



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
CAMPUS ARAGÓN**

**“MANUAL DE ULTRASONIDO INDUSTRIAL Y  
LIQUIDOS PENETRANTES”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A :  
**LUIS RENÉ CAZARES ORTIZ**

ASESOR :  
DR. EN I. JAVIER JIMÉNEZ GARCÍA

MÉXICO

2005

m. 342424



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

**Índice.**

**Simbología.**

**Introducción.** 1

<b>I. Ultrasonido industrial.</b>	<b>3</b>
I.1. Generación de ondas ultrasónicas por medio de transductores y materiales piezoeléctricos.	5
I.2. Efectos físicos para la generación de ondas ultrasónicas.	7
I.3. Transductores.	8
I.3.1. Clasificación de los transductores.	10
I.3.1.1. Transductor de acuerdo al grado de amortiguamiento.	10
I.3.1.2. Transductores de acuerdo al número de cristales.	12
I.3.1.3. Transductores de acuerdo por sus aplicaciones especiales.	13
I.4. Palpadores de acuerdo a la forma de propagación.	15
I.5. Comportamiento y tipos de ondas ultrasónicas.	17
I.6. Descripción de la onda incidente perpendicular o normal.	21
I.7. Descripción de la onda incidente angular.	22
I.8. Ley de Snell (Ley de la reflexión y de la refracción).	23
I.9. Descripción del comportamiento del haz ultrasónico.	25
I.10. Principales parámetros en un sistema ultrasónico de tipo pulso-eco.	29
I.11. Efectos físicos presentados en ultrasonido industrial.	31
I.12. Términos utilizados en la detección de las discontinuidades por ultrasonido Industrial.	33

I.13.	Interpretación de la presentación de indicaciones en la pantalla A-Scan del equipo ultrasónico.	36
I.14.	Efecto de las características del sistema de ensayo por ultrasonido industrial.	38
<b>II.</b>	<b>Líquidos penetrantes.</b>	<b>43</b>
II.1.	Propiedades físicas de los líquidos penetrantes.	45
II.2.	El proceso de los líquidos penetrantes.	47
II.3.	Interpretación de las indicaciones.	58
II.3.1.	Apariencia de las indicaciones.	59
II.3.2.	Nitidez de las indicaciones.	59
II.3.3.	Brillantez y extensión de las indicaciones.	59
II.3.4.	Persistencia de las indicaciones.	59
II.4.	Evaluación de las indicaciones.	60
II.5.	Tipos de líquidos penetrantes.	60
II.5.1.	Penetrante fluorescente removible con agua, método A tipo 1.	61
II.5.2.	Penetrante fluorescente posemulsificable, método A tipo 2.	63
II.5.3.	Penetrante fluorescente removible con solvente, método A tipo 3.	65
II.5.4.	Penetrante contrastante (Visible) lavable con agua, método B tipo 1.	66
II.5.5.	Penetrante contrastante (Visible) posemulsificable, método B tipo 2.	67
II.5.6.	Penetrante contrastante (Visible) removible con solvente, método B tipo 3.	68

II.6.	Funciones del inspector y terminología utilizada en la interpretación y evaluación de indicaciones.	70
<b>III</b>	<b>Manual de ultrasonido industrial y líquidos penetrantes.</b>	<b>73</b>
III.1.	Componentes del equipo ultrasónico tipo pulso-eco, "Sonic 1200".	73
III.2.	Lista de chequeo de inspección inicial.	74
III.3.	Accesorios requeridos para la calibración del equipo ultrasónico empleando incidencia angular para detectar discontinuidades en zonas soldadas.	74
III.3.1.	Localizar el punto de entrada del sonido del transductor hacia el material de inspección.	77
III.3.2.	Localizar el ángulo refractado.	81
III.3.3.	Calibración por distancia.	82
III.3.4.	Calibración por sensibilidad.	83
III.4.	Trazabilidad de zonas de rastreo sobre la superficie del espécimen a inspección.	85
III.4.1.	Formas de rastreabilidad en la zona de barrido.	88
III.5.	Evaluación de una discontinuidad.	90
III.5.1.	Lista de chequeo de inspección inicial.	91
III.5.2.	Detección de discontinuidades empleando haz recto mediante el método de área-amplitud.	97
<b>IV</b>	<b>Análisis de resultados.</b>	<b>99</b>
IV.1.	Evaluación de la discontinuidad encontrada.	101
IV.2.	Evaluación de una discontinuidad empleando haz recto mediante el método de área amplitud.	103

IV.3. Práctica para detectar discontinuidades mediante la técnica de líquidos penetrantes.	105
<b>Conclusiones.</b>	110
<b>Glosario de términos.</b>	111
<b>Bibliografía.</b>	115

## Simbología y abreviaturas.

Símbolo	Significado	Unidades SI y SA
$\alpha$	Angulo de incidencia	Grados
A	Amplitud	% de la EVP
a	Nivel de indicación	dB
A	Area	in
b	Nivel de referencia	dB
$\beta$	Angulo de reflexión	Grados
$\beta_2$	Angulo de incidencia de la zapata	Grados
$\beta_L$	Angulo de reflexión de la onda longitudinal reflejada	Grados
$\beta_T$	Angulo de reflexión de la onda transversal reflejada	Grados
c	Factor de atenuación	dB
d	Diámetro efectivo del transductor	in
D.A.	Distancia angular	in
d2	Indicación crítica	dB
Di	Diámetro de la indicación a ser valuada	in
Dr	Diámetro de referencia	in
Dbi	Valor absoluto de decibeles	dB
E	Módulo de elasticidad	lbs/in <sup>2</sup>
e	Energía acústica específica	ws/m <sup>3</sup>
$\epsilon$	Deformación unitaria	%

F	Frecuencia	Hertz (Hz)
G	Módulo de corte	lbs/in <sup>2</sup>
I	Intensidad acústica	w/m <sup>2</sup>
li	Intensidad de la onda incidente	w/m <sup>2</sup>
lr	Intensidad de la onda reflejada	w/m <sup>2</sup>
lt	intensidad de la onda transmitida	w/m <sup>2</sup>
$\lambda$	Longitud de onda	in
$\eta$	Discontinuidad más pequeña que puede detectar el equipo ultrasónico	in
Ni	Nivel de indicación	dB
NR	Nivel de referencia	dB
$\sigma$	Esfuerzo de tracción o compresión	lbs/in <sup>2</sup>
P	Presión acústica	N/m
P	Pulso	ns
r	Radio efectivo del transductor (Diámetro del cristal)	in
$\delta$	Densidad del material	lbs/in <sup>3</sup>
$\tau$	Esfuerzo de corte	lbs/in <sup>2</sup>
$\theta$	Angulo de transmisión o de refracción	Grados
$\theta_L$	Angulo de refracción de la onda longitudinal refractada	Grados
$\theta_T$	Angulo de refracción de la onda transversal refractada	Grados
$\mu$	Coefficiente de poisson	%
V	Voltaje	Volts

V	Velocidad acústica en el material de prueba	in/ $\mu$ s
VL	Velocidad longitudinal	in/ $\mu$ s
Vm	Velocidad máxima de vibración del material	in/ $\mu$ s
Vs	Velocidad superficial	in/ $\mu$ s
VT	Velocidad transversal	in/ $\mu$ s
$\gamma$	Deformación de corte unitaria	%
Z	Impedancia acústica	Kg/m <sup>2</sup> • s

## Introducción.

El objetivo del siguiente trabajo es para dar a conocer y explicar a todo aquel interesado, en las áreas de ingeniería dos tipos de ensayos no destructivos, el ultrasonido industrial y los líquidos penetrantes, que no han sido comúnmente aplicados dentro de la industria mexicana, debido a la elevada inversión de equipo, pero sobretodo a la falta de personal capacitado y calificado para llevar a cabo inspecciones y evaluaciones con estos tipos de pruebas.

Los ensayos no destructivos son un campo de la ingeniería que nos permite inspeccionar, identificar y evaluar discontinuidades de materiales que se encuentran en la fabricación y/o construcción de componentes, subensambles, equipos e instalaciones y cuya finalidad es saber interpretar la sanidad estructural y decidir si el material en proceso o servicio es apto para realizar la función a la que fue diseñada.

Las pruebas no destructivas son la aplicación de métodos físicos indirectos, como es la transmisión del sonido, la opacidad al paso de la radiación, etc., y que tienen la finalidad de verificar la sanidad de las piezas examinadas. No obstante, cuando se aplica este tipo de pruebas no se busca determinar las propiedades físicas inherentes de las piezas, sino verificar su homogeneidad y continuidad.

Las pruebas no destructivas, como su nombre lo indica, no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material. Por ello, las piezas que son sometidas a los ensayos correspondientes no afectan de manera permanente las propiedades de los materiales que las componen.

En el caso del ultrasonido industrial una de las grandes aplicaciones es la inspección de uniones soldadas, la técnica varía de acuerdo al tipo de material que incluye su espesor, el proceso de unión y los requerimientos de código y en ocasiones los requerimientos propios del cliente contratante del servicio.

Cabe mencionar que con este tipo de inspección se solucionan muchas restricciones tanto en tiempo de resultados como en equipo de trabajo, ya que es un equipo portátil, que no ocupa tanto espacio, no teniendo que pasar por diferentes tipos de proceso para obtener resultados como la radiografía industrial. Los materiales consumibles son más accesibles y baratos que otros tipos de prueba y con su aplicación se pueden obtener la clasificación de la discontinuidad encontrada, su ubicación precisa, dirección y profundidad.

Con los líquidos penetrantes no se puede determinar la profundidad de la discontinuidad encontrada, pero sí su ubicación real y que tipo de defecto está presente tomando en cuenta que se debe tener una buena preparación teórica y práctica para su realización.

La ventaja de esta inspección es que el equipo y material consumible es relativamente barato y nos puede ayudar a minimizar problemas en las etapas de proceso de fabricación permitiendo la toma de acciones preventivas en la industria, reduciendo con esto costos en horas hombre.

Si bien los ensayos no destructivos son relativamente fáciles de aplicar, no obstante se requiere que el personal que los realice haya sido debidamente capacitado, calificado y que cuente con la experiencia necesaria a fin de que se interpreten y evalúen correctamente los resultados.

Por ello la aportación esencial de esta investigación fue la de elaborar un manual de ultrasonido industrial y líquidos penetrantes, para que las futuras generaciones de ingenieros aragoneses que cuentan con el equipo disponible en el centro tecnológico del campus Aragón, estudien una rama de la ingeniería que no es muy conocida y mucho menos en términos de práctica, ya que como experiencia personal en la industria metal-mecánica este tipo de ensayos no destructivos son muy requeridos en los procesos de fabricación industrial, pero como se mencionó anteriormente no hay suficiente personal capacitado para ello.

Sin embargo, con este manual los alumnos de la ENEP - Aragón tendrán la oportunidad de conocer el equipo, manejarlo, interpretarlo y evaluar discontinuidades reales que se presentan en el campo laboral, para que con el conocimiento profundo de estas dos técnicas, no vean limitadas sus oportunidades de realización profesional, ya que en empresas certificadas este tipo de cursos son altamente cotizados, aunado a que la mayoría de los empresarios no fomentan la capacitación de su personal en estas áreas.

## I. Ultrasonido industrial.

Los ensayos no destructivos son técnicas de inspección que se utilizan para verificar la sanidad interna de los materiales, sin deteriorarlos ni alterar o afectar de forma permanente sus propiedades, sean éstas físicas, químicas o mecánicas.

Dentro de la industria moderna, una tecnología ampliamente desarrollada para tal fin es la aplicación del ultrasonido.

Así, existen varias ramas de aplicación del ultrasonido como son:

En Ingeniería médica:

- 1.-tratamiento del Cáncer.- Por efecto de resonancia.
- 2.-Cirugía ultrasónica.- Por efecto de calor.
- 3.-Tratamiento de la artritis.
- 4.-Corte ultrasónico del hueso.- Se efectúa de 20 a 50 Mhz.

En ingeniería Industrial:

- 1.-Pruebas no destructivas.- Rectificación de piezas.
- 2.-Limpieza ultrasónica.- Para quitar grasa en materiales.
- 3.-Perforación ultrasónica.- Para zonas de difícil acceso.
- 4.-Medición industrial de espesores y detección de burbujas, grietas y otras.
- 5.-Verificación de la sanidad interna de soldadura en piezas metálicas.

En ingeniería química:

- 1.-Emulsificación.- Mezclas químicas.
- 2.-Desgasificación de líquidos y metales fundidos.
- 3.-Activación de reacciones químicas, ruptura de macromoléculas.

El ultrasonido es una vibración mecánica con un rango mayor al audible por el oído humano, la cual se transmite a través de un medio físico y es orientado, registrado y medido en hertz con la ayuda de un aparato creado para ese fin, [1],[5].

Para comprender mejor el concepto de ultrasonido, es necesario revisar la información concerniente del análisis de las ondas de sonido, la cual es expresada en términos de frecuencias, que son:

### 1) Infrasonica.

Son vibraciones mecánicas comprendidas entre el rango de frecuencia de 1 a 16 ciclos por segundo (c/s) o Hertz (Hz).

## 2) Sónica o audible.

Estas vibraciones mecánicas están comprendidas entre el rango de 16 Hertz y 20 Khz. Cabe recordar que una onda es audible no sólo por su frecuencia sino también por su intensidad que se mide en decibelios.

## 3) Ultrasónica.

Las ondas ultrasónicas son las que comprenden vibraciones mecánicas mayores de 20 Khz. El límite superior no está definido físicamente.

Las frecuencias utilizadas en ensayos no destructivos para el control de discontinuidades, comienzan en la proximidad de la zona audible y se extienden hasta los 25 Mhz. En el caso de los materiales metálicos, las frecuencias utilizables varían entre 0.2 Mhz y 25 Mhz, [1],[4],[5].

El principio en el que se basa el método de inspección por ultrasonido es la impedancia acústica ( $Z$ ), que es la resistencia que oponen los materiales al paso de una onda ultrasónica y es igual al producto de la velocidad de propagación de un modo de vibración dado por la densidad del material.

Para realizar la prueba de ultrasonido, el sonido es transmitido a través del material de prueba por medio de un transductor ultrasónico. La interacción de ese sonido con el material puede indicar la velocidad, densidad, espesor y por supuesto, la presencia de anomalías como son las discontinuidades o fallas del mismo.

Los elementos esenciales del sistema de la prueba por ultrasonido son:

- 1.- Equipo electrónico de ultrasonido tipo pulso-eco.
- 2.- Cable coaxial.
- 3.- Transductor.
- 4.- Material a inspeccionar.

Los tres primeros elementos constituyen el medio de inspección, mientras que el cuarto es el objeto sujeto a examen.

Así, existen varios tipos de instrumentos ultrasónicos que son:

- a) Picha y Cacha (pitch-Catch). Aquí se utilizan dos transductores, uno envía el pulso (transmisor) y el otro recibe (receptor), ambos transductores se localizan en una misma superficie.
- b) Transmisión a través (Through transmission). También se utiliza un transductor transmisor y un transductor receptor, solo que en este caso se encuentran localizados en superficies opuestas. En este modo de inspección el pulso viaja a través de la pieza inspeccionada y es recibido en la superficie opuesta al transmisor.

- c) Pulso-Eco. En general, hoy en día las inspecciones por ultrasonido se realizan por la técnica pulso-eco. Esta técnica consiste en enviar un pulso acústico que viaja a través del medio de inspección hasta que un cambio en la impedancia acústica provoca que sea reflejado ocasionando que regrese para que posteriormente sea recibido. Normalmente, la señal recibida indica la presencia de discontinuidades y contiene información sobre la distancia recorrida por el pulso.

Así, el equipo electrónico de ultrasonido tipo pulso-eco genera pulsos eléctricos muy breves, del orden de microsegundos.

Los pulsos eléctricos generados por el equipo son conducidos por el cable coaxial hasta el transductor, el cual mediante un cristal que tiene propiedades piezoeléctricas las transforma en vibraciones mecánicas con frecuencias entre los 0.20 y 25 Mhz. Estas vibraciones son transmitidas al material en examinación, donde se propagan y reflejan en la superficie opuesta, o bien, pueden ser reflejadas, atenuadas o dispersadas por una discontinuidad.

Así, los pulsos reflejados son captados por el transductor, el cual los transforma en pulsos eléctricos que son analizados y representados en una pantalla, en una gráfica o en un digitalizador de imágenes, en el cual se visualiza en tiempo real el pulso inicial, el pulso de la reflexión proveniente de la pared posterior y las reflexiones provenientes de las discontinuidades presentes en el material.

Dichas reflexiones se localizarán entre el pulso inicial y el reflejo de la pared posterior, en una posición de la pantalla que es proporcional a la magnitud y a la localización de la discontinuidad en el espesor del objeto, [1],[3],[5],[13].

Así, en el campo de la ingeniería el más utilizado es aquel que tiene la función de detectar la presencia de un deflector, que puede ser, una discontinuidad física en el material de prueba, una inclusión de material extraño o simplemente el reflejo de la pared posterior a la de incidencia y que son transmitidos y medidos por amplitud y tiempo a través de este tipo de instrumento, [1],[3],[5].

#### **1.1. Generación de ondas ultrasónicas por medio de transductores y materiales piezoeléctricos.**

Una parte vital en el sistema de inspección por ultrasonido es el transductor, ya que por medio de éste, la energía eléctrica se convierte en energía mecánica (ondas sonoras) o viceversa. Esto opera debido al efecto piezoeléctrico, el cual consiste en que ciertos cristales cuando se tensionan, se polarizan eléctricamente y generan voltaje eléctrico entre las superficies opuestas.

Los cristales son átomos arreglados en un patrón tridimensional definido.

Existen 32 clases diferentes y 20 de éstas son piezoeléctricas, de las cuales 10 se polarizan espontáneamente. En el último caso, algunos de los materiales cambian

su dirección de polarización cuando se les aplica un campo eléctrico y son llamados ferroeléctricos por analogía con los materiales ferromagnéticos que se magnetizan espontáneamente.

La mayoría de los transductores usados en ultrasonido son del tipo ferroeléctrico y se conocen como cerámicos, debido a que sus propiedades físicas y mecánicas son comparables a las del material del mismo nombre.

Se emplean por su alta eficiencia, en la conversión de la energía eléctrica en ondas ultrasónicas las cuales se describirán a continuación:

a) Cuarzo.

Se obtiene a partir de cristales naturales. Posee excelentes características de estabilidad térmica, química y eléctrica.

Es muy duro y resistente al desgaste y es el menos eficiente de los generadores de energía acústica. Requiere alto voltaje para su manejo a bajas frecuencias.

b) Sulfato de Litio.

Este material se considera como uno de los receptores más eficientes, No envejece y es poco afectado por la interferencia en el modo de conversión.

Sus desventajas son que es muy frágil, soluble en agua y se debe emplear a temperaturas menores de 75 °C.

c) Cerámicos polarizados.

Estos transductores se obtienen por sinterización y se polarizan durante el proceso de fabricación. Se consideran como los generadores más eficientes de energía ultrasónica cuando operan a bajos voltajes de excitación. Sus principales limitaciones son: resistencia mecánica relativamente baja, en algunos casos existe interferencia en el modo de conversión, presentan tendencia al envejecimiento, además poseen menor dureza y resistencia al desgaste que el cuarzo.

Los materiales de este tipo utilizados con mayor frecuencia son:

1) Titanato de bario.

Se considera buen emisor debido a su elevado módulo piezoeléctrico. Sus limitaciones más importantes son: problemas de acoplamiento y amortiguación, su empleo está limitado a frecuencias menores de 15 Mhz. debido a su baja resistencia mecánica y alta impedancia acústica, presenta

interacción entre varios modos de vibración y la temperatura de su punto de Curie es de 115-150 °C.

## 2) Metaniobato de Plomo.

Presenta un módulo piezoeléctrico elevado, lo que lo califica como buen emisor. Posee excelente estabilidad térmica, lo que le permite ser elevados a altas temperaturas. Una de sus limitaciones es que presenta una baja frecuencia fundamental y una mala resistencia mecánica, por lo que se aplica principalmente a frecuencias altas. Otra limitante es que presenta interacción entre varios modos de vibración.

## 3) Zirconato de Plomo.

Se considera como el mejor emisor por su alto módulo piezoeléctrico. Sin embargo, es el más difícil de amortiguar por su alto coeficiente de deformación. Se recomienda su empleo cuando existen problemas de penetración en zonas soldadas, [1], [5].

### **I.2. Efectos físicos para la generación de ondas ultrasónicas.**

La generación de ondas ultrasónicas puede realizarse por diversos medios o efectos físicos. Sin embargo, se describirán sólo los principales: piezoelectricidad, electrostricción y la magnetostricción.

#### a) Piezoelectricidad.

La piezoelectricidad fue descubierta en 1880 por Pierre y Marie Curie, quienes descubrieron que algunos materiales como el cuarzo, al ser sometidos a una presión mecánica externa, producen cargas eléctricas sobre su superficie.

En 1881, Lippman descubrió el efecto contrario y predijo que al aplicar una corriente eléctrica al material se produce deformación mecánica.

Como se puede observar, la piezoelectricidad puede ser un fenómeno reversible, porque al producir una deformación mecánica en un cristal, se provocan cargas eléctricas sobre sus caras (efecto piezoeléctrico directo); por otra parte, si al cristal se le aplica una corriente eléctrica sobre sus caras, se producirá una deformación mecánica (efecto piezoeléctrico invertido).

Ambos efectos (piezoeléctrico directo e invertido) son proporcionales, ya sea con la cantidad de energía eléctrica o con la deformación aplicada.

El "efecto piezoeléctrico invertido" se utiliza para la generación de ondas ultrasónicas.

## b) Electrostricción.

La electrostricción presenta dos diferencias fundamentales con la piezoelectricidad, la primera es la deformación relativa que no es proporcional al campo eléctrico, y la segunda es que siempre se produce una deformación, aún si se invierte la polaridad de la tensión aplicada.

Para utilizar este efecto en la generación de ondas ultrasónicas, es necesario modificar la estructura de los materiales electrostrictivos y convertirlos en piezoeléctricos por cualquiera de los dos métodos siguientes:

- 1) Aplicar corriente continua al cristal para orientar todos los dominios en una dirección.
- 2) Calentar el material sobre su temperatura Curie (arriba de la cual la estructura pierde sus propiedades ferroeléctricas) y aplicar un voltaje de aproximadamente 100 volts por milímetros de espesor durante el enfriamiento para fijar los dominios en una orientación preferente.

## c) Magnetostricción.

El efecto magnetostrictivo directo consiste en la orientación preferente de los dominios magnéticos bajo la acción de un campo magnético externo, dicha orientación provoca la deformación del material. El efecto magnetostrictivo recíproco consiste en la generación de campos magnéticos debido a la deformación de los materiales.

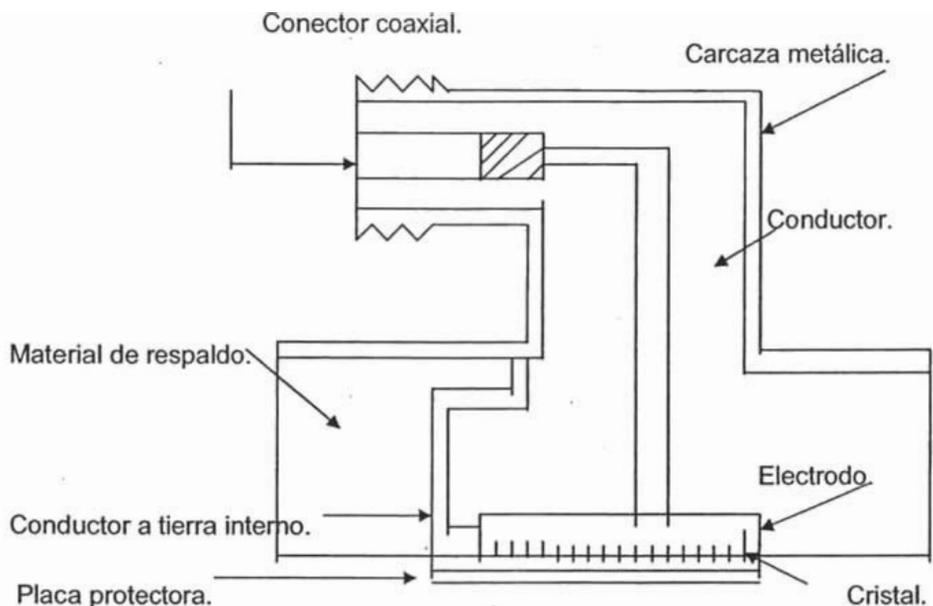
Entre estos materiales se encuentran el níquel y sus aleaciones, los aceros y las ferritas. La ventaja de estos materiales, en comparación con los piezoeléctricos, es la alta temperatura de su punto de Curie.

De los tres efectos descritos, el piezoeléctrico es el más utilizado para la generación y recepción de ondas ultrasónicas, [1],[5],[11].

## 1.3. Transductores.

En el campo por inspección ultrasónica se define como palpador (sonda o unidad de búsqueda) al arreglo que permite la manipulación del transductor para efectuar la inspección. Así mismo se define como transductor a aquel elemento que tiene por función transformar energía mecánica en energía eléctrica o viceversa, que es el caso de los cristales piezoeléctricos.

Las partes básicas de un transductor se muestra en la figura 1 y cada una de ellas se describe a continuación:



**Figura 1.** Componentes de un transductor de onda longitudinal.

a) Carcasa metálica.

Es un envoltorio que sirve como blindaje y proporciona la resistencia mecánica.

b) Cristal.

El cristal es una pequeña placa de material piezoeléctrico y que es el elemento principal del palpador.

c) Electrodo.

Los electrodos son placas conductoras de la corriente eléctrica que se encuentran en las caras del cristal.

d) Placa protectora.

La presencia de una placa protectora en el transductor depende de las propiedades físicas y de la resistencia mecánica del cristal al desgaste con la superficie de prueba.

e) Material de respaldo.

El material de respaldo sirve como soporte del cristal y como amortiguador mecánico y acústico. Se encuentra adherido firmemente al cristal por la cara opuesta a la de contacto y tiene dos funciones:

1.- Amortiguar las vibraciones por la inercia del cristal para evitar que vibre libremente al ser excitado.

2.- Absorber las vibraciones generadas en el sentido opuesto al deseado, [2],[8],[11].

### **I.3.1. Clasificación de los transductores.**

Basándose en ensayos realizados por la American Society for Nondestructive Testing (ASNT), los transductores se clasifican de acuerdo a:

- a) El grado de amortiguamiento del transductor.
- b) La forma de propagación del haz.
- c) El número de cristales.
- d) Por aplicaciones especiales.

#### **I.3.1.1. Transductor de acuerdo al grado de amortiguamiento.**

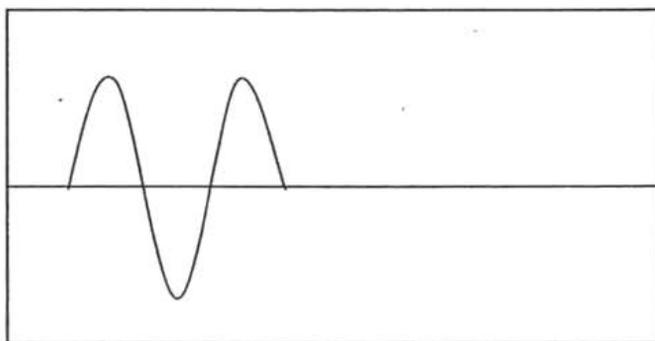
En el caso del grado de amortiguamiento, el transductor es de:

- a) Banda ancha.
- b) Banda angosta.

El ancho de la banda significa la gama de frecuencias que son iguales o mayores al 70% de la frecuencia central.

- a) Transductor de banda ancha.

Cuando el cristal está fuertemente amortiguado se obtienen pulsos cortos, figura 2.



**Figura 2.** Pulso ultrasónico de banda ancha.

Las características principales de este tipo de transductores son:

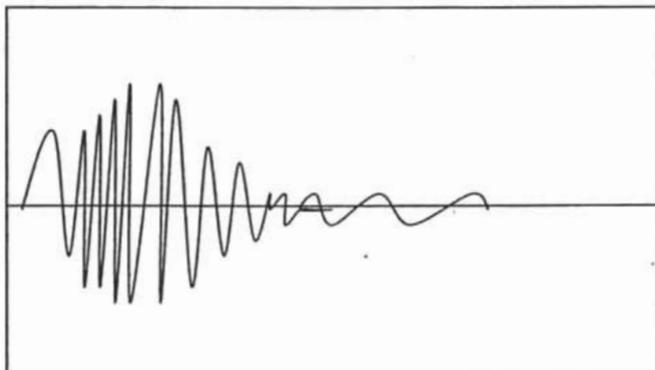
1. Reducción del campo muerto.
2. Pulsos acústicos de corta duración, de uno o dos ciclos de vibración.
3. Elevado poder de resolución que permite realizar mediciones de tiempo de recorrido sumamente exactas.
4. Menor sensibilidad.
5. Menor poder de penetración.
6. Mayor atenuación.

b) Transductor de banda angosta.

Cuando el cristal esta poco amortiguado el pulso es largo y en consecuencia, su espectro de frecuencias es más amplio y se encuentra situado cerca de la frecuencia de resonancia del cristal, figura 3.

Las características principales de este tipo de transductores son las siguientes:

1. Incremento del campo muerto.
2. Pulsos acústicos de larga duración, de dos a cinco ciclos de vibración.
3. Mayor sensibilidad.
4. Mayor poder de penetración.
5. Menor atenuación.



**Figura 3.** Pulso ultrasónico de banda angosta.

Es importante destacar que al incrementarse el amortiguamiento se reduce la sensibilidad del transductor y esto eleva el poder de resolución siempre y cuando haya pulsos de corta duración.

El amortiguador del cristal es un elemento indispensable en los equipos que operan por el método de pulso-eco, teniendo las siguientes características:

1. Reducir el tiempo de oscilación del cristal.
2. Absorber las ondas que pudieran interferir el oscilograma.
3. Soportar mecánicamente el cristal piezoeléctrico.

Posiblemente de estas tres características la más importante sea la primera; ya que la duración del pulso acústico define la llamada zona muerta o campo muerto.

