudio.

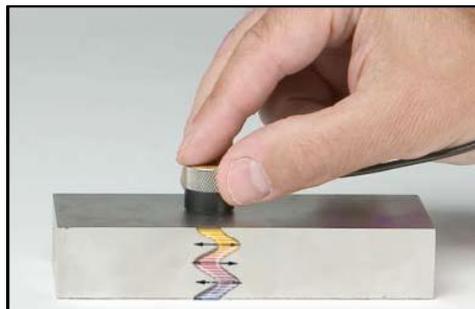


Figura 1.9 Recorrido de una onda transversal

Finalmente, las ondas ultrasónicas obedecen a las mismas leyes básicas del movimiento ondulatorio de las ondas sonoras de frecuencias mas bajas, sin embargo tienen las siguientes propiedades:

1.- Las ondas de frecuencias más altas tienen longitudes de onda más cortas, lo cual significa que la difracción o flexión en torno a un obstáculo se da para objetos y/o rendijas de dimensiones menores. Por lo tanto es más fácil dirigir o enfocar un haz de ultrasonido [15].

En aplicaciones en las cuales se desea utilizar el sonido para localizar objetos, las longitudes de onda deben ser pequeñas en comparación con el tamaño de los objetos. Se puede utilizar esta técnica para localizar cuerpos extraños en los ojos por ejemplo. Si el cuerpo extraño es un fragmento de un décimo de milímetro, entonces la longitud de onda de sonido en el medio en que se desplaza —el humor vítreo— debe ser del orden de una décima de milímetro o menos [15].

2.- Las ondas ultrasónicas pueden atravesar sin dificultad las paredes metálicas de tubos y recipientes [15].

Esto quiere decir que el sistema de inspección puede montarse externamente, es decir, es no invasor.

Para que las ondas atraviesen debe existir un buen acoplamiento entre el emisor de ondas y el objeto o la sustancia a inspeccionar, es decir debe existir un acoplamiento de impedancias.

Referencias

- [1] El estado sólido. H.M. Rosenberg. Edit. Alianza Universidad Textos
- [2] Sensores y acondicionadores de señal. Ramón Pallás Areny. Edit. Marcombo
- [3] Física del estado solido. Domínguez Adame Francisco
- [4] Ciencia de los materiales. Wenceslao González Viñas, Héctor L. Mancini. Edit. Ariel
- [5] Principios de química. Peter William Atkins, Loretta Jones. 3ª Edición. Edit. Medica Panamericana
- [6] Understanding Solid State Physics. Sharon Ann Holgate. CRC Press Taylor & Francis Group. 2010
- [7] Materiales para ingeniería1 introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. Michael F. Ashby. David R. H. Jones
- [8] Introducción a la ciencia de los materiales. William D. Callister JR. Edit. Reverte, S.A.
- [9] Teoría de la elasticidad. Landau Y Lifshitz. Edit. Reverte, S.A.
- [10] Temas de física (acústica. determinación de velocidad transversal y longitudinal). Luis B. López Vázquez
- [11] Ultrasonic transducers technical notes. Olympus NDT. 2006
- [12] Introducción a la física del estado solido. Charles Kittel
- [13] Materiales industriales teoría y aplicaciones. Ligia María Vélez Moreno
- [14] Proyecto de ingeniería de las ondas. Vega Fidalgo Luis, David Zorita Téllez. Universidad de Valladolid
- [15] Aplicación de métodos por ultrasonidos en los ensayos de materiales metálicos. José Ors Martínez
- [16] Ensayos no destructivos por ultrasonidos. Alfonso Fernández Hatre. Centro para la calidad en Asturias
- [17] Deformation and fracture mechanics of engineering materials. Richard W. Hertzberg. 1976. John Wiley & sons, Inc.
- [18] Física de los sólidos. Frederick Brown
- [19] Física. Raymond A. Serway. Jerry S. Faughn. 5a. Edición. Edit Thomson. 2005

CAPÍTULO DOS

DISEÑO Y ADAPTACIÓN DEL SISTEMA ULTRASÓNICO

2.1 Equipo y características

El equipo de inspección ultrasónica utilizado se compone de:

1. Emisor de ondas ultrasónicas PANAMETRICS 5052 PR
2. Transductores de contacto Olympus
3. Tarjeta Osciloscópica tipo ISA VisualScope
4. Computadora Acer
5. Cable coaxial
6. Acoplante

En el análisis de inspección ultrasónica es importante conocer los parámetros con los que operan los dispositivos. A continuación se muestran las características de los dispositivos empleados en el análisis de inspección ultrasónica.

2.1.1 Emisor de ondas ultrasónicas PANAMETRICS 5052PR

El modelo 5052PR es una unidad emisora/receptora de ondas ultrasónicas, cuando se combina con un osciloscopio y transductores apropiados, proporciona la posibilidad de hacer mediciones con ondas ultrasónicas. Las aplicaciones incluyen detección de fallas, medición de espesores, medición de velocidad de sonido (para cálculo de constantes elásticas), análisis de espectro, caracterización de transductores, y una amplia gama de mediciones que pueden ser usadas para monitorear materiales o procesos [1].

La sección de emisor del instrumento genera pulsos eléctricos cortos de energía controlada, cuando son aplicados a un transductor ultrasónico son convertidos en pequeños pulsos ultrasónicos. Los pulsos ultrasónicos son recibidos ya sea por el transductor transmisor después de la reflexión parcial o total (método pulso-eco) o por un transductor receptor separado (métodos emisor y receptor o de transmisión). Las señales de voltaje producidas por el transductor que representan los impulsos recibidos se amplifican por la sección del receptor. La amplificación de señales esta disponible como una salida para monitor en un osciloscopio y las mediciones son hechas directamente desde el panel de control.

El panel frontal del emisor de ondas ultrasónicas (ver figura 2.1) muestra los siguientes controles:

1.- Interruptor de encendido. Provee el voltaje necesario para el emisor, el indicador de luz deberá estar encendido cuando la posición del interruptor esté en la posición ON. Tenemos que asegurarnos que el pasador SI localizado en el panel trasero este situado en el voltaje apropiado.

2.-Tasa de control de repeticiones. Este control permite la variación continua de la tasa de repetición de pulso interno en el rango de aproximadamente 200 a 5000 Hz. En la posición EXT la tasa de repetición interna del generador esta desconectada y el 5052PR puede ser activado externamente usando el conector J3 EXT TRIG localizado en el panel trasero.

3.- Energía. El interruptor de energía contiene cuatro posiciones y es usado para seleccionar el pulso óptimo y la amplitud de la excitación para un transductor dado. La salida disponible de energía y la amplitud para varias resistencias de amortiguamiento están dadas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Energía y amplitud para diversas resistencias de amortiguamiento

Configuración de energía	Resistencia de amortiguamiento Ohms	Pulso de energía disponible μ Joules	Amplitud del pulso Volts
1	50	14	140
2	100	36	200
3	100	58	200
3	250	58	240
4	250	94	270

4.- Amortiguamiento. El control de amortiguamiento varía la carga resistiva presentada al transductor por el emisor/receptor.



Figura 2.1 Panel frontal del emisor de ondas PANAMETRICS 5052 PR

El panel trasero del emisor de ondas ultrasónicas (ver figura 2.2) muestra las siguientes conexiones

- 1.- Conector de señal de salida. El amplificador de señal está disponible en este conector. Debe ser conectado un cable coaxial a la amplificación vertical del osciloscopio.
- 2.- Conector SYNC (sincronización). Provee un pulso de sincronización de +2V ($Z_{out} = 50$ Ohms). Esta disponible para disparar al osciloscopio y para otros equipos.
- 3.- Conector externo disparador. Con el control de Tasa de repeticiones en la posición EXT, el 5052 puede ser disparado a tasas más grandes a 10,000 Hz* (en la posición de energía #1) por una fuente externa de +5V (>100 ns de ancho) en 50 Ohms.

*La tasa máxima de repetición posible sin una disminución en la energía del pulso de excitación depende del pulso de energía.



Figura 2.2 Panel trasero del emisor de ondas PANAMETRICS 5052 PR

En la figura 2.3 se muestra el emisor de ondas y la computadora en la que se instaló la tarjeta osciloscópica VisualScope para el análisis ultrasónico.



Figura 2.3 Emisor de ondas ultrasónicas y osciloscopio

En la figura 2.3 se puede observar una superficie metálica de aluminio, dicha superficie se utilizó como barrera para que la señal emitida en las muestras se reflejara, esto es debido a que las muestras y la superficie son de materiales diferentes.

2.1.2 Transductores de contacto Olympus

Como se vio en la sección 1.4.1 existen diferentes tipos de transductores, en esta inspección ultrasónica se utilizaron dos transductores de contacto, uno de emisión de ondas longitudinales con una frecuencia de 5 MHz y otro transductor de ondas transversales con una frecuencia de 5 MHz [2]. En la tabla 2.2 se muestran los datos técnicos de los transductores de contacto utilizados en la inspección.

Tabla 2.2 Características de transductores piezoeléctricos utilizados

Frecuencia MHz	Tipo de Transductor	Tamaño nominal del elemento		Retraso Msec	Modelo de Transductor
		in	mm		
5	Longitudinal	0.25	6	7	M110=RM
5	Transversal	0.25	6	4	V156=RM



(a)

(b)

Figura 2.4 Transductor longitudinal (a) y transductor transversal (b)

2.1.3 Osciloscopio VISUALSCOPE

Para detectar las ondas de ultrasonido se utilizó una tarjeta osciloscópica VISUALSCOPE. El osciloscopio VISUALSCOPE es un instrumento de aplicación virtual de alto rendimiento, programado para Microsoft Windows 95 o mayor. Combinado con el software PCIP-SCOPE transforma una PC en un osciloscopio con todas las características de almacenamiento digital [3] (ver figura 2.5).

