

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



**Control de Calidad de Juntas
Soldadas por Ultrasonido**

**Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO MECANICO**

Gabriel Federico Calle Sotelo

Promoción 83 - 2

LIMA - PERU

1988

INDICE

	Pág.
PROLOGO	
CAPITULO I	
INTRODUCCION	6
CAPITULO II	
PRINCIPIOS FISICOS Y FUNDAMENTO TEORICO	
DEL UTLRASONIDO	8
2.1 Propagación de las Ondas Mecánicas.	10
2.1.1 Ondas Longitudinales	11
2.1.2 Ondas Transversales o de Cilladura	
2.2 Ondas Electromagnéticas y Mecánicas	12
2.2.1 Ondas Electromagnéticas	12
2.2.2 Ondas Mecánicas	
2.3 Ondas Sónicas o Acusticas	14
2.3.1 Ondas Infrasonicas	14
2.3.2 Ondas Audibles	
2.3.3 Ondas Ultrasonicas	15
2.4 Propagación de las Ondas Sónicas	
Diversos Medios	15
2.4.1 Ondas Sónicas en Gases y Líquidos	17
2.4.2 Ondas Sónicas en los Sólidos	20
2.4.2.1 Ondas Longitudinales y	
Transversales	21
2.4.2.2 Ondas de Superficie	22

2.5	Magnitudes del Campo Sónico	23
2.5.1	Presión del Sonido	23
2.5.2	Rapidez del Sonido	24
2.5.3	Impedancia Acustica	24
2.5.4	Energía específica de una Onda Sónica	27
2.5.5	Intensidad del Sonido	27
2.6	Reflexión con Incidencia Vertical	28
2.6.1	Acoplamiento	
2.6.2	Reflexión sobre una separación del Material	35
2.7	Reflexión y Refracción con Incidencia Oblicua	
2.7.1	Desdoblamiento de la Onda	38
2.7.2	Leyes de la Reflexión y de la Refracción	
2.7.2.1	Reflexión Total	41
2.7.2.2	Refracción con Medio de Acoplamiento	42
2.8.	Consecuencias Importantes de la Reflexión y Refracción en los Ensayos Ultrasonicos	46
2.8.1	Conexión Perpendicular	46
2.8.2	Conexión Oblicua	47

CAPITULO III

GENERADORES Y RECEPTORES DE ULTRASONIDO

3.1	Efecto PiezoEléctrico	50
-----	-----------------------	----

3.2	Efecto MagnetoEstrictivo	55
CAPITULO IV		
	TECNICAS DE ENSAYO Y LIMITACIONES DE LAS DISTINTAS TECNICAS	57
4.1	Método de Transmisión	57
4.1.1	Factor de Reflexión y de Transmisión	58
4.2	Método de Impulso y sus Ecos	61
4.2.1	Ajustes	65
4.3	Método de Resonancia	68
4.4	Metodo de Transmisión-Recepción (SE)	70
4.4.1	Palpador SE	
CAPITULO V		
	INTERACCION DE LAS ONDAS CON LA SOLDADURA	76
5.1	Angulo de Ensayo	78
5.2	Dimensiones del Palpador	79
5.3	Procedimiento de Exploración	80
5.3.1	Desplazamiento Transversal del Palpador	80
5.3.2	Desplazamiento Longitudinal del Palpador	82
5.3.3	Rotación del Palpador	83
5.3.4	Localización de los defectos	83
5.3.5	Identificación del tipo de defecto	84
5.4	Defectos mas Frecuentes en las Juntas Soldadas	88

5.4.1	Cavidades y Poros	88
5.4.2	Inclusiones	
5.4.3	Falta de Penetración	90
5.4.4	Falta de Fusión	
5.4.5	Grietas	92

CAPITULO VI

	INSPECCION DE LAS TUBERIAS DE PRESION DE UNA CENTRAL HIDROELECTRICA	93
6.1	Estructura y Equipos	
6.1.1	Presa y Derivación	93
6.1.2	Bocatoma	
6.1.3	Desarenador	96
6.1.4	Canales y Tubos	96
6.1.5	Camara de Carga	96
6.1.6	Detalle de Fabricación de la Tubería de Presión	96
6.1.6.1	Materiales de Construcción	98
6.1.6.2	Preparación de la Plancha	
6.2	Procedimiento de Ensayo	101
6.2.1	Calibración	101
6.2.1.1	Bloques de Calibración o Referencia	102
6.2.1.2	Bloque Normalizado por el IIS/IIW	104
6.2.1.3	Bloques Tipo ASME	106
6.2.2	Calibración del Sistema	107