### **I.3.1.2. Transductores de acuerdo al número de cristales.**

Así mismo, con base en el número de cristales piezoeléctricos que llevan incorporados se consideran los siguientes tipos, que a continuación se describen:

1. Transductores con un solo cristal que actúa como emisor y/o receptor, (cristal único E+R).
- 2- Doble cristal, uno emisor y otro receptor.
3. Cristal múltiple.

- 1.- Transductor de cristal único (tipo E+R).

Este tipo de Transductores se componen de un solo cristal piezoeléctrico que realiza las funciones de emisor y receptor y que se componen de las siguientes partes:

- a) Un cristal piezoeléctrico.
- b) Una caja o montura metálica que protege el conjunto, además del amortiguador del cristal.
- c) Un hilo conductor eléctrico y,
- d) Una conexión.

Este transductor es frecuentemente empleado en las aplicaciones generales.

Un buen transductor de cristal sencillo debe poseer alta sensibilidad para distancias grandes y buen poder de resolución.

- 2.- Transductor dúplex o doble cristal (tipo E-R).

El transductor de doble cristal, uno emisor y otro receptor, trata de resolver el problema de la zona muerta que se presenta en los transductores de un solo cristal, lo que impide o dificulta la detección de heterogeneidades próximas a la superficie de exploración.

Una de las grandes ventajas que presentan estos transductores es el de poder utilizar los cristales más indicados para cada inspección.

### 3.- Transductor de cristal múltiple (de brocha o de mosaico).

Este tipo de transductor se fabrica de un patrón tipo mosaico, constituido de pequeños cristales colocados de manera que la intensidad del haz varíe muy poco sobre la longitud total que transmite el transductor, lo que es necesario para mantener la uniformidad de la sensibilidad.

Estos transductores proporcionan un haz largo, delgado y rectangular (en su sección transversal) para recorrer grandes superficies.

Su propósito es detectar rápidamente las discontinuidades en la pieza de inspección. Los transductores de menor tamaño y mayor sensibilidad se utilizan para definir el tamaño, forma, orientación y localización de las discontinuidades.

Este tipo de transductor está diseñado para aplicaciones especiales tales como:

- a) Medida simultánea de espesores en varios rangos.
- b) Examen de superficies curvas.
- c) Examen de muestras grandes.

#### **1.3.1.3. Transductores de acuerdo por sus aplicaciones especiales.**

Estos transductores son útiles en la inspección de muestras con características especiales, como lo es la complejidad de su forma e incluso la naturaleza del material.

A continuación describiremos cuatro tipos de transductores por aplicaciones especiales.

##### **1.- Transductor libre.**

Los cristales de este tipo de transductor oscilan libremente; es decir, están sometidos a su propia amortiguación interna, ya que carece de material amortiguante, lo que implica bajo poder de resolución, pero sensibilidad elevada.

Los pulsos acústicos de baja energía son capaces de excitar el cristal para que se genere una señal eléctrica suficiente para proporcionar una indicación; esto es, permite utilizar estos transductores en el examen de materiales de elevado coeficiente de atenuación.

Además, es posible mejorar la inspección con el empleo de frecuencias muy bajas por lo que se puede efectuar la inspección de sólidos, de algunos plásticos y de mezclas de resinas para aislantes.

## 2.- Transductor superamortiguado.

Al contrario de los transductores libres, la amortiguación es muy alta, de tal forma que es capaz de transmitir pulsos acústicos extremadamente cortos, lo que le confiere un poder de resolución adecuado.

Este transductor se utiliza principalmente en la inspección de piezas de pared delgada y de bajo coeficiente de atenuación, donde además se requiere un alto poder de resolución.

## 3.- Transductor con línea de retardo.

Es un transductor de haz longitudinal que va montado sobre una cuña llamada "línea de retardo", hecha de lucita o de plexiglass y cuyo propósito es incrementar la resolución cerca de la superficie frontal. Así mismo, reduce hasta una tercera parte del campo muerto.

## 4.- Transductor de alta temperatura.

Este transductor se utiliza sobre piezas muy calientes, por ejemplo, después de forja, rolado, etc.

Usando este tipo de transductor, la inspección puede realizarse de dos formas:

a) Utilizando el transductor directamente, a través de un acoplante especial llamado "Pyrogel", que es de forma líquida viscosa e incolora con características químicas especiales que trabaja hasta una temperatura de 260 °C (500 °F), [14].

Nota: El contacto del transductor con la pieza es intermitente.

b) Utilizando una línea de retardo hecha con un material especial llamado "Vespel", que es una resina especial que provee máxima resistencia a la tensión, elongación y a la fricción, este material es muy difícil de maquinarse. Se puede emplear entre 427°C y 538°C (800°F -1000°F). Al fundirse permite la formación del acoplante, [14].

El transductor tiene que ser seleccionado teniendo en cuenta las condiciones planteadas por el material y la forma de la pieza, al igual que los requisitos del ensayo, como es el caso del tamaño mínimo de la discontinuidad que se desea detectar.

Esto es posible en tanto que los principios fundamentales de la acústica no se opongan a los requisitos de inspección, como ocurre cuando se exige un haz no divergente; que sería conveniente lograr por razones físicas, pero imposible de obtener prácticamente, [1],[2],[8].

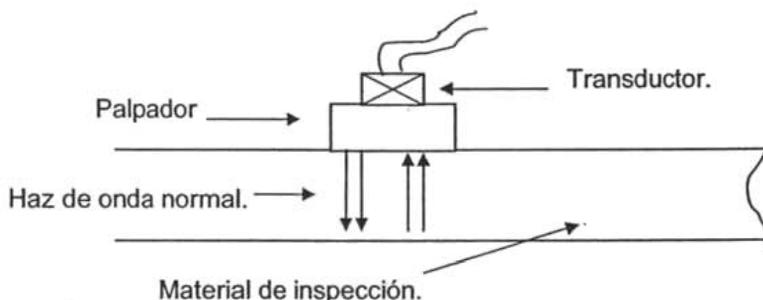
#### I.4. Palpadores de acuerdo a la forma de propagación del haz.

Como se mencionó anteriormente, el palpador (Sonda o unidad de búsqueda) es el arreglo que permite la manipulación del transductor para efectuar el rastreo en la zona o superficie de búsqueda y de acuerdo a la dirección de propagación del haz, los palpadores se clasifican en:

- a) Palpadores de incidencia normal o de haz recto.
- b) Palpador de incidencia angular.

a) Palpador de incidencia normal o de haz recto.

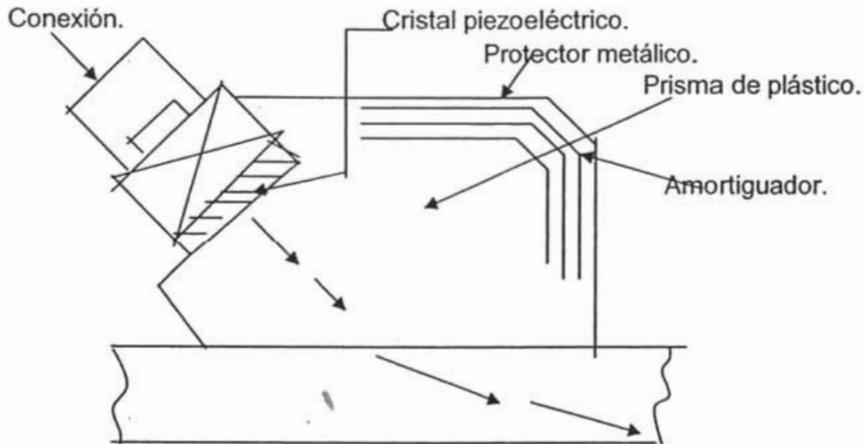
El palpador de incidencia normal generalmente se emplea para la inspección de piezas en las que se puede colocar directamente la unidad de prueba sobre el área de interés y las discontinuidades son paralelas a la superficie de contacto, figura 4.



**Figura 4.** Palpador de incidencia normal o de haz recto.

b) Palpador de incidencia angular.

Este tipo de palpador genera ondas de corte, de superficie y de placa. Se construye acoplando la unidad de haz recto a una de las caras de una zapata de plexiglass, la cual presenta determinado ángulo de refracción, se emplea en los equipos de pulso-eco y su aplicación es casi exclusiva en la detección de discontinuidades orientadas perpendicularmente a la superficie de prueba, figura 5.



**Figura 5.** Palpadores angulares de contacto.

Existen diversas formas de clasificar a estos palpadores, la más común se basa en el tamaño, frecuencia, forma, intercambiabilidad, temperatura de prueba, etc.

El palpador se fabrica de plexiglass (Material acrílico "Metyl methacrylate" de forma incolora, material altamente ligero, ofrece buen acabado superficial, alta resistencia al impacto y a las condiciones climatológicas a la intemperie) y a este se le enrosca el transductor que va asentado en ángulo en la parte superior delantera de la zapata, [14].

También cuenta con unas ranuras o muescas que ayudan a atenuar las ondas ultrasónicas secundarias que vienen de regreso al transductor y así no causen interferencia que puedan influir en el resultado de una inspección.

En cada palpador se tiene marcado el ángulo de refracción del sonido dentro del material de prueba, los ángulos comerciales son: 35°, 45°, 60°, 70°, 80° y 90° grados.

A su vez, estos palpadores pueden ser de ondas:

- 1.- Transversales.
- 2.- Longitudinal.
- 3.- De superficie.
- 4.- De Lamb.

Otra subclasificación de palpadores de incidencia angular se basa en la técnica de inspección empleada como son:

1) **Palpador de contacto.**

El palpador de contacto se coloca directamente en la superficie de prueba aplicando presión y un medio de acoplamiento. Se fabrica para las inspecciones de haz recto o angular.

2) **Palpador de inmersión.**

La transmisión del ultrasonido desde el transductor a la muestra de inspección se efectúa a través de una columna de líquido, a fin de que no exista contacto directo, presión o rozamiento entre el transductor y la muestra.

Los palpadores de inmersión pueden ser planos o cóncavos y a su vez estos últimos se dividen en dos:

a) **De enfoque cilíndrico hacia una línea.**

Estos palpadores son usados para inspeccionar tubos y barras.

b) **Con punto de enfoque en forma de cono hacia un punto.**

Estos palpadores también son usados para inspeccionar tubos y barras pero difieren con los de enfoque cilíndrico en donde el punto a examinar requiere de más precisión.

### **1.5. Comportamiento y tipos de ondas ultrasónicas.**

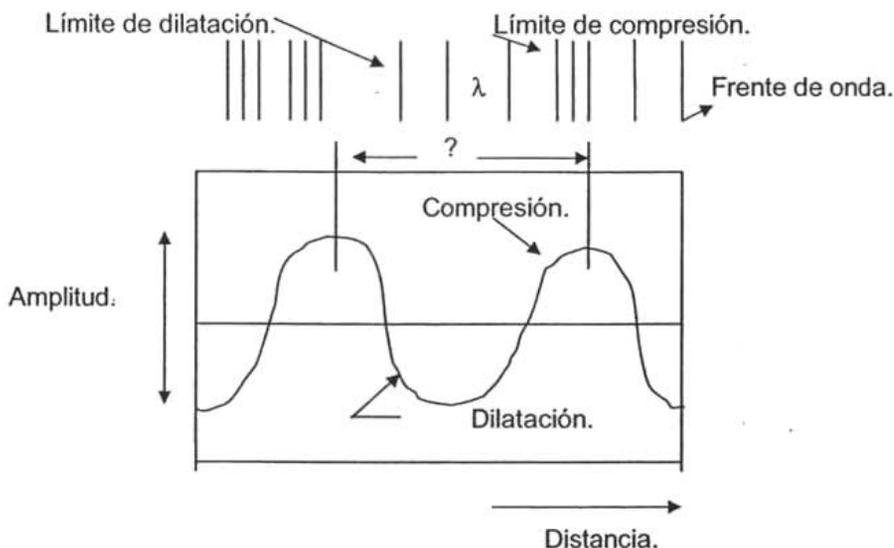
Las partículas de un medio en el que se propaga una onda ultrasónica experimentan diversos desplazamientos, lo que da lugar a diferentes tipos de ondas.

Desde el punto de vista de los ensayos no destructivos, las más interesantes son: longitudinales o de compresión, transversales o de corte, superficiales o de Rayleigh y de placa o de Lamb que a continuación se describirán.

a) **Ondas longitudinales o de compresión.**

Las ondas longitudinales o de compresión se caracterizan porque los desplazamientos de las partículas son paralelos a la dirección de propagación del ultrasonido, creando zonas de compresión y de dilatación, separadas entre sí media longitud de onda dentro del material en el que se propagan, figura 6.

Dichas ondas pueden transmitirse a través de sólidos, líquidos y gases; su velocidad de viaje es la más elevada respecto de los otros modos. Prácticamente, todos los transductores emiten ondas longitudinales a partir de las cuales se generan otras de diferentes tipos, ya sea por un ángulo de incidencia diferente al normal, o bien, por la geometría del material sujeto a inspección.



→  
Dirección de propagación.

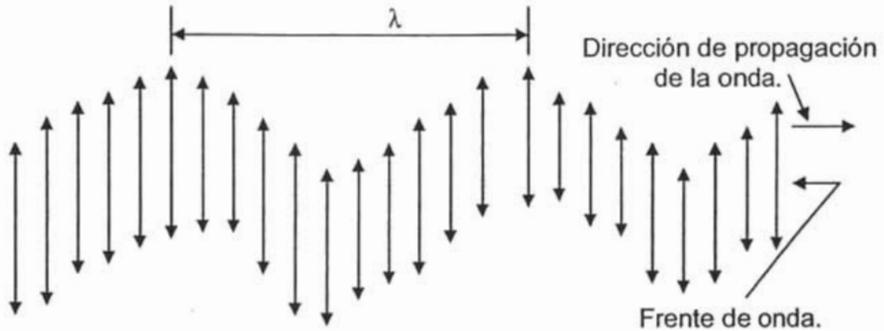
↔  
↔  
Oscilación  
de la partícula.

**Figura 6.** Representación esquemática de una onda longitudinal de compresión.

b) Ondas transversales o de corte.

Las ondas transversales o de corte son denominadas de esta manera, debido a que el movimiento de las partículas es transversal a la dirección de propagación, para lo cual, es necesario que cada partícula exhiba una gran fuerza de atracción hacia sus vecinas, con lo que al moverse hacia atrás y hacia adelante provoque la oscilación de las demás, figura 7.

Es importante mencionar que los gases o los líquidos son prácticamente incapaces de transmitir ondas transversales, pues sus moléculas ofrecen poca resistencia al deslizamiento transversal, y por lo tanto no existen vínculos elásticos que las ligen a su posición cero.



**Figura 7.** Representación esquemática de una onda transversal o de corte.

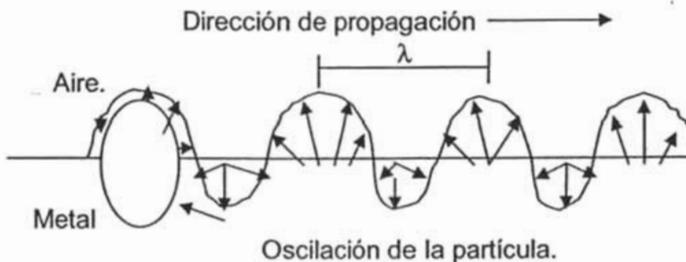
Una onda de corte viaja aproximadamente a la mitad de la velocidad de una onda longitudinal cuando se desplazan en el mismo material, y por lo tanto tiene longitudes de la misma frecuencia, lo que las hace más sensibles a los reflectores pequeños. Por tales características, se utiliza en la inspección de uniones soldadas.

c) Ondas de superficie o de Rayleigh.

Las ondas de superficie o de Rayleigh son aquellas que se desplazan sobre la superficie del material y penetran a una profundidad máxima de una longitud de onda, su trayectoria es elíptica y su velocidad es aproximadamente el 90% de la velocidad de las de corte.

Son muy sensibles y se atenúan cuando existe un segundo medio en su trayectoria; por ejemplo, un líquido o un sólido en contacto con la superficie.

En la práctica, se emplean para detectar discontinuidades en superficies poco rugosas, figura 8.



**Figura 8.** Representación esquemática de una onda de superficie o de Rayleigh.

d) Ondas de placa o de Lamb.

Las ondas de placa o de Lamb son aquellas que se generan cuando un material muy delgado se somete a una onda de superficie.

Estas se clasifican en:

- a) Simétricas o de dilatación, figura 9a.
- b) Asimétricas o de flexión, figura 9b.

La velocidad de propagación de las ondas de Lamb no se pueden considerar como una constante del material, ya que depende de su espesor, de la frecuencia, ángulo de incidencia, del modo (longitudinal, transversal o superficial) y tipo de onda.

Es importante destacar que 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, para la cual se utilizan acoplantes viscosos.

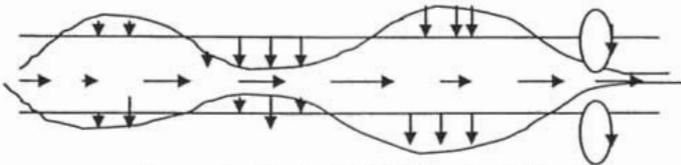


Figura 9a. Onda simétrica o de dilatación.

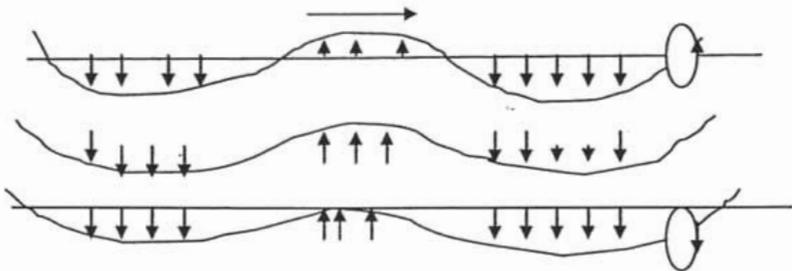


Figura 9b. Onda asimétrica o de flexión.

Así, las partículas superficiales comunicarán la energía recibida a las partículas vecinas y éstas, a su vez a las siguientes produciéndose así una propagación de la energía exterior a través de todas las partículas del medio.

Dado que el aire, y en general los gases, atenúan fuertemente el sonido, es necesario el empleo de un medio acústicamente conductor, interpuesto entre el palpador y la muestra de ensayo: que desplace la fina película de aire existente y

permita la transmisión de la presión incidente. A este medio se le denomina acoplante.

Los medios de acoplamiento acústico son líquidos más o menos viscosos, pero en general se trata de compuestos orgánicos pastosos, los cuales deberán poseer las siguientes características:

- a) Mojar la superficie del material a examinar y también la del palpador para eliminar la capa de aire entre ambos.
- b) Fácil aplicación.
- c) No escurrir demasiado rápido sobre la superficie.
- d) Ser homogéneo y libre de burbujas o partículas sólidas que puedan reflejar o desviar el haz de ultrasonido.
- e) No ser corrosivo ni tóxico.
- f) Tener una impedancia acústica intermedia entre el material del examen y el transductor.

#### 1.6. Descripción de la onda incidente perpendicular o normal.

Si una onda acústica plana incide perpendicularmente sobre una superficie plana y uniforme que separa dos medios diferentes, una parte de la energía de la onda se refleja y vuelve en la misma dirección de la incidente, mientras que la otra parte se propaga en el segundo medio manteniendo su dirección y su sentido, en donde "I<sub>i</sub>" es la intensidad de la onda incidente, "I<sub>r</sub>" es la intensidad de la onda reflejada, "I<sub>t</sub>" es la intensidad de la onda transmitida, y "Z" son las impedancias acústicas respectivas de los dos materiales.

Estos parámetros están relacionados entre sí por medio de los coeficientes de reflexión y de transmisión "R" y "T" respectivamente, de la siguiente forma:

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left[ \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2 \quad \dots (1)$$

(coeficiente de reflexión)

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad \dots (2)$$

(coeficiente de transmisión)

Donde:

Z<sub>1</sub> = Impedancia acústica en el medio 1.

Z<sub>2</sub> = Impedancia acústica en el medio 2.

r = Z<sub>2</sub> / Z<sub>1</sub>.

En donde el balance de la energía expresada en intensidad nos da:

$$I_i = I_r + I_t \quad \dots (3)$$

y por consiguiente:

$$R + T = 1 \quad \dots(4)$$

Desde el punto de vista de las intensidades acústicas, es indiferente del lado de la superficie límite sobre el que incide la onda, ya que los valores de "R" y "T" no cambian al permutarse entre sí  $Z_1$  y  $Z_2$ .

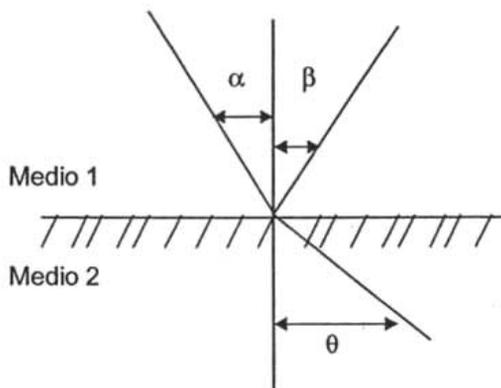
Dichas expresiones son también válidas para las ondas transversales. Sin embargo, la velocidad acústica en los líquidos y en los gases es nula para dichas ondas; entonces, se reflejan totalmente en una interfase sólido-líquido o sólido-gas (su coeficiente de reflexión es igual a cero).

Para obtener el 100% de transmisión, la relación ideal de impedancia es 1:1. No obstante, en la práctica esto no es posible, pero debe procurarse obtener valores muy cercanos entre sí.

### 1.7. Descripción de la onda incidente angular.

Cuando una onda sonora longitudinal o transversal cruza oblicuamente la interfase entre dos materiales de diferente velocidad o impedancia acústica, una porción del sonido se refleja y la otra se refracta.

En la figura 10, se muestran los fenómenos de reflexión y de refracción de una onda en una superficie plana, en donde  $\alpha$  (alfa) es el ángulo de incidencia;  $\beta$  (beta), el ángulo de reflexión y  $\theta$  (teta), el ángulo de transmisión o de refracción. Este último está determinado por las velocidades del sonido en los diferentes materiales (impedancia acústica) y por el ángulo de incidencia.



**Figura 10.** Reflexión y refracción de una onda con incidencia angular en la interfase plana que separa dos medios.

### I.8. Ley de Snell (Ley de la reflexión y de la refracción).

Las direcciones de las ondas reflejadas y transmitidas se determinan por la Ley de Snell, la cual relaciona los ángulos de incidencia  $\alpha$  de acuerdo con las velocidades del primero y del segundo medio.

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \theta} = \frac{V_1}{V_2} \quad \dots(5)$$

Donde:

$V_1$  = velocidad del medio 1.

$V_2$  = velocidad del medio 2.

$\alpha$  = ángulo de incidencia.

$\beta L$  = ángulo de reflexión de la onda longitudinal reflejada.

$\beta T$  = ángulo de reflexión de la onda transversal reflejada.

$\theta L$  = ángulo de refracción de la onda longitudinal refractada.

$\theta T$  = ángulo de refracción de la onda transversal refractada.

Así por ejemplo, en las figuras 11 y 11a, se aprecia la transformación de la onda reflejada y de la transmitida en una onda longitudinal y en otra transversal, dando como resultado que una sola onda incidente dé origen a cuatro ondas cuando los dos medios son cuerpos sólidos.

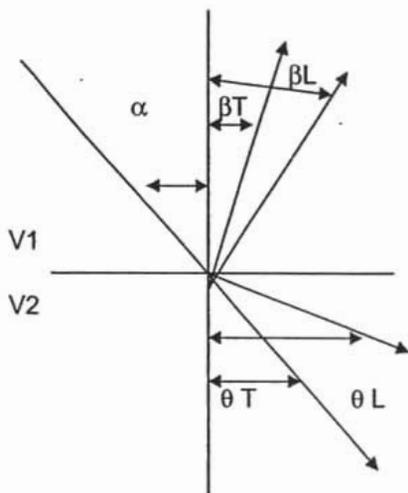


Figura 11.

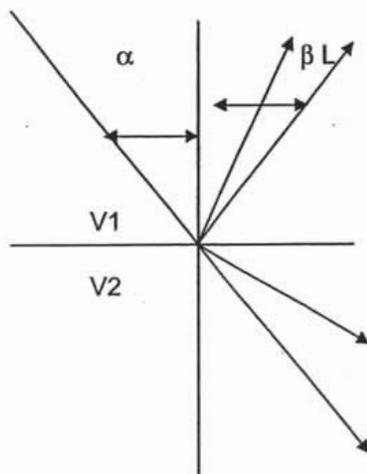


Figura 11a.

En la figura 11a, se observa que en el medio 1, si la onda incidente y la onda longitudinal reflejada son del mismo tipo, éstas poseen velocidades acústicas idénticas.

Por tanto, el ángulo de incidencia  $\alpha$  (alfa) es igual al ángulo de reflexión  $\beta L$ , porque:

$$\frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Sen } \beta L} = 1 \quad ; \quad \text{sen } \alpha = \text{sen } \beta L. \quad \dots(6)$$

En la mayoría de las ocasiones, durante la inspección de cuerpos sólidos, es necesario eliminar la onda longitudinal transmitiendo exclusivamente la onda transversal para simplificar la inspección.

Si dos tipos de ondas están presentes al mismo tiempo en el material de inspección (con diferentes velocidades y ángulos de refracción) es prácticamente imposible evaluar de forma adecuada una discontinuidad, antes de la inspección debe verificarse que sólo exista un modo de propagación al calcular:

- a) El primer ángulo crítico de incidencia, en el que únicamente existen ondas de corte en el segundo medio y el haz longitudinal es totalmente reflejado; esto es, su ángulo de refracción es igual o mayor a 90 grados.

De acuerdo a las figuras 11 y 11a, puede apreciarse que siguiendo la Ley de Snell se obtiene que:

$$\frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Sen } \theta L} = \frac{VL_1}{VL_2} \quad ; \quad \text{Sen } \theta L = \text{Sen } 90 \text{ grados} = 1 \quad \dots(7)$$

$$\frac{\text{Sen } \alpha}{1} = \frac{VL_1}{VL_2} \quad \text{ó} \quad \text{Sen } \alpha = \frac{VL_1 (\text{longitudinal})}{VL_2 (\text{longitudinal})} \quad \dots(8)$$

- b) El segundo ángulo crítico de incidencia, que es alcanzado cuando la onda de corte se refracta a 90 grados. En este punto todas las ondas transversales son reflejadas y quedan sólo las de superficie.

Para tal caso, también al aplicar la Ley de Snell se observa que:

$$\frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Sen } \theta t} = \frac{VL_1}{VT_2} \quad ; \quad \text{sen } \theta t = \text{sen } 90 \text{ grados} = 1 \quad \dots(9)$$

$$\text{Sen } \alpha = \frac{\text{VL1 (longitudinal)}}{\text{VT2 (transversal)}} \quad \dots(10)$$

El primer ángulo crítico de incidencia es la condición límite para lograr la reflexión total de la onda longitudinal refractada y se obtendrá cuando  $\theta t = 90$  grados.

Si el primer ángulo de incidencia es mayor al segundo, se tiene una reflexión total de los dos tipos de ondas reflejadas; lo que significa que el haz incidente no es transmitido a través del segundo medio.

En el proceso de reflexión y refracción, la transformación de un tipo de onda en otro se denomina "conversión de modo", que permite obtener ondas transversales o superficiales si se emplea un transductor de haz longitudinal colocado sobre una zapata de plexiglass con un ángulo de incidencia adecuado, [1],[2],[4],[5].

### 1.9. Descripción del comportamiento del haz ultrasónico.

El comportamiento del haz ultrasónico puede modificarse en función de la geometría, frecuencia y características específicas del transductor, figura 12; Sin embargo, independientemente de estas variables siempre presentará las siguientes características:

- a) Un eje central.
- b) Un campo muerto.
- c) Un campo cercano o zona de Fresnel.
- d) Un campo lejano o zona de Fraunhofer.
- e) Divergencia del haz.

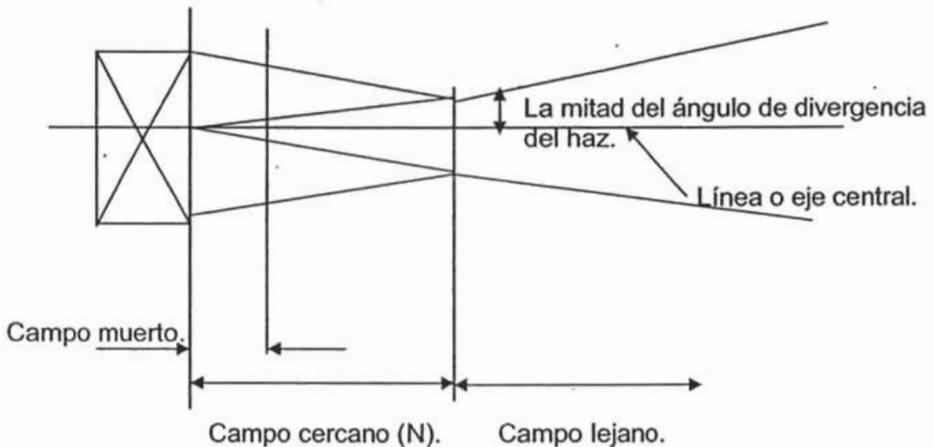


Figura 12. Representación simplificada del haz ultrasónico.

a) Campo muerto.

Es la distancia frente al transductor (trayectoria previa) y su extensión es equivalente a la longitud de un pulso completo.

En esta zona ninguna indicación puede detectarse debido a que existe un lapso en el cual el transductor ha dejado de vibrar pero está saturado y en consecuencia no detecta la señal que pueda generarse en el material a inspeccionar, figura 13 y 13 a.

Una forma de disminuir esta limitante es emplear un transductor de doble cristal; o bien, una línea de retardo.

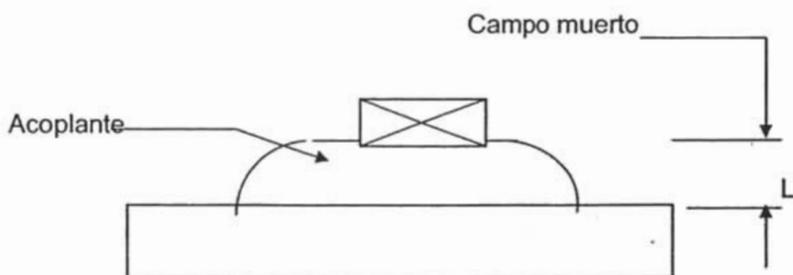


Figura 13. Longitud del campo muerto (L).