VISUALSCOPE soporta dos canales de entrada analógicos, cuatro canales de señal y una pantalla alfanumérica. Se puede tener medidas de tiempo, amplitud y frecuencia sobre señales usando cursores manuales o automáticos. Con el calculador de señales se pueden guardar señales en memoria, calcular funciones en las señales de entrada, o activar mediciones automáticas en los datos adquiridos. VISUALSCOPE tiene 14 mediciones automáticas para elegir.

Características del osciloscopio

1. 2 canales de entrada analógicas
2. 1 canal trigger externo
3. Señal de ancho de banda de 10MHz
4. Velocidad de muestreo de 20MHz
5. Tiempo de muestreo para ondas repetitivas 2ns
6. Resolución vertical de 8 bits.
7. 2048 muestras en el modo single-channel (un solo canal)
8. 1024 muestras en el modo dual-channel (doble canal)
9. Acoplamiento de entrada: AC, DC o Tierra
10. Dos ventanas de tiempo base
11. Triggering: \pm borde de nivel de configuración del usuario

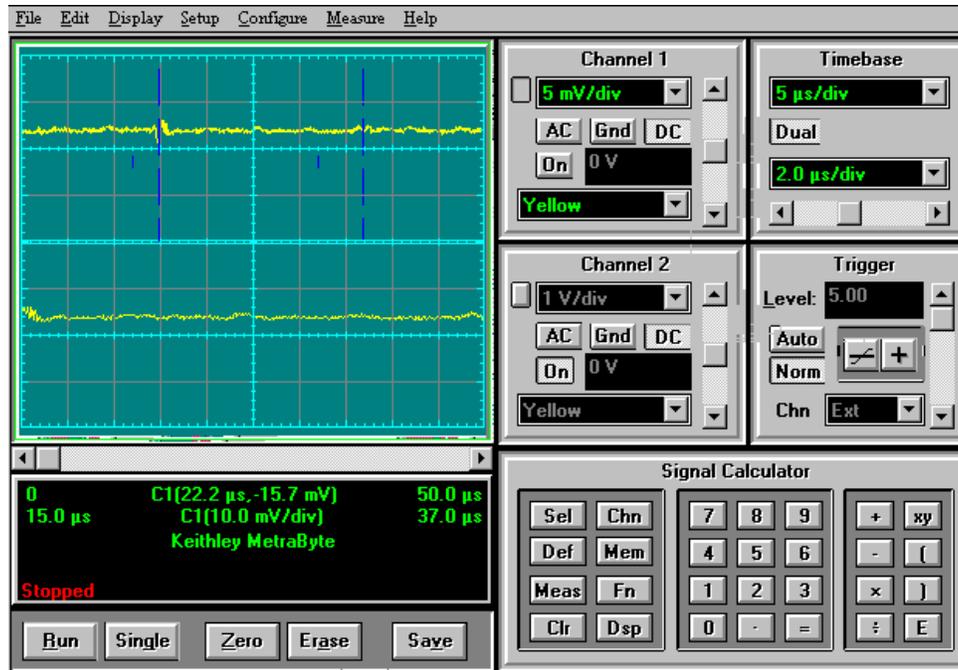


Figura 2.5 Osciloscopio VISUALSCOPE

Características de la pantalla

1. Pantalla de 1, 2 o 4 canales
2. Pantalla rápida de tiempo real
3. Selección de cuadros, cuadrícula y ejes
4. Desplazamiento de la forma de onda en tiempo o volts
5. Cursor manual para precisar mediciones de tiempo y voltaje
6. Cursores automáticos para el seguimiento de las características de la señal
7. Copiar las formas de onda y datos a otras aplicaciones de Windows

Características del calculador de señales

1. Matemáticas de forma de onda (+, -, *, /, X vs Y)
2. 10 memorias de forma de onda
3. 14 mediciones de forma de onda incluyendo frecuencia, ciclo de trabajo, tiempo de subida/caída, voltaje máximo/mínimo, y amplitud RMS.
4. Estadística de forma de onda
5. Funciones de la señal definidas por el usuario
6. Vuelve a muestrear digitalmente operandos tomados en diferentes tasas

Funciones de cálculo

1. Mediciones automáticas y estadísticas en señales de entrada
2. Guardar formas de onda en disco o transferirlos a otras aplicaciones
3. Anotaciones en las formas de onda guardadas
4. Guarda y recuerda la configuración de instrumentos en el disco
5. Impresión de formas de onda
6. Mouse o teclado para el control de las operaciones

A continuación se muestra en la figura 2.6 una señal enviada a través de un material. En la pantalla del osciloscopio se pueden observar algunas de las características antes descritas.

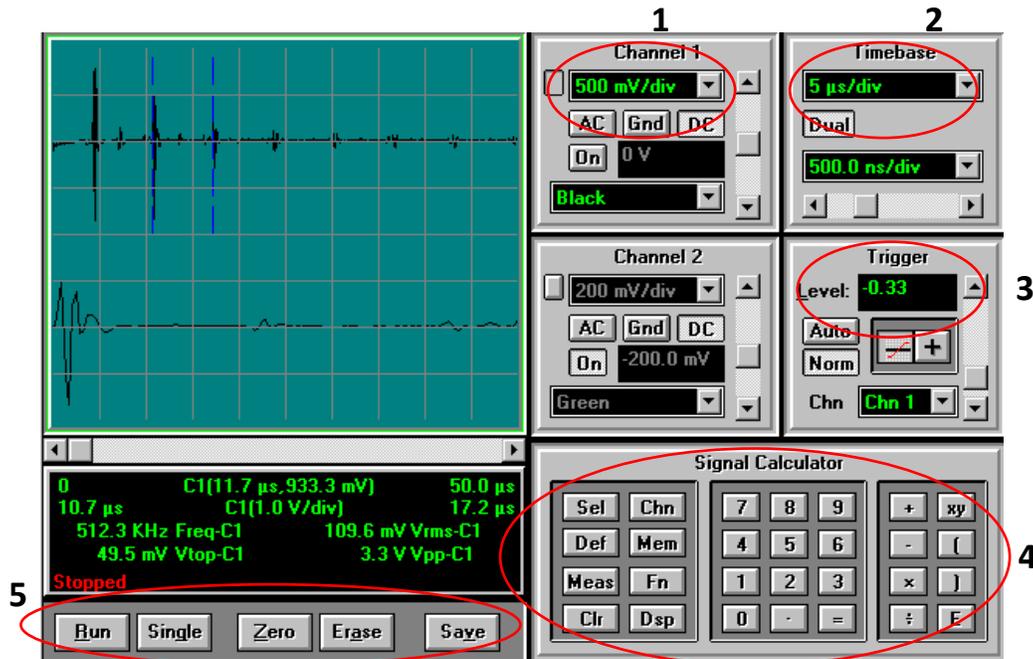


Figura 2.6 Mediciones realizadas en el osciloscopio

- 1.- Canal activo en el cual la señal es recibida, se observa la indicación de voltaje por división el cual puede ser ajustado en diferentes valores según sea requerido.
- 2.- Muestra la escala de tiempo por división, al igual que la ventana de canales la escala de tiempo puede ser ajustada según sea necesario.
- 3.- El trigger permite configurar la entrada de la señal, es posible seleccionar de manera automática o manual el paso de dicha señal así como el canal por el cual entrará la señal.
- 4.- La calculadora para señales permite realizar operaciones entre señales recibidas o almacenadas.
- 5.- Los botones para toma de señales, permiten iniciar, detener, borrar o guardar una señal en el momento que se requiera.

2.1.4 Cable coaxial

Los cables son del tipo coaxial para prevenir problemas de interferencia eléctrica y sus conexiones deben ser compatibles con las del instrumento y el palpador a emplear. El cable coaxial fue creado en la década de los 30, y es un cable utilizado para transportar señales eléctricas de alta frecuencia que posee dos conductores concéntricos, uno central, llamado vivo, encargado de llevar la información, y uno exterior, de aspecto tubular, llamado malla o blindaje, que sirve como referencia de tierra y retorno de las corrientes. Entre ambos se encuentra una capa aislante llamada dieléctrico, de cuyas características dependerá principalmente la calidad del cable. Todo el conjunto suele estar protegido por una cubierta aislante [4]. En la figura 2.7 se puede observar el cable utilizado en la inspección.



Figura 2.7 Cable coaxial

La mayoría de los cables coaxiales tienen una impedancia característica de 50, 52, 75, o 93 Ω . El cable coaxial es la forma de cableado preferida desde hace tiempo por el hecho de que es barato y fácil de manejar (debido a su peso, flexibilidad, etc.).

Un cable coaxial está compuesto por un hilo de cobre central (denominado núcleo) que está rodeado por un material aislante y luego, por una protección de metal trenzada.

1. La funda protege al cable del entorno externo. Generalmente está hecha fabricada en caucho (o, a veces, Cloruro de Polivinilo (PVC) o Teflón).
2. La protección (cubierta de metal) que recubre los cables, protege los datos transmitidos en el medio para que no haya interferencias (o ruido) y los datos se puedan distorsionar.
3. El aislante que rodea al núcleo central está fabricado en material dieléctrico que evita cualquier contacto con la protección que pueda causar interacciones eléctricas (cortocircuitos).
4. El núcleo, que realiza la tarea de transportar los datos. Consiste en un solo hilo de cobre, o en varias fibras trenzadas.

Gracias a la protección, el cable coaxial se puede utilizar para cubrir grandes distancias y a altas velocidades (a diferencia del cable par trenzado). Sin embargo, se suele utilizar con mayor frecuencia para instalaciones básicas. También existen cables coaxiales que tienen una doble protección (una capa aislante y una capa de protección) y otros con cuatro protecciones (dos capas aislantes y dos capas protectoras).