6.2.3	Niveles de Aceptacion para la Interpretación de Juntas Soldadas	108
6.3	Costo de la Inspección de Soldadura	112
6.3.1	Metrado del Cordón de Soldadura	112
6.3.2	Estimado de la Inversion en Equipo para la Inspección de Juntas Soldadas de la Tubería de Presión por Rayos X	113
6.3.3	Estimado del Costo para la Inspección Radiográfica de las Juntas Soldadas	114
6.3.4	Estimado de la Inversión para la Inspección de Juntas Soldadas por Ultrasonido	115
6.3.5	Estimado del Costo para la Inspección por Ultrasonido de las Juntas Soldadas	115
6.4	Cualificación y Certificación del Personal de Ensayos no Destructivos	117
6.5	Reporte e Informe sobre Inspección Ultrabónica	120
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	122
	BIBLIOGRAFIA	126
	APENDICE	128
	TABLAS	138

PROLOGO

Existen ondas sonoras que el oído humano no puede percibir, dentro de este espectro se encuentran las ondas que poseen una frecuencia por encima de 20 kc/s. las que conocemos con el nombre de ultrasonidos.

Estas ondas se hacen pasar a través de un medio que contenga masa, los cuales viajan con una determinada velocidad de propagación y que al encontrar algún cambio de densidad (medio diferente), sufre atenuación, es decir, difracción, reflexión, absorción, etc. pero la atenuación que se utiliza en el control de calidad de soldaduras es básicamente la reflexión que sufre la onda, lo cual evidencia una pérdida de energía sónica. La propagación de las ondas sonoras implica la generación de vibraciones del cuerpo que constituye la fuente de energía y también de las partículas elementales del medio que atraviesan las ondas.

Aunque estas vibraciones pueden adoptar una forma cualquiera del gran número de formas diferentes, en casi todos los casos de interés se puede comparar con las oscilaciones de una masa "M" suspendida de un soporte

fijo, mediante un muelle que que posee una constante elástica C_m . Hoy en día en nuestro país esta propagación de ondas, así como su generación es muy aplicado en diferentes ramas como: El campo medicinal, ecografías, la destrucción de cálculos renales; en el campo marino, para la navegación y en la pesca de consumo, para la ubicación de cardumenes.

También en España se está desarrollando la técnica de ultrasonido para la traslación de atmosferas radioactivas de un lugar a otro, etc.; nosotros la utilizaremos para la detección de fallas en soldaduras pero teniendo perspectivas para el estudio y aplicación de estas ondas en las áreas ya mencionados.

En el capítulo II, desarrollamos las bases físicas sobre las cuales descansa la propagación de las ondas ultrasónicas; hacemos una diferencia bastante acertada de las ondas longitudinales y transversales. Así mismo aplicamos la ley de Snell, para calcular los ángulos de difracción que sufren las ondas sónicas al pasar de un medio a otro y con la ayuda de esta ley; fundamentar porque un solo tipo de ondas transversales en palpadores angulares.

En el capítulo III notamos como se generan las energías sónicas por los efectos piezoeléctricos y

magnetoestrictivos estos efectos realizan la
transformación de energía mecánica en energía eléctrica y
viceversa.

En el capítulo IV estudiaremos las diversas técnicas en el control de calidad de juntas soldadas por ultrasonido, haciendo énfasis en la aplicación selectiva, de acuerdo a la forma y características de la pieza o parte de máquina que queremos inspeccionar.

En el capítulo siguiente analizaremos específicamente la interacción de las ondas con la soldadura tratando las frecuencias y los ángulos de ensayos necesarios para la inspección correcta y rápida de las soldaduras aplicando un desplazamiento adecuado de los palpadores y así poder diferenciar e identificar los diferentes defectos en soldadura.