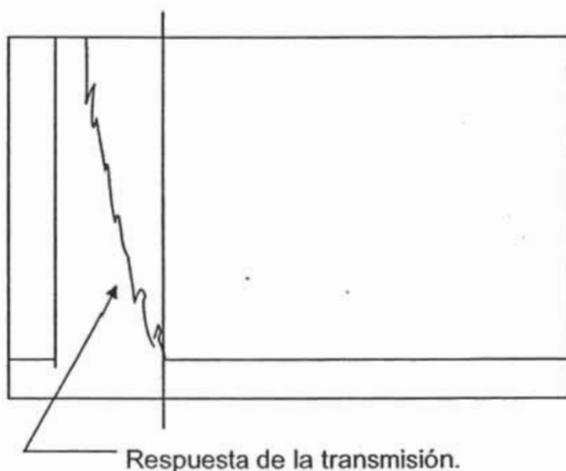
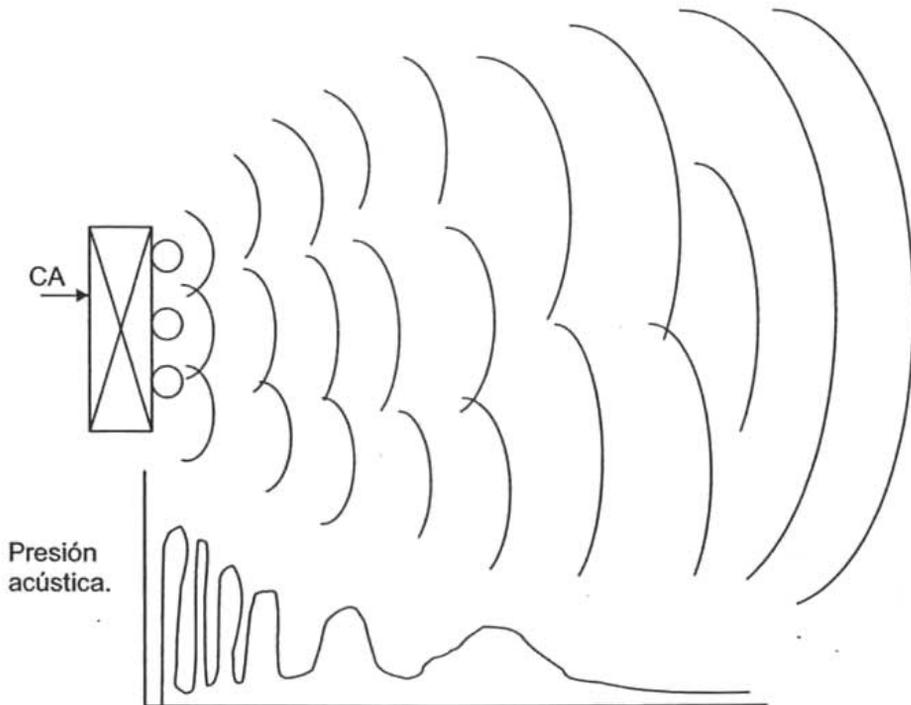


Figura 13a. Representación del campo muerto en la pantalla del equipo ultrasónico.

b) Campo cercano o zona de Fresnel (N).

El campo cercano o zona Fresnel es una zona de interferencia originada por la vibración irregular del material que se encuentra frente al transductor.

Su formación puede explicarse de la manera siguiente, debido a que la cara del cristal de un transductor ultrasónico no vibra uniformemente bajo la influencia del pulso eléctrico, sino que lo hace en forma compleja, ya que su estructura es la de un mosaico formado por cristales individuales que vibran en la misma dirección, pero ligeramente fuera de fase con sus vecinos. Por lo que cada uno actúa como una fuente puntual y emite una onda esférica hacia afuera desde el plano de la cara del cristal, figura 14.



**Figura 14.** Vibración y generación de ondas individuales de las partículas, provocada por un cristal piezoeléctrico por influencia de una corriente eléctrica alterna.

El material que está frente al transductor vibra, creando diferentes frentes de onda, cada uno de ellos tiene su propia oscilación originando una zona de presión acústica irregular que consiste en regiones de intensidades máximas y mínimas correspondientes a los nodos de referencia de las ondas que están respectivamente en fase y fuera de fase.

En la zona de Fresnel, la presión acústica varía irregularmente y se puede detectar una discontinuidad pero no se puede evaluar porque se tienen variaciones en la amplitud de la indicación. La amplitud en esta zona depende de la frecuencia, de la velocidad del sonido en el material y del diámetro del transductor.

Esta amplitud puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$N = \frac{d^2}{4\lambda} = \frac{d^2 f}{4v} \quad \dots(11)$$

Donde:

N = Longitud del campo cercano.

d = Diámetro efectivo del transductor (diámetro del cristal).

$\lambda$  = Longitud de onda.

f = Frecuencia.

v = Velocidad.

Cuando una discontinuidad se encuentra en la zona cercana es recomendable reducirla, esto se logra al disminuir el diámetro del cristal del transductor y su frecuencia central al mismo tiempo.

c) Campo lejano o zona Fraunhofer.

La zona Fraunhofer es la región después del campo cercano y se caracteriza porque la intensidad del haz ultrasónico disminuye proporcionalmente a la distancia del transductor.

La amplitud de la reflexión en el campo lejano disminuye exponencialmente con el aumento de la distancia. La amplitud máxima de la reflexión se presenta en el centro del haz.

La pérdida exponencial de la amplitud de la señal en el campo lejano es el resultado de la divergencia del haz y la atenuación del mismo.

d) Divergencia del haz.

En este caso, en el campo cercano, el haz ultrasónico se propaga en línea recta y en el campo lejano la onda acústica se expande al aumentar la distancia desde el emisor.

El ángulo de divergencia en el campo cercano puede determinarse por la ecuación 12:

$$\text{sen } \alpha = 1.2 \frac{\lambda}{d} \quad \text{ó} \quad \text{sen } \alpha = 1.2 \frac{v}{f d} \quad \dots \quad (12)$$

Donde:

- $\alpha$  = Mitad del ángulo de divergencia.
- $v$  = Velocidad acústica en el material de prueba.
- $f$  = Frecuencia central del transductor.
- $d$  = Diámetro del cristal del transductor.
- $\lambda$  = Longitud de onda.

Nota: La constante 1.2 en la ecuación anterior es usada para una intensidad teóricamente nula (energía del haz ultrasónico de 0%)

Si el emisor no es circular al ángulo de divergencia no puede ser evaluado exactamente aplicando la ecuación anterior. Por lo que se determina experimentalmente, [1],[2],[8].

#### 1.10. Principales parámetros en un sistema ultrasónico de tipo Pulso-Eco.

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

##### A) Sensibilidad.

Se define 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.

Esta característica es particular de cada transductor y aún los del mismo tamaño, frecuencia y material no siempre producen señales idénticas en la pantalla del osciloscopio.

Existe una relación directa entre la sensibilidad y la eficiencia en la conversión de energía acústica en ondas ultrasónicas.

Cuanto mayor sea esta última, más alta será la sensibilidad.

La sensibilidad de un transductor está directamente relacionada con la divergencia del haz.

Al aumentar "d" y "f", aumenta la sensibilidad debido a que el ángulo de divergencia disminuye y como consecuencia el campo cercano aumenta.

#### B) Resolución.

La resolución es la capacidad para separar dos señales cercanas en tiempo y profundidad. Puede dividirse en dos tipos:

##### B1) 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.

Se puede verificar mediante un bloque patrón con orificios a diferentes profundidades a partir de la superficie de contacto.

##### B2) 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.

#### C) Frecuencia central.

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

Las frecuencias de uso común en la industria se encuentran entre 2.25 Mhz. para la detección y evaluación de discontinuidades en piezas fundidas, forja, soldadura y placas.

De 5.0 Mhz. Es la frecuencia nominal para la medición de espesores en recipientes, tuberías y tanques.

De 0.5 y 1.0 Mhz. Que son frecuencias bajas comunes para la detección y evaluación de discontinuidades en materiales muy gruesos y/o con estructura de grano burdo.

#### D) Atenuación del haz.

La atenuación del haz es la pérdida de energía de una onda ultrasónica al desplazarse a través de un material. Las causas principales son la dispersión y la absorción.

La dispersión se debe a que los materiales no son estrictamente homogéneos, ya que contienen superficies límites o pequeñas interfaces, en las que la impedancia acústica cambia bruscamente por la diferencia de densidad o velocidad acústica de los materiales en dichas interfaces.

Los factores de mayor influencia en la dispersión son el tamaño del grano, la naturaleza del metal que determina su anisotropía elástica y la frecuencia de las ondas.

La dispersión aumenta con el tamaño de grano y con la frecuencia; de aquí que el ensayo de estructuras de grano burdo, por ejemplo fundiciones, requiera bajas frecuencias, del orden de 1 Mhz ó 2 Mhz. A igualdad de grano y longitud de onda, la anisotropía elástica determina la mayor o menor dispersión.

Desde este punto de vista, el cobre es, entre los metales más usuales, el más anisotrópico (más dispersante) y el aluminio el menos dispersante, en tanto que el acero se encuentra en un valor intermedio.

#### **I.11. Efectos físicos presentados en ultrasonido industrial.**

La prueba por ultrasonido consiste en el empleo de ondas mecánicas que viajan a través de un material, en el que sus partículas vibran a la misma frecuencia que las ondas sonoras con respecto a un punto fijo, sin embargo las partículas no viajan con ellas, sino que tan sólo reaccionan a su energía, que es la que se mueve a través del medio.

Para comprender claramente el funcionamiento de la inspección por ultrasonido, es necesario conocer las definiciones de algunos conceptos y sus efectos físicos que caracterizan a las ondas y su interacción con la materia, a continuación se describen:

a) Amplitud (A).

Es el pulso vertical mas alto de una señal, comúnmente de base a punta en una presentación A-scan.

b) Frecuencia (f).

Se define como el número de veces que repite un evento por unidad de tiempo. Su unidad de medición es ciclos/seg. (Hertz). En ultrasonido, una unidad de búsqueda electro-acústica es excitada por el pulso generador para producir un pulso de energía ultrasónica

c) Longitud de onda ( $\lambda$ ).

Es la distancia ocupada por una onda completa y es igual a la distancia a través de la cual se mueve la onda por periodo o ciclo.

d) Velocidad de propagación o velocidad acústica (v).

Es la velocidad de transmisión de la energía sonora a través de la cual de un medio en la dirección de propagación.

Para completar cuanto hasta ahora se ha expuesto, en la tabla 1, se dan una serie de datos numéricos que han sido resultado del estudio en diferentes tipos de materiales y que serán de gran utilidad para cálculos posteriores, [2].

Material.	Densidad. 10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup> (δ)	Velocidades acústicas.		Impedancia acústica en:	
		In/seg x 10 <sup>6</sup>		Kg/m <sup>2</sup> s	
		Vel. Lineal	Vel. Angular	Z = ϕ • VL x 10 <sup>6</sup>	
				Vel. Lineal	Vel. angular
Acero inox,	8.03	0.2330	0.120	47.52	24.47
Aluminio	2.71	0.2500	0.120	17.20	8.26
Fundición (Hierro- Carbono)	7.20	0.1800	0.100	32.91	18.28
Hierro	7.70	0.2300	0.130	44.98	25.42
Iconel (Laminado)	8.25	0.2200	0.120	46.10	25.14
Monel (Laminado)	8.83	0.2100	0.110	47.90	24.67
Niquel	8.90	0.2200	0.120	49.73	27.12

**Tabla 1.** Densidades, velocidades e impedancias acústicas de distintos materiales.

Los parámetros de frecuencia, velocidad acústica y longitud de onda son útiles para describir la geometría del haz, las propiedades de los transductores, además de los modos de propagación, la cual es válida para todos los tipos de ondas, ecuación 13.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \dots(13)$$

En el caso particular de la aplicación del ultrasonido, la velocidad permanece constante, pues está determinada por la densidad y las constantes elásticas del material bajo prueba.

e) Impedancia acústica (Z).

Otro factor importante en la inspección ultrasónica es la impedancia acústica, definida como una cantidad matemática usada en computación con características de reflexión como límites o como la resistencia de un material a las vibraciones de las ondas ultrasónicas.

La impedancia acústica es el producto de la velocidad de onda por la densidad del material y se define con la ecuación 14:

$$Z = \delta \cdot V_m. \quad \dots(14)$$

Donde:

$\delta$  = Densidad (kg./m<sup>3</sup>).

$V_m$  = Velocidad máxima de vibración en el material (m/s).

$Z$  = Impedancia acústica (kg./m<sup>2</sup> s).

La impedancia es mayor en los cuerpos sólidos que en los líquidos y por lo tanto, mayor en líquidos que en gases.

f) Intensidad acústica.

La intensidad acústica es la cantidad de energía que pasa por unidad de área en la unidad de tiempo y viene dada por el producto de la energía específica y la velocidad acústica, ecuación 15.

$$I = \frac{P^2}{\rho V} \quad (\text{w/m}^2) \quad \dots(15)$$

Donde:

$I$  = Intensidad acústica.

$P$  = Presión.

$\rho$  = Densidad del material.

$V$  = Velocidad acústica.

#### **I.12. Términos utilizados en la detección de las discontinuidades por ultrasonido industrial.**

En todos los métodos de ensayos no destructivos se producen indicaciones en forma directa o indirecta, las cuales deben ser correctamente interpretadas antes de obtener información útil.

Existe una gran tendencia por parte de los inspectores, de confundir los términos "interpretación" y "evaluación".

Actualmente, éstos se refieren a dos etapas completamente diferentes en el proceso de inspección, por lo que requieren distintas categorías de conocimiento y de experiencia; particularmente en la técnica de ultrasonido es notable la diferencia entre los niveles I, II y III de calificación.

El término "interpretar" una indicación significa predecir que tipo de discontinuidad puede ser la causa que la origina.

La "evaluación" es posterior a la interpretación y consiste en comparar las características de la indicación o de la posible discontinuidad con los requisitos establecidos por las normas de calidad aplicables.

También debe conocer el material de la pieza inspeccionada y en caso necesario, debe ser capaz de obtener toda la información posible acerca de la discontinuidad que produce la indicación y su posible efecto en la pieza.

Para iniciar la interpretación y evaluación de discontinuidades es necesario clarificar algunos conceptos importantes empleados en la inspección no destructiva.

a) Sensibilidad.

Para la inspección por ultrasonido, se puede definir que la sensibilidad es la capacidad del sistema ultrasónico para detectar discontinuidades que tienen una cierta dimensión establecida por un código, norma o especificación.

b) Umbral de detección.

Es la capacidad de un sistema (equipo ultrasónico, cable coaxial y palpador) para detectar una discontinuidad de un tamaño determinado y producir una indicación que pueda ser interpretada y evaluada sin dificultades.

c) Indicación y su interpretación.

Es una señal que puede ser producida por una alteración en el material o pieza sujeta a inspección y es generada por el método de inspección no destructivo empleado. Las indicaciones pueden ser:

1) Falsas.

Una indicación falsa es aquella que aparece durante la inspección y que puede ser provocada por una mala aplicación del método.

2) No relevantes.

La indicación no relevante, normalmente es producida por la estructura del material o por la configuración de la pieza.

En general, esta indicación se produce por interrupciones de la configuración de la pieza y pueden ser los dientes, cuñeros, condición de la superficie.

También puede ser producida por cambios en algunas características del material como su tamaño de grano, los tratamientos de endurecimiento a que ha sido sometido o el acabado superficial.

3) Relevantes.

Una indicación relevante es producida por una discontinuidad. Para determinar su importancia se debe interpretar la indicación y evaluar la discontinuidad.

d) Discontinuidad y su clasificación de acuerdo a su origen.

Es la falta de homogeneidad o interrupción en la estructura física normal de un material, también puede ser una deficiencia en la configuración física de una pieza, parte o componente.

Las discontinuidades pueden ser:

a) No relevantes.

Una discontinuidad no relevante es aquella que por su tamaño, forma o localización requiere de ser interpretada, pero no es necesario evaluarla.

b) Relevantes.

Una discontinuidad relevante es aquella que por su tamaño, forma o localización requiere de ser interpretada y evaluada.

Las discontinuidades se dividen en tres clases: inherentes, de proceso y de servicio.

1) Discontinuidades inherentes:

Las discontinuidades inherentes son aquellas que se forman durante la solidificación del metal fundido. Estas discontinuidades están directamente relacionadas con la calidad y el tipo de aleación del metal, la forma del vaciado y la solidificación del metal, incluyendo aquellas que son producidas por las variables del proceso primario, tales como una alimentación inadecuada, vertedero en mal estado, temperatura alta de vaciado, inclusiones no metálicas y gases atrapados.

2) Discontinuidades de proceso:

Las discontinuidades de proceso son aquellas que se relacionan con los procesos de manufactura que pueden ser maquinado, tratamientos térmicos, recubrimientos metálicos, conformado en caliente (forja, extrusión, rolado), conformado en frío (doblado, prensado, extruido) y soldadura.

Durante estos procesos, muchas discontinuidades que son subsuperficiales se pueden convertir en superficiales.

3) Discontinuidades de servicio:

Son las discontinuidades que se generan por las diferentes condiciones del servicio al que se sujeta la pieza, pudiendo tratarse de esfuerzos de tensión o compresión, corrosión, fatiga o fricción.

e) Defecto.

Defecto es toda discontinuidad o indicación de una discontinuidad que por su tamaño, forma o localización ha excedido los límites de aceptación establecidos por el código, norma o especificación aplicable.

f) Discontinuidad crítica.

Es la discontinuidad más grande que se puede aceptar o la más pequeña que puede ser rechazada.

g) Evaluación.

Es la ponderación de la severidad de la discontinuidad después de que la indicación se ha interpretado; es decir, si la pieza debe ser aceptada, reparada o rechazada.

Durante el proceso de evaluación de una indicación se pueden plantear cuatro interrogantes:

- 1.-¿Que tipo de discontinuidad causa la indicación?
- 2.-¿Cuál es la extensión de la discontinuidad?
- 3.-¿Que efecto tiene la discontinuidad en la calidad de la pieza?
- 4.-¿Cuales son las tolerancias dimensionales establecidas por el documento para la indicación?

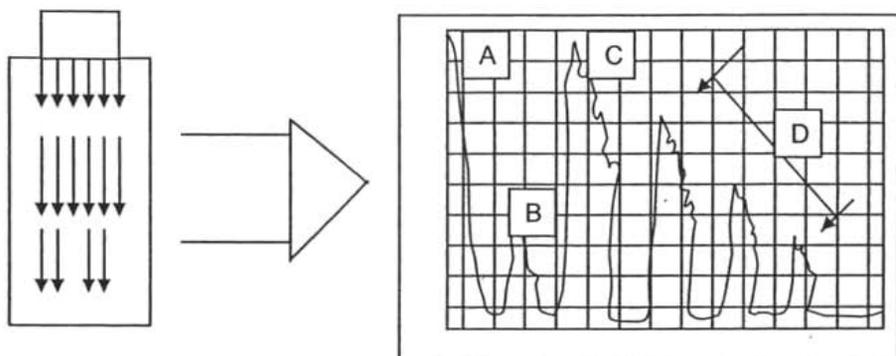
El tipo y tamaño de la discontinuidad no sólo se determina con respecto a la amplitud de la indicación, sino también en base a la experiencia del técnico, [1],[3].

### **I.13. Interpretación de la presentación de indicaciones en la pantalla A-Scan del equipo ultrasónico.**

Los instrumentos ultrasónicos cuentan con una presentación en la pantalla que muestra la sección de interés de la pieza a inspección y estas son tres:

- a) Presentación tipo B-Scan.- Este tipo de presentación muestra la sección transversal del material que está siendo inspeccionado y se puede observar la forma a lo largo de una discontinuidad o su distribución.
- b) Presentación tipo C-Scan.- Este tipo de presentación es una vista de planta, o sea, una vista superior en forma de mapa, similar a una imagen radiográfica.
- c) Presentación tipo A-Scan.- La mayoría de los instrumentos en uso cuentan con una presentación tipo "A", también conocida como barrido tipo "A". La presencia de discontinuidades es representada por medio de ecos, picos, reflexiones o indicaciones sobre la pantalla y son explicadas a continuación:

Cuando una onda ultrasónica pasá a través de un material que contiene una discontinuidad, sobre la pantalla del tubo de rayos catódicos se obtienen diferentes indicaciones que son necesarias analizar para determinar el origen de cada una de ellas, figura 15:



- A = Pulso inicial o eco de entrada.  
 B = Reflexión de la discontinuidad.  
 C = Reflexión de la pared posterior.  
 D = Reflexiones secundarias de la pared posterior.

**Figura 15.** Presentación de indicaciones en el barrido tipo "A".

a) Línea de barrido.

Es la línea luminosa horizontal sobre la pantalla y es conocida como línea de registro o línea de tiempo base.

b) Pulso inicial.

La primera indicación sobre la línea de tiempo base es conocida como el pulso inicial y estará en el extremo izquierdo de la pantalla.

El ancho del pulso inicial sobre la línea de tiempo base se llama zona o campo muerto en donde las discontinuidades no pueden ser detectadas y es una combinación de:

- a) Voltaje del pulso inicial.
- b) Cero eléctrico.
- c) Cero acústico en pruebas de contacto con haz longitudinal.
- d) Oscilaciones del cristal.

El pulso inicial puede bloquear parcialmente las indicaciones de discontinuidades que están cerca de la superficie; esto se debe a que cuando aparece el pulso inicial, el transductor todavía está transmitiendo y no puede recibir reflexiones hasta que su función como transmisor sea completada.

Al campo muerto también se le llama trayecto previo, debido a que representa al trayecto del haz ultrasónico desde el cristal piezoeléctrico, pasando por la placa protectora del transductor y el agente acoplante, hasta llegar a la superficie frontal del material inspeccionado.

c) Indicación de una discontinuidad.

Una indicación de una discontinuidad es producida mediante el sonido reflejado por una discontinuidad en la pieza sujeta a inspección.

La reflexión dependerá de la amplitud de la discontinuidad, por lo que la amplitud de la indicación o deflexión vertical en la línea de barrido será proporcional a la cantidad de energía ultrasónica reflejada.

d) Reflexión de la pared posterior.

Puede existir una indicación conocida como primera reflexión de pared posterior, la cual representa:

1.- El reflejo del sonido desde la superficie posterior del material sometido a prueba.

2.- El espesor del material.

e) Reflexiones secundarias de la pared posterior.

De la pared posterior pueden formarse varias indicaciones, ya que normalmente no toda la energía acústica es transmitida en la interfase, por lo que es reflejada varias veces entre la superficie y la pared posterior del objeto sometido a inspección.

(Cada vez que la energía restante alcanza la superficie de exploración, el palpador la detecta). [1],[2],[3],[4].

#### **I.14. Efecto de las características del sistema de ensayo por ultrasonido industrial.**

Los sistemas de inspección ultrasónica pueden variar sus características de reproductibilidad, repetitividad, precisión y exactitud, por lo que se deben controlar sus propiedades para que se mantengan invariables en el tiempo, para ello no es suficiente la confianza en los límites especificados por el fabricante, por lo cual se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

a) Los transductores deben ser verificados únicamente en aquellas condiciones para las cuales fueron desarrollados por el fabricante: es decir, los transductores para contacto directo sobre acero deben verificarse acoplados directamente sobre un patrón de acero y los transductores para la técnica de inmersión deben verificarse con una columna de líquido interpuesta entre el transductor y el material.

b) El transductor y el resto del equipo deben ser verificados siempre en conjunto, o sea, todo el sistema de inspección debe ser controlado como una unidad.

c) La energía acústica reflejada debe ser medida con la menor interferencia o distorsión acústica y eléctrica posible, evitando el empleo del control de

rechazo, de los amplificadores de banda estrecha y de cualquier otro medio que pueda alterarla excesivamente.

1) Efecto de las interferencias eléctricas.

Puesto que la gama de frecuencias del amplificador está prácticamente dentro de la gama de los receptores de radio, se pueden reproducir interferencias que se manifiestan en la pantalla como una crepitación de la línea de tiempo base o un aumento del nivel de ruido (paso). Pueden originarse por conexiones eléctricas inadecuadas, equipo defectuoso o dañado.

2) Efecto de las interferencias causadas por el transductor.

Este tipo de interferencias ocurre generalmente al emplear un transductor en mal estado y pueden ser ocasionadas por:

a) Los disturbios debidos al acoplamiento del transductor. Se presentan principalmente en los transductores angulares con zapatas desgastadas o ralladas que provocan indicaciones próximas a éstas, las cuales son fácilmente identificables porque se presentan aún sin apoyar el transductor en la muestra.

b) Los disturbios causados cuando el cristal piezoeléctrico está dañado, se afloja, se separa de la capa amortiguadora, o bien del palpador; en este caso, la señal inicial se ensanchará en la pantalla aumentando la zona muerta.

3) Efecto de las interferencias debidas a la refracción.

Cuando una onda ultrasónica incide sobre una superficie límite entre dos medios; puede ocurrir la refracción del haz al no formar éste un ángulo recto con la superficie reflectora. Cuando existe refracción, las ondas transversales pueden producir indicaciones secundarias en la pantalla del equipo.

4) Efecto del medio de acoplamiento.

Con anterioridad, se ha mencionado la conveniencia del empleo de un medio acústicamente conductor interpuesto entre el transductor y la muestra bajo inspección. Esto se debe a que en el caso de aplicación del método por contacto, una película fina de aire impediría la transmisión de casi la totalidad de la presión acústica incidente, salvo en el caso de emplear frecuencias de inspección muy bajas.

Los medios de acoplamiento generalmente empleados son las grasas y los aceites minerales con diversos grados de viscosidad, ya que cuanto mayor es la rugosidad superficial, mayor debe ser la viscosidad del aceite.

Generalmente, en los ensayos por inmersión se emplea como medio de transmisión agua, a la que se le ha agregado un agente humectante para evitar la formación de burbujas en la superficie del transductor, además de un agente antioxidante. En otros casos, se emplea queroseno como agente de inmersión para evitar la oxidación de la muestra de ensayo.

#### 5) Efecto de la condición y el acabado superficial de la muestra.

Entre los efectos que se deben a la condición de la superficie de exploración, hay que distinguir en primer lugar los ocasionados por material extraño en la superficie de la pieza que se está inspeccionando. Un ejemplo de esto puede ser la cascarilla de óxido o los recubrimientos (que son resultado de procesos como tratamientos térmicos, termomecánicos y protectores), cuya falta de adherencia da lugar a una merma sensible en la transmisión de la presión acústica incidente, debido al efecto de la película de aire interpuesta entre la cascarilla o el recubrimiento y el material base. Por ello, conviene evaluar previamente el efecto de estos materiales extraños en la pieza antes de la inspección y así evitar interferencias, ya que en el caso de existir éstas es necesario preparar la superficie de exploración eliminándolos con lija, desbaste, esmeril o chorro de arena.

También el efecto en la condición de la superficie es reflejado en la apariencia del oscilograma, especialmente cuando la distancia entre los valles y crestas es similar a la longitud de onda. Dicha rugosidad en la superficie puede tener como efecto una variación de la presión acústica, que depende no sólo de la rugosidad media, sino también del índice de refracción y de la frecuencia.

La rugosidad media para la cual se produce esta interferencia y que anula la presión acústica de las ondas transmitidas, se denomina rugosidad crítica.

#### 6) Efecto de la configuración geométrica de la muestra.

Durante la inspección de ciertas piezas, pueden observarse indicaciones no relevantes producidas por huecos internos, o cambios de espesor.

Adicionalmente, se pueden producir fenómenos de conversión de ondas en los cambios de configuración geométrica, por lo que es preciso estudiar detenidamente los planos de su diseño para conocer las posibles trayectorias del haz; o bien, explorar por más de una cara y prestar especial atención en los puntos simétricos.

#### 7) Efecto de la estructura del material.

Se pueden producir indicaciones no relevantes cuando se inspeccionan materiales con grano muy basto o porosos, lo que hace que se eleve de tal manera el nivel de ruido (pasto) y que no sea posible distinguir pequeñas discontinuidades, perdiéndose además poder de penetración.

En ocasiones estas interferencias se pueden reducir al operar con una frecuencia más baja.

Los cambios locales de estructura (por ejemplo la zona de crecimiento de grano de algunas uniones soldadas), pueden dar lugar a indicaciones como resultado de la dispersión del ultrasonido. Esto, que podría considerarse como una circunstancia desfavorable, se puede aprovechar para detectar cambios estructurales que impliquen variaciones significativas en las características mecánicas del material.

En el caso de uniones soldadas, es posible la aparición de indicaciones no relevantes provocadas por los cambios de estructura en las zonas afectadas térmicamente en ambos lados de la unión soldada, especialmente cuando el ángulo del bisel es igual al de transmisión del haz de ultrasonido.

#### 8) Efecto de la curvatura de la superficie de exploración.

La curvatura de la superficie de exploración produce fenómenos de cambio en la divergencia del haz, aumentándola o disminuyéndola (focalización), además de fenómenos de conversión de ondas que dan lugar a falsas indicaciones. Estos fenómenos dependen del sentido de la curvatura de la superficie de exploración y de que el ensayo se realice por contacto o inmersión con incidencia normal o angular.

En el ensayo por contacto, la curvatura de la superficie disminuye la sensibilidad, por lo que la inspección de superficies convexas es menos crítica que la de las cóncavas.

En la inspección de una superficie convexa, usando un transductor plano, el área de contacto es muy reducida, lo que producirá un fuerte aumento del ángulo de divergencia del haz en el interior de la muestra y por consecuencia, una disminución de la sensibilidad.

En la inspección de una superficie cóncava, utilizando un transductor plano, la sensibilidad disminuirá fuertemente debido a que el centro del transductor no hace contacto con la superficie de la muestra.

Con radios de curvatura relativamente pequeños, será preciso recurrir al empleo de dispositivos especiales, como el constituido por un adaptador en combinación con un mosaico de cristales que actúe como una lente convergente, compensando así el efecto de la curvatura.