2.1.5 Acoplante

El análisis de una onda en un medio, sólo es posible teóricamente, ya que en la práctica cualquier material presenta superficies límites o de contorno, con lo que la propagación de la onda se altera.

El uso de gel de acoplamiento es necesario para proporcionar el acoplamiento acústico entre el transductor y la pieza de ensayo ya que las ondas no pueden transmitirse por el aire. La capa de gel acoplante garantiza: la eliminación total del aire entre la pieza y el transductor, obteniendo un buen acoplamiento acústico, así mismo permite que el transductor se mueva libremente y con facilidad sobre la superficie evitando rozamientos y desgaste [2].

Los acoplantes deberán ser sustancias con cierta viscosidad, homogéneas y libres de partículas sólidas o burbujas. Los cuales deberán contar con las siguientes características:

- Fácil aplicabilidad
- No ser corrosivo ni tóxico
- No escurrir sobre la superficie

Los acoplantes más empleados son los siguientes: aceite lubricante (SAE 20 ó SAE 30), glicerina, benceno, pastas acoplantes (cola celulósica), siliconas, soluciones jabonosas o agua con aditivos humectantes.

Características del gel acoplante utilizado

SWC	4oz. (0.12 litros)	Palpadores de onda transversal, no tóxica, soluble en agua, orgánico de alta viscosidad
-----	--------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------



Figura 2.8 Gel acoplante

2.1.6 Muestras metálicas

Las muestras que se usaron para las pruebas (ver figura 2.9) son: latón, acero 1020, aluminio y cobre. Se utilizaron estos materiales porque se conocen datos para la comparación posterior de las lecturas obtenidas utilizando el sistema de inspección ultrasónica. Las muestras seleccionadas tienen propiedades conocidas tales como densidad, velocidad de propagación del sonido y módulos de elasticidad. Así mismo podremos observar que sucede cuando las muestras son de un material puro como es el caso del aluminio y el cobre, y del mismo modo observar el comportamiento de materiales aleados como el caso del acero y el latón.



Figura 2.9 Materiales metálicos (latón, acero 1020, aluminio y cobre)

La forma de las muestras consistió en un cilindro de una pulgada de diámetro y un espesor aproximado de 2 cm. Cada una de las muestras fue pulida en una de sus caras con lijas de diferentes calibres progresivamente para obtener una superficie sin imperfecciones y así conseguir un buen acoplamiento con el transductor.

2.1.7 Muestras de polímeros

Para realizar el análisis ultrasónico en polímeros se utilizaron muestras de Nylon, Lucita y Teflón (ver figura 2.10), dichos materiales son de una pieza redonda de aproximadamente una pulgada de diámetro y 2 centímetros de espesor, al igual que los materiales metálicos existen datos teóricos para realizar la comparación de los resultados que se obtengan de este análisis.



Figura 2.10 Polímeros Nylon, Lucita y Teflón

2.1.8 Cristales (Cerámicos)

En este análisis ultrasónico se agregaron los siguientes cerámicos: Bromuro de Potasio (KBr), Cloruro de Potasio (KCl), Ioduro de Potasio (KI) y una muestra de Óxido de Aluminio (Al_2O_3) (ver figura 2.11), estos materiales presentan datos como densidad y constantes elásticas que serán comparadas con los obtenidos en este análisis, las dimensiones de estos cristales son irregulares, salvo el espesor que pudo ser determinado con el uso de un Vernier.

Un caso especial que se presentará para el análisis ultrasónico es de cristales de Cloruro de Sodio (NaCl), dos de estos cristales pertenecen a un domo salino utilizado para el almacenamiento de hidrocarburos y un tercer cristal que fue sintetizado en el laboratorio al cual se le agregó europio, al igual que los cristales anteriores las dimensiones son irregulares y solamente fue posible obtener su espesor utilizando un Vernier.



Figura 2.11 Cerámicos y cristales de Cloruro de Sodio

Los materiales antes mencionados presentan diversas características tales como elasticidad y densidad, que permitirán entender el paso de las ondas ultrasónicas, en algunos casos los materiales presentarán una gran atenuación de la emisión ultrasónica y en otros casos la emisión será bastante buena a través del material.

En los materiales KCl, KBr, KI y NaCl sintético, desde su crecimiento en el laboratorio se les agregó Europio, el cual les da la característica de fluorescencia y no altera su composición. En la figura 2.12 se puede observar el cristal utilizado de Bromuro de Potasio (KBr) expuesto a una lámpara de luz ultravioleta la cual muestra la fluorescencia que provocó el Europio en el material, del lado izquierdo observamos el cristal sin exponerlo a luz ultravioleta.

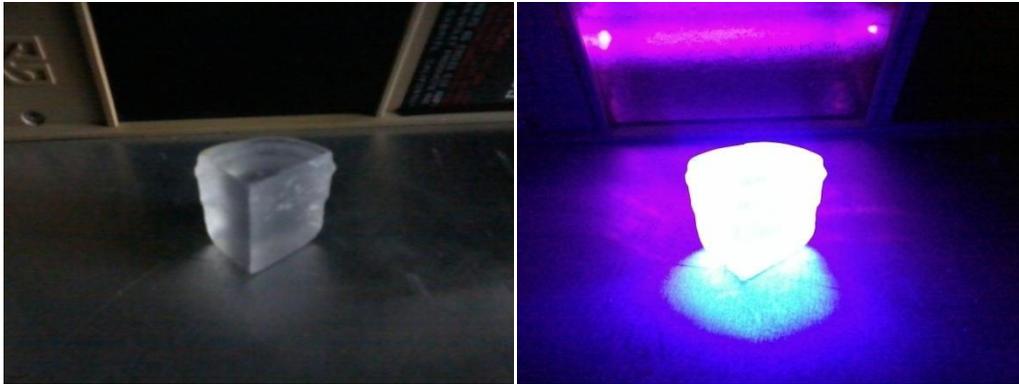


Figura 2.12 KBr aplicando luz ultravioleta

Del mismo modo se expuso a los cristales de Ioduro de Potasio (KI), Cloruro de Potasio (KCl) y la muestra de Cloruro de Sodio (NaCl) creada en el laboratorio a la emisión de luz ultravioleta, en la figura 2.13 se observa la fluorescencia de cada uno.

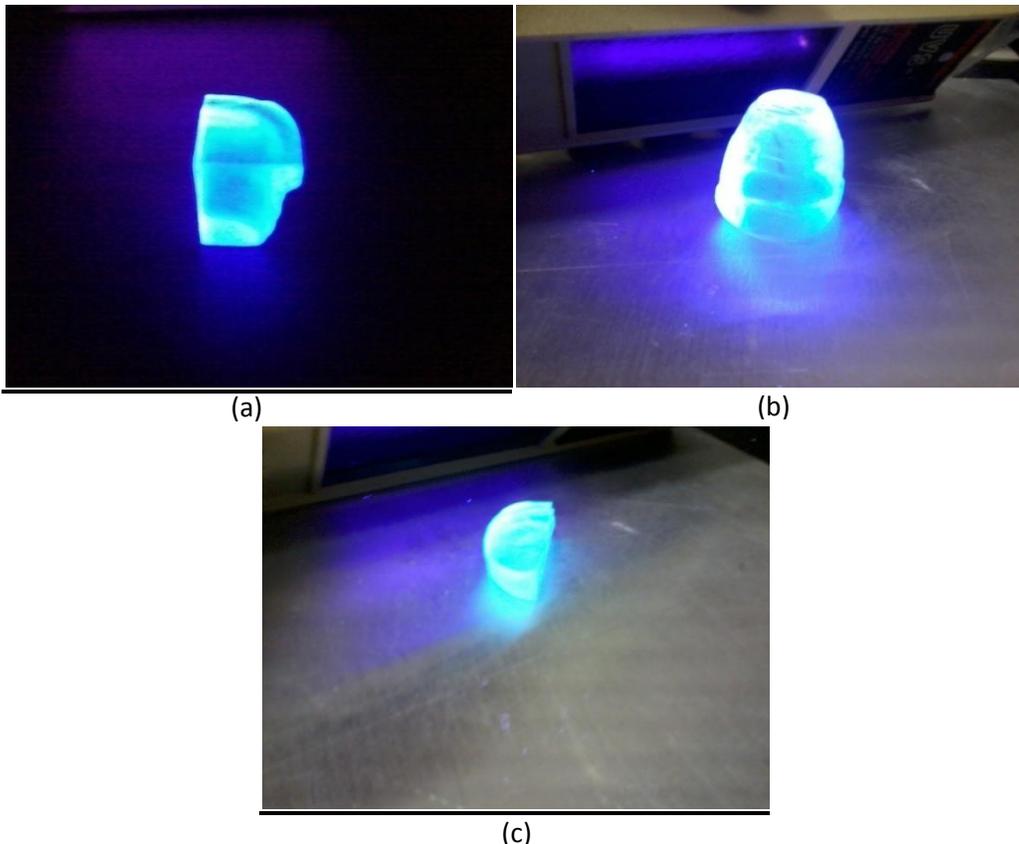


Figura 2.13 Muestras expuestas a luz ultravioleta. (a) KBr, (b) KCl y (c) NaCl sintetizado

2.2 Parámetros para un sistema ultrasónico

Los principales parámetros que deben ser controlados en un sistema ultrasónico son los siguientes:

- Sensibilidad
- Resolución
- Frecuencia central

2.2.1 Sensibilidad

La sensibilidad esta definida como la capacidad de un transductor para detectar discontinuidades pequeñas. Se mide por medio de la amplitud de la respuesta de una discontinuidad artificial en un bloque de referencia. La sensibilidad es una característica particular de cada transductor, aun siendo del mismo material, tamaño y frecuencia no siempre producen señales idénticas en el osciloscopio [5].