En el último capítulo hacemos una aplicación correcta en tuberías de presión, aplicando las normas internacionales, ASME, A.P.I, que aceptan o rechazan un **cordón de** soldadura incluyendo un análisis de costos de inspección por rayos X y ultrasonido, señalando las bases de calificación de personal que necesitamos en controles efectivos y profesionales.

En el año 1939 Alemania demostró su avance potencial en el campo metalurgico y energético. A ese nivel estaban E.E.U.U y la U.R.S.S. después de la Segunda Guerra quedaron sólo dos de los tres antes mencionados.

Después de 1945 hasta el presente sólo han transcurrido 42 años, estos años han sido de constante avance tecnológico, nuestro país al margen de este conflicto también empieza a crecer tecnológicamente, aunque no con la misma velocidad de E.E.U.U y la U.R.S.S. pero, en noviembre de 1987, en una importante reunión el Dr. Carlos del Rio Cabrera presidente del Concytec :

"Nuestro país sólo lleva 20 años de retraso tecnológico respecto a las potencias mundiales". Quienes conocen la amplia trayectoria de este ilustre peruano no podemos dejar de lado esta opinión.

Esto es realmente muy alentador y nos compromete a todos los peruanos a seguir trabajando para que esa diferencia de años tecnológicos sea cada vez menor.

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través de sus diversos programas de subvención y apoyo económico-financiero trata que esa distancia sea más corta.

Así mismo quisiera hacer mi reconocimiento al Concytec por el apoyo otorgado a la presente Tesis para su ejecución y elaboración. También expresarle mi mas sincero agradecimiento a mi asesor Ing.Ulises Huaman por su comprensión y ayuda permanente.

CAPITULO I

INTRODUCCION

El control de calidad es un medio por el cual nos da un grado de confiabilidad de la pieza o parte de máquina sujeta a inspección, dentro de los controles tenemos dos tipos:

Los Ensayos Destructivos y los Ensayos No Destructivos. Dentro de los destructivos tenemos; Tracción, Flexión, Torsión, Metalografía, etc., debido a la elevada versatilidad y a la rapidez del ensayo por ultrasonido, hoy en día se viene aplicando esta técnica, sobre todo en juntas soldadas.

Ultrasonido es el nombre que se le da a frecuencias superiores a la que el oído humano puede percibir (más 20 kc/s.). La propagación de estas ondas a través de un medio, en materiales, permiten la determinación de grietas y medidas de espesor.

El trabajo estará orientado a la aplicación del control de calidad en tuberías de presión;

basicamente serà un estudio de tipo experimental donde comprobaremos los fenomenos físicos en la propagaci3n de ondas ultras3nicas sobre un medio metálico.

Actualmente control de calidad de juntas soldadas utiliza, ademàs de ultrasonidos, las tècnicas de líquidos penetrantes, rayos X, como procesos complementarios.

El ultrasonido se hace insustituible en partes inaccesibles del equipo de rayos X; el siguiente es rango de espesores por los cuales se puede aplicar los ensayos no destructivos:

RAYOS X:

Material Fe, espesores de 8 mm. a 100 mm.
 Material Al, espesores de 50 mm. a 300 mm.
 Material Cu, espesores de 5 mm. a 50 mm.

RAYOS γ :

Material Fe, espesores de 20 mm. a 300 mm.
 Material Al, espesores de 50 mm. a 300 mm.
 Material Cu, espesores \leq 200 mm.

Ultrasonido realmente abarca toda la gama anterior.

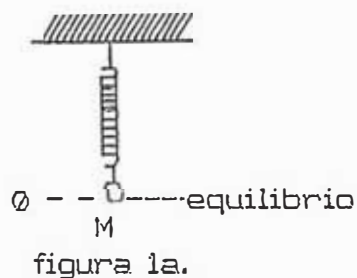
El estudio se harà para juntas soldadas en general y en particular como aplicaci3n a las tuberias de presi3n de la central hidroelèctrica de Quiroz ubicada en el departamneto de Fiura

CAPITULO II

PRINCIPIOS FISICOS Y FUNDAMENTO TEORICO DEL ULTRASONIDO

La propagación de las ondas implica la generación de vibraciones del cuerpo que constituye la fuente de energía y de las partículas elementales del medio que atraviesan las ondas.