En el ensayo por inmersión de superficies curvas con incidencia normal, la superficie actúa como un "lente acústico" convergente o divergente según sea ésta cóncava o convexa. Esto se debe a la curvatura de la superficie y si la onda central del haz incidirá normalmente, ya que las restantes, aunque con pequeños ángulos, lo harán de forma oblicua por lo que sufrirán

una refracción cuyo ángulo en superficies límites es mayor que el de incidencia (por ser mayor la velocidad acústica en el sólido que en el líquido).

En el caso de una superficie cóncava, este efecto producirá la convergencia del haz dentro del sólido; es decir, la presión acústica transmitida al sólido convergerá hacia un punto del eje del haz, acercando la longitud del campo cercano con el consiguiente aumento de sensibilidad en función del radio de curvatura.

Si se trata de determinar el tamaño de una discontinuidad por comparación con una muestra patrón, ésta deberá presentar una superficie de exploración con idéntica curvatura a la de la muestra de ensayo. La misma conclusión se puede extender a la condición o acabado de la superficie y al medio de acoplamiento.

La incidencia angular de un haz ultrasónico sobre una superficie convexa, puede producir fenómenos de conversión de ondas que dan lugar a indicaciones falsas. Por ejemplo, en el ensayo por contacto directo sobre una superficie de este tipo, con un transductor angular de ondas transversales adaptado totalmente a la curvatura, los rayos periféricos del haz pueden formar ángulos de incidencia que se propaguen junto con las ondas transversales, longitudinales y superficiales, en cuyo caso se producirán indicaciones secundarias en la pantalla.

Si el ensayo es longitudinal, la divergencia lateral del haz aumenta, por lo que para transductores de 70 grados y mayores, se pueden producir ondas superficiales a ambos lados del transductor y hacia adelante.

Es recomendable, en el caso de superficies de radio de curvatura relativamente pequeño, no adaptar el transductor perfectamente a la misma, sino reducir la superficie de contacto; esto, si bien da lugar al aumento del ángulo de divergencia del haz ultrasónico en el material, también evita las perturbaciones causadas por los rayos periféricos. De igual forma, se pueden adoptar la solución de focalizar el haz por medio de un mosaico de cristales.

En los ensayos por inmersión con incidencia angular sobre superficies convexas, se pueden producir efectos similares a los expuestos si el haz incidente presenta una sección relativamente grande con relación al diámetro de la muestra y si su ángulo de divergencia es elevado.

#### 9) Efecto de las interferencias accidentales.

Se deben a la presencia de gotas de aceite, grasa, restos de tejidos o suciedad, sobre todo cuando se trabaja con transductores angulares o de ondas de superficie, [1],[2],[4],[11].

## II. Líquidos penetrantes.

La inspección por líquidos penetrantes se define como un procedimiento de inspección no destructiva, diseñado para detectar y exponer discontinuidades presentes en la superficie de prueba.

El objeto del método de líquidos penetrantes es detectar grietas, porosidades, traslapes, costuras y otras discontinuidades superficiales rápida y económicamente comúnmente a cualquier material a excepto a aquellos considerados como porosos, materiales metálicos que pueden ser inspeccionados incluyendo Aluminio, Magnesio, Titanio, Acero, Cobre, Latón, y bronce así como también aleaciones, materiales no metálicos como cerámicos, plásticos y vidrio.

En todos los casos el éxito de la inspección depende de la limpieza de la superficie, de las piezas a inspeccionar, de la ausencia de contaminación, de las condiciones de la superficie y del cuidado de los operadores para asegurar que se efectúe la técnica de manera adecuada y se realice la interpretación correcta de las indicaciones, [1],[10].

Cabe mencionar que no cualquier líquido situado sobre una superficie se filtra en discontinuidades abiertas a la superficie, un líquido penetrante es empujado hacia el interior de ellas por medio de la acción capilar, un penetrante no depende solo de la fuerza gravitacional para entrar a las discontinuidades, la acción capilar es la razón por la cual el líquido entra al interior de las discontinuidades del material y tiene la facilidad de ascender o descender sobre la superficie de ellas, [1],[12].

Por ello el equipo usado para la inspección por Líquidos Penetrantes depende de los propósitos o el acceso que se tenga en campo, en áreas muy reducidas para la inspección de piezas, materiales o elementos en proceso, acabado final o inspección de mantenimiento preventivo o correctivo.

La presentación del equipo de líquidos penetrantes más empleados en la industria son:

### a) Equipo portátil.

El equipo portátil esta disponible para aquellas pruebas en donde las situaciones para el uso del equipo estacionario es muy impráctico, la accesibilidad de contar con equipo portátil hace que algunas inspecciones sean rápidas y manejables en cualquier momento estando en condiciones de inspecciones de campo donde la muestra a inspeccionar esta localizada a varios metros de altura, sujeta con cualquier otro elemento o donde la pieza o el elemento este operando o ejerciendo cualquier tipo de esfuerzo.

El equipo portátil de líquidos penetrantes se compone de envases presurizados como son:

- 1.- Líquido Penetrante (visible o fluorescente).
- 2.- Revelador (no acuoso o húmedo)
- 3.- Solvente limpiador.
- 4.- Brocha.
- 5.- Paño o trapo limpio.
- 6.- Lámpara de mano de luz blanca o luz negra.
- 7.- Gafas protectoras.



**Figura 16.** Equipo portátil de líquidos penetrantes.

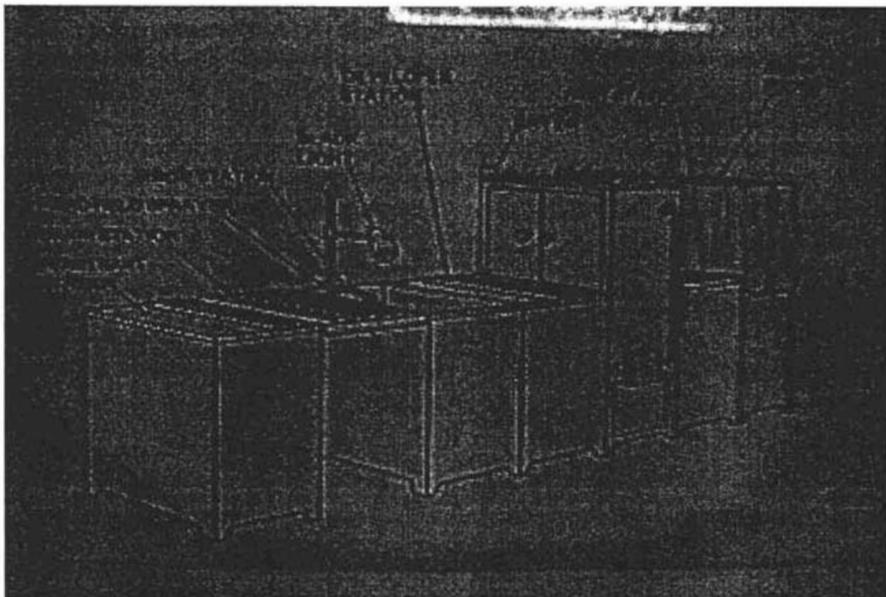
b) Equipo estacionario.

El equipo estacionario es aquel en el que normalmente se sitúa o esta localizado en un solo lugar. Este podría ser demasiado ostentoso y difícil de situarlo en un solo lugar, además de que un equipo estacionario se usa en lugares o empresas donde ya se conocen las piezas en proceso, es decir, sus dimensiones físicas, geométricas, textura etc.

El equipo estacionario se divide en varias subestaciones de proceso que son:

- 1.- Subestación de prelimpieza.
- 2.- Subestación del líquido penetrante.
- 3.- Subestación de secado.
- 4.- Subestación del emulsificador.
- 5.- Subestación de enjuague.
- 6.- Subestación de secado.
- 7.- Subestación del revelador.
- 8.- Subestación de inspección.
- 9.- Subestación de poslimpieza.

El número requerido de subestaciones dependerá del tipo de líquidos penetrantes usados ya sean penetrantes visibles o fluorescentes, el proceso o método de penetrante removible con solvente o con agua y el tipo de revelador usado ya sea seco o no acuoso.



**Figura 17.** Arreglo típico de una estación de inspección por líquidos penetrantes, [9].

### **II.1. Propiedades físicas de los líquidos penetrantes.**

Para obtener las características y la sensibilidad adecuada, el penetrante debe presentar un balance correcto de sus propiedades físicas, ya que este tipo de inspección depende de la facilidad de un penetrante para mojar la superficie de una pieza y cubrirla en forma continua y uniforme.

Las principales propiedades de los líquidos penetrantes son:

a) Adherencia.

Es la fuerza de atracción entre moléculas de sustancias distintas.

b) Cohesión.

Es la fuerza que mantiene a las moléculas de una misma sustancia a una distancia determinada unas de otras.

Por ejemplo, los sólidos tienen alta cohesión, en comparación de los líquidos; a su vez, los líquidos tienen mayor cohesión que los gases.

c) Humectabilidad.

Es la capacidad de un líquido para mojar un sólido y que afecta las características de penetración y de sangrado de los líquidos penetrantes.

d) Viscosidad.

Es la propiedad que presentan los líquidos de oponerse al flujo, como resultado de la fricción molecular o interna. Es una característica que depende de la temperatura y de la composición de la mezcla de solventes.

Esta propiedad afecta la velocidad de penetración.

Cuando un líquido es demasiado viscoso, requiere de largos periodos para emigrar dentro de discontinuidades muy finas; por otra parte, los penetrantes de baja viscosidad se escurren rápidamente y no son detenidos en las aberturas poco profundas.

e) Tensión superficial.

Es la fuerza que tiende a disminuir la superficie libre de un líquido. La fuerza de cohesión entre las moléculas de un líquido genera la tensión superficial, los líquidos con baja tensión superficial presentan buenas propiedades de penetración.

f) Capilaridad.

Es la tendencia de los líquidos para penetrar o emigrar de pequeñas aberturas tales como fracturas, fisuras, laminaciones etc.

g) Gravedad específica.

La gravedad específica es una comparación entre la densidad de un penetrante y la densidad del agua destilada a 4 °C.

El penetrante debe tener una gravedad específica menor que 1 para evitar que en un tanque el agua flote en la superficie del penetrante, ya que esto puede evitar que el penetrante cubra el objeto de prueba.

h) Volatilidad.

Es una característica definida por la presión de vapor y el punto de ebullición de un líquido. Es recomendable una baja volatilidad del penetrante para evitar las pérdidas por evaporación en tanques abiertos.

Un penetrante de alta volatilidad se secará más rápidamente en la superficie de la pieza de prueba. Cuando se utilicen materiales con bajo punto de inflamación y/o tóxicos, la volatilidad será una consideración de seguridad.

i) Inflamabilidad.

El estallamiento de los aceites está relacionado con su punto de inflamación; es decir, el momento en que se incendia. De acuerdo a las especificaciones, se requiere un mínimo de 51.6 °C (125 °F) como punto de inflamación. Los fabricantes consideran por lo general una temperatura mínima de 57 °C (135 °F).

j) Actividad química.

Es importante que los penetrantes sean químicamente compatibles con el material a ser inspeccionados.

Los que contienen cloruros, cloro, halogenuros o sulfuros están frecuentemente restringidos para la inspección de aceros austeníticos, aleaciones de titanio y aceros al alto níquel.

En caso de que no exista un requisito específico, el contenido de éstos se limita al 1% como máximo (en peso del residual), [1],[4],[8],[10].

## **II.2. El proceso de los líquidos penetrantes.**

Durante cualquier momento del proceso en cualquier tipo de pieza metálica, no metálica y no porosa, se puede dar aplicación a la técnica por líquidos penetrantes tomando muy en cuenta los siguientes pasos para obtener una inspección adecuada y con resultados satisfactorios que nos proporcionarán información correcta para el análisis e interpretación de posibles discontinuidades halladas en el espécimen a prueba, para esto, el proceso requiere de ocho pasos para llevar a cabo una adecuada aplicación de esta técnica y se describen a continuación:

### **1) Preparación de la superficie.**

La inspección por líquidos penetrantes requiere, además de que las discontinuidades se encuentren en la superficie, que estén abiertas a ésta, para que el penetrante tenga una vía de acceso; por lo que es esencial una buena limpieza de la pieza para obtener resultados confiables. Debe tenerse extremo cuidado para asegurar que las piezas estén limpias y secas.

Las indicaciones y la detección de discontinuidades dependen del flujo del penetrante; aun en las pequeñas fisuras. Es evidente que el penetrante no puede fluir si la discontinuidad se encuentra tapada con aceite, óxido o cualquier otra materia extraña.

### **2) Limpieza superficial.**

La técnica de limpieza a utilizar depende del tipo de contaminante presente en la superficie de la pieza. En la selección del método de limpieza se debe tener especial cuidado de que éste no enmascare cualquier indicación o que los

residuos de los productos de limpieza actúen como contaminantes, influyendo en la sensibilidad del método.

Los métodos de limpieza se clasifican como:

a) Limpieza por medios químicos.

Este tipo de limpieza tiene poco efecto degradante sobre el acabado superficial.

Los principales métodos son:

1.- Limpieza alcalina.

Remueve cascarillas, óxidos, grasas, material para pulir, aceites y depósitos de carbón.

Este método se emplea en grandes piezas en las cuales las técnicas manuales suelen ser muy laboriosas.

2.- Limpieza ácida.

Se emplean soluciones muy ácidas para remover cascarilla muy pesada o de gran tamaño; para eliminar cascarilla ligera y manchas metálicas. Se utiliza una solución débilmente ácida.

3.- Limpieza con sales fundidas.

Se emplea para remover cascarilla muy densa y óxidos fuertemente adheridos.

b) Limpieza por medios mecánicos.

Este tipo de limpieza debe utilizarse con precaución, ya que puede cubrir o enmascarar las discontinuidades.

Los principales métodos son:

1.- Pulido abrasivo.

Remueve escama, rebaba, escoria de soldadura y óxido. Este método no debe utilizarse en metales suaves como aluminio, cobre, magnesio y titanio.

2.- Aplicación de arena seca a alta presión (sand-blasting).

Remueve escamas pesadas, capas de pintura o recubrimientos antioxidantes, depósitos de carbón, óxidos, fundentes, arena de fundición, etc.

3.- Aplicación de arena húmeda a alta presión.

Es utilizado para un mejor control del acabado superficial o dimensional, su aplicación es la misma del método anterior.

4.- Agua y vapor a alta presión.

Se lleva a cabo con limpiador alcalino o con detergente. Remueve residuos de lubricantes, aceites, compuestos de pulido, grasas y astillas. Se utiliza cuando debe protegerse el acabado superficial.

5.- Limpieza ultrasónica.

Se emplea generalmente con detergentes y agua o con un solvente. Se utiliza para la limpieza de piezas pequeñas o delicadas.

Las áreas porosas o ásperas pueden retener penetrantes produciendo con esto indicaciones fluorescentes naturales (tales como aceites y grasas) y pueden causar indicaciones confusas.

Los depósitos sobre la superficie o áreas abiertas pueden diluir al penetrante, reduciendo su efectividad. Tales materiales pueden reaccionar con el penetrante destruyendo la coloración o la fluorescencia.

El agua o la humedad dentro de las discontinuidades pueden entorpecer la entrada del penetrante a las grietas.

c) Limpieza por solventes.

Es ampliamente utilizado, ya que es capaz de disolver y remover casi cualquier tipo de componente orgánico que se encuentre sobre la superficie.

Este método puede dividirse en desengrasado al vapor y enjuague con solventes.

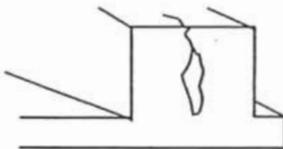
1) Desengrasado por vapor.

Remueve aceite y grasa, por lo general emplea solventes clorados. No es recomendable para titanio y sus aleaciones.

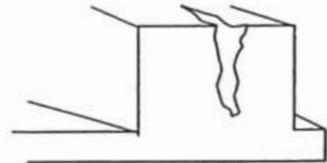
2) Enjuague con solventes.

Remueve aceite y grasa, puede emplear solventes no clorados.

Los solventes más comúnmente empleados son acetona, percloroetileno, alcohol isopropílico, cloruro de metileno; todos éstos se evaporan a la temperatura ambiente.



**Figura 18 .** Pieza con falta de limpieza y discontinuidad enmascarada.



**Figura 19 .** Pieza con limpieza aceptable y discontinuidad abierta a la superficie.

### 3) Aplicación del penetrante.

El penetrante se aplica sobre la superficie limpia y seca de la pieza a inspeccionar, por cualquier método que la humedezca totalmente; por ejemplo, inmersión, rociado, vaciado, con brocha, etc.

Todas las superficies deben cubrirse totalmente para permitir que mediante la acción capilar el penetrante se introduzca en las discontinuidades.

Antes de aplicar el penetrante es recomendable limpiar la superficie con el solvente removedor que recomiende el fabricante; esto con la finalidad de asegurar que la discontinuidad no tenga algún otro solvente o líquido que pudiera interferir con la inspección o que evite la introducción del penetrante en la cavidad de la discontinuidad.

El considerar un tiempo de drenado del penetrante durante el tiempo de penetración puede aumentar la sensibilidad del penetrante.

Los constituyentes volátiles en una película delgada se evaporan rápidamente cuando se exponen al aire.

Esta evaporación aumenta la concentración del pigmento del penetrante remanente.

La aplicación del penetrante se realiza de acuerdo a los siguientes métodos:

#### a) Aplicación del penetrante por inmersión.

Este tipo de aplicación se recomienda cuando las piezas son pequeñas o de peso reducido; cuando se inspeccionan grandes lotes o bien toda una producción de componentes críticos.

Otra razón de emplear la inmersión es la complejidad del objeto a inspeccionar en su forma o cuando se requiere cubrir toda la superficie de la pieza. Su relación es factible si se tienen módulos o trenes de inspección.

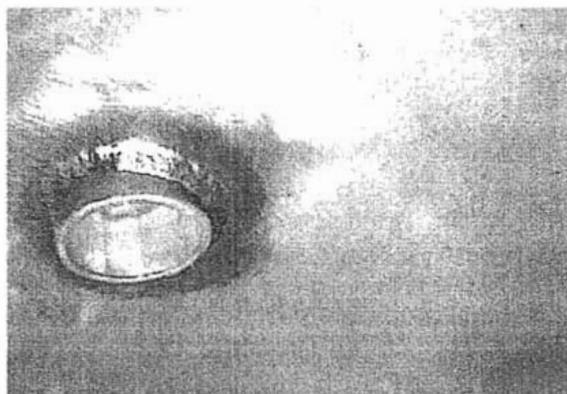
#### b) Aplicación del penetrante por aspersión.

Este tipo de aplicación es la forma más común de aplicar el penetrante, ya que el rocío se puede obtener empleando aire a presión o mediante aerosoles. No obstante la comodidad de su aplicación, debe tenerse cuidado en el que el rocío sea homogéneo. Además es conveniente ayudarse de una brocha o pincel para cubrir aquellas áreas que por su situación física impiden en que el rocío llegue a ellas.

Se recomienda para la inspección esporádica de lotes pequeños o piezas ya instaladas en su ensamblaje final, en superficies planas o relativamente grandes; pero debe evitarse en piezas pequeñas porque se desperdicia demasiado penetrante.

c) Aplicación del penetrante con brocha.

Es una de las formas más económicas y reduce el desperdicio de penetrante. Se recomienda su aplicación en piezas grandes y medianas de formas regulares; también cuando se van a inspeccionar áreas bien definidas como los cordones de soldadura, áreas pequeñas y zonas de difícil acceso para los aerosoles o para aplicar pequeñas cantidades de penetrante en zonas en las que sólo se desea limpiar la parte sujeta a inspección.



**Figura 20.** Aplicación del penetrante sobre la superficie de prueba.

4) Tiempo de penetración del líquido penetrante.

Se define como el tiempo necesario para que el penetrante se introduzca en las discontinuidades.

Este tiempo varía de acuerdo a los siguientes factores:

- 1.- Tipo de penetrante utilizado.
- 2.- Características del material a inspeccionar.
- 3.- El proceso de fabricación del material.
- 4.- Las posibles discontinuidades a detectar.
- 5.- Temperatura.

Existen tablas de tiempos de penetración para diferentes materiales y discontinuidades (ver tabla 21), en las cuales deben considerarse algunos puntos:

Los tiempos sugeridos son tiempos mínimos, y debe verificarse que en este periodo la superficie de la pieza permanezca cubierta con el penetrante.

En caso de que la aplicación inicial de penetrante sea insuficiente, éste se puede aplicar nuevamente, asegurando así que se introduzca en la discontinuidad.

Las tablas de tiempo de penetración se elaboraron tomando como base el rango de temperatura de 16 °C.

El penetrante no debe utilizarse a temperaturas menores al límite inferior, porque disminuye su actividad y no se introduce en las discontinuidades, a pesar de cumplir con el tiempo de penetración establecido en las tablas.

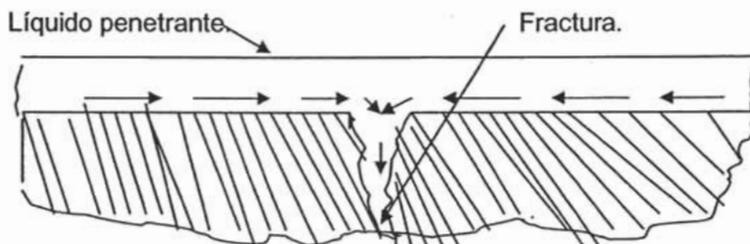
El empleo de tiempos de penetración mayores a los recomendados no afectan la sensibilidad de la inspección, a menos que se permita que el penetrante se seque sobre la superficie de prueba.

Si la superficie comienza a secarse, debe reapplicarse penetrante, de otra forma será difícil su remoción.

Las indicaciones finas del penetrante, por lo general denotan discontinuidades finas.

No obstante, estas discontinuidades pueden ser causadas por un tiempo de penetración inadecuado o insuficientes. Una indicación muy difusa suele ser producida por una condición porosa, pero también puede implicar una remoción incompleta.

La viscosidad de muchos líquidos se incrementa a baja temperatura y los penetrantes no son la excepción. Si la pieza se mantiene fría por ejemplo, bajo de 16 °C (60 °F), el penetrante puede congelarse o condensarse y no entrar en defectos muy finos. Si por el contrario tanto la pieza como el penetrante están muy calientes, los componentes volátiles pueden evaporarse, afectando la capacidad del penetrante para revelar pequeñas discontinuidades. Si las temperaturas del penetrante y del material sujeto a inspección están en el rango de 25°C a 50 °C (80°F-120 °F), se producen óptimos resultados.



**Figura 21.** Acción del líquido penetrante sobre la superficie de prueba.

#### 5) Remoción del exceso de penetrante sobre la superficie.

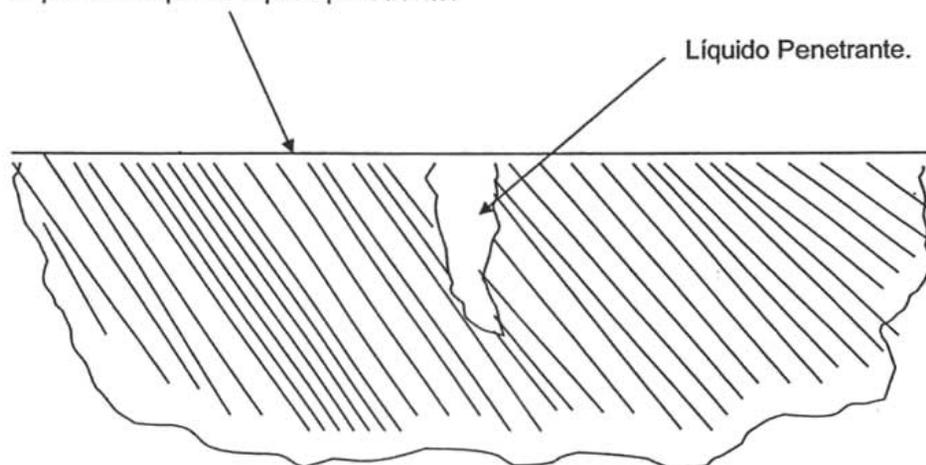
La remoción del exceso del penetrante es el paso más importante en el procesamiento de las piezas para su inspección; por ello debe mantenerse estricto control en cuanto a los diferentes parámetros que esta parte del proceso encierra y de este modo asegurar resultados confiables.

Después de transcurrido el tiempo de penetración, se elimina el exceso de penetrante que queda en la superficie de la pieza. Se debe evitar que el penetrante se seque sobre ésta, ya que puede impedir que el penetrante emerja de las discontinuidades al aplicar el revelador. En caso de que el penetrante se seque, la inspección debe reiniciarse desde el paso de la prelimpieza.

Si no se remueve el exceso de penetrante, pueden presentarse indicaciones falsas, por el contrario, una remoción excesiva puede ocasionar la extracción del penetrante de las discontinuidades grandes o poco profundas, dando como resultado una intensidad reducida.

Otra condición que puede crear indicaciones es el lugar donde se ensamblan dos piezas: Al presionar la flecha en una rueda, el penetrante muestra una indicación en la línea de separación. Esto es perfectamente normal ya que las dos piezas no se encuentran soldadas entre sí. El único problema con tales indicaciones es que el penetrante absorbido en la unión de ambas piezas puede exudar y cubrir alguna discontinuidad real.

Superficie limpia de líquido penetrante.



**Figura 22.** Remoción del líquido penetrante sobre la superficie de prueba.

## 6) Aplicación del revelador.

La cantidad de penetrante que emerge de la discontinuidad superficial es bastante reducida; por lo que es necesario hacer más notable su visibilidad.

Es por ello que posterior a la remoción del exceso de líquido penetrante, se aplica el revelador, una sustancia especialmente compuesta para extraer al penetrante atrapado en las discontinuidades; para que de esta forma sea visible al ojo humano.

El tiempo requerido para que aparezca una indicación es inversamente proporcional al volumen de la discontinuidad. Mientras mayor sea la discontinuidad, el tiempo de absorción del penetrante es menor además de que el penetrante es extraído más fácilmente por el revelador.

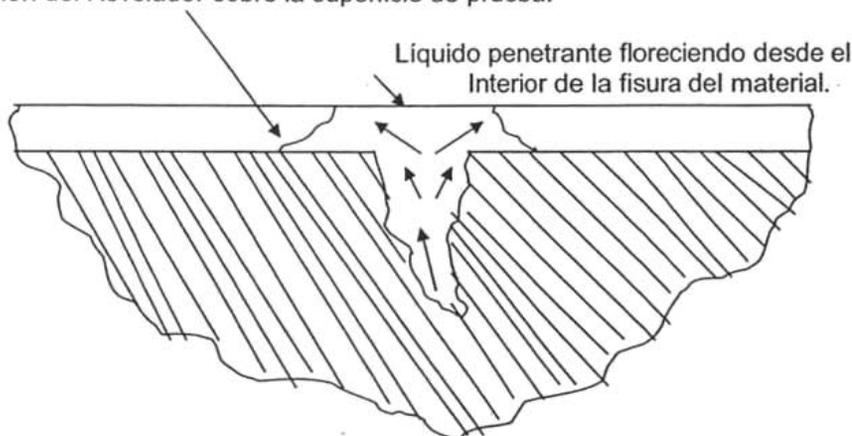
Es importante que transcurra el tiempo suficiente para permitir la aparición de las discontinuidades muy finas.

Es posible emplear el tiempo de revelado como una medida de la extensión de la discontinuidad, si se toman en consideración las siguientes variables.

- a) Tipo de penetrante.
- b) Sensibilidad de la técnica.
- c) Temperatura del penetrante.
- d) Condiciones del examen.



Aplicación del Revelador sobre la superficie de prueba.



**Figura 23.** Aplicación del revelador sobre la superficie de prueba.

El tiempo de revelado comienza inmediatamente después de aplicar el revelador, tan pronto como se evaporen los solventes y se forme la película blanca de revelador.

Un periodo extenso permite el exudado excesivo del penetrante, que al extenderse oscurece las indicaciones.

El revelador logra que las indicaciones sean fácilmente visibles mediante:

- 1.- Un fondo que proporcione un buen contraste.
- 2.- Una extracción del penetrante fuera de las aberturas mediante la acción de absorción.
- 3.- La reducción de la intensidad de la luz negra reflejada durante la observación de las indicaciones fluorescentes.

Si no se remueve por completo el penetrante de la superficie en la operación de lavado y enjuague, será visible; esto puede ocurrir con el penetrante visible o con el fluorescente.

Las evidencias de una remoción incompleta son por lo general fáciles de identificar ya que el penetrante se aloja más en las áreas amplias que en las zonas agudas en donde se encuentran las verdaderas indicaciones.

Después del proceso del revelado, cuando se encuentra acumulación de penetrante, las piezas deben reprocesarse. A su vez, éstas deben limpiarse antes de reaplicar el líquido penetrante.

En tales casos se recomienda desengrasar las piezas para remover todos los posibles trazos de penetrante.

El peligro de aprobar piezas con una remoción deficiente reside en el hecho de que en ciertas áreas pueden existir grietas, las que pueden ser enmascaradas o cubiertas por el penetrante sobre la superficie.

Una pieza completamente limpia y sin discontinuidades no debe tener áreas de penetrante visible o fluorescente sobre ella.

Por el contrario, una pieza bien procesada debe mostrar el penetrante colorante visible o fluorescente solamente sobre las discontinuidades.

### 7) Inspección.

Después de transcurrido el tiempo de revelado, se efectúa la inspección y evaluación de la superficie de la pieza.

El tipo de iluminación empleado depende del proceso utilizado; ya que debe usarse luz normal (luz blanca) de suficiente intensidad para los penetrantes visibles y luz ultravioleta (luz negra) para los fluorescentes.

Esta parte del proceso es sumamente importante; por lo que es necesario verificar que la indicación en examen sea válida y no falsa, dando la impresión equivocada a causa de iluminación inadecuada, un proceso erróneo, etc.

Cuando se tenga duda de sobre la inspección, es preferible limpiar la pieza y repetir el proceso completo, después se determinará el tipo, localización y tamaño de la discontinuidad; así como la especificación aplicable para su evaluación.

La calidad de la inspección está directamente relacionada con la habilidad del inspector para encontrar y evaluar las indicaciones que aparezcan en la superficie de prueba, pero también por las condiciones en que ésta se realice.

Algunos procesos de inspección pueden alterar la condición de las discontinuidades superficiales.

No es posible determinar la eficiencia relativa de diversos procesos mediante inspecciones sucesivas sobre el mismo material, ya que muchos de los materiales utilizados para la inspección no destructiva no son compatibles; por ejemplo lo son el polvo ferromagnético, los líquidos penetrantes fluorescentes y los penetrantes visibles.