2.2.2 Resolución

Es la capacidad de separar dos señales cercanas en tiempo o profundidad. Se divide en dos tipos:

- Resolución en superficie cercana. Es la habilidad para separar claramente una señal de un reflector en una distancia mínima cercana a la superficie, sin presentar interferencia de la señal de entrada inicial [5].
- Resolución en superficie de pared posterior. Es la capacidad de un transductor de proporcionar indicaciones separadas de discontinuidades con una profundidad muy cercana a la superficie de pared posterior, esta resolución depende del ancho del pulso y de la frecuencia [5].

2.2.3 Frecuencia central

Los transductores deben utilizarse en su rango de frecuencia especificado para obtener una aplicación óptima [5].

Referencias

- [1] Instruction manual ultrasonic pulser/receiver model 5052PR. Panametrics, Inc.
- [2] Ultrasonic transducers technical notes. Olympus NDT. 2006
- [3] Visualscope digital storage oscilloscope user's guide. Keithley Metrabyte division. Keithley Instruments, Inc.
- [4] Materiales industriales teoría y aplicaciones. Ligia María Vélez Moreno
- [5] Ensayos no destructivos por ultrasonidos. Alfonso Fernández Hatre. Centro para la calidad en Asturias

CAPÍTULO TRES

PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LAS CONSTANTES ELÁSTICAS DE SÓLIDOS

Para verificar el funcionamiento del sistema de medición de constantes elásticas, medimos la velocidad de propagación de ondas transversales y longitudinales generadas por el emisor de ondas descrito en el capítulo anterior, en una serie de materiales metálicos, cerámicos y polímeros disponibles todos en el laboratorio de Metalurgia del Instituto de Física. Con esas velocidades y los valores de la densidad de las muestras, se calculó en cada caso el Módulo de Young, el Módulo de Corte y el Coeficiente de Poisson.

Es importante mencionar que este sistema puede ser utilizado en la industria como un auxiliar en áreas como control de calidad para industrias metalmeccánicas. Antes de mostrar el procedimiento para el cálculo de constantes elásticas se presentará un enfoque básico realizado a este sistema.

3.1 Enfoque industrial básico en el análisis operacional del sistema ultrasónico

Al realizar la adaptación e implementación del sistema ultrasónico para la medición de constantes elásticas se utilizaron algunos enfoques para determinar la operación que tendría dicho sistema dentro de un área de investigación.

3.1.1 Finalidad de la operación

El primer planteamiento consistió en determinar la finalidad de la operación del sistema ultrasónico, la cual consiste en la obtención de constantes elásticas en materiales sólidos a partir de la medición de las velocidades longitudinal y transversal a través del material sometido a inspección. Este sistema se puede utilizar como un auxiliar para la caracterización de diversos sólidos, presentando una operación satisfactoria.

Otra alternativa en la utilización del sistema ultrasónico consiste en la obtención de espesores en materiales a partir del tiempo que tarda la señal en pasar a través del material y conociendo las velocidades de propagación del sonido del material.

3.1.2 Diseño de las piezas

Tomando en cuenta como segundo planeamiento el diseño de las piezas o muestras a inspeccionar, estas debían tener un diámetro mayor al del transductor, así mismo contar con una superficie sin imperfecciones para colocar adecuadamente el transductor.

Algunos de los materiales que se utilizaron cuentan con datos comparativos en literatura como es en el caso de los metales y polímeros, estos metales sirvieron como referencia para establecer la dispersión que presentaba el sistema. Se optó también por involucrar algunos tipos de cerámicos en el análisis, lo cual representa la utilidad del sistema en el análisis de otro tipo de materiales. En la figura 3.1 se observa un cilindro de teflón que muestra una superficie sin imperfecciones.



Figura 3.1 Superficie de Teflón sin imperfecciones

3.1.3 Condiciones de trabajo y distribución del equipo

Las condiciones de trabajo para la operación del sistema no requieren de instalaciones especiales como controles de humedad o temperatura, debido a ello resulta ser muy práctico y de fácil instalación. El sistema ultrasónico se distribuyó como se ilustra en la figura 3.2 donde se muestra la organización de los dispositivos involucrados.



Figura 3.2 Área de trabajo y distribución de dispositivos

Es importante mencionar que esta distribución permitió una operación adecuada, al ser un sistema que no requiere instalaciones especiales es muy versátil su colocación y posible traslado hacia otros lugares. El orden o lugar en el que sean colocados los dispositivos no genera variación al momento de obtener los datos para la medición de constantes elásticas.

La conexión de los dispositivos se muestra en la sección 3.2 así como la descripción del procedimiento realizado en la toma de lecturas.

3.1.4 Preparación y mantenimiento del equipo

Otro de los planteamientos a considerar involucra la preparación y el cuidado en los dispositivos utilizados. Se puede mencionar que en el caso del osciloscopio y el emisor de ondas únicamente se debe tener en cuenta la alimentación de energía a la que se va a conectar, ambos dispositivos requieren corriente alterna de 127V.

El mantenimiento de los transductores se realiza con la limpieza de los mismos después de cada toma de lectura y manejándolos con precaución para evitar que se golpeen y se dañen internamente, cada transductor cuenta con empaques para que se puedan almacenar y ubicar con mayor facilidad.

3.1.5 Análisis de métodos y movimientos en la operación

Para llevar a cabo el análisis en la operación del sistema ultrasónico se utilizó un diagrama bimanual en el cual se consigna la actividad de las manos del operador indicando la relación entre ellas. Para este análisis se mostrará el método que se utilizó una vez que se implemento el sistema (tabla 3.1), una vez implementado se hicieron algunas mejoras en el proceso de operación la cual se registro en la tabla 3.2,

Como se mencionó en la sección 3.1.3 el orden o lugar en el que sean colocados los dispositivos no genera variación al momento de obtener los datos para la medición de constantes elásticas.

Tabla 3.1 Diagrama bimanual de operación del sistema anterior

Diagrama bimanual de operación de un sistema ultrasónico			
Descripción mano izquierda	Símbolos		Descripción mano derecha
	M.I	M.D	
Sujeta muestra	●	●	Sujeta gel acoplante
Va hacia área de inspección	➡	D	Espera
Espera	D	●	Aplica gel acoplante
Va hacia área de inspección	➡	D	Espera
Coloca muestra en área de inspección	●	D	Espera
Espera	D	➡	Va hacia emisor de ondas
Espera	D	●	Enciende emisor de ondas
Toma el mouse	●	D	Espera
Espera	D	●	Coloca transductor sobre la muestra
Espera	D	●	Retira transductor de la muestra
Espera	D	●	Coloca transductor sobre la muestra
Da click e inicia toma de lecturas	●	●	Sujeta firmemente el transductor
Ajusta controles en osciloscopio	●	D	Espera
Va hacia emisor de ondas	➡	D	Espera
Ajusta controles en el emisor de ondas	●	D	Espera
Va hacia el mouse	➡	D	Espera
Da click para detener toma de lecturas	●	●	Retira transductor
Espera	D	●	Apaga emisor de ondas
Sujeta muestra	●	●	Remueve gel acoplante
Resumen			
Método	Anterior		
	M.I	M.D	
●	8	10	
D	7	8	
➡	4	1	
Total	19	19	

Tabla 3.2 Diagrama bimanual de operación del sistema actual

Diagrama bimanual de operación de un sistema ultrasónico			
Descripción mano izquierda	Símbolos		Descripción mano derecha
	M.I	M.D	
Sujeta muestra	●	●	Sujeta gel acoplante
Espera	D	●	Aplica gel acoplante
Va hacia área de inspección	➡	D	Espera
Coloca muestra en área de inspección	●	D	Espera
Espera	D	➡	Va hacia emisor de ondas
Espera	D	●	Enciende emisor de ondas
Toma el mouse	●	D	Espera
Espera	D	●	Coloca transductor sobre la muestra
Da click e inicia toma de lecturas	●	●	Sujeta firmemente el transductor
Ajusta controles en osciloscopio	●	D	Espera
Va hacia emisor de ondas	➡	D	Espera
Ajusta controles en el emisor de ondas	●	D	Espera
Va hacia el mouse	➡	D	Espera
Da click para detener toma de lecturas	●	●	Retira transductor
Espera	D	●	Apaga emisor de ondas
Sujeta muestra	●	●	Remueve gel acoplante
Resumen			
Método	Actual		
	M.I	M.D	
●	8	8	
D	5	7	
➡	3	1	
Total	16	16	

Es posible observar de las tablas 3.1 y 3.2 que el método de operar el sistema es bastante similar en ambos casos, representando así la versatilidad y funcionalidad práctica de este sistema, el número de movimientos se redujo en tan solo tres movimientos, también se observa que la mayor parte de la operación consiste en mantener firmemente al transductor en la muestra para evitar que se deslice y provoque lecturas erróneas.

3.1.6 Aplicaciones hacia el mejoramiento

Es posible observar que en un área de investigación se requiere tener ciertos planteamientos cuando se trata de implementar un dispositivo, los planteamientos o enfoques anteriores permitieron un buen desempeño al momento de su utilización así como la posibilidad de buscar mayores aplicaciones como es en el caso de muestras de Cloruro de Sodio, aceros de interés en el área nuclear e incluso en el área de soldaduras.

En términos de un proceso de producción, este sistema podría utilizarse en el área metalmecánica como una herramienta de apoyo para el control de calidad. Se ha visto que equipos ultrasónicos son utilizados para determinar el desgaste existente en las paredes de tuberías por lo que se puede utilizar incluso en un área de mantenimiento como herramienta de detección previa de adelgazamiento en tuberías.

Una vez que se han planteado las condiciones básicas para llevar a cabo la operación del sistema se procede a la conexión de los instrumentos, la medición de las muestras y la toma de lecturas.

3.2 Conexión de sensores e instrumentos

Se conecta el canal 1 del osciloscopio a la salida SYNC del emisor de ondas. El canal 2 del osciloscopio se conecta a la señal de salida en el emisor [1] [2].

En la parte frontal del emisor se conecta el transductor en la salida T/R ya que esta salida se utiliza para los transductores de tipo emisión-recepción.

El diagrama correspondiente se muestra en la figura 3.3.

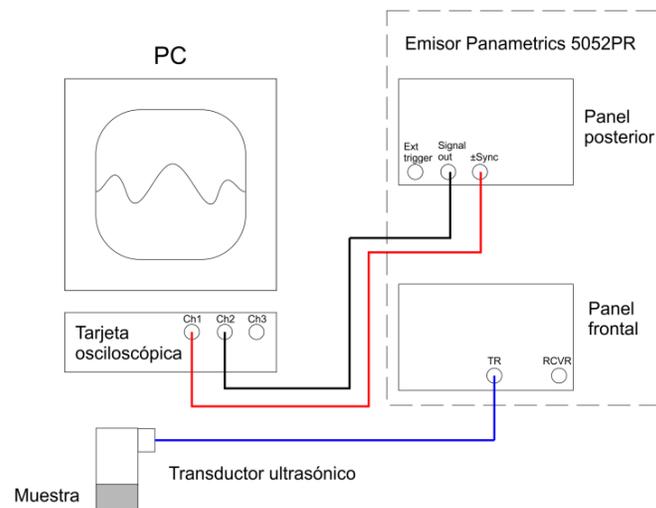


Figura 3.3 Conexión de instrumentos

Una vez hecha la conexión anterior se procede a realizar las lecturas correspondientes, de acuerdo al tipo de transductor que se este utilizando algunos parámetros en los controles se irán cambiando, esto con el objetivo de que la señal se pueda obtener de una manera mas clara.

3.3 Procedimiento de medición

Como se mencionó en el capítulo dos, se tomaron sólidos de diferentes características con constantes elásticas conocidas (en su mayoría), para evaluar el desempeño del sistema de medición. Para esto, se siguieron los siguientes pasos.

- 1.- Preparación de muestras
- 2.- Ajuste de parámetros de los instrumentos
- 3.- Toma de lecturas
- 4.- Cálculos e interpretación de resultados

3.3.1 Preparación de muestras

Para evitar errores la muestra debe ser de un tamaño mayor al área del transductor lo que permite asegurar que la totalidad del haz acústico cruce la muestra; se debe tener en cuenta que debido a la difracción, el haz se dispersa. Si el espesor de la muestra es pequeño se produce reverberación, lo que modifica la forma de la onda y dificulta el cálculo del tiempo [3].

En general, la desviación estándar de los resultados de materiales como los metales, principalmente los no puros, es mayor, comparada con la de los puros y los materiales amorfos. Esto es consecuencia de la atenuación acústica, provocada por defectos en el material como el límite de grano, dislocaciones, etc., que causan dispersión de las ondas [4].

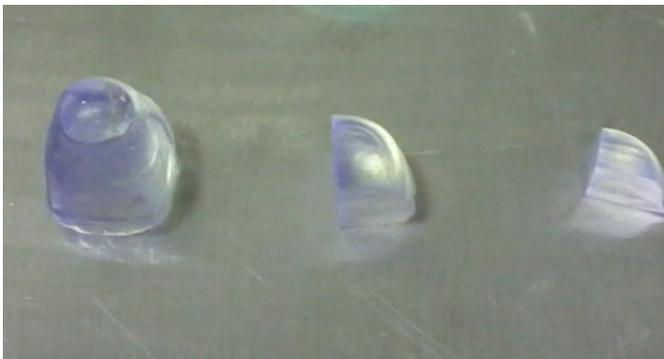
Las muestras que se utilizaron en este ensayo son de los siguientes materiales: aluminio, cobre, latón y acero 1020. Se usaron estos materiales porque se conocen datos para la comparación de las lecturas obtenidas. También en este estudio se utilizaron materiales no metálicos como el Nylon, Teflón y Lucita; otros materiales utilizados fueron cristales Cerámicos de Cloruro de Potasio (KCl), Ioduro de Potasio (KI), Bromuro de Potasio (KBr) y una muestra de Oxido de Aluminio (Al_2O_3). Cristales de Cloruro de Sodio son agregados como un caso especial en el capítulo cuatro para comparar la sal natural con la sal sintética elaborada en el laboratorio. En la figura 3.4 se muestran los cristales y materiales antes mencionados.



Latón, acero, aluminio y cobre



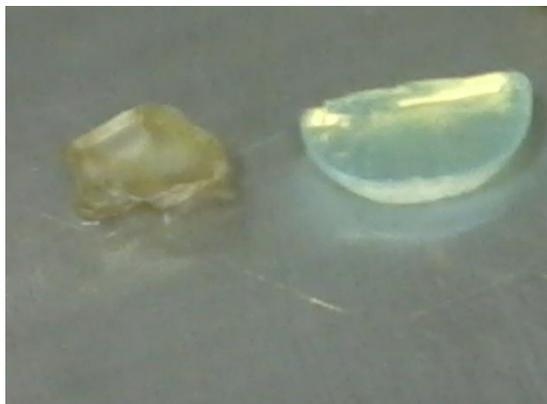
Nylon, Lucita y Teflón



Cristales de KCl, KI y KBr



Oxido de Aluminio



Cloruro de Sodio natural y sintético

Figura 3.4 Muestras utilizadas en el análisis ultrasónico

Con estas muestras, los transductores y el osciloscopio, el objetivo es conocer el tiempo de vuelo o de transmisión de la señal utilizando el método de inspección ultrasónica para determinar las constantes elásticas y compararlas con los valores registrados en la literatura, las mediciones de espesores se realizaron con un Vernier digital una vez que las caras de los materiales metálicos fueron pulidos, en el caso de los polímeros la superficie no presentaba superficies con imperfecciones, para los Cerámicos y las muestras de Cloruro de Sodio se tomaron las partes con mejor superficie para que el transductor fuera colocado adecuadamente.

A cada una de las muestras utilizadas se le agregó un poco de gel acoplante en la cara que fue pulida para que las ondas viajaran de una mejor manera a través del material, como una primera fase en la toma de lecturas se uso una superficie suave para verificar el regreso de la señal. Para la determinación de la densidad de las muestras se utilizó una báscula para medir la masa,

Para los cerámicos y cristales salinos se tomó la densidad reportada en literatura debido a que la forma de los cristales no es regular, como se puede observar en la figura 3.2, lo que dificulta el cálculo del volumen. Aunque podríamos haber usado el principio de Arquímedes para esto, en este caso no lo hicimos.

3.3.2 Ajuste de parámetros de los instrumentos

Los parámetros para la toma de lecturas sugeridos por el fabricante del emisor 5052PR para transductores de 5 MHz se muestran en la tabla 3.3 [1].

Tabla 3.3 Parámetros para transductores de 5MHz

Osciloscopio	Emisor/Receptor
Sensibilidad Vertical- .2V/cm	Tasa de repetición- 8 a 10
Velocidad de barrido horizontal- 2μs/cm	Energía- 1
Ext trig- pendiente positiva	Amortiguación- 8
	Atenuación- 40 Db
	Filtro H.P.- Apagado
	Modo- Pulso-Eco (posición 1)

Una vez que se han colocado los controles de manera adecuada se procedió a la toma de lecturas.

3.3.3 Toma de lecturas

El transductor se coloca de manera firme sobre la superficie del material a inspeccionar con una capa delgada de gel acoplante para evitar que el transductor se desplace provocando lecturas erróneas y al mismo tiempo evitar que entre el transductor y el material de ensayo se genere un vacío, el emisor de ondas una vez que sus controles se encuentran en las posiciones adecuadas es encendido y se observa el desplazamiento de las ondas en el osciloscopio, el cual medirá el tiempo en el que viaja la onda ultrasónica a través del material para determinar las constantes elásticas, mediante la utilización de las ecuaciones correspondientes mencionadas en el capítulo uno. En dichas ecuaciones se involucrarán las velocidades longitudinal y transversal, y la densidad de cada material como se mencionó en el capítulo uno.

En la figura 3.5 se muestra un ejemplo de la obtención del tiempo de viaje de una señal a través de una muestra de acero, la figura corresponde a una señal emitida por un transductor longitudinal.