Las discontinuidades pueden ser indetectables por la inspección con penetrantes, si previamente se han usado partículas magnéticas, ya que el óxido de hierro residual puede taponar las posibles discontinuidades.

De la misma forma sucede cuando se utilizan penetrantes fluorescentes, si anteriormente se ha inspeccionado el mismo material con penetrantes visibles. En este caso, el colorante absorbe la radiación ultravioleta incidente o puede anular o reducir por completo la fluorescencia.

#### 8) Limpieza final.

La poslimpieza o limpieza final es la última parte del proceso por líquidos penetrantes. Es necesaria, ya que el penetrante y el revelador tienden a acumular humedad lo cual puede producir corrosión, o bien, interferir en el uso o proceso posterior a la inspección.

El método de limpieza recomendado es uno semejante al de la prelimpieza. Los limpiadores del tipo detergente generalmente se utilizan para remover materiales base agua; mientras que el desengrase en vapor es más conveniente para la remoción de materiales base aceite, [1],[4],[9],[10].



**Diagrama 1.** El proceso de Líquidos Penetrantes, [9],[10].

### **II.3. Interpretación de las indicaciones.**

En todos los métodos de ensayos no destructivos, incluyendo la inspección por líquidos penetrantes, se producen indicaciones indirectas, que deben ser correctamente interpretadas antes de obtener información útil.

Para interpretar las indicaciones correctamente, el inspector debe familiarizarse completamente con el proceso que está empleando.

Debe saber si se efectuó correctamente, además de ser capaz de obtener toda la información acerca de una discontinuidad y sus consecuencias en la pieza.

Puesto que la evaluación correcta de las indicaciones obtenidas depende de la interpretación exacta de las mismas, el inspector es un elemento clave del proceso.

En muchas ocasiones se espera que el inspector que observa la indicación, también la interprete, por lo que un inspector hábil y con experiencia puede ser de gran utilidad para mejorar los métodos de inspección.

En cuanto a las discontinuidades en particular, éstas se dividen en tres clases: Inherentes, de proceso y de servicio.

#### **1.- Discontinuidades inherentes.**

Son aquellas que se forman durante la fusión y solidificación del metal fundido, existen dos tipos:

##### **a) De fundición primaria.**

Estas discontinuidades están directamente relacionadas con la fundición y solidificación original del metal o lingote antes de ser transformado en tochos, palanquillas, placas, etc.

##### **b) De fundición secundaria.**

Son discontinuidades que se relacionan con el fundido, el vaciado y la solidificación del metal, incluyendo aquellas discontinuidades que pueden ser apropiadas de las variables de manufactura, vertedero en mal estado; temperatura alta de vaciado y gases atrapados.

#### **2.- Discontinuidades de proceso.**

Las discontinuidades de proceso son aquellas que se relacionan con los procesos de manufactura como maquinado, tratamientos térmicos, recubrimientos metálicos, forja, extrusión, rolado, etc.

Es importante recordar que durante los procesos de manufactura, muchas discontinuidades que son subsuperficiales se abren a la superficie.

### 3.- Discontinuidades de servicio.

Son discontinuidades que se forman por las diferentes condiciones de servicio, como son: esfuerzos de tensión o compresión, por corrosión, fatiga o fricción, [10].

#### **II.3.1. Apariencia de las indicaciones.**

Si se usa un penetrante fluorescente y el examen se realiza bajo luz ultravioleta (luz negra) las áreas sanas aparecerán de un color azul-violeta intenso, mientras que las discontinuidades se observarán resplandecientes con una luz brillante verde-amarilla.

La intensidad de fluorescencia está asociada con el volumen y concentración de penetrante retenido en la discontinuidad. Si se usa un penetrante con colorante, el examen se deberá hacer bajo la luz natural.

El revelador forma un fondo blanco y las discontinuidades son visibles mediante una indicación de color rojo, la cual está estrechamente relacionada con el volumen de penetrante atrapado en la discontinuidad.

#### **II.3.2. Nitidez de las indicaciones.**

La definición de la indicación del penetrante es afectada por el volumen del líquido retenido en la discontinuidad y por las condiciones de prueba tales como la temperatura, tiempo de revelado de las indicaciones y tipo de penetrante usado. Por lo general las indicaciones bien definidas o claras provienen de discontinuidades lineales y angostas.

#### **II.3.3. Brillantez y extensión de las indicaciones.**

El color o brillo fluorescente de las indicaciones del penetrante puede ser muy útil en la evaluación de una discontinuidad. La brillantez está directamente relacionada con la cantidad de penetrante presente y con el tamaño de la discontinuidad. Es difícil para el ojo humano detectar pequeñas diferencias en el color de los penetrantes visibles y fluorescentes.

#### **II.3.4. Persistencia de las indicaciones.**

Con el tiempo algunas indicaciones disminuyen su coloración y en ocasiones desaparecen. Esto era un fenómeno común cuando fueron empleados los primeros penetrantes visibles, que tenían baja concentración de pigmento.

Una buena forma de estimar el tamaño de las discontinuidades es mediante la persistencia de la indicación. Las indicaciones que aparecen después de remover y volver a aplicar el revelador, generalmente son discontinuidades muy grandes que pueden mantener una gran cantidad de penetrante; sin embargo, los líquidos

penetrantes sólo pueden indicar el largo y ancho pero no la profundidad de una discontinuidad.

Existen variables que influyen en la persistencia de la indicación, algunas de éstas son:

- 1.- Los métodos de prelimpieza. (Los restos de álcalis o de ácidos pueden disminuir la coloración del pigmento).
- 2.- El tipo de penetrante y su tipo de pigmento.
- 3.- La temperatura. (La alta temperatura o un tiempo excesivo en el secador).
4. - Tipo de revelador.
5. - La concentración del emulsificante y el tiempo de emulsificación, [1],[9], [10].

#### **II.4. Evaluación de una discontinuidad.**

La presencia de una indicación plantea cuatro interrogantes:

- 1.- Que tipo de discontinuidad causa esta indicación.
- 2.-Cuál es la extensión de la discontinuidad.
- 3.- Qué efecto provoca la discontinuidad sobre el servicio posterior de la pieza.
- 4.- Cuáles son las tolerancias establecidas por el documento aplicable.

Con base en las respuestas de estas preguntas es posible determinar si la pieza se acepta o se rechaza.

El tipo y tamaño de la discontinuidad no sólo determina con respecto a la experiencia del técnico, ya que de ello depende la estimación del posible daño de la pieza.

#### **II.5. Tipos de líquidos penetrantes.**

Existen operaciones de inspección que requieren de la mayor sensibilidad posible, pero hay otras en que la sensibilidad requerida es menor, por lo que a falta de conocimiento, se podría incurrir en costos elevados no justificables o bien en economías mal entendidas.

El tamaño, forma y peso de las piezas a inspeccionar, así como su número, influyen de manera determinante en la selección del sistema a emplear.

Adicionalmente, la sensibilidad del método y su costo también son factores importantes para tal selección.

Las técnicas capaces de desarrollar una alta sensibilidad son más costosas que las técnicas de baja sensibilidad.

A continuación se presentan los tipos de líquidos penetrantes usados en la industria.

- 1.- Líquido penetrante lavable con agua.
- 2.- Líquido penetrante posemulsificable.
- 3.- Líquido penetrante removible con solvente.

Estas tres características son comercialmente empleadas para líquidos penetrantes fluorescentes ó contrastantes con luz natural, solo que la diferencia de cada uno de ellos es su modo de proceso de aplicación, que a continuación se describen en:

#### **II.5.1. Penetrante fluorescente removible con agua, método A tipo 1.**

En los países altamente industrializados este proceso de inspección es uno de los más ampliamente utilizados.

Difiere del proceso posemulsificable en que no requiere de la ampliación de un emulsificante para remover el exceso de penetrante.

Los tipos fluorescentes producen indicaciones fluorescentes y brillantes de color amarillo verdoso, cuando se observan bajo luz ultravioleta.

Las principales ventajas y limitaciones de este proceso se enlistan continuación:

Ventajas:

- 1.- Tiene varios niveles de fluorescencia para una amplia gama de aplicaciones.
- 2.- El exceso de penetrante de la superficie se remueve fácilmente con agua.
- 3.- Se recomienda su empleo cuando existe un gran número de piezas de gran dimensión.
- 4.- Es junto con la técnica de penetrante visible removible con agua el más recomendable para piezas con superficies rugosas, así como para piezas forjadas y fundiciones de grandes dimensiones.
- 5.- Es buen método para la inspección de piezas roscadas y ranuradas.
- 6.- Permite economía en tiempo para una amplia gama de discontinuidades.
- 7.- Elimina el paso de emulsificación y las variables asociadas.
- 8.- Es de fácil adaptación a procesos automatizados comparado con las técnicas posemulsificables.
- 9.- Reduce el costo de operación, principalmente por la reducción del tiempo de proceso y el costo del equipo.

## Limitaciones:

- 1.- Un acabado superficial demasiado terso como es el caso del cromado o del niquelado puede afectar la sensibilidad de la prueba.
- 2.- La sensibilidad es afectada por la remoción del penetrante.
- 3.- Este tipo de penetrante es de fácil remoción en discontinuidades abiertas y poco profundas, causando con esto la posible omisión en la detección de las mismas, aunque en comparación con otros, el método posemulsificable es más recomendable para este tipo de discontinuidades.
- 4.- Requiere inspección en áreas oscuras con luz ultravioleta (Luz negra).
- 5.- Necesita de agua y de electricidad.
- 6.- El anodizado que ha sido sellado con cromatos puede afectar la sensibilidad de este método.

### 1.- Aplicación del penetrante.

Puede emplearse la técnica de inmersión para las piezas de tamaño pequeño, ya sea en forma individual o en canastas o en recipientes para sumergirlos en el tanque de penetrante. En otros casos se puede utilizar el rociado. Para ambas técnicas sólo es necesario aplicar una capa de penetrante para cubrir la superficie de la pieza, por lo que no se requiere mantener las piezas inmersas en penetrante durante el tiempo de permanencia.

### 2.- Tiempo de penetración.

Este tiempo incluye la estancia de la pieza en el tanque de inmersión en el penetrante y el tiempo de drenado en que la película de penetrante cubre toda la superficie de la pieza. Cuando se utilizan tiempos de penetración demasiado largos, el penetrante puede secarse, por lo que se hace necesario la reaplicación de una nueva capa.

### 3.- Remoción del exceso de penetrante.

Se efectúa mediante un lavado con agua. Lo mejor es emplear un rocío grueso, poniendo especial atención en las partes donde existen orificios o cuerdas para asegurar la remoción completa.

Para este tipo de penetrantes, la operación de lavado debe efectuarse bajo luz ultravioleta para asegurar una limpieza correcta.

### 4.- Aplicación del revelador.

En este paso del proceso existen dos tipos de reveladores que son:

#### a) Revelador húmedo.

Cuando se utiliza este tipo de revelador, puede eliminarse la etapa de secado. Las piezas se sumergen en un tanque con revelador húmedo; se extraen del mismo; se permite el drenado del revelador húmedo; se colocan en un secador para remover el exceso de agua antes del revelado.

b) Revelador seco.

Cuando se emplea este tipo de reveladores, es necesario secar la pieza inmediatamente después de la remoción del exceso de penetrante.

Este revelador puede aplicarse individualmente o en conjunto mediante el uso de canastas. Puede utilizarse un tanque con el revelador en polvo o una pistola para su aplicación.

5.- Secado.

Para esta operación se utiliza un secador con recirculación de aire caliente de 220 °F a 225 °F, y el periodo de permanencia es sólo el necesario para secar el agua de la superficie. Si se excede del tiempo, puede provocarse evaporación del penetrante con la consiguiente reducción de sensibilidad del proceso. Por la misma razón, la temperatura de secado no debe ser mayor a 250 °F.

Adicionalmente, durante el secado se produce el calentamiento de la pieza y del penetrante de las discontinuidades, lo que reduce su viscosidad y tensión superficial, permitiendo que el revelador extraiga más fácil y eficientemente al penetrante de las discontinuidades.

6.- Inspección.

Debe realizarse bajo luz ultravioleta en un área oscura. Se deberán interpretar y evaluar las indicaciones de las discontinuidades que florezcan con una luz brillante en la oscuridad.

### **II.5.2. Penetrante fluorescente posemulsificable, método A tipo 2.**

Un penetrante posemulsificable tiene una base o vehículo de aceite, al cual se le ha añadido un pigmento fluorescente y brillante. Este tipo de penetrante no puede removerse por el lavado con agua, pues no contiene un emulsificante.

El tiempo de penetración es comparable al de los penetrantes lavables con agua. Las ventajas de esta técnica sobre el proceso de penetrante removible con agua se basan principalmente en la flexibilidad en la etapa de aplicación del emulsificante y el hecho de que el penetrante no emulsificado no es fácilmente extraído de las discontinuidades.

El tiempo de emulsificación incluye el tiempo durante el que la pieza se sumerge en un tanque con emulsificante, más el tiempo de drenado de éste.

Ventajas:

- 1.- Puede detectar discontinuidades abiertas y poco profundas, las cuales no pueden localizarse con el método lavable con agua.
- 2.- Es un sistema de alta sensibilidad para la detección de discontinuidades muy finas.

- 3.- Tiene alta luminosidad o brillantez, ya que su formulación permite el uso de altas concentraciones de colorante fluorescente.
- 4.- El tiempo de penetración se reduce porque el penetrante libre de emulsificante se introduce más rápidamente en las discontinuidades.
- 5.- Las piezas pueden ser reprocesadas con buenos resultados.
- 6.- El penetrante posemulsificable no absorbe agua, de tal forma que si existe alguna posible contaminación con dicho líquido, ésta no reduce la vida útil del penetrante.
- 7.- Presenta mejores resultados en la detección de discontinuidades contaminadas o que no se han limpiado bien.

#### Limitaciones:

- 1.- La principal limitación de esta técnica es que requiere separar los pasos de penetración y de emulsificación para asegurar la detección de discontinuidades anchas, lo que significa un tiempo mayor de proceso, utilización de equipo adicional y control de los dos pasos por separado.
- 2.- El nivel de sensibilidad se define mediante un cuidadoso control del tiempo de emulsificación; se requiere especial cuidado durante este paso, para asegurar resultados consistentes.
- 3.- Esta técnica no es adecuada para la inspección de piezas con ranuras, aristas, cuñeros, roscas, etc., por la dificultad de lavado y limpieza, debido a que el emulsificante no tiene el tiempo suficiente para difundirse correctamente en estos lugares.
- 4.- El costo total de inspección en tiempo, materiales y operación es por lo general mayor, comparado con las técnicas lavables con agua.
- 5.- Requiere del suministro de agua y electricidad.

#### 1.- Aplicación del penetrante.

El penetrante posemulsificable puede aplicarse por inmersión, rociado o con brocha. Posee excelentes características de penetración. Sin embargo, la acción general de este tipo de penetrante es parecida al tipo lavable con agua, inclusive puede aplicarse de forma similar.

#### 2.- Remoción del exceso de penetrante y aplicación del emulsificante.

Puesto que el penetrante usado en este proceso no es lavable con agua, es necesario aplicar un emulsificante para hacer una mezcla penetrante emulsificable que pueda removerse con agua.

El emulsificante puede aplicarse por inmersión o por rociado sobre la pieza de prueba, pero debe evitarse el empleo de brocha, pues es posible que se remueva el penetrante atrapado en las discontinuidades.

El tiempo de emulsificación en piezas donde existen fracturas profundas y estrechas no es un factor crítico de control. Para piezas con superficies tersas, este tiempo debe ser menor que para superficies rugosas.

La rugosidad de la superficie puede evitar que se combinen el emulsificante y el penetrante de la superficie reduciendo en consecuencia la lavabilidad.

Esta acción indeseable hace poco recomendable el empleo de penetrantes posemulsificables en superficies demasiado rugosas, con cuerdas u orificios.

El tiempo de emulsificación es un factor crítico cuando se requiere detectar discontinuidades finas. Sin embargo, no existen tiempos recomendables de emulsificación, por lo que para cada pieza y discontinuidad, éste debe determinarse en forma experimental.

El tiempo de emulsificación puede variar desde 10 segundos hasta 5 minutos, dependiendo de la condición superficial de la pieza y del tipo de discontinuidades esperadas. El tiempo promedio es aproximadamente 3 minutos.

### 3.- Enjuague.

Después del período de emulsificación, debe removerse la mezcla de emulsificante y penetrante, empleando en lo posible un rociado con agua; esta operación debe efectuarse bajo luz ultravioleta para asegurar la remoción completa de la superficie.

### 4.- Secado e inspección.

Se efectúan de forma idéntica a la del proceso de penetrante lavable con agua.

## **II.5.3. Penetrante fluorescente removible con solvente, método A tipo 3.**

En este método, el exceso de penetrante es removido de la superficie de la pieza por medio de material absorbente seco y posteriormente con un material absorbente humedecido con solvente.

En este caso debe tenerse extremo cuidado de no saturar con solvente el material de limpieza para evitar la remoción del penetrante de las discontinuidades. Este método se emplea con frecuencia en lugares en que no existe agua, en materiales con acabado terso o en zonas bien definidas.

Ventajas.

- 1.- Asegura buena visibilidad de las discontinuidades, inclusive de las más finas.
- 2.- Utiliza equipo portátil.
- 3.- No requiere agua.
- 4.- Puede utilizarse en piezas anodizadas.
- 5.- Es buen método para la inspección de secciones específicas de una pieza.
- 6.- Las piezas pueden reinspeccionarse.

Limitaciones:

- 1.- El penetrante puede ser inflamable.
- 2.- Requiere de una área con luz ultravioleta para la inspección.
- 3.- El tiempo de remoción del exceso de penetrante es mayor que en el caso de los penetrantes lavables con agua.
- 4.- Generalmente, no se utiliza en superficies rugosas, como por ejemplo en fundiciones.

#### **II.5.4. Penetrante contrastante (visible) lavable con agua, método B tipo 1.**

El proceso de penetrante contrastante (visible) removible con agua usa un penetrante que puede ser removido con agua y que no requiere la ayuda de un emulsificante.

Se utiliza cuando no se requiere alto nivel de sensibilidad y cuando se inspeccionan grandes volúmenes de piezas.

Ventajas:

- 1.- Es una técnica rápida.
- 2.- Recomendable para emplearse en piezas donde el tamaño y forma lo permitan.
- 3.- El equipo es portátil, no requiere del empleo de luz ultravioleta.
- 4.- Puede emplearse sólo en algunas zonas de secciones grandes o en piezas que van a ser separadas.

Limitaciones:

- 1.- Es el de menor sensibilidad en comparación con los demás sistemas penetrantes para detectar discontinuidades muy finas.
- 2.- Sólo detecta discontinuidades considerablemente grandes.
- 3.- El volumen de penetrante atrapado en las discontinuidades es muy susceptible de ser extraído o diluido durante el proceso de remoción del exceso de penetrante.
- 4.- Después de la remoción se requiere secar la superficie a la brevedad posible.
- 5.- Para la inspección de grandes lotes de piezas o inspecciones en serie, se requiere el suministro continuo de agua y un sistema adecuado de drenado.

- 1.- Aplicación del penetrante.

Puede emplearse las mismas técnicas de aplicación de los penetrantes fluorescentes como son: inmersión y rociado. También se puede aplicar con brocha.

## 2.- Enjuague.

Puesto que en este caso el penetrante es lavable con agua, el enjuague simplemente se efectúa hasta que se elimina el color rojo de la superficie de la pieza. Deben tomarse precauciones especiales durante el enjuague porque las gotas finas de agua o un rociado severo pueden eliminar el penetrante de las discontinuidades. Por la misma razón, debe evitarse el tiempo y la presión excesiva de rociado, o largos periodos de permanencia cuando las partes se sumergen en agua.

Se recomienda emplear agua a temperatura de 20°C a 35 °C. Puede emplearse agua a menor temperatura, pero se requerirá mayor tiempo de enjuague.

## 3.- Aplicación del revelador.

El revelador se rocía en la superficie de la pieza después de remover el exceso de penetrante. Para obtener óptimos resultados, debe aplicarse una capa ligera y uniforme del revelador.

### **II.5.5. Penetrante contrastante (visible) posemulsificable, método B tipo 2.**

En este método, la combinación del penetrante contrastante y el emulsificante removedor produce una mezcla, la cual puede ser enjuagada de la superficie de la pieza fácilmente.

Mientras que el emulsificante no entre en contacto con el penetrante de las discontinuidades, el enjuague con agua no remueve el penetrante de éstas.

No obstante, la combinación penetrante-emulsificante puede ser removida con agua.

Este sistema se utiliza cuando se desea obtener mayor sensibilidad que la alcanzada con los penetrantes visibles lavables con agua y en este caso también cuando se inspecciona grandes volúmenes de piezas.

Este método ha sido diseñado para que la combinación del penetrante y el emulsificante produzca una mezcla fácilmente lavable con agua.

Puesto que el emulsificante no se introduce en las discontinuidades, el enjuague con agua no remueve el penetrante de las mismas formas.

Ventajas:

- 1.- Es muy útil cuando se requiere una sensibilidad mayor que la que ofrecen los penetrantes visibles removibles con agua.
- 2.- Es aplicable en piezas con rugosidad superficial media.
- 3.- Sólo es removible la mezcla penetrante/emulsificador.
- 4.- Su aplicación es adecuada para inspecciones en campo.
- 5.- Es idóneo para discontinuidades anchas y poco profundas.
- 6.- El penetrante posee alta calidad de penetración.

Limitaciones:

- 1.- Requiere un paso adicional en el proceso y esto incrementa el costo de la inspección.
- 2.- Es necesario aplicar un líquido emulsificador.
- 3.- El tiempo de emulsificación es muy crítico; debe ser el suficiente para que el emulsificador se mezcle con el penetrante atrapado en las discontinuidades.
- 4.- Requiere el suministro de agua.

1.- Secado.

Las piezas deben secarse totalmente antes de aplicar el revelador seco. Puede usarse un horno de secado a una temperatura entre 49°C y 60 °C (120°F a 140 °F).

También es recomendable secar las piezas con una corriente de aire seco a presión o secar al medio ambiente.

2.- Aplicación del revelador.

Cuando se utiliza un revelador en suspensión, debe usarse el método de rociado para obtener una capa delgada y uniforme.

No debe utilizarse la inmersión o la aplicación del revelador con brocha o por inmersión, porque no proporcionan una capa con las características descritas.

Se puede emplear una pistola rociadora con una presión de aire de 25 Psi a 30 Psi.

### **II.5.6. Penetrante contrastante (visible) removible con solvente, método B tipo 3.**

Se utilizan para la inspección puntual y cuando por razón del tamaño de la pieza, masa y condición de la superficie, el método de eliminación por agua no es factible.

Por este sistema pueden inspeccionarse pequeñas cantidades de piezas.

Ventajas:

- 1.- No requiere suministro de agua.
- 2.- Se puede aplicar donde no sea permisible o resulte impráctico una operación de enjuague.
- 3.- Es práctico su empleo para inspeccionar solamente una pequeña porción de un gran ensamble o de una pieza muy grande.
- 4.- No requiere luz ultravioleta o áreas de examinación semioscurecidas.

Limitaciones:

- 1.- Sólo es aplicable a piezas con acabado terso.
- 2.- Su aplicación es impráctica y en ocasiones imposible en superficies con acabado burdo.
- 3.- No es muy sensible para detectar discontinuidades poco profundas y anchas.
- 4.- El proceso de remoción generalmente ocupa mayor tiempo.
- 5.- No es costeable su aplicación al inspeccionar grandes cantidades de piezas.

El penetrante contrastante utilizado con más frecuencia es del tipo removible con solvente. En este caso, el exceso de líquido penetrante se elimina de la superficie de la pieza empleando un disolvente que elimine tanto el penetrante como el colorante.

Generalmente se emplean tres variantes:

- a) El tipo de bajo punto de inflamabilidad en el que el líquido penetrante es principalmente un aceite inflamable relativamente volátil.
- b) El tipo de alto punto de inflamabilidad, aquí el penetrante consiste en líquidos orgánicos que pueden ser combustibles pero que ofrecen mucho menos riesgo del incendio que el tipo de bajo punto de inflamabilidad.
- c) El tipo no combustible, en el que el líquido penetrante consiste en un líquido orgánico o en una mezcla de líquidos orgánicos que son esencialmente no combustibles y no inflamables.

Lo atractivo de este tipo de líquidos penetrantes visibles reside precisamente en su extrema simplicidad de operación; puede emplearse en cualquier sitio y no requieren polvos o equipo.

#### 1) Selección de revelador.

La selección del revelador juega un papel muy importante en la inspección por líquidos penetrantes, por lo que se debe utilizar el que convenga, dependiendo del método utilizado y del tipo de superficie a ser inspeccionada.

Las reglas generales para el uso de los diferentes reveladores son:

- a) Los reveladores en suspensión acuosa actúan más eficientemente en superficies tersas.
- b) Los reveladores secos actúan más eficientemente en superficies rugosas y con penetrante fluorescente.

c) Los reveladores en suspensión acuosa son más eficientes para la inspección masiva de piezas pequeñas por su facilidad y velocidad de aplicación.

d) Los reveladores en suspensión acuosa aplicados por inmersión no son recomendables para la detección de discontinuidades muy pequeñas o finas.

e) Los reveladores en suspensión no acuosa, aplicados por rociado, son muy eficientes para detectar discontinuidades finas, pero son inadecuados para discontinuidades anchas o poco profundas.

f) La limpieza y reinspección de una superficie rugosa es más difícil si un revelador en suspensión acuosa fue usado en una inspección anterior.

Debe recordarse que el revelador no produce las indicaciones, sólo absorbe el penetrante que quedó atrapado en las discontinuidades, por lo que la aplicación del revelador debe ser en forma de una capa delgada y homogénea que no interfiera con la formación de las posibles indicaciones ni reduzca su visibilidad, [9],[10],[12].

## **II.6. Funciones del inspector y terminología utilizada en la interpretación y evaluación de indicaciones.**

Para interpretar de manera óptima las indicaciones que resultan de la aplicación de líquidos penetrantes, es necesario contar no sólo con los instrumentos adecuados.

Es indispensable además que el inspector tenga la experiencia suficiente para interpretar las indicaciones, pero además, que en los casos necesarios se apoye en los especialistas de otras disciplinas afines al proceso de producción del material examinado, para la evaluación final de piezas inspeccionadas. Así mismo, deberá acatar la normatividad emitida para tal efecto, misma que más que ser un obstáculo para su labor, puede convertirse en una guía para la toma de decisiones.

A continuación se definen algunos términos importantes en la interpretación de indicaciones:

a) Sangrado.

Es la acción de un penetrante cuando es expuesto a la superficie desde el interior de una discontinuidad.

b) Capilaridad.

Es la tendencia de los líquidos penetrantes de emigrar o introducirse hacia el interior de pequeñas fisuras tales como fracturas, porosidades, falta de fusión etc.

c) Contraste.

Es la diferencia de visibilidades entre una indicación y la superficie de prueba.

d) Defecto.

Es una discontinuidad que por su tamaño, forma o localización interfiere con la geometría y la funcionalidad normal de un artículo.

Con base a lo anterior, se puede concluir que:

- 1.- Todos los defectos son discontinuidades.
- 2.- No todas las discontinuidades son defectos.
- 3.- No todas las indicaciones son discontinuidades.

e) Indicación.

Es una señal o marca a causa del resultado del sangrado del líquido penetrante que fue alojado en una discontinuidad y pueden ser:

1.- Indicación falsa.

Es aquella que aparece durante la inspección y que puede ser provocada por una mala aplicación del método o contaminante de la superficie.

2.- Indicación no relevante.

Es producida por la configuración del material o de la pieza.

En general es el resultado de las cuerdas de una rosca, las zonas de ajuste de presión o bien de cualquier cavidad que pueda alojar al líquido penetrante.

3.- Indicación relevante.

Es producida por una discontinuidad y para determinar su importancia se debe interpretar la indicación y evaluar la discontinuidad:

f) Discontinuidad.

Es la falta de homogeneidad o interrupción en la estructura física normal de un material; también puede ser una deficiencia en la configuración física normal de una pieza, parte o componente.

Las discontinuidades pueden ser:

1.- Discontinuidad no relevante.

Es aquella que por su tamaño, forma o localización, requiere de ser interpretada pero no es necesario evaluarla.

2.- Discontinuidad relevante.

Es aquella que por su tamaño, forma o localización requiere de ser interpretada y evaluada.

g) Interpretación.

Es la determinación del significado de las indicaciones desde el punto de vista de si es o no relevante.

h) Sensibilidad.

Capacidad del proceso de líquidos penetrantes para detectar discontinuidades superficiales.

i) Evaluación.

Es la determinación de la severidad de la discontinuidad después de que la indicación se ha interpretado; es decir, determina si el artículo es aceptado, reparado o rechazado, [9],[10],[12].

### III. Manual de ultrasonido industrial y líquidos penetrantes.

Con este manual se pretende instruir al usuario para adquirir los conocimientos necesarios acerca del manejo, calibración e interpretación en la pantalla del equipo ultrasónico de tipo pulso eco "Sonic 1200"; y solo es aplicable con fines de entrenamiento para la detección de discontinuidades en el interior de materiales con geometría no muy complejas y en uniones soldadas.

Para el caso con líquidos penetrantes se describirán los pasos para la aplicación, tiempos de penetración e interpretación de discontinuidades que se pueden detectar en materiales comúnmente usados en la industria.