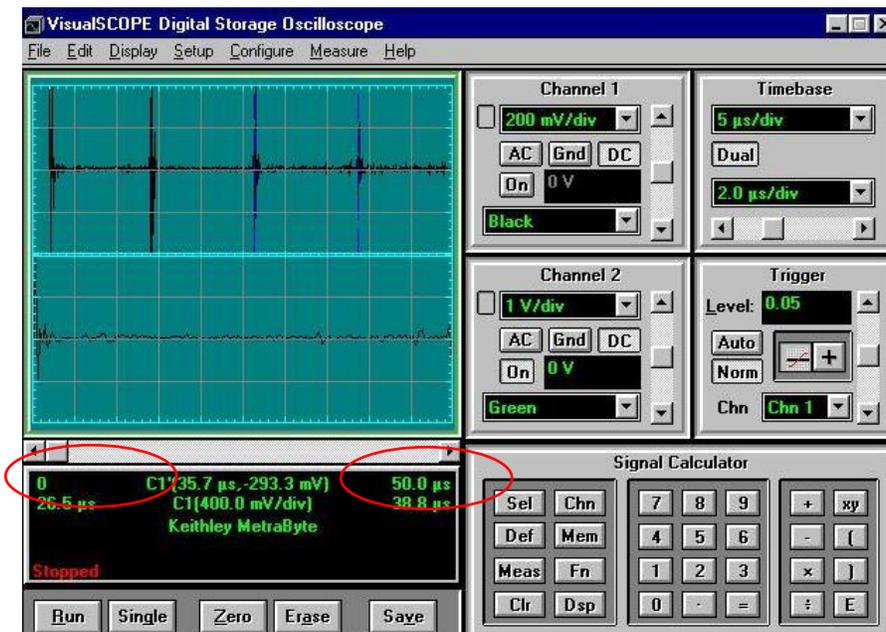


Figura 3.5 Obtención del tiempo de vuelo

El osciloscopio VisualScope indica el tiempo total que existe en la pantalla (en la figura 50.0μs), mediante la activación del botón Dual se indicará el tiempo de viaje de la señal emitida utilizando un par de líneas, dicho tiempo es mostrado en la parte inferior del tiempo total (marcada en óvalos rojos). Una vez determinadas las señales de interés y el tiempo de viaje, se determina el tiempo de viaje como la diferencia entre ambos tiempos, realizado lo anterior se obtiene la velocidad del sonido en el material en inspección.

La velocidad del sonido en el material está dada por la ecuación:

$$C = \frac{2T}{t} \quad (3.1) [5]$$

Donde:

- C= Velocidad del sonido en el material
- T= Espesor del material en inspección
- t= Tiempo de viaje de la señal

La ecuación 3.1 es utilizada para determinar tanto la velocidad de ondas longitudinales V_L como la velocidad de las ondas transversales V_T , con dichas velocidades y con la densidad se pueden determinar las constantes elásticas aplicando las ecuaciones mencionadas en el capítulo uno, las cuales se muestran a continuación:

$$\sigma = \frac{1 - 2 \left(\frac{V_T}{V_L} \right)^2}{2 - 2 \left(\frac{V_T}{V_L} \right)^2}$$

$$E = \frac{V_L^2 \rho (1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}{(1 - \sigma)}$$

$$G = V_T^2 \rho$$

En donde

σ = Coeficiente de Poisson (Adimensional)

E= Módulo de Young o módulo de elasticidad en pascales (Pa)

G= Módulo de Corte o cizallamiento en pascales (Pa)

V_T = Velocidad de las ondas transversales (m/s)

V_L = Velocidad de las ondas longitudinales (m/s)

ρ = Densidad ($\frac{kg}{cm^3}$)

3.4 Cálculos y tablas de valores

Los cálculos realizados para determinar las constantes elásticas se presentan a continuación.

3.5 Memoria de cálculos para la determinación de constantes elásticas

A continuación se muestran los cálculos realizados para obtener las constantes elásticas de algunos de los materiales utilizados.

3.5.1 Metales

Acero

$$\sigma_{Acero} = \frac{1 - 2 \left(\frac{V_T}{V_L} \right)^2}{2 - 2 \left(\frac{V_T}{V_L} \right)^2} = \frac{1 - 2 \left(\frac{3222.76}{5881.30} \right)^2}{2 - 2 \left(\frac{3222.76}{5881.30} \right)^2} = 0.285$$

$$E_{Acero} = \frac{V_L^2 \rho (1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}{(1 - \sigma)} = \frac{(5881.30)^2 (7790) (1 + 0.285)(1 - 2(0.285))}{(1 - 0.285)} = 207.87 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$G_{Acero} = V_T^2 \rho = (3222.76)^2 (7790) = 80.908 \times 10^9 \text{ Pa}$$

3.5.2 Polímeros

Nylon

$$\sigma_{Nylon} = \frac{1 - 2\left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2}{2 - 2\left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2} = \frac{1 - 2\left(\frac{1290}{2453.75}\right)^2}{2 - 2\left(\frac{1290}{2453.75}\right)^2} = 0.447$$

$$E_{Nylon} = \frac{V_L^2 \rho (1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}{(1 - \sigma)} = \frac{(2453.75)^2 (1140) (1 + 0.447)(1 - 2(0.447))}{(1 - 0.447)} = 1.903 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$G_{Nylon} = V_T^2 \rho = (1290)^2 (1140) = 1.897 \times 10^9 \text{ Pa}$$

3.5.3 Cerámicos

NaCl (Sintético)

$$\sigma_{NaCl} = \frac{1 - 2\left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2}{2 - 2\left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2} = \frac{1 - 2\left(\frac{2493.15}{5055.55}\right)^2}{2 - 2\left(\frac{2493.15}{5055.55}\right)^2} = 0.339$$

$$E_{NaCl} = \frac{V_L^2 \rho (1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}{(1 - \sigma)} = \frac{(5055.55)^2 (2160) (1 + 0.339)(1 - 2(0.339))}{(1 - 0.339)} = 36.010 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$G_{NaCl} = V_T^2 \rho = (2493.15)^2 (2160) = 13.426 \times 10^9 \text{ Pa}$$

3.6 Tablas Comparativas

3.6.1 Metales

Acero

Densidad ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	RL(*) [6]	7800
	C(**)	7791
Velocidad Longitudinal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [5]	5890
	C	5881.30
Velocidad Transversal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [5]	3240
	C	3222.76
Módulo de Elasticidad (GPa)	RL [6]	200
	C	207.87
Coeficiente de Poisson (Adimensional)	RL [6]	0.25-0.30
	C	0.285
Módulo de Corte (GPa)	RL [6]	80
	C	80.90

Aluminio

Densidad ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	RL [6]	2700
	C	2695
Velocidad Longitudinal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [5]	6320
	C	6322.68
Velocidad Transversal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [5]	3120
	C	3116.53
Módulo de Elasticidad (GPa)	RL [6]	70
	C	70.14
Coeficiente de Poisson (Adimensional)	RL [6]	0.32-0.36
	C	0.339
Módulo de Corte (GPa)	RL [6]	25
	C	26.12

Cobre

Densidad ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	RL [6]	8900
	C	8920
Velocidad Longitudinal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [5]	4660
	C	4624.70
Velocidad Transversal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [5]	2260
	C	2267.42
Módulo de Elasticidad (GPa)	RL [6]	110-120
	C	123.45
Coeficiente de Poisson (Adimensional)	RL [6]	0.33
	C	0.341
Módulo de Corte (GPa)	RL [14]	40-47
	C	45.85

*RL-Reportado en la literatura

**C- Cálculo experimental

Latón

Densidad ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	RL [6]	8400-8700
	C	8530
Velocidad Longitudinal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [5]	4430
	C	4429.67
Velocidad Transversal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [5]	2120
	C	2139.03
Módulo de Elasticidad (GPa)	RL [6]	100
	C	105.64
Coeficiente de Poisson (Adimensional)	RL [6]	0.32-0.42
	C	0.347
Módulo de Corte (GPa)	RL [6]	35
	C	39.02

3.6.2 Polímeros

Lucita

Densidad ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	RL [7]	1190
	C	1183
Velocidad Longitudinal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [7]	2700-2800
	C	2685.33
Velocidad Transversal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [8]	1300
	C	2725.33
Módulo de Elasticidad (GPa)	RL [9]	-----
	C	4.18
Coeficiente de Poisson (Adimensional)	RL [9]	0.37-0.43
	C	0.398
Módulo de Corte (GPa)	RL [9]	1.7
	C	1.49

Nylon

Densidad ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	RL [9]	1130
	C	1136
Velocidad Longitudinal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [5]	2600
	C	2453.75
Velocidad Transversal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [5]	1290
	C	-----
Módulo de Elasticidad (GPa)	RL [9]	1.4-2.8
	C	1.90
Coeficiente de Poisson (Adimensional)	RL [9]	0.4
	C	0.447
Módulo de Corte (GPa)	RL	-----
	C	1.89

Teflón

Densidad ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	RL [10]	2100
	C	2159
Velocidad Longitudinal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [10]	1400
	C	1275.81
Velocidad Transversal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL [9]	635
	C	-----
Módulo de Elasticidad (GPa)	RL [9]	2.76-4.14
	C	2.90
Coeficiente de Poisson (Adimensional)	RL [9]	0.05-0.2
	C	0.256
Módulo de Corte (GPa)	RL	-----
	C	1.15

3.6.3 Cerámicos

KCl

Densidad ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	RL [11]	1100
	C	1100
Velocidad Longitudinal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL	-----
	C	4173.33
Velocidad Transversal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL	-----
	C	1793.69
Módulo de Elasticidad (GPa)	RL [12]	-----
	C	9.86
Coeficiente de Poisson (Adimensional)	RL	-----
	C	0.386
Módulo de Corte (GPa)	RL	-----
	C	3.53

KBr

Densidad ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	RL [11]	2750
	C	2750
Velocidad Longitudinal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL	-----
	C	3494.15
Velocidad Transversal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL	-----
	C	1374.66
Módulo de Elasticidad (GPa)	RL [12]	15.2
	C	14.69
Coeficiente de Poisson (Adimensional)	RL	-----
	C	0.408
Módulo de Corte (GPa)	RL	-----
	C	5.19

KI

Densidad ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	RL [11]	3130
	C	3130
Velocidad Longitudinal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL	-----
	C	2541.08
Velocidad Transversal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL	-----
	C	972.70
Módulo de Elasticidad (GPa)	RL [12]	-----
	C	8.46
Coeficiente de Poisson (Adimensional)	RL	-----
	C	0.413
Módulo de Corte (GPa)	RL	-----
	C	2.96

Al₂O₃

Densidad ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	RL [13]	3980
	C	3980
Velocidad Longitudinal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL	-----
	C	11339
Velocidad Transversal ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	RL	-----
	C	6803.63
Módulo de Elasticidad (GPa)	RL	-----
	C	449.52
Coeficiente de Poisson (Adimensional)	RL [13]	0.26
	C	0.218
Módulo de Corte (GPa)	RL	-----
	C	184.23

Podemos sintetizar los resultados de las mediciones anteriores en la siguiente tabla

Tabla 3.6.4 Valores calculados y reportados de las constantes elásticas de algunos de los materiales empleados

Material	Módulo de elasticidad (GPa)			Módulo de corte (GPa)		
	C	RL	% de dispersión	C	RL	% de dispersión
Acero	207.87	200	3.93	80.90	80	1.12
Aluminio	70.14	70	0.2	26.12	25	4.48
Cobre	123.45	110-120	**	45.85	40-47	*
Latón	105.64	100	5.64	39.02	35	11.48
Nylon	1.90	1.4-2.8	*	1.89	-----	-----
Teflón	2.90	2.76-4.14	*	1.15	-----	-----
KBr	14.69	15.2	3.35	5.19	-----	-----

*Dentro del intervalo

** Ligeramente fuera del intervalo

No se incluyeron las constantes calculadas para todos los casos, debido a que los valores de las constantes elásticas reportadas en la literatura dependen mucho de las características fisicoquímicas del material, véase por ejemplo el caso del cobre, nylon y teflón. Aún así, la dispersión que se obtuvo no es superior al 6% en el Módulo de Young y del 12% en el caso del Módulo de Corte.

Se puede agregar que para una evaluación precisa de este sistema, se tendría que hacer una calibración a partir de mediciones en muestras controladas de acuerdo a sus características fisicoquímicas y cuyas constantes hayan sido medidas por instrumentos calibrados por el Centro Nacional de Metrología (CENAM).

Referencias

- [1] Instruction manual ultrasonic pulser/receiver model 5052PR. Panametrics, Inc.
- [2] Visualscope digital storage oscilloscope user's guide. Keithley Metrabyte division. Keithley Instruments, Inc.
- [3] Aplicación de métodos por ultrasonidos en los ensayos de materiales metálicos. José Ors Martínez
- [4] Introducción a la ciencia de los materiales. William D. Callister Jr. Edit. Reverte, S.A.
- [5] Ultrasonic transducers technical notes. Olympus NDT. 2006
- [6] Medición del módulo de elasticidad en materiales de ingeniería utilizando la técnica de indentación instrumentada y de ultrasonido. J.M. Meza, E.E. Franco, M.C.M. Farias
- [7] Ficha de datos plexiglás. EVONIX Industries
- [8] La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes. Francisco J. Carrion, M. Guadalupe Lomeli G., Juan Antonio Q. Rodríguez, Miguel M. Madrid. Publicación técnica 231
- [9] Physical properties of polymers handbook. James E. Mark. 2a. Edición. Edit. Springer
- [10] Ficha de datos técnicos Teflon. DuPont
- [11] Young's modulus of alkali halides from interionic potential energy functions. P. Mohazzabi, B.O. Okeke, I.P. Ikegwonu. Journal of materials science. 1985
- [12] The measurement of the elastic constants of four alkali halides. S. Hart. Department of natural philosophy, University of Aberdeen. 1968
- [13] Principios de química. Peter William Atkins, Loretta Jones. 3ª Edición. Edit. Medica panamericana
- [14] Resistencia de materiales básica para estudiantes de ingeniería. Salazar Castillo Jorge Eduardo. Universidad Nacional de Colombia. 2007

CAPÍTULO CUATRO

APLICACIONES ESPECIALES DEL SISTEMA ULTRASÓNICO PARA LA MEDICIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS

4.1 Aplicaciones especiales del sistema ultrasónico

El sistema ultrasónico para medir constantes elásticas, se aplicó de manera especial a tres tipos de materiales de interés tecnológico, el primero se refiere a cristales mono y policristalinos de Cloruro de Sodio (NaCl), la segunda aplicación se realizó a muestras de acero sinterizado 316L de interés en la industria nuclear, y por último a una soldadura de acero-cobre realizada por impacto con un cañón neumático.

4.1.1 Aplicación a muestras de Cloruro de Sodio

El sistema fue utilizado como una aplicación especial para la determinación de constantes elásticas en dos cristales de Cloruro de Sodio (NaCl) uno de ellos fue extraído de un domo salino utilizado para el almacenamiento de hidrocarburos [1], y el segundo fue creado en el laboratorio de manera sintética, a este último se le agregó Europio, lo cual le da la característica de luminiscencia sin afectar sus propiedades.

El mineral analizado en este caso corresponde a un estudio sistemático de mecánica de suelos iniciado hace 20 años aproximadamente en la zona de Tuzandepetl Tabasco, para evaluar la posibilidad de construir depósitos naturales para el almacenamiento de hidrocarburos en cavidades practicadas a domos salinos con capacidad de hasta 1 000 000 de metros cúbicos [1].

En este tipo de estudios, para desarrollar los modelos matemáticos necesarios para predecir el comportamiento mecánico de la sal es necesario conocer las propiedades mecánicas que presenta, entre otras, las constantes elásticas del material.

Para mostrar una posible aplicación del sistema de análisis ultrasónico construido, se realizaron mediciones en muestras de un domo salino proporcionado por investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

En esencia, el mineral extraído de uno de los pozos está constituido por cristales de sal de diferentes tamaños, algunos de menos de 1mm y otros de hasta centímetros de largo [1], en la figura 4.1 (a) y (b) se pueden apreciar los cristales extraídos y que se utilizaron en este análisis.

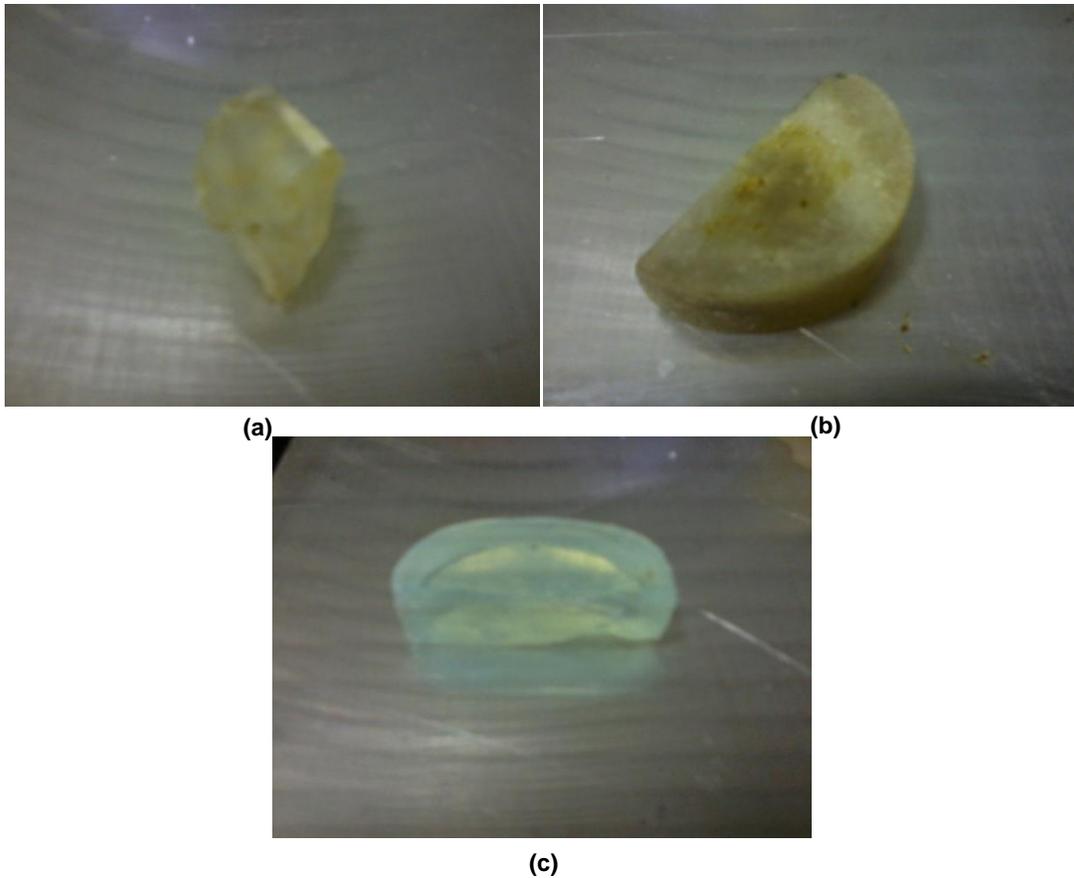


Figura 4.1 Cristales de NaCl natural (a) y (b) y sintético (c)

Para comparar, se midieron las constantes elásticas en monocristales de Cloruro de Sodio sintetizado en el Laboratorio de Crecimiento de Cristales del Instituto de Física de la UNAM, dicho cristal se puede ver en la figura 4.1 (c).

Como en el caso de las muestras del capítulo anterior, se midió la densidad de cada muestra (por el método de Arquímedes por tratarse de muestras con forma irregular), el espesor entre caras planas paralelas y el tiempo de viaje de los pulsos ultrasónicos para calcular la velocidad de las ondas longitudinales y transversales.

Después de aplicar las ecuaciones (1.7), (1.8) y (1.9) descritas en el capítulo 1, registramos los resultados en las siguientes tablas.