#### III.1. Componentes del equipo ultrasónico tipo pulso-eco "Sonic 1200".

Cantidad.	Especificación.
1	Unidad base "Sonic 1200". S/N. 1200B1293DO11339, INVENTARIOS U.N.A.M.:1498522.
1	Unidad Display LCD.
1	Eliminador y/o cargador de baterías. Marca STAVELEY, INPUT: 90-260 V, 47-63 HZ, 80 WATTS, OUTPUT: 24 VDC MAX. S/N.1000BCE1242DO71487,
1	Cable para el eliminador y/o recargador.
2	Baterías tipo DR35.
1	Bolsa ligera para transporte.
1	Estuche protector de plástico duro.
1	Bote de 2 onzas de acoplante tipo X30S.
1	Manual de operación para equipo Sonic 1200.
1	Certificado de calibración tipo NIST.
1	Cable de 6' BNC-BNC.(Kings KC-59-491;KC-59-152).
1	Cable de 6' BNC-microdot.(Kings KC-59-152;microdot)
1	Transductor marca PowerLink tipo SpectrumE8L de 5 MHZ y de 0.5" Diam.
1	Transductor marca PowerLink tipo Spectrum E4L de 2.25 MHZ y de 0.75" Diam.
1	Transductor marca PowerLink tipo Spectrum C17 de 10 MHZ y de 0.25" Diam.
1	Transductor de incidencia angular marca PowerLink tipo Spectrum F2L de 2.25 MHZ y de 0.5" Diam.
1	Zapata tipo Spectrum G2 de 45°.
1	Zapata tipo Spectrum G4 de 60°.
1	Zapata tipo Spectrum G6 de 70°.

Tabla 2. Paquete estandar Sonic 1200.

### III.2. Lista de chequeo de inspección inicial.

Después de que el equipo ultrasónico y los componentes han sido desempacados checar de nuevo la lista de paquete, debe hacerse una inspección visual y de operación básica al equipo.

Estructura estética dañada?

Encendido del instrumento "On" ok?

Encendido de prueba ok?

Mensaje encendido en la carátula "EL/LCD" ok?

Nota : Para consulta de características, instalación y manejo de los accesorios del equipo ultrasónico "Sonic 1200", antes de ser usado para inspección de materiales debe recurrirse al manual de operación del mismo equipo, "No es recomendable tomar en cuenta otro tipo de manual que no cuente con las mismas características", [3].

### III.3. Accesorios requeridos para la calibración del equipo ultrasónico empleando incidencia angular para detectar discontinuidades en zonas soldadas.

La prueba se hace por medio de una inspección empleando onda de haz angular.

El haz angular es la mejor manera para detectar indicaciones en uniones de materiales con soldadura y este tipo de onda es usualmente especificado en códigos como el AWS y ASME para la obtención de mejores resultados en una soldadura en particular.

#### 1.- Transductor.

El transductor usado dependerá del material, condición de superficie y espesor, (Usar tabla 1 y ecuación 13 para cálculo de los hertz), y deberá ser capaz de separar las tres reflexiones del bloque de calibración IIW tipo 2.

Para seleccionar el transductor correctamente de realizarán las siguientes operaciones:

Consultar tabla 1, empleando ecuación 13 y tomando en cuenta que la discontinuidad más pequeña que puede detectarse con la prueba ultrasónica es:

$$n = \frac{\lambda}{2} \quad \dots(16)$$

Donde:

$n$  = Discontinuidad más pequeña que puede encontrarse (2mm).

$\lambda$  = Longitud de onda.

Sabemos que por la ecuación 13;  $f = \frac{V}{\lambda}$ , entonces sustituimos valores para el acero:

Por tabla 1, sabemos que el acero tiene una velocidad acústica angular de  $3048 \times 10^3$  mm/s, despejando  $\lambda$  de ecuación 16, tenemos:

$\lambda = 2n$  y sabemos que  $n = 2$  mm, sustituimos,

$$\lambda = 2(2\text{mm}) = 4\text{mm},$$

$$V = 3048 \times 10^3 \text{ mm/s}$$

Sustituimos valores en ecuación 13:

$$F = \frac{3048 \times 10^3 \text{ mm/s}}{4 \text{ mm}} = 0.762 \text{ Mhz.}$$

En caso de que no se tenga disponible un transductor con la frecuencia calculada, se usará la inmediata superior que puede ser 2.0 Mhz. ó 2.25 Mhz.

#### 2.- Zapata.

El ángulo en la zapata dependerá del espesor a inspeccionar, (Ver tabla 3, "selección del ángulo de la zapata").

#### 3.- Cable del transductor.

Usar un Sonic BNC/Microdot y que haga juego con el transductor y conectarlo a la entrada "RCV" del equipo ultrasónico.

#### 4.- Acoplante.

Usar un acoplante que moje perfectamente la superficie de prueba y que no se seque con rapidez. Para superficies lisas es recomendable usar acoplantes ligeros (gel comercial o aceite industrial), para superficies rugosas usar el Sonic X30s #3317450 que es el más apropiado.

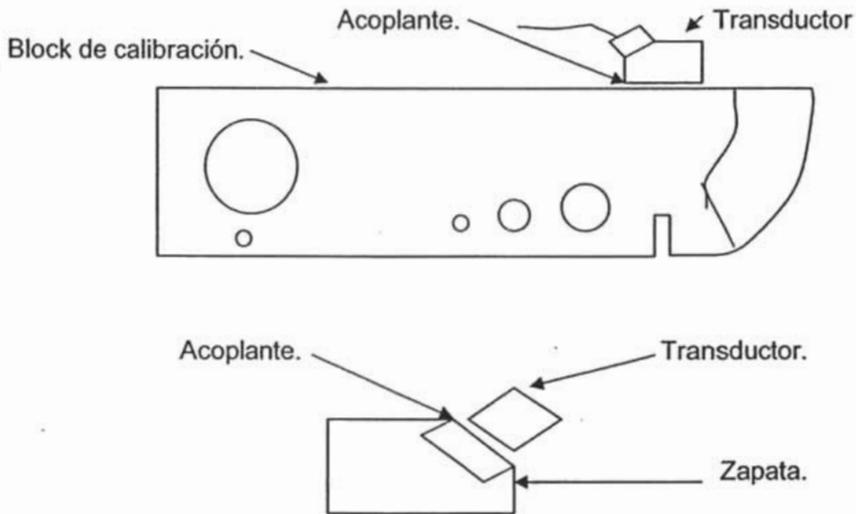
Nota: El acoplante se colocará entre la superficie del bloque de calibración y el palpador así como también al roscar el transductor con la zapata, figura 24.

5.- Bloque de calibración IIW tipo 2 ó en su caso el IIW tipo 1.

El bloque de calibración IIW tipo 1 se caracteriza por su utilidad para verificar el punto índice de emisión, el ángulo refractado, el poder de resolución y la sensibilidad.

El bloque de calibración IIW tipo 2 es una versión semejante al del tipo 1 pero éste incluye un radio de 2" x 0.250" en escalón y tres agujeros laterales para verificar la resolución del equipo.

Nota: Para recarga de las baterías y conexión del equipo ultrasónico el usuario debe leer cuidadosamente las instrucciones indicadas en la sección 1.0 del manual de fabricación del equipo ultrasónico, "Preparación antes de operación".



**Figura 24.** Colocación del acoplante sobre la superficie de inspección y en la zapata.

Espesor (pulg)	Angulo de refracción (grados)
0.312-0.750	80 y 70
+0.750-1.5	70
+1.5-2.5	70,60 y 45
+2.5-4	70,60 y 45
+4-8	70,60 y 45

**Tabla 3.** Selección del ángulo de la zapata.

Una vez conectados los accesorios y el equipo ultrasónico a la toma de corriente, pulsar el botón verde "ON", y esperar hasta que aparezca la última configuración que realizó el operador en la inspección anterior o en su defecto puede aparecer la configuración del fabricante si en la misma inspección que realizó el operador pulsó el botón de "Rango" mientras el equipo estaba prendido, [2],[3].

### III.3.1. Localizar el punto de entrada del sonido del transductor hacia el material de inspección.

1.- Pulsar menú "Rango" en el equipo ultrasónico y aparecerá en la pantalla una serie de valores para cada una de las funciones, tabla 4.

Ganancia	Rango	Retardo	Velocidad	Max. Rep.
----------	-------	---------	-----------	-----------

Tabla 4. Menú "Rango" en pantalla.

a) Seleccionar con los botones INC/DEC o con la perilla SmartKnob rotándolo hacia la derecha o izquierda del equipo ultrasónico un rango de 10 in.

La pantalla del equipo tiene una forma cuadrículada dividida en 10 secciones por 10, esto quiere decir que ahora cada sección valdrá 1in, figura 25.

El "Rango" será ajustado dependiendo de la longitud máxima de la trayectoria de la onda (La suma de la primera pierna más la segunda pierna, figura 35).

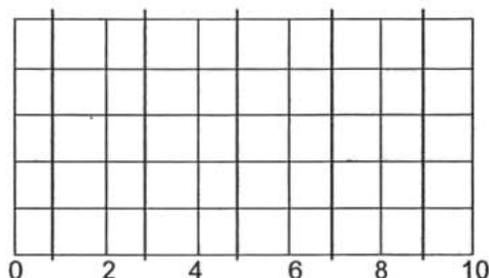


Figura 25. Pantalla cuadrículada con rango de 10 in.

b) Seleccionar el recuadro de "Retardo" y ajustarlo a 0.600 in/ $\mu$ s.

c) Seleccionar recuadro de "Velocidad" y ajustarlo a la velocidad de propagación acústica según el tipo de material a inspeccionar indicado en la tabla 1, para este caso será de 0.120 in/ $\mu$ s, (Velocidad angular).

d) Seleccionar recuadro "Ganancia" y ajustar la amplitud máxima del eco aproximadamente al 40 % de la escala vertical de la pantalla, (este valor

será ajustado como mejor convenga explicado en calibración por sensibilidad, paso número 3).

El recuadro "Max. Rep." se manejará ya en la práctica, ya que sirve para reducir el sonido de disturbio ocasionado por el campo muerto entre la zapata y el material de inspección. (Dejarlo en 50 Hz por el momento y será ajustado como mejor convenga).

2.- Ir a menú "Pulso" y tendremos una representación en la pantalla como la tabla 5.

Ganancia	Pulso	Atenuar	Modo	Voltaje
----------	-------	---------	------	---------

**Tabla 5.** Menú "pulso" en pantalla.

- a) Seleccionar un ajuste de pulso a 65 ns.
- b) Seleccionar el recuadro "Atenuar" y ajustarlo en 200  $\Omega$ .
- c) Seleccionar el recuadro "Modo" y ponerlo en la modalidad simple.
- d) Seleccionar el recuadro "Voltaje" y ponerlo en 150 V.

3.- Ir a menú "RCVR" y tendremos ahora una representación en la pantalla como la tabla 6.

Ganancia	DB Diff.	Presentación	Freq.	Rechazo
----------	----------	--------------	-------	---------

**Tabla 6.** Menú "RCVR" en pantalla.

- a) El recuadro "Dife. dB" por el momento se dejará en 0.00 dB. ya que sirve cuando tenemos una ganancia patrón en decibeles y como en este caso no la tenemos, no es necesario hacer ningún tipo de ajuste en este recuadro.
- b) Seleccionar el recuadro "Presentación" y escoger la modalidad onda completa.
- c) Seleccionar el recuadro "Frecuencia" y ajustarlo a la frecuencia del transductor que estamos usando.
- d) Seleccionar el recuadro "Rechazo" y ponerlo a la modalidad del 0 %.

4.- Ir a menú "Espesor" y tendremos una presentación como la tabla 7.

Ganancia	Med-Espe.	Pico	Off-Set.	Med-Vel.
----------	-----------	------	----------	----------

**Tabla 7.** Menú "Espesor" en pantalla.

a) "Med-Espe" no será utilizado en esta ocasión ya que se emplea en calibración con haz recto y será dejado en modalidad de apagado al igual que el recuadro "Pico".

b) Seleccionar el recuadro "Off-Set" y ajustarlo a 0.000  $\mu$ s.

c) Seleccionar el recuadro "Med-Vel" y ajustarlo a 0.120 in/ $\mu$ s.

5.- Ir a menú "Angulo" y tendremos una presentación en la pantalla como la tabla 8.

Ganancia	Trig.	Angulo	Espesor	O-Diametro.
----------	-------	--------	---------	-------------

**Tabla 8.** Menú "Angulo" en pantalla.

a) Seleccionar el recuadro "Trig." y dejarlo en modalidad de apagado.

b) Seleccionar el recuadro de "Angulo" y el valor será el mismo que se tiene en la zapata de rastreo.

c) Seleccionar el recuadro "Espesor" y ajustar a las mismas unidades del espesor del material a inspeccionar.

d) Seleccionar el recuadro "O-Diam" y ajustarlo al diámetro indicado en el cuerpo del transductor a ser usado.

e) El menú "DAC" y "MAIN" no serán usados en esta sección ya que primero se hace la recomendación de que el practicante se familiarice con el equipo para posteriormente lo maneje con equipo software.

6.- Ir a menú "Compuerta 1" y tendremos una presentación en pantalla como la tabla 9.

Ganancia	Compuerta 1	Posición	Ancho	Nivel
----------	-------------	----------	-------	-------

**Tabla 9.** Menú "Compuerta 1" en pantalla.

a) Este elemento nos proporciona los niveles de decibeles, posición longitudinal u horizontal de la deflexión con los cuales estamos encontrando nuestra discontinuidad y lo hace cuando nuestra longitud de onda máxima o el "Pico" de la onda toca una parte de la "Compuerta".

b) Seleccionar el recuadro "Compuerta 1" y posicionarla con el signo "+".

c) Seleccionar el recuadro "Posición" y ajustarla a 0.5 pulg.

d) Seleccionar el recuadro "Ancho" y ajustarla a 2.0 pulg.

e) Seleccionar el recuadro "Nivel" y posicionarla al 40 % de la escala vertical de la pantalla y estará representada como lo muestra la figura 26:

7.- Ir a menú "Compuerta 2" y tendremos una presentación en pantalla como se muestra en la tabla 10.

Ganancia	Compuerta 2	Posición	Ancho	Nivel
----------	-------------	----------	-------	-------

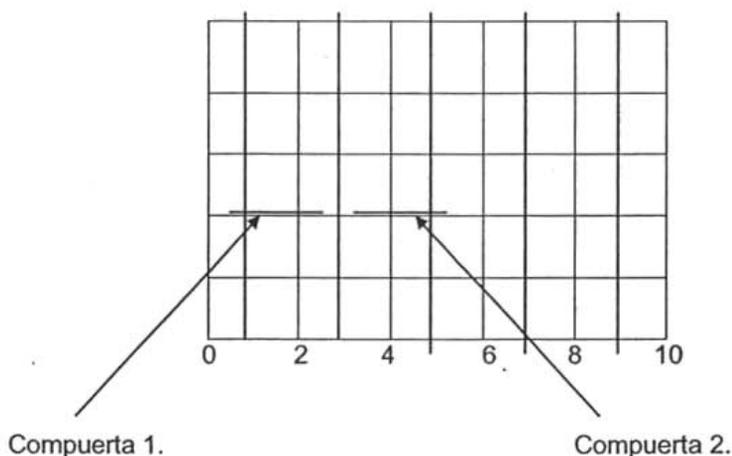
**Tabla 10.** Menú "Compuerta 2 en pantalla.

a) Seleccionar el recuadro "Compuerta 2" y posicionarla con el signo "+".

b) Seleccionar el recuadro "Posición" y ajustarla a 3.25".

c) Seleccionar el recuadro "Ancho" y ajustarla a 2.0".

d) Seleccionar el recuadro "Nivel" y ajustarla al 40% de la escala vertical de la pantalla y estará representada como lo muestra la figura 26:



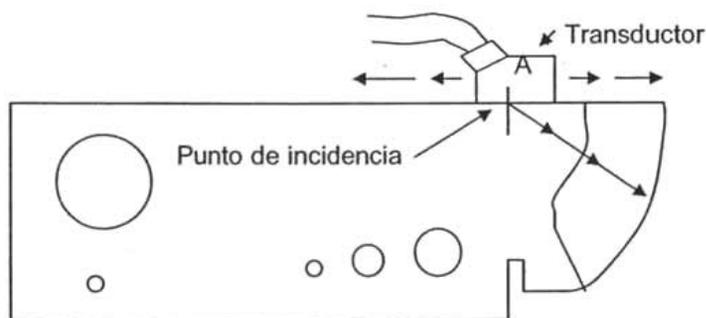
**Figura 26.** Representación de la "Compuerta 1 y 2" en la pantalla del equipo ultrasónico.

6.- Colocar el transductor en la posición "A" sobre el block de calibración IIW tipo 2 y un poco de gel entre el transductor y el block como lo muestra la figura 27.

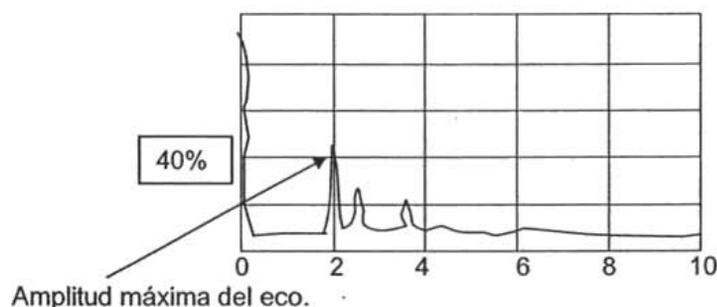
7.- Mover el transductor hacia atrás y hacia adelante hasta que dé la señal de eco de la amplitud máxima de la pared posterior en la pantalla del equipo

ultrasónico como se representa en la figura 28, si la amplitud de la onda es muy alta o baja hacer ajuste con el recuadro de ganancia y ajustarla hasta que el pico de la onda toque la compuerta 1(para el primer eco).

8.- La marca de fabricación de incidencia del sonido del transductor debe coincidir con la marca de fabricación del block de calibración, de no ser así, se debe marcar la zapata con un bolígrafo en el punto donde coincide con la marca del block de calibración.



**Figura 27.** Localización del punto de incidencia angular.



**Figura 28.** Radio máximo en pantalla cuadrículada con rango de 10 in.

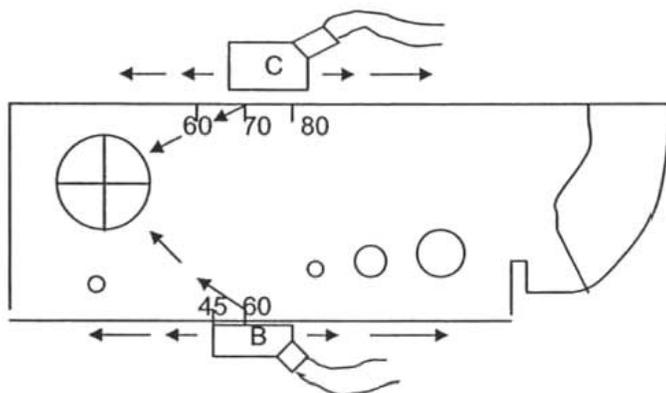
### III.3.2. Localizar el ángulo refractado.

1.- Colocar el transductor en la posición "B" en el block de calibración. si corresponde a ángulos de 40 grados hasta 60 grados, figura 29.

2.- Colocar el transductor en la posición "C" sobre el block de calibración si corresponde a ángulos de 60 grados hasta 70 grados, figura 29.

3.- Mover el transductor de adelante hacia atrás sobre la línea indicativa del ángulo del transductor hasta que la señal del radio en la pantalla del equipo sea máxima, representada en la pantalla del equipo ultrasónico.  
 Comparar el punto de entrada del sonido del transductor (Calculado en el paso anterior) con la marca del ángulo del block de calibración, de no ser así, marcar este nuevo y verificar si cumple con más o menos 2 grados de tolerancia.

Para corroboración del punto de entrada del sonido se pueden hacer cálculos trigonométricos y debe coincidir con el radio del barreno del block de calibración que es de 2" de diámetro.



**Figura 29.** Localización del ángulo refractado.

### III.3.3. Calibración por distancia.

1.- El barrido horizontal será ajustado para representar la distancia de la trayectoria del sonido actual.

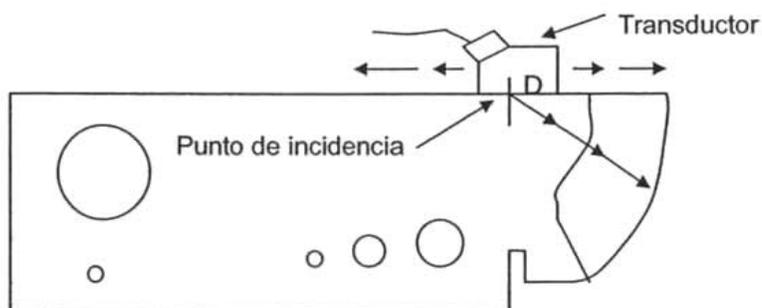
Esta calibración podrá ser preparada usando escalas de 5 in. (127 mm) ó 10 in. (254 mm) en la pantalla del equipo ultrasónico, cualquiera es apropiada, a menos que la configuración de la unión del material o el espesor nos demande un rango mayor, entonces si es ese caso, se usarán las escalas de 15 in. (381 mm) ó 20 in. (508 mm).

2.- Colocar el transductor en la posición "D" sobre el block de calibración, figura 30. (Aplica para cualquier ángulo).

3.- Ajustar el instrumento hasta obtener indicaciones de 2 in. (50.8 mm) y 4 in. (101.6 mm) sobre el block de calibración como se explicará a continuación:

4.- El primer eco debe estar localizado en 2" y el segundo en 4" en la graticula de la pantalla (Usando el block IIW tipo 2).

Para el block IIW tipo 1, el primer eco estará a una distancia de 4" y el segundo eco en 9", si no es así, seleccionar el recuadro de "Retardo" en menú "Rango" y mover la onda de eco hasta que el pico de la onda del primer eco toque la graticula a la distancia de 2" en la escala horizontal de la pantalla.



**Figura 30.** Calibración por distancia.

5.- El segundo eco debe estar localizado en la graticula de la pantalla en 4", para ello se debe ir al recuadro de "Velocidad" y ajustar la onda hasta que el pico del segundo eco sea ajustado a la distancia de 4" en la escala horizontal de la pantalla.

6.- Volver al recuadro de "Retardo" y verificar si el pico de la onda del primer eco está localizada en las 2" donde anteriormente se había situado, de no ser así repetir el paso 4 y 5 cuantas veces sea necesario hasta lograr que el primer eco este sobre las 2" y el segundo eco este sobre las 4" de la escala horizontal de la pantalla.

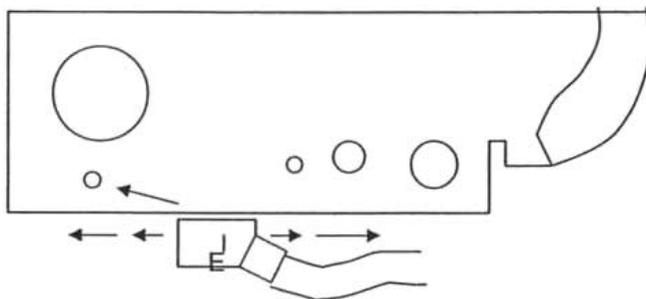
### **III.3.4. Calibración por sensibilidad.**

1.- Colocar el transductor en la posición "E", figura 31.

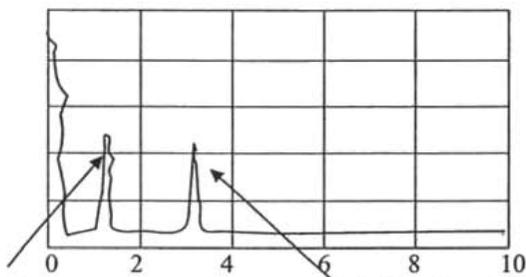
2.- Mover el transductor hacia delante y hacia atrás hasta obtener la máxima amplitud de la indicación del barreno que tiene un diámetro de 0.060" (1.5 mm), figura 32.

3.- Usando el control de ganancia, ajustar la amplitud de la indicación del barreno colocándola al 40% de la escala vertical de la pantalla, este registro de ganancia en dB será nuestro nivel de referencia (NI), para futuras inspecciones.

4.- Corroborar distancias horizontales y verticales en el block de calibración usando fórmulas trigonométricas, las dimensiones físicas del block IIW tipo I y tipo II, se representan en la figura 33.



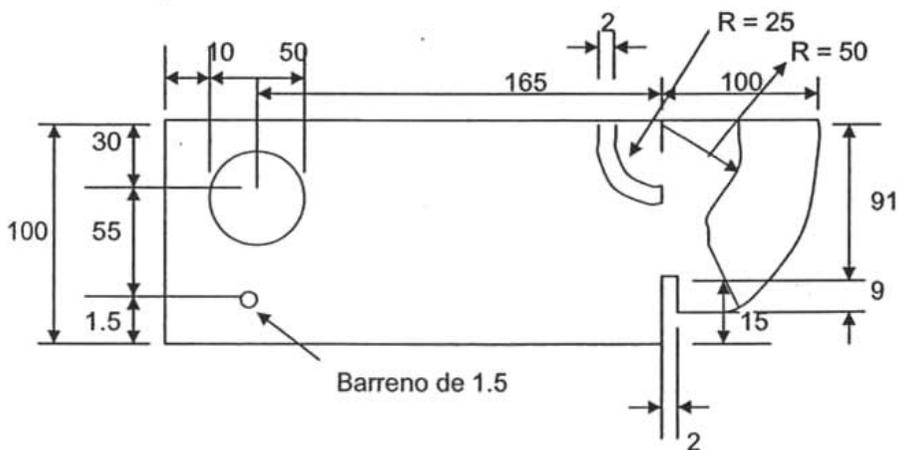
**Figura 31.** Calibración por sensibilidad.



Indicación del barreno.

Indicación de la pared del bloque.

**Figura 32.** Pantalla del equipo ultrasónico indicando la amplitud de la indicación del barreno al 40 % de la escala vertical de la pantalla.



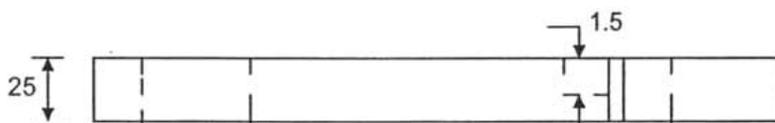


Figura 33. Dimensiones en mm. del block de calibración IIW tipo 1 y tipo 2.

### III.4. Trazabilidad de zonas de rastreo sobre la superficie del espécimen a inspección.

Ahora que nuestro equipo ultrasónico ya esta calibrado, procederemos a hacer una inspección en la probeta para detectar posibles discontinuidades en el interior de la unión con soldadura.

1.- Colocar la probeta de tal forma que la corona de la soldadura quede hacia arriba.

2.- Marcar el eje longitudinal del cordón de la soldadura como el eje "x" tomando como el punto inicial el lugar en donde se inicio la marca.

El transversal como el eje "y" sobre la placa de la probeta tomando como el punto inicial el centro de la corona del cordón de la soldadura, con signo positivo el lado de rastreo y el lado opuesto con signo negativo.

Cada muestra se denotará con las siglas "UT- #", que quiere decir inspección por ultrasonido y el número consecutivo de la muestra.

Así también, se marcará como "Cara A" la superficie de rastreo y "Cara B" el lado opuesto al de rastreo.

3.- marcar la zona de rastreo como se muestra en la figura 34, calculándola con la ecuación 17.

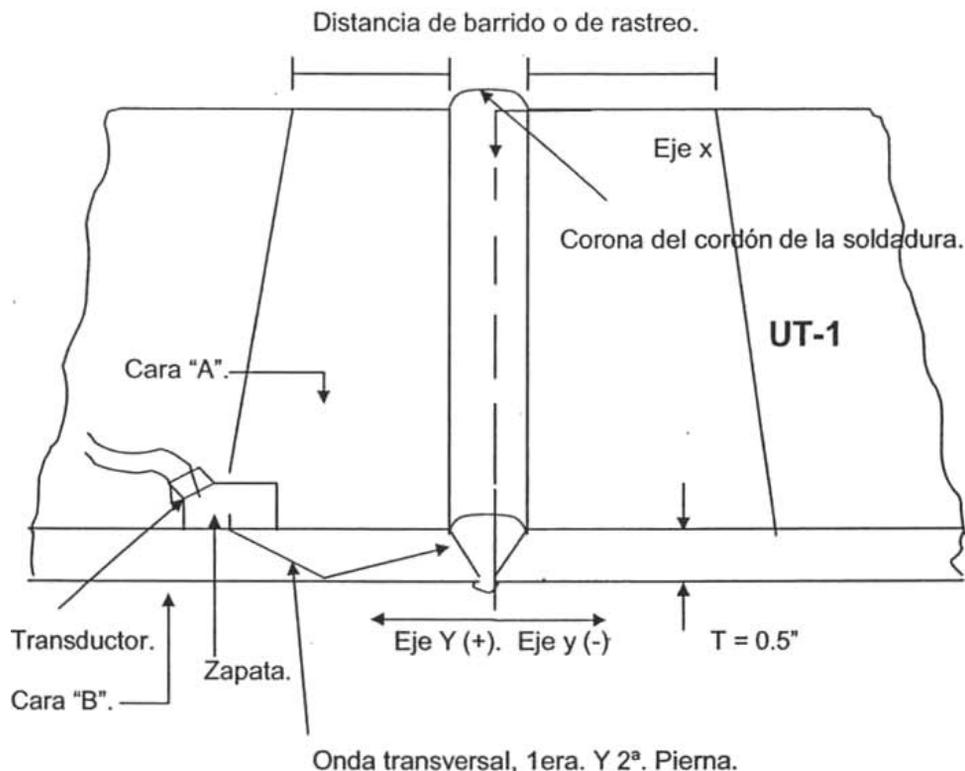
$$\text{Zona de rastreo} = 2 \cdot T \cdot \text{Tang } \beta \quad \dots(17).$$

Donde:

T = Espesor de la placa a inspeccionar.

$\beta$  = Angulo de la zapata empleada.

Esta zona es la que nos permite rastrear todo el volumen del cordón de soldadura y no debe salirse de los límites porque podría ser el caso de que encontremos una indicación fuera del cordón de soldadura e interpretar indicaciones erróneamente.



**Figura 34.** Marcaje del espécimen a rastrear.

4.- Calcular la distancia de la onda completa con la ecuación 18:

$$\text{Longitud de la onda completa} = 2 T / \text{Cos } \beta \quad \dots(18).$$

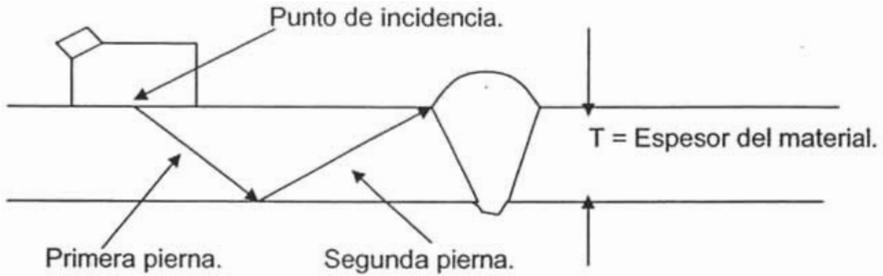
Donde:

T = Espesor de la placa a inspeccionar.

$\beta$  = Angulo de la zapata empleada.

Esta distancia comprende el total de la onda de incidencia que son la 1ra y 2ª pierna.

La primera pierna se toma en cuenta desde el punto de incidencia de la zapata hasta la cara posterior de la placa y la 2ª pierna comprende desde este punto hasta la trayectoria final de la longitud de la onda, figura 35.



**Figura 35.** Representación de la 1era. Y 2ª. Pierna de una onda transversal completa.

5.- Calcular la profundidad de la primera pierna con la ecuación 19, figura 36.

$$\text{Primera pierna} = D.A. \cdot \cos \beta \quad \dots(19).$$

6.- Calcular la profundidad de la segunda pierna con la ecuación 20, figura 36.

$$\text{Segunda pierna} = 2 T - (D.A. \cdot \cos \beta) \quad \dots(20).$$

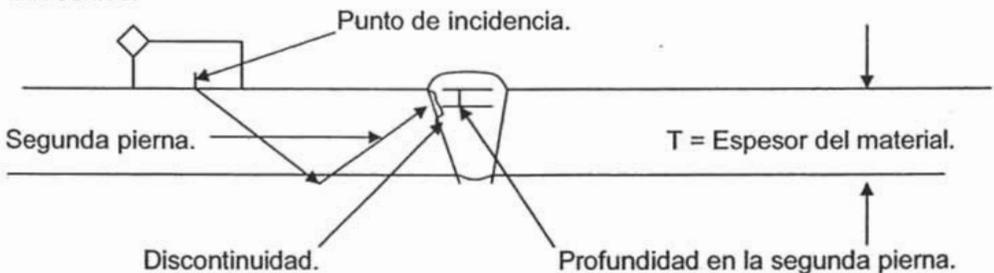
Donde:

D.A. = Distancia Angular de la onda transversal.

$\beta$  = Angulo de la zapata.

T = Espesor del material a inspeccionar.

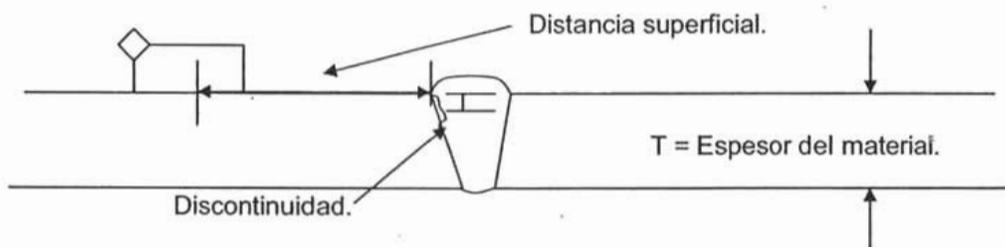
Nota: El equipo ultrasónico nos va a dar automáticamente la distancia angular y es la que se encuentra en la parte superior derecha de la pantalla del equipo ultrasónico.



**Figura 36.** Localización de la profundidad de la 1ra. Y 2ª pierna en el material de inspección.

7.- Calcular la distancia superficial con la ecuación 21, figura 37.

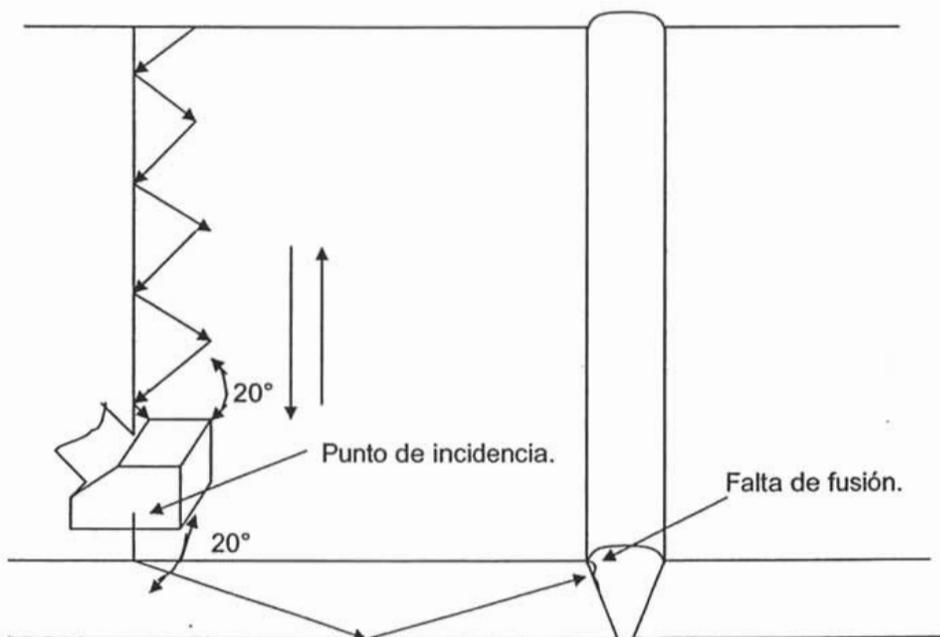
$$\text{Distancia superficial} = D.A. \cdot \sin \beta \quad \dots(21).$$



**Figura 37.** Representación de la distancia superficial.

### III.4.1. Formas de rastreabilidad en la zona de barrido.

Una vez trazada la zona de barrido se sigue a rastrear el área del cordón de soldadura con los movimientos que a continuación se describirán:

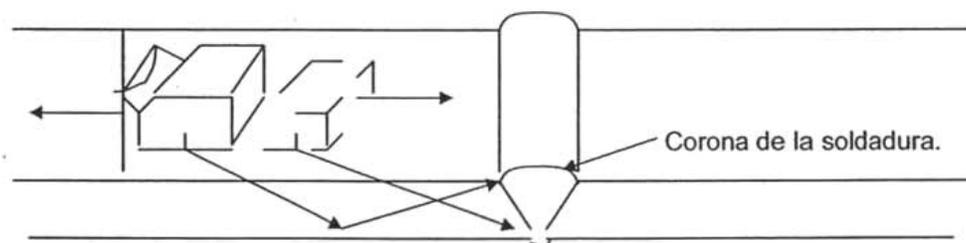


**Figura 38.** Desplazamiento Horizontal del transductor durante el barrido en forma de zig-zag con rotación de hasta  $20^\circ$ .

En la figura 38 se muestra el tipo de desplazamiento de la zapata la cual se hace de forma de zig-zag hasta un ángulo de 20 grados y un ancho de la mitad del transductor y horizontal al cordón de soldadura, lo que permite rastrear hasta el límite superior de la corona del cordón de la soldadura y encontrar posibles discontinuidades como falta de fusión, escoria, grietas y porosidades.

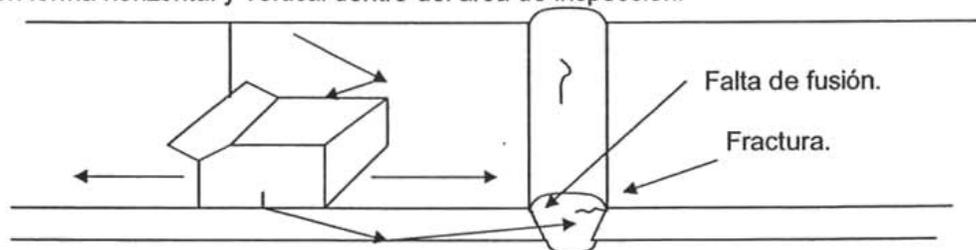
En la figura 39 se muestra otro tipo de barrido del transductor, con este movimiento vertical al cordón de soldadura se inspecciona el área transversal cubriendo toda la altura del cordón de soldadura, es decir, desde la penetración hasta la corona de la misma y es posible saber en que posición se encuentra nuestra posible discontinuidad.

Si el movimiento de la zapata es de atrás hacia delante o viceversa y en la pantalla del equipo ultrasónico hay una onda de haz máxima y mínima, esto quiere decir que nuestra discontinuidad se encuentra en forma vertical con respecto al cordón de soldadura y si desaparece quiere decir que esta en forma horizontal del mismo cordón, si es así, se deberán hacer movimientos como lo explicado en la figura 38 y medir su longitud hasta que desaparezca la onda máxima en la pantalla del equipo ultrasónico.



**Figura 39.** Desplazamiento del transductor en forma vertical del cordón de soldadura.

En la figura 40 se muestra el movimiento en forma de zig-zag pero no rotando el transductor 20 grados sino en forma vertical al cordón de soldadura y arrastrándolo hacia toda la longitud del cordón con un ancho de la mitad del transductor, este movimiento permite localizar discontinuidades que se encuentran en forma horizontal y vertical dentro del área de inspección.



**Figura 40.** Desplazamiento del transductor en forma de zig-zag vertical.

Con esto se han descrito los diferentes movimientos de rastreo en una unión soldada, lo cual nos permite determinar posición, longitud y dirección de las discontinuidades en el interior del espécimen inspeccionado.

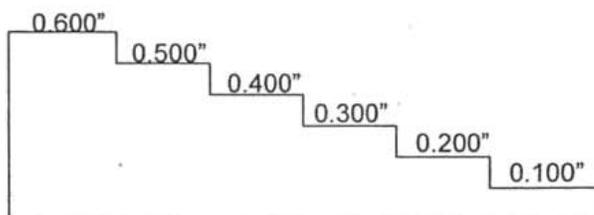
### III.5. Calibración por distancia empleando haz de incidencia vertical a la superficie de prueba.

Uno de los mayores métodos usados para la prueba de espesores por ultrasonido es el de tipo pulso-eco. Este método proporciona datos de excelente exactitud sobre superficies lisas.

El rango para la prueba es usualmente de 0.10 in a 20.0 in, de espesor y deben ser recalibrados cada vez que el instrumento ultrasónico es operado.

Los siguientes accesorios son requeridos para este procedimiento:

1.- Block de escalón o cualquier pieza que nos proporcione un espesor de referencia y calibrado, figura 41.



**Figura 41.** Block de calibración escalonado o de pasos.

2.- Transductor. El transductor usado dependerá del material y espesor usado para la prueba de inspección. Para acero y aluminio con un espesor arriba de 5 in, un transductor spectrum E8L (5Mhz) es una buena selección. Para superficies rugosas, corroidas o altamente irregular en superficie, un transductor spectrum E4L (2.25 Mhz) puede ser usado.

3.-Cable para el transductor. Usar un sonic BNC/Microdot (39102894) o un sonic BNC/BNC (39102892) y que haga juego con el transductor y conectarlo a la entrada "RCV" del equipo ultrasónico.

4.-Acoplante. Usar un acoplante que moje perfectamente la superficie sin dejar burbujas entre el espacio del transductor y la superficie de inspección. Sobre superficies lisas puede usarse un acoplante ligero como aceite o grasa comercial y para superficies rugosas usar un sonic X30S (33317450).

### III.5.1. Lista de chequeo de inspección inicial.

Después de que el equipo ultrasónico y los componentes han sido desempacados checar de nuevo la lista de paquete, debe hacerse una inspección visual y de operación básica al equipo.

- Estructura estética dañada?
- Encendido del instrumento "On" ok?
- Encendido de prueba ok?
- Mensaje encendido en la carátula "EL/LCD ok?"

Nota: Para consulta de características, instalación y manejo de los accesorios del equipo ultrasónico "Sonic 1200", antes de ser usado para inspección de materiales debe recurrirse al manual de operación del mismo equipo, "No es recomendable tomar en cuenta otro tipo de manual que no cuente con las mismas características", [2],[3],[6],[7].

Para la calibración del equipo ultrasónico usando haz recto para medición de espesores se procede como sigue:

1.- Una vez conectados los accesorios y el equipo ultrasónico a la toma de corriente, pulsar el botón verde "ON", y esperar hasta que aparezca la última configuración que realizó el operador en la inspección anterior o en su defecto puede aparecer la configuración del fabricante si en la misma inspección que realizó el operador pulsó el botón de "Rango" mientras el equipo estaba prendido.

2.- Pulsar el menú "Pulso" en la carátula del equipo ultrasónico y aparecerá en la pantalla una serie de valores para cada una de las funciones, como lo muestra la tabla 11:

Ganancia	Pulso	Atenuar	Modo	Voltaje
----------	-------	---------	------	---------

**Tabla 11.** Menú "Pulso" en pantalla.

- a) Seleccionar el recuadro de "Ganancia" y ajustarlo a un valor de 24.0 dB. (Este valor será manejado posteriormente como mejor convenga).
- b) Seleccionar el recuadro de "Pulso" y ajustarlo a un valor de 65 ns.
- c) Seleccionar el recuadro de "Atenuar" y ajustarlo a 50  $\Omega$ .
- d) Seleccionar el recuadro de "Modo" y ajustarlo a la modalidad simple.
- e) Seleccionar el recuadro de "Voltaje" y ajustarlo a 150V.

3.- Ir a menú "RCVR" y aparecerá en la pantalla una serie de valores como lo muestra la tabla 12:

Ganancia	DB Diff	Presentación	Frecuencia	Rechazo
----------	---------	--------------	------------	---------

**Tabla 12.** Menú "RCVR" en pantalla.

- Seleccionar el recuadro "DB Diff" y ajustarlo a 0.00 dB.
- Seleccionar el recuadro "Presentación" y ajustarlo a la modalidad de onda completa.
- Seleccionar el recuadro de "Frecuencia" y ajustarlo a la frecuencia indicada en el transductor.
- Seleccionar el recuadro "Rechazo" y dejarlo en la modalidad de apagado.

4.- Ir al menú "Rango" y aparecerá en la pantalla una serie de valores como lo muestra la tabla 13:

Ganancia	Rango	Retardo	Velocidad	Max Rep.
----------	-------	---------	-----------	----------

**Tabla 13.** Menú "Rango" en pantalla.

- Seleccionar el recuadro "Rango" y ajustarlo a 0.500 in/us.
- Seleccionar el recuadro "Retardo" y ajustarlo a 0.030 in/us.
- Seleccionar el recuadro "Velocidad" y ajustarlo a la velocidad que indica la tabla 1, según el tipo de material a inspeccionar, en este caso será de 0.230 in/us.
- Seleccionar el recuadro "Max Rep" y ajustarlo a 50 Hz.

5.- Ir a menú "Compuerta 1" y aparecerá en pantalla una serie de valores como se muestra en la tabla 14:

Ganancia	Compuerta 1	Posición	Ancho	Nivel
----------	-------------	----------	-------	-------

**Tabla 14.** Menú "Compuerta 1" en pantalla.

- Seleccionar el recuadro "Compuerta 1" y lo pondremos en modalidad con signo "+".
- Seleccionar el recuadro "Posición" y lo ajustaremos en 0.500".

c) Seleccionar el recuadro "Ancho" y lo ajustaremos a 2.0".

d) Seleccionar el recuadro "Nivel" y lo ajustaremos al 70% de la escala vertical de la pantalla.

6.- Ir a menú "Compuerta 2" y aparecerá una serie de valores como lo muestra la tabla 15:

Ganancia	Compuerta 2	Posición	Ancho	Nivel
----------	-------------	----------	-------	-------

**Tabla 15.** Menú "Compuerta 2" en pantalla.

a) Seleccionar el recuadro "Compuerta 2" y ajustarlo en la modalidad con signo "+".

b) Seleccionar el recuadro "Posición" y ajustarlo a 2.0".

c) Seleccionar el recuadro "Ancho" y ajustarlo a 2.0".

d) Seleccionar el recuadro "Nivel" y ajustarlo al 70 % de la escala vertical de la pantalla.

7.- Ir a menú "Espesor" y aparecerá una serie de valores como se muestra en la tabla 16:

Ganancia	Med-Espe	Pico	Off-Set	Med-Vel
----------	----------	------	---------	---------

**Tabla 16.** Menú "Espesor" en pantalla.

a) Seleccionar el recuadro "Med-Espe" y colocarlo en la modalidad 1P-1<sup>a</sup>.

b) Seleccionar el recuadro "Pico" y dejarlo en la modalidad de Off.

b) Seleccionar el recuadro "Off-Set" y ajustarlo a 0.00 us.

c) Seleccionar el recuadro "Med-Vel" y ajustarlo a la velocidad del material a inspeccionar, en este caso es de 0.230in/us.

8.- Ir a menú "Angulo" y aparecerá en pantalla una serie de valores como se muestra en la tabla 17:

Ganancia	Trigg	Angulo	Espesor	O-Diámetro
----------	-------	--------	---------	------------

**Tabla 17.** Menú "Angulo" en pantalla.

a) Seleccionar el recuadro "Trigg" y dejarlo en la modalidad de apagado.

- b) Seleccionar el recuadro "Angulo" y dejarlo 0 grados.
- c) Seleccionar el recuadro "Espesor" y ajustarlo al espesor de inspección, en este caso será de 1.0".
- d) Seleccionar el recuadro "O-Diámetro" y ajustarlo al diámetro indicado en el transductor empleado.
- e) El menú "DAC" y "MAIN" no serán usados en esta sección ya que primero se hace la recomendación de que el practicante se familiarice con el equipo para posteriormente lo maneje con equipo software.

9.- Colocar el transductor en la superficie del espesor de 0.100" en nuestro block escalonado y localizar la principal onda de reflexión y usando el control de retardo colocarla aproximadamente sobre cero.

10.-Calcular el número de ecos reflejados, y estos serán observados cuando nuestra calibración este terminada correctamente, ecuación 22.

Datos:

Rango = 5".

Block de referencia = 1".

Rango/ Block = Número de reflexiones que serán representadas en nuestra pantalla ultrasónica. ... (22).

Sustituyendo valores =  $5" / 1" = 5$  Ecos, más la principal onda de reflexión que se había situado cerca del cero y esta representada en la figura 42:

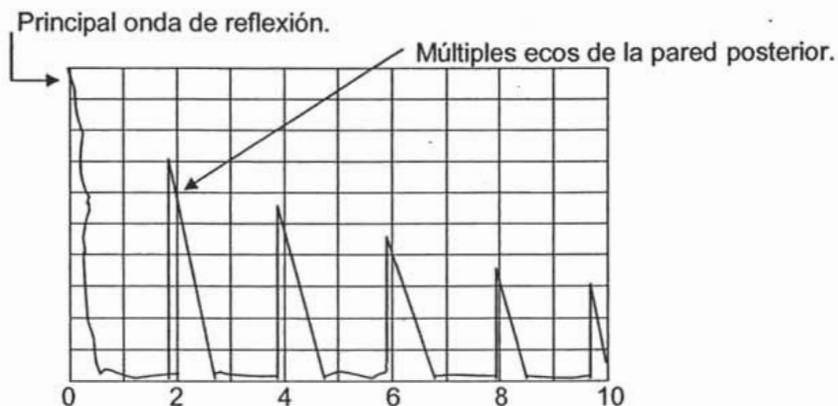
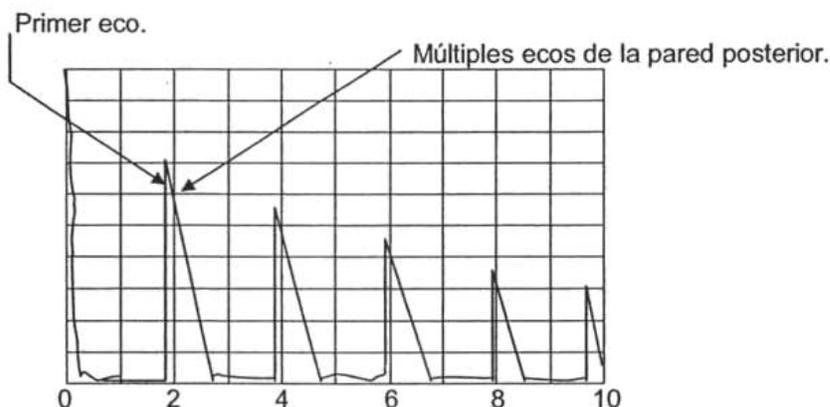


Figura 42. Representación de los ecos de reflexión de pared posterior.

Para espacios amplios, ajustar con el control de "Velocidad" para observar el número de ecos deseados como fue calculado en el paso 10.

Nota: Un ajuste en el control de ganancia puede ser necesario en cualquier punto de la calibración para ajustar la onda al 70 % de la escala vertical de la pantalla.

11.- Colocar el transductor sobre el espesor de 0.100" del block y usando el control de retardo para posicionar el límite encontrado del primer eco sobre el # 2 de la escala horizontal de la pantalla, figura 43.



**Figura 43.** Colocación del primer eco sobre cero de la escala de la pantalla.

12.-Calcular el porcentaje del rango que representa el espesor del block de referencia, ecuación 23:

Block de referencia / Rango = % del rango que representa el espesor del block de referencia. ... (23).

Sustituyendo valores =  $1" / 5" = 20 \%$ .

Este porcentaje nos dice que el espacio exacto entre los ecos múltiples es del 20 %.

Este es el primer paso para calcular el espacio exacto del último eco reflejado.

Para encontrar el espacio exacto del último eco reflejado, tomaremos el número de ecos que queremos ver cuando nuestra calibración este completa, (calculada en el paso 3) y multiplicarla por el porcentaje exacto entre cada eco, ecuación 24:

$5 \text{ ecos} \cdot 20 \% = 100 \%$  ... (24).

Así, nuestro último eco reflejado estará situado sobre el 100 % de nuestra escala horizontal de la pantalla.

13.- Posicionando el palpador en el espesor máximo del bloque escalonado y usando el control de calibración "Velocidad", situar la lectura del último eco reflejado (Límite derecho de la pantalla), nuestro sexto eco reflejado estará sobre el 100 % de la pantalla.

Nota: Incrementar si es necesario la ganancia para observar todos los ecos requeridos y para obtener la máxima exactitud en la calibración.

14.- En algunos casos, no siempre es capaz de obtener o distinguir el número de ecos requeridos para la calibración. Si este es el caso, colocaremos el límite del primer eco en cero sobre la escala de la pantalla, ahora podemos ajustar con el control de "Velocidad" el eco próximo, ajustándolo al espesor que representa el block de calibración, (Al 20 % del rango de la pantalla).

15.- Repetir el paso 11 y 13 hasta obtener que ambos ecos (0.100" y 0.500") estén posicionados en el #2 y en el #10 respectivamente, sobre la escala horizontal de la pantalla.

El paso 11 sitúa el límite del primer eco reflejado sobre el #2, usando el control de "Retardo".

El paso 13 sitúa el límite del último eco reflejado en el #10" o al 100% de la escala horizontal de la pantalla, usando el control de "Velocidad".

16.- Checar ahora los espesores de 0.200", 0.300" y 0.400" en el block escalonado de calibración, si coinciden con la escala horizontal de la pantalla, el equipo estará calibrado, figura 44, si no coinciden, repetir los pasos 9 al 16.

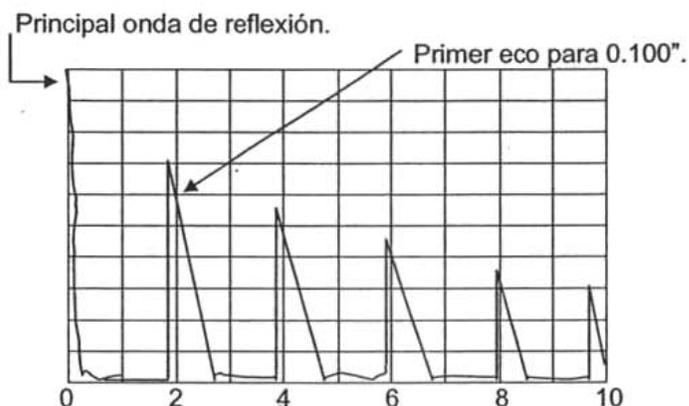


Figura 44. Primer eco de reflexión sobre el 20 % de la escala horizontal de la pantalla.

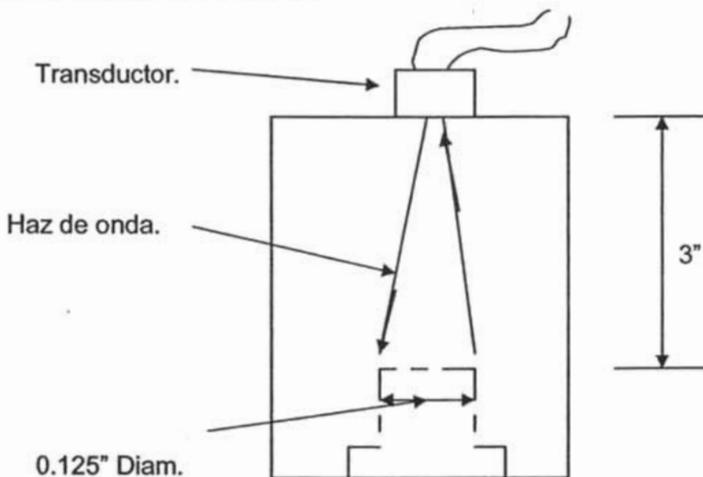
Ahora nuestra calibración esta completa para medición de espesores, [2],[3].

### III.5.2. Detección de discontinuidades empleando haz recto mediante el método de área-amplitud.

Este método nos permite detectar discontinuidades empleando el control de "Ganancia", la unidad de referencia estará en decibelios al igual que nuestra indicación que se esta evaluando siempre y cuando las dos estén a la misma profundidad, se sugiere calibrar el equipo a la misma profundidad del grosor del espécimen a inspeccionar.

Para comenzar con este tipo de inspección se procede como sigue:

1.- El equipo se calibra de la misma forma que con haz recto pero ahora tendremos una indicación en nuestro block de calibración de 0.125" de Diam. y a una profundidad de 3", figura 45:



**Figura 45.** Presentación de la discontinuidad de referencia.

2.- Se obtiene la máxima amplitud de la indicación, ajustándola al 70 % de la escala vertical de la pantalla con el control de ganancia y este será nuestro nivel de referencia (NR).

3.- Ahora rastreamos nuestra muestra de inspección y encontramos una discontinuidad que refleja una amplitud mayor al 70 % de la escala vertical de la pantalla, en este caso disminuir la amplitud con el control de ganancia hasta llegar al 70 % de la escala vertical, (En caso contrario, incrementar la amplitud con el mismo método hasta llegar al mismo nivel de la escala vertical) y este será ahora nuestro nivel de indicación (NI).

4.- Procederemos a calcular el valor absoluto de dBi, ecuación 25 y consultamos la tabla 18 para obtener la relación de diámetros (re /dB)

$$dBi = NI - NR \quad \dots(25).$$

5.- Si el resultado es positivo quiere decir que nuestra discontinuidad es menor que la de referencia y para calcular su diámetro usamos ecuación 26:

$$Di = \frac{Dr}{re / dB} \quad \dots(26).$$

Donde:

Di = Diámetro de la indicación a ser evaluada.

Dr = Diámetro de referencia.

re / dB = Relación de los diámetros (de la tabla 18).

6.- Si el resultado es negativo quiere decir que nuestra discontinuidad es mayor que la de referencia y para calcular su diámetro usamos la ecuación 27:

$$Di = Dr \cdot re/dBi \quad \dots(27).$$

dB	Relación	dB	Relación
0	1.00:1	11	3.55:1
0.5	1.06:1	12	3.98:1
1	1.12:1	13	4.47:1
2	1.25:1	14	5.01:1
3	1.41:1	15	5.62:1
4	1.58:1	16	6.31:1
5	1.78:1	17	7.08:1
6	2.00:1	18	7.94:1
7	2.24:1	19	8.91:1
8	2.51:1	20	10.00:1
9	2.82:1	40	100.00:1
10	3.16:1	60	1000.00:1

**Tabla 18.** Relación de amplitud (dB)

Hasta aquí, hemos llegado a estudiar como calibrar el equipo ultrasónico para detectar discontinuidades en zonas soldadas y la aplicación de haz recto para medición de espesores, en el capítulo IV se llevará a cabo la aplicación de estos dos conceptos además de la prueba por líquidos penetrantes y así poder analizar resultados para dar como satisfactorio lo antes expuesto en capítulos anteriores.

#### IV. Análisis de resultados.

Para analizar resultados de todo lo explicado en capítulos anteriores, aquí, en este capítulo realizaremos un ensayo teórico de evaluación de una discontinuidad encontrada con haz angular, haz recto y con líquidos penetrantes, donde se aplicarán los conceptos y fórmulas antes mencionadas, se analizarán los pasos de rastreabilidad y evaluación, esto es con la finalidad de que cuando el usuario se enfrente a situaciones reales en el área de trabajo esté familiarizado con los resultados que se están obteniendo ya que para cualquier tipo de material a inspeccionar se lleva a cabo el mismo principio de operación que aquí se han estudiado.

Pasemos ahora a evaluar una discontinuidad encontrada con el rastreo de haz angular en una placa de acero de espesor de 0.5", con una zapata de 70 grados y teniendo como base los siguientes datos:

Usando las ecuaciones 17-21 antes descritas para ubicar exactamente el punto de deflexión (posible discontinuidad) del haz de onda reflejada se procederá como sigue:

Habiendo encontrado una discontinuidad, obtenemos la máxima respuesta de amplitud en nuestra pantalla del equipo ultrasónico de la deflexión encontrada en nuestro material de inspección moviendo el transductor, en el mismo punto situado, obteniendo ya la máxima amplitud, seleccionar el recuadro de "Ganancia" en el tablero del equipo ultrasónico y atenuar la máxima amplitud de la onda al 40 % donde se situó la "Compuerta" de referencia y tomar dato en decibelios y este será nuestro nivel de indicación, tomando como ejemplo una deflexión en un material de inspección de acero al carbón y que tiene como datos encontrados una vez hecha la rastreabilidad de:

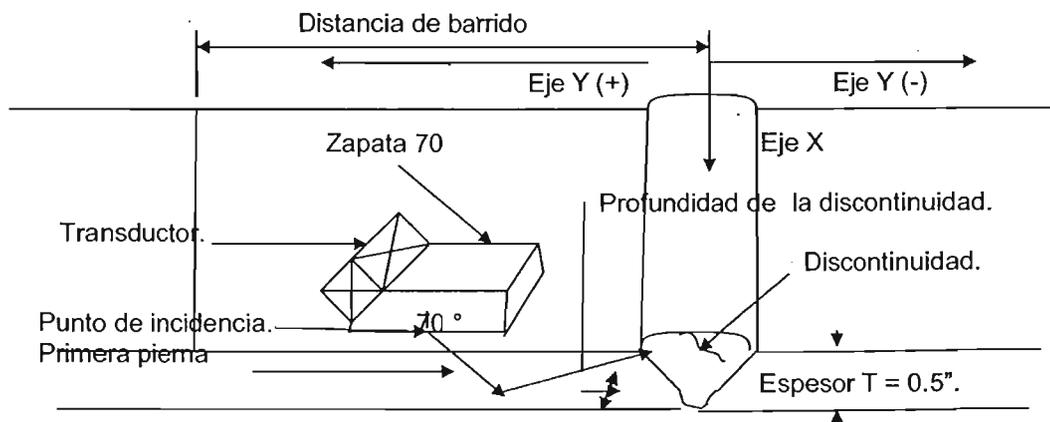


Figura 46. Rastreo en la zona de inspección para encontrar discontinuidades.