Tabla 4.1 Módulos de elasticidad calculados para muestras de Cloruro de Sodio

Muestra de Cloruro de Sodio	Módulo de Young (GPa)	Módulo de corte (GPa)
Policristalino	37.50	15.13
Monocristalino	258.59	99.01
Sintético	36.01	13.42

En la tabla 4.1 es claro que el Cloruro de Sodio policristalino y el sintético presentan valores de las constantes elásticas del mismo orden, no así el monocristal extraído del domo salino en el cual se observa un incremento muy acentuado, para explicar esto sería necesario hacer un estudio detallado de la composición y la microestructura de estos monocristales asunto que no es motivo del presente trabajo, sin embargo queda de manifiesto que esta técnica resulta ser un auxiliar para explicar propiedades físicas de materiales naturales.

4.1.2 Aplicación a muestras sinterizadas de Acero 316L

El acero 316L, es ampliamente utilizado en la industria alimenticia y farmacéutica, en las líneas de producción, almacenamiento de alimentos procesados y de fármacos, por su alta resistencia a la corrosión.

Desde hace muchos años, este acero es empleado en la industria nuclear para la construcción de diversos componentes que van desde tuberías para la conducción del agua desmineralizada de los intercambiadores de calor hasta los tubos de almacenamiento del combustible de dióxido de uranio que se colocan en el núcleo del reactor [2].

En muchos laboratorios de investigación del área de materiales, existen proyectos para desarrollar nuevos dispositivos fabricados de este tipo de acero, aplicando lo que se conoce como metalurgia de polvos.

Para mostrar otra de las posibles aplicaciones del sistema de ultrasonido que se describe en el presente trabajo, se realizaron una serie de mediciones de las constantes elásticas de tres pastillas de acero 316L sinterizadas bajo condiciones diferentes, las pastillas fueron facilitadas por el área de materiales del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

En la figura 4.2 se muestran las pastillas utilizadas durante el análisis.

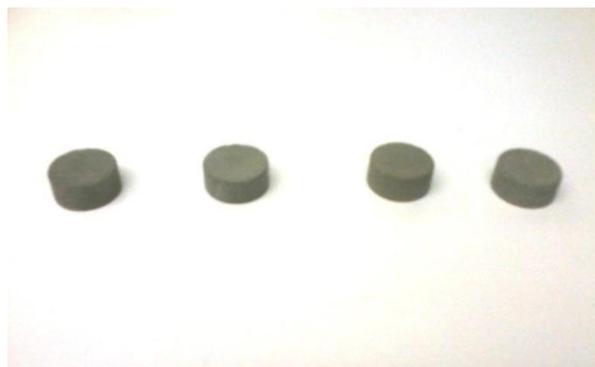


Figura 4.2 Muestras de Acero sinterizado

Las condiciones de sinterizado y la densidad medida se muestran en la tabla 4.2.1.

Tabla 4.2.1 Condiciones de sinterizado y densidad medida de las muestras de acero 316L

Muestra	Precompactación	Temperatura de tratamiento °C	Tiempo de tratamiento (horas)	Densidad ($\frac{kg}{cm^3}$)
1	16 toneladas	1300	1	6755
2	16 toneladas	1300	2	7009
3	16 toneladas	1300	3	7045

Para la determinación del volumen y la densidad fueron obtenidos de la misma forma que se hizo para las muestras en metales y polímeros, así mismo, se aplicaron las ecuaciones (1.7), (1.8) y (1.9) descritas en el capítulo uno para calcular las constantes elásticas. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 4.2.2.

Tabla 4.2.2 Constantes elásticas de las muestras de acero 316L sinterizadas.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Velocidad Longitudinal ($\frac{m}{s}$)	4918.18	5104.76	4863.63
Velocidad Transversal ($\frac{m}{s}$)	2705	2821.05	2815.78
Modulo de Elasticidad (GPa)	126.87	142.83	139.65
Coefficiente de Poisson (Adimensional)	0.28	0.28	0.24
Modulo de Corte (GPa)	49.43	55.77	55.85

Tabla 4.2.3 Datos comparativos de muestras sinterizadas de acero 316L

Muestra de Acero 316L	Tiempo de tratamiento (horas)	Módulo de elasticidad (GPa)	Módulo de corte (GPa)
1	1	126.87	49.43
2	2	142.83	55.77
3	3	139.65	55.85

En la tabla 4.2.3 aparecen registrados el módulo de corte y el módulo de elasticidad de las muestras de acero 316L que fueron sometidas a un proceso de sinterizado, es claro que a partir de las 2 horas de tratamiento, los valores de las constantes elásticas se estabilizan, tal como sucede con la densidad, con lo cual se deduce que para modificar las constantes elásticas sería necesario un tratamiento a mayor temperatura de las mismas.

La técnica de ultrasonido resulta ser un auxiliar para explicar y decidir que tipo de tratamientos adicionales podrían darse durante el proceso de sinterizado de polvos metálicos.

4.1.3 Aplicación a soldadura por impacto de acero y cobre

La tercera aplicación del dispositivo de ultrasonido para medir constantes elásticas fue en soldaduras generadas por impacto con un cañón neumático que dispara proyectiles a velocidades de hasta $1 \frac{km}{seg}$.

Este tipo de estudios forma parte de un proyecto relacionado con el proceso de “Reacciones químicas y transformaciones de fase inducidas por ondas de choque en materiales” que forma parte de los proyectos de investigación del Laboratorio de altas presiones del Instituto de Física de la UNAM.

En general las soldaduras entre metales se da mediante procesos de fusión, por descarga eléctrica o por flama (acetileno, hidrógeno, etc.) entre dos metales cuyos puntos de fusión son similares o por la fusión de un material de aporte (eutéctico de fusión) de características físico-químicas parecidas a los metales que se desean soldar.

Sin embargo, para ciertas aplicaciones tecnológicas, cuando es necesario soldar materiales tan disímiles como el acero con el cobre o con el aluminio, esto se consigue a través del impacto directo entre los metales.

En la figura 4.2.1 se muestran una serie de soldaduras hechas al impactar dos placas de acero y cobre de 5mm de espesor a diferentes velocidades (entre 400 y 600 $\frac{m}{s}$) con una inclinación de 25° [3].



Figura 4.2.1 Muestras de soldadura por impacto de acero y cobre

Se realizaron mediciones de las constantes elásticas en dirección perpendicular al plano de la soldadura para un caso de 580 $\frac{m}{s}$. No fue posible hacerlo en las dos direcciones a lo largo del plano de la soldadura por no contar con sensores de ultrasonido de menor tamaño.

En la tabla 4.3 se muestran los valores correspondientes a este experimento.

Tabla 4.3 Resultados obtenidos para la Soldadura por impacto de acero y cobre

Densidad ($\frac{kg}{m^3}$)	C	8984.59
Velocidad Longitudinal ($\frac{m}{s}$)	C	5228.57
Velocidad Transversal ($\frac{m}{s}$)	C	2678.04
Modulo de Elasticidad (GPa)	C	170.49
Coficiente de Poisson (Adimensional)	C	0.32
Modulo de Corte (GPa)	C	64.43

Tabla 4.3.1 Datos comparativos de materiales utilizados en la soldadura

Muestra	Módulo de elasticidad (GPa)	Módulo de corte (GPa)
Acero	207.87	80.90
Cobre	123.45	45.85
Soldadura acero y cobre	170.49	64.43

Al revisar los datos de la tabla 4.3.1, como era de esperarse, las constantes elásticas toman valores intermedios respecto al acero y al cobre. Como se mencionó, la medición interesante sería en dirección a lo largo de la soldadura. Sin embargo, para algunas aplicaciones de este tipo de acoplamientos es necesario conocer las constantes elásticas tal como se realizó la medición.

Estamos pensando por ejemplo en un ensamble de metales que trabajen como los muelles de los automóviles, se podrían soldar metales de alta resistencia con metales flexibles más ligeros por ejemplo.

Referencias

[1] Diseño de almacenamientos en domos salinos. Martínez Rodríguez Juan Manuel. Facultad de Ingeniería. UNAM

[2] Ingeniería de reactores nucleares. Samuel Glasstone, Alexander Sesonske. Edit. Reverte

[3] Caracterización morfológica de la soldadura por impacto en los sistemas cobre-acero y acero-cobre. Gerardo Meza Salazar. 2010.

CAPÍTULO CINCO

CONCLUSIONES

De este ejercicio de instrumentación es posible concluir lo siguiente:

- Con elementos, instrumentos y sensores existentes en el almacén del Laboratorio de Metalurgia del IFUNAM, se adaptó y recuperó un dispositivo para determinar constantes elásticas de sólidos; cristalinos y amorfos, cerámicos, polímeros y metálicos.
- A partir de las mediciones y cálculos realizados se puede concluir que el sistema opera satisfactoriamente. Debido a que la dispersión en los resultados presentó un 6% en el caso del módulo de Young y 12% en el caso del módulo de corte
- Sin embargo para calibrarlo se tendría que hacer a partir de mediciones en muestras controladas en cuanto a sus características fisicoquímicas y cuyas constantes hayan sido medidas por instrumentos calibrados por el Centro Nacional de Metrología (CENAM).
- Al aplicarlo a materiales específicos, se mostró la utilidad y la variedad de problemas de interés tecnológico en campos como la industria nuclear, la industria petrolera, la industria metalmeccánica (área de soldaduras por impacto), en investigación en geología y ciencia e ingeniería de materiales.

Finalmente, con algunas modificaciones, tales como el uso de otro tipo de sensores (de menores dimensiones o de mayor frecuencia de operación), sería posible aplicarlo a la detección de defectos e imperfecciones (huecos o grietas) en materiales, lo cual es muy útil para evaluar la integridad estructural de materiales que se usan en diferentes industrias como la de la construcción, la automotriz, la naval, la aeronáutica, etc.