Usando fórmula 17 para conocer la zona de rastreo o de barrido:

$$\text{Zona de rastreo} = 2T \cdot \text{Tang. } \beta \quad \dots(17).$$

$$\text{Sustituyendo valores} = 2(0.5") \cdot \text{Tang. } 70^\circ = 2.75 \text{ "}$$

Esta es el área en donde vamos a buscar posibles discontinuidades.

Ahora ya que hicimos un recorrido sobre el área de barrido y encontramos una indicación, en el punto donde se encuentra el transductor, en la figura 47, procederemos como sigue:

Usando la fórmula 18 para conocer la distancia total de la onda transversal

$$2T / \text{Cos } \beta \quad \dots(18).$$

$$\text{Sustituyendo valores} = 2(0.5) / \text{Cos } 70^\circ = 2.92"$$

Este valor es el de nuestra onda completa si ponemos nuestro punto de incidencia desde el límite posterior al del cordón de soldadura (límite de rastreo), pero como nuestra zapata no esta en el límite posterior sino dentro del área de barrido o de rastreo, tenemos que saber cual es el valor de nuestra distancia superficial, (nuestro equipo ultrasónico debe estar en modalidad tal que nos proporcione automáticamente el valor de la distancia de onda transversal, para lo cual debe ser este caso), suponiendo que nuestra longitud de onda es de 2.30" y así aplicamos la formula 21 para calcular la distancia superficial que hay desde el punto de emisión de onda hasta la discontinuidad encontrada:

$$\text{Distancia superficial} = D.A \cdot \text{Sen } \beta \quad \dots(21).$$

$$\text{Sustituyendo valores} = 2.30" \cdot \text{Sen } 70^\circ = 2.16"$$

Ahora debemos medir manualmente con un flexómetro la distancia real que hay entre el punto de incidencia del palpador y la discontinuidad encontrada por nuestro equipo ultrasónico y debe caer en el área de la soldadura que se esta inspeccionando, de no ser así, rastrear nuevamente el área hasta encontrar indicaciones congruentes con cálculos hechos.

Como sabemos que nuestra primera pierna va de 0" hasta 1.46" y que la segunda pierna va desde 1.46" hasta 2.92", por lógica sabemos que nuestra discontinuidad se encuentra en la segunda pierna ya que la longitud de la onda rebasa las 1.46 " .

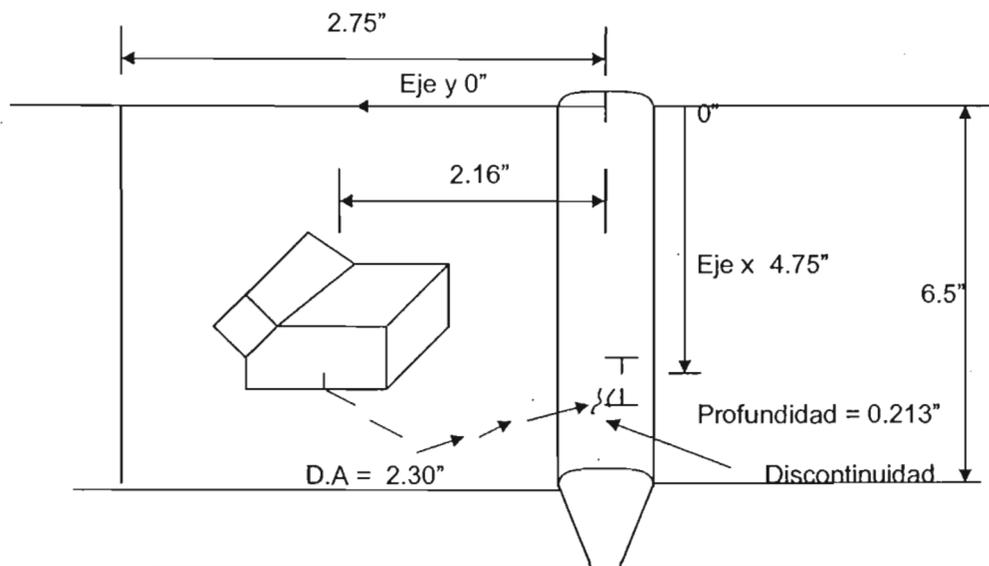
Ahora procederemos a calcular la profundidad en la que se encuentra nuestra discontinuidad usando la fórmula 20:

$$\text{Profundidad de la segunda pierna} = 2T - (D.A. \cdot \text{Cos } \beta) \quad \dots(20).$$

Sustituyendo valores =  $2(0.5") - (2.30" \cdot \text{Cos } 70^\circ) = 0.213"$

Nuestra discontinuidad se encuentra a 0.213" desde la superficie de la placa de inspección (cara A), hacia la cara opuesta (cara B).

Nuestra indicación tendrá ahora las siguientes dimensiones, figura 47.



**Figura 47.** Representación de dimensiones en la muestra inspeccionada y evaluada.

La discontinuidad se encontró a 4.75" sobre el eje "x" y a 0" sobre el eje "y", [2],[3],[7].

#### IV.1. Evaluación de la discontinuidad encontrada.

Ahora para evaluar la discontinuidad encontrada se procede como ejemplo usando la tabla 20, "Criterios de aceptación por ultrasonido para construcciones estáticas" y usando las siguientes fórmulas como sigue:

1.- Calcular el factor de atenuación (Denotado con la letra "c" en el reporte ultrasónico), ecuación 28.

$$\text{Factor de atenuación} = (\text{D.A.} - 1")^2 \text{ dB} \quad \dots(28).$$

$$\text{Sustituyendo valores} = (2.30" - 1")^2 \text{ dB} = 2.6" = 3"$$

Nota: La constante 1 es la distancia en pulgadas que existe desde la orilla del transductor hasta el punto de emisión del mismo.

Valores fraccionarios menores de 0.5 serán reducidos al nivel con valor entero y 0.6 y mayores aumentados al valor entero inmediato.

2.- Calcular la indicación crítica con la ecuación 29, (Denotado con la letra "d" en el reporte ultrasónico).

Indicación crítica ("d") = Nivel de indicación ("a") – Nivel de referencia ("b") – Factor de atenuación ("c") ... (29).

Sustituyendo valores = 38 – 32 – 3 = 3

Serciorarse de incluir el signo del resultado correctamente (+ ó -).

Ahora llenaremos nuestro reporte de datos, tabla 19.

Muestra numero	Número de la indicación	Angulo del transductor	Desde la cara	Pierna	Decibeles				Discontinuidad				
					de Nivel indicación	de Nivel referencia	de Fcator atenuación	Indicación crítica	Longitud de la discontinuidad	Distancia angular	Profundidad	Distancia	
												Desde "x"	Desde "y"
1	1	70°	A	2a	a 38	b 32	c 3	d +3	0.25"	2.30"	0.213"	4.75"	0"

**Tabla 19.** Reporte de datos de ultrasonido industrial.

1.- En nuestro ejemplo encontramos una discontinuidad con una indicación crítica de +3 dB.

Ahora nos referiremos a la tabla 20, "Criterios de aceptación ultrasónica para construcciones estáticas":

Notas:

Clase A.

Cualquier indicación en esta categoría, debe ser rechazada cualquiera que sea su longitud.

Clase B

Cualquier indicación en esta categoría teniendo una longitud mayor que 0.750" debe ser rechazada.

### Clase C

Cualquier indicación en esta categoría teniendo una longitud mayor que 2.0" debe ser rechazada.

### Clase D

Cualquier indicación en esta categoría debe ser aceptada a menos de la longitud o localización en la soldadura según especificaciones de la norma o código aplicado.

Clase de la discontinuidad	Espesor de la soldadura y ángulo de rastreo.										
	0.0625" a 0.750"	+0.750" a 1.5"	+1.5" a 2.5"			+2.5" a 4"			+4" a 8"		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
Clase A	+ 5 y menores	+ 2 y menores	- 2 y menores	+ 1 y menores	+ 3 y menores	- 5 y menores	- 2 y menores	0 y menores	- 7 y menores	- 1 y menores	- 1 y menores
Clase B	+ 6	+ 3	-1 0	+2 +3	+4 +5	-4 -3	-1 0	+1 +2	-6 -5	-3 -2	0 +1
Clase C	+7	+4	+1 +2	+4 +5	+6 +7	-2 +2	+1 +2	+3 +4	-4 +2	-1 +2	+2 +3
Clase D	+ 8 y mayores	+ 5 y mayores	+ 3 y mayores	+ 6 y mayores	+ 8 y mayores	+ 3 y mayores	+ 3 y mayores	+ 5 y mayores	+ 3 y mayores	+ 3 y mayores	+ 4 y mayores

**Tabla 20 .** Criterios de aceptación y rechazo ultrasónico.

De acuerdo con la tabla 20, con placas con un espesor de 0.3125" a 0.750" y teniendo una indicación crítica de +5 y menores esta bajo consideración como una discontinuidad clase "A" ; Por lo tanto, nuestra discontinuidad evaluada esta fuera de los límites de aceptación.

De esta forma es como se maneja la inspección, interpretación y evaluación ultrasónica en zonas soldadas en la industria, [2],[3],[6],[7].

#### IV.2. Evaluación de una discontinuidad empleando haz recto mediante el método de área amplitud.

Al realizar un rastreo en una pieza mecánica, se detectó una indicación con una altura del 20% de la escala vertical de la pantalla. El nivel de referencia (NR) es de 48 dB para un diámetro de 4.0 mm y el nivel de indicación requiere de 50 dB para alcanzar la altura del 70 % de la escala vertical de la pantalla, ¿Cual es el tamaño calculado de la discontinuidad?.

Sustituimos valores en la ecuación 25 para encontrar el valor absoluto en DBi:

$$DBi = 50 - 48 = +2.$$

Consultando la tabla 18, +2 dB equivalen a la relación 1.25:1 y como el signo es positivo, la indicación tiene un diámetro de 1.25 veces menor que el diámetro de referencia.

Si el diámetro de referencia es 4.0 mm, entonces por ecuación 26 tenemos que:

$$Di = 4.0 / 1.25 = 3.2 \text{ mm.}$$

Por lo tanto, el diámetro calculado en esta indicación es de 3.2 mm, [2],[3].

### **IV.3. Práctica para detectar discontinuidades mediante la técnica de líquidos penetrantes.**

Con esta práctica se pretende detectar discontinuidades en materiales afectados por el calor y en uniones con soldadura en cualquier situación y proceso de formación. Es necesario seguir cada uno de los pasos que a continuación se describen para obtener resultados óptimos y asegurar una buena interpretación al momento de evaluar.

A continuación se describirán los pasos requeridos para tal inspección.

#### **1.-Temperatura de la superficie.**

La superficie de la zona a inspeccionar y los materiales penetrantes deben estar a una temperatura que no rebase el rango entre los 10°C y 52°C.

#### **2.- Limpieza previa.**

Las inspecciones de mejor resultado son aquellas en las que se tiene una superficie limpia y seca; para ello se debe limpiar el área de inspección a 1" adyacente a ella, secar la superficie y dejarla libre de contaminantes ya sean aceite, grasa, pintura, etc. de tal forma que no interfieran o enmascaren las posibles discontinuidades abiertas a la superficie de inspección.

#### **3.- Aplicación del penetrante.**

Aplicar sobre la superficie de inspección líquido penetrante, ya sea por rocío o brocha. Cuidar que toda la superficie esté cubierta con líquido penetrante y uniformemente.

Nota: Cumple para cualquier tipo de proceso, pero nunca deben mezclarse unos con otros ni emplear un solo tipo de proceso con diferentes marcas de líquidos penetrantes.

- a) Líquido penetrante removible con agua.
- b) Líquido penetrante post-emulsificable.
- c) Líquido penetrante removible con solvente.

4.-Tiempo de penetración.

Dejar un tiempo de penetración, tabla 21, para diferentes tipos de materiales y discontinuidades.

Material	Formado	Tipo de discontinuidad	Tiempo mínimo de penetración,mins.
Aluminio	Fundición	Porosidad,Fractura	5
	Forjado	Laminaciones	10
	Soldado	Porosidad,Fractura	5
	Todas las demás	Fracturas	10
Magnesio	Fundición	Porosidad,Fractura	5
	Forjado	Laminaciones	10
	Soldado	Porosidad,Fractura	10
	Todas las demás	Fracturas	10
Acero	Fundición	Porosidad,Fractura	10
	Forjado	Laminaciones	10
	Soldado	Porosidad,Fractura	20
Todos los demás	Todas las demás	Fracturas	20

**Tabla 21.** Tiempo de permanencia del líquido penetrante sobre la superficie de prueba.

5.- Limpieza del exceso del penetrante.

Después de que el tiempo de penetración especificado en la tabla fue cumplido, se procede a la limpieza del exceso del penetrante que quedó sobre la superficie de inspección, cuidando de no remover el líquido penetrante de las discontinuidades.

a) Para el caso de penetrantes removibles con agua el exceso será removido con un bote presurizado con agua o con un trapo limpio, libre de pelusas y húmedo con agua limpia. La presión del agua no deberá ser mayor de 50 psi. y la temperatura no excederá de 110°F.

b) Para el caso de penetrantes post-emulsificables el exceso del penetrante será removido aplicando sobre la superficie mojada el líquido emulsificador y el tiempo de emulsificación no deberá exceder de 5 minutos a menos que haya sido calificado un procedimiento para la prueba o en su defecto el tiempo se puede calcular dependiendo de la experiencia y de las condiciones superficiales del espécimen a prueba. La mezcla será removida con un bote presurizado con agua y siguiendo el mismo proceso que en el inciso a).

c) Para el caso de penetrantes removibles con solvente este será removido con un trapo limpio y libre de pelusas o con papel absorbente humedeciéndolo con el removedor y limpiando la superficie ligeramente hasta que ya no haya líquido penetrante sobre la superficie pero cuidando que no se haya removido el líquido de las posibles discontinuidades.

Nota: Para este paso queda prohibido rociar la superficie de inspección directamente con el removedor.

#### 6.- Secado de la superficie.

Secar la superficie de prueba como sigue:

a) Para líquidos removibles con agua o post-emulsificables, la superficie puede ser secada frotando sobre la superficie un trapo seco y limpio o recirculando aire pero la temperatura no debe levantarse a más de 125°F.

b) Para líquidos removibles con solvente la superficie puede ser secada por evaporación normal.

#### 7.- Aplicación del revelador.

El revelador será aplicado tan pronto como sea posible.

Una capa insuficiente de revelador será perjudicial en nuestra prueba porque no absorberá totalmente el líquido penetrante de las indicaciones pequeñas y estas no serán visibles en superficies rugosas, así mismo una capa muy gruesa de revelador puede enmascarar indicaciones.

Con penetrantes de color contrastante solamente un revelador húmedo debe ser usado.

Con penetrantes fluorescentes un revelador húmedo o seco debe ser usado.

a) Aplicación del revelador seco. El revelador deberá ser aplicado solamente en superficies secas con la ayuda de una brocha ligera, un aspersor manual u otro medio cuidando de que toda la superficie de inspección quede cubierta con revelador.

b) Aplicación del revelador húmedo. Antes de que sea aplicado el revelador húmedo sobre la superficie de inspección debe ser agitado hasta estar seguros de una adecuada dispersión de las partículas suspendidas.

En la aplicación de reveladores húmedos se tienen dos tipos:

1.- Aplicación de reveladores acuosos. Pueden ser aplicados a superficies secas o húmedas con la ayuda de brochas ligeras, botes presurizados u otros medios.

2.- Aplicación de reveladores no-acuosos. Pueden ser aplicados solamente a superficies secas con la ayuda de botes presurizados, excepto donde el área de inspección es muy reducida, bajo estas circunstancias puede ser aplicado con una brocha y el tiempo de secado será por evaporación normal.

8.- Tiempo de revelado.

El tiempo de revelado para la inspección final comienza inmediatamente después de la aplicación de un revelador seco o tan pronto como después de que el revelador húmedo comience a secarse sobre la superficie de inspección. Para ello se da como rango de un periodo entre 7 a 30 minutos.

9.- Interpretación.

Después de que el tiempo de revelado a pasado y de que se observó el crecimiento o el sangrado de la indicación se pueden interpretar los resultados, no obstante que para ello se requiere de bastante experiencia porque se pueden confundir entre una indicación no relevante con un defecto, si no se cuenta con la experiencia necesaria es preferible observar la formación de indicaciones durante la aplicación del revelador y determinar también la extensión de las indicaciones.

a) Indicaciones con color contrastante.

Para penetrantes con color contrastante, el revelador forma una uniforme y razonable capa blanca sobre la superficie de inspección, las discontinuidades superficiales son indicadas por el crecimiento del sangrado del penetrante que estuvo alojado en el interior de ellas. Indicaciones con un color rosa pálido pueden ser causa de una limpieza excesiva, y si por el contrario se hizo una limpieza inadecuada, las indicaciones pueden ser de difícil interpretación. Además de que se debe tener una adecuada iluminación para asegurarse de la sensibilidad visual durante la examinación y evaluación de las indicaciones.

b) Indicaciones con color contrastante.

Con penetrantes fluorescentes, El proceso es esencialmente el mismo con la excepción que la examinación es con el empleo de luz ultravioleta, llamada "Luz negra" y se debe emplear como sigue:

- 1.- Hacer la inspección en un área totalmente oscura.
- 2.- El examinador deberá estar en el área oscura por lo menos 5 minutos antes de empezar a interpretar las discontinuidades para que sus pupilas se adapten a la oscuridad.
- 3.- Permitir un calentamiento previo de la luz negra por lo menos de 5 minutos para permitir la adecuada intensidad de luz ultravioleta emitida.

La intensidad de luz negra emitida debe ser como mínimo de  $1000 \text{ uW} / \text{cm}^2$  sobre la superficie a la que esta siendo inspeccionada y deberá asegurarse por lo menos una vez cada 8 horas y siempre y cuando la estación de trabajo sea cambiada de lugar.

#### 10.- Evaluación.

Todas las indicaciones deben ser evaluadas en términos del criterio de aceptación de acuerdo a la sección del código de referencia.

Todas las discontinuidades deben ser indicadas de acuerdo al sangrado del penetrante, sin embargo, indicaciones localizadas sobre superficies irregulares debido a marcas de maquinado u otras condiciones de superficie pueden producir falsas indicaciones.

Amplias áreas de fluorescencia o pigmentación podrían enmascarar indicaciones de discontinuidades que son inaceptables, si se presenta este caso, repetir el proceso.

Ejemplo de criterios de aceptación tomando como referencia el código ASME Sec. VIII Div. 1:

Una indicación es la evidencia de una imperfección mecánica. Sólo las indicaciones con dimensiones mayores de 1.6 mm (1/16") serán consideradas importantes.

- a) Una indicación lineal es aquella que tiene una longitud mayor de tres veces el ancho.
- b) Una indicación redonda es aquella que tiene forma circular, elíptica, incluso con colas, donde su longitud sea menor a tres veces su ancho.
- c) Cualesquiera de las indicaciones dudosas se volverán a inspeccionar repitiendo antes el proceso de los líquidos penetrantes y determinar si son o no relevantes.

Para el caso de uniones con soldadura sea cual sea el proceso debe ser aceptable si esta libre de:

- a) Indicaciones lineales importantes.
- b) Indicaciones redondas importantes mayores de 4.8 mm (3/16").
- c) Cuatro o más indicaciones redondas importantes en una línea, separadas de orilla a orilla entre si por 1.6 mm (1/16") o menos.
- d) Una indicación de una imperfección puede ser mayor que la imperfección que la causa; no obstante, el tamaño de la indicación es la base para evaluación y aceptación.

#### 11.- Limpieza final.

En la superficie de la prueba examinada deberá hacerse limpieza final, quitando perfectamente todos los residuos del penetrante o del revelador ya que podrían combinarse con otros factores de proceso posterior y producir oxidación, contaminación etc, [1],[9],[10],[12].

## Conclusiones.

- Con base en la metodología de la investigación, se elaboró el manual de Ultrasonido Industrial y Líquidos Penetrantes,
- Este manual tiene la característica peculiar de ser un instructivo que guía metodológicamente al usuario, aunque nunca haya manejado la detección de discontinuidades que se presentan en cualquier etapa de un proceso metal-mecánico.
- La utilización de este manual, reduce considerablemente costos reflejados en la capacitación externa, ya que abarca temas relacionados con los niveles I y II en ultrasonido industrial y líquidos penetrantes, conforme a la práctica recomendada por la ASNT.
- Con este manual el usuario aprenderá a manipular el equipo y evaluar discontinuidades en un promedio muy inferior, comparado con la acreditación para ultrasonido industrial y líquidos penetrantes.
- Es importante destacar que la elaboración de este manual, como una formación de mis competencias profesionales, me ha permitido incursionar sin ninguna dificultad en el campo laboral, ya que a partir de la comprensión profunda de estos dos ensayos no destructivos, por supuesto con el apoyo del Dr. Jiménez, tuve los elementos suficientes para ingresar en el aseguramiento y la calidad de productos nacionales e internacionales, en el área de inspección.

## Glosario de términos.

Acoplante.	Substancia con características especiales usado entre la zapata de rastreo y la superficie del espécimen a prueba para mejorar la transmisión de la energía ultrasónica.
Adaptación visual.	Ajuste de los ojos al momento de pasar de un espacio iluminado a uno oscuro.
Adherencia.	Habilidad de un líquido para esparcirse o adherirse a la superficie de un sólido en cualquier posición.
Amplitud.	Pulso vertical de una señal, usualmente (en ultrasonido) de base a pico en una presentación A-Scan.
Angulo crítico.	Angulo incidente del haz ultrasónico del cual la onda refractada específica más larga no existe.
A-Scan.	Método de registro en la pantalla del equipo ultrasónico que representa una línea base horizontal que indica distancia o tiempo y una línea vertical con origen desde la línea base que indica la amplitud.
Atenuación. (db/m)	Factor que describe un decremento en la intensidad del haz ultrasónico con respecto a la distancia. Normalmente expresada en decibelios por unidad de longitud.
Atenuador.	Cualquier interferencia en el haz ultrasónico que causa alteración en la amplitud de una indicación.
Block de referencia.	Block diseñado especialmente como medio para proveer reflexiones ultrasónicas con características conocidas.
B-Scan.	Método de registro en la pantalla del equipo ultrasónico que muestra una sección en cruz del espécimen indicando la longitud aproximada de reflectores y de sus posiciones relativas.
Campo cercano.	Región de la onda ultrasónica adyacente al transductor y teniendo una descripción de onda compleja. También conocido como zona Fresnel.

Campo lejano.	Zona de la onda donde reflectores iguales dan exponencialmente amplitudes decrecientes cuando incrementa la distancia.
Compuerta.	Medio electrónico que selecciona un segmento horizontal para monitorear procesos de "Tiempo" o de "Distancia".
Contaminante.	Cualquier sustancia o elemento extraño presente en la zona de inspección o cualquier indicio que afecte el desempeño de los resultados esperados.
Contraste.	Diferencia en visibilidad (Brillantez o Coloración) entre una indicación y la superficie de prueba.
Control de decibeles.	Control que ajusta la amplitud de una señal.
Conversión de modo.	Fenómeno por el cual una onda ultrasónica que es propagada en una forma puede reflejarse o refractarse en una interfase para formar una onda ultrasónica de forma diferente.
Corrección. (Distancia-Amplitud)	Cambio electrónico de una amplificación para proveer amplitudes iguales desde reflectores iguales a profundidades diferentes.
Cristal.	Elemento piezoeléctrico en una unidad de rastreo.
C-Scan.	Método de registro en la pantalla de equipo ultrasónico que muestra una vista del objeto a prueba y sus discontinuidades encontradas.
Decibel (dB).	20 Veces la base diez logarítmica de el radio de dos amplitudes de una señal ultrasónica: $dB = 20 \log_{10} (\text{Amplitud-Radio})$ .
Eco.	Indicación de la energía reflejada.
Emulsificador.	Líquido especial que interactúa con una sustancia aceitosa para que sea removido el líquido penetrante con agua.
Enjuague.	Es el proceso de remover el líquido penetrante de la superficie de prueba por medios de lavado con otro líquido, usualmente agua.

Frecuencia (Repetición de pulso).	Número de veces por segundo que una unidad de búsqueda electro-acústica es excitada.
Haz angular.	Término usado para describir el haz ultrasónico con un ángulo de incidencia ya sea de refracción de reflexión o normal a la superficie de prueba.
Indicación.	Marca o detonación de la presencia de un reflector.
Inspección.	Examinación de la parte de prueba para detectar discontinuidades.
Interferencia.	Límite entre dos materiales.
Impedancia acústica.	Es el resultado de la velocidad de onda por la densidad del material.
Línea base.	Trazo horizontal en la pantalla A-Scan del equipo ultrasónico que representa distancia o tiempo.
Línea de retardo.	En una presentación A-Scan o B-Scan en el cual la parte inicial de la escala de tiempo no esta mostrada.
Longitud de onda.	Aquellas ondas en las cuales el movimiento de la partícula del material esta esencialmente en la misma dirección que la onda de propagación.
Luz negra.	Radiación electromagnética cercana al rango de la longitud de onda de los rayos ultravioleta, 330-390 nm (3300-3900 Å).
Luz visible.	Radiación electromagnética con rango de longitud de onda de 400-700 nm (4000-7000 Å).
Método de resonancia.	Técnica en la cual ondas ultrasónicas continuas son medidas en forma de frecuencia para identificar características de partes a inspección tales como espesor, integridad física o continuidad en su estructura granular.
Método pulso-eco.	Método de inspección en la cual la presencia y posición de un reflector son indicados por la amplitud y tiempo del eco producido por el mismo reflector.

Modo.	Tipo de propagación de una onda ultrasónica creada por el movimiento de la partícula según las características físicas del material.
Película fina.	Partículas finas del revelador formando una capa fina sobre la superficie de prueba.
Pierna.	Proporción del haz ultrasónico comenzando desde la superficie de la unidad rastreadora hasta la pared posterior del material de prueba, continuando con la reflexión hasta llegar a la superficie de prueba, este haz es usualmente ilustrado como una letra "V".
Pulso.	Movimiento de onda de lapso muy breve que produce vibraciones mecánicas.
Rango.	La máxima longitud de onda que es registrada en la pantalla por el equipo ultrasónico.
Reflector.	Interfase en la cual una onda ultrasónica encuentra un cambio acústico y parte de la energía de la onda es reflejada.
Transductor.	Dispositivo electroacústico para convertir energía eléctrica en energía acústica y viceversa.

## Bibliografía

- [1]. American Society for Nondestructive Testing (ASNT), "**Recommended practice No. SNT-TC-1**", ISBN 1-57117-050-2, 1711 Arlingate Lane Columbus, OH. 43228-0518, 1996.
- [2]. Kraut Kramer Branson, "**Recommended sequence of operations for ultrasonic weld inspection according to AWS structural welding code**", Box 350, Lewinstown, PA 17044, 1996.
- [3]. Staveley Instruments, "**Operating manual for sonic 1200 ultrasonic flaw detector, P/N 7720044.00**", 421 North Quay street, Kennewick, WA 99336, May 13 1998 Rev. 2 (5/98).
- [4]. American Society of Mechanical Engineerings Code (ASME), "**Secc. V Nondestructive Examination. Article 5, Ultrasonic Examination, General requirements, Ultrasonic examination methods for materials and fabrication, Mandatory appendices, Nonmandatory appendix. Article 6, Liquid Penetrant Examination. Article 23, Ultrasonic standard practices for ultrasonic examination of heavy steel forgins, standard specification for straight-beam, ultrasonic examination of steel plates, Recommended practice for ultrasonic pulse-echo straight-beam testing by the contact method. Standard practice for thickness measurement by manual contact ultrasonic method. Article 30, Terminology**", Edition 2001 Add. 02.
- [5]. Josef and Herbert Kraut Kramer, "**Ultrasonic Testing of Materials**", 3th. Edition, Democratic Republic of Germany, Springer-Verlag Berling Heidelberg, 1983.
- [6]. Dupont NDT Systems, Inc. "**Quantum QFT-2 Operator's Manual**", Versión 3.0, 15751, Graham Street Huntington Beach, CA 92649, 1993.
- [7]. Kraut Kramer Branson, "**Operating Manual for Model USN 52, Ultrasonic Flaw Detector with On Board Data Logger Data Set Memory**", Part No. 021-002-078 Rev B, 1994.
- [8]. Catálogo Panametrics, Inc. NDT Division, "**Ultrasonic Transducers**", 221 Crescent Street Waltham, MA. 02453 U.S.A. 2003.
- [9]. General Dynamics, Convair Division, "**Programed Instruction Handbook, Nondestructive Testing, Liquid Penetrant**", Fourth Edition, 1997.
- [10]. Robert MC. Master, "**Nondestructive Testing Handbook, Liquid Penetrant**", Second Edition, Vol. II, 1982.

- [11]. American Society for Nondestructive Testing, "**Redi-Reference Guide/87 on Materials Evaluation**", Vol. 45 No. 2, U.S.A. 1987.
- [12]. American Society for Testing and Materials (ASTM), "**Standard Recommended Practice for Liquid Penetrant Inspection Method, E 165-80**", U.S.A., 1983.
- [13]. Hartford Steam Boiler Engineering Services Inspection and Insurance co. "**Technical Data Handbook**", Fourth Edition, Hartford, CT 06102-5024, 1994.

Página WEB:

- [14]. <http://www.modernplastics.com/runsearch.asp>  
Junio-21.2004.