Aunque que estas vibraciones puedan adoptar una forma cualquiera de un gran número de formas diferentes. En casi todos los casos de interés se puede relacionar con las oscilaciones de una masa "M", suspendida de un soporte fijo, mediante un muelle que soporta una constante elástica C_m , es decir. desplazamiento por unidad de fuerza restauradora.



C_m = Constante elástica del resorte

$$[F] = [1/C_m] [X]$$

Vibraciones Simples

Desplacemos la masa M , una longitud X_0 , tal que el muelle se alargue dentro de su límite elástico y a continuación dejemosla en libertad: comienza a oscilar respecto a su posición media cero.

La masa en ausencia de amortiguamiento ejecutará vibraciones armónicas simples; donde la ecuación del movimiento para un instante "t" es:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{x}{Cm} = 0$$

Donde: x ; posición de la masa en función del tiempo

La solución de la ecuación diferencial es:

$$V = X_0 \cos W_r t$$

$$\text{Donde: } W_r = \sqrt{\frac{1}{M Cm}}$$

Si graficamos la solución de la ecuación diferencial (figura 1b), también obtendríamos representaciones similares si se expresa la velocidad V (figura 1c) o la aceleración (figura 1d) en función del tiempo.

La comparación entre la posición (figura 1b) y la velocidad (figura 1c) permite deducir que la

velocidad de la masa es máxima cuando pasa por la posición cero, mientras que es nula en los puntos extremos.

De allí se puede deducir también que la energía del resorte se intercambia continuamente entre potencial y cinética. Al pasar por la posición cero tiene sólo energía cinética, pues el resorte se halla totalmente sin tensión, siendo la velocidad máxima. En cambio en los dos puntos extremos el resorte adquiere su máxima tensión, siendo la velocidad nula, es decir, que existe solamente energía potencial. En las posiciones intermedias tiene lugar las dos formas de energía, cuya suma es constante, mientras no haya amortiguamiento.

En el sentido de la definición ambas energías experimentan también una vibración.

2.1. Propagación de las ondas mecánicas.-

De una manera general puede definirse a la onda como: una propagación de vibraciones. En la propagación de la onda existe un transporte de energía pero no de masa. Por lo tanto las ondas sonoras se pueden propagar en cualquier medio donde existan átomos o moléculas, que puedan vibrar elásticamente, es decir, estas ondas pueden

propagarse tanto en medios sólidos, como en líquidos o gaseosos.

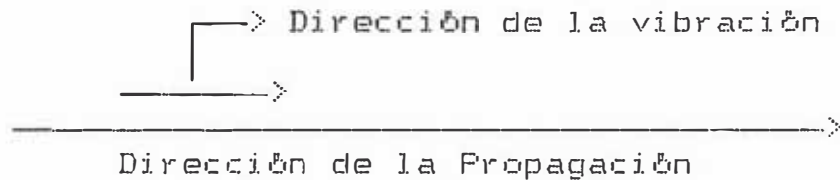
Sin embargo debe tenerse en cuenta que tanto en los gases como en los líquidos las ondas sonoras se pueden propagar como en ondas longitudinales, y no como transversales, esto se debe a que el módulo de elasticidad de corte es nulo.

En los líquidos puede decirse que existe un pequeño valor de " G "; pero esta propagación es fuertemente amortiguada por lo que no cabe considerarlas a los efectos de la captación y transmisión de los ultrasonidos.

En cambio en los cuerpos sólidos se manifiestan tanto las ondas longitudinales como las transversales, o ambos a la vez en distintos grados de combinación, se debe a que el vínculo elástico de los átomos tiende a mantener a estos en su posición de equilibrio.

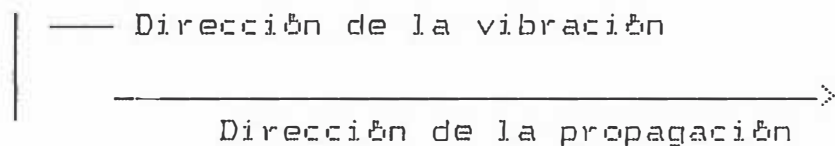
2.1.1. Ondas longitudinales

En las ondas longitudinales la dirección de la oscilación coincide con la dirección de la propagación.



2.1.2. Ondas transversales o de cizalladura

La dirección de oscilación de las partículas individuales es perpendicular a la dirección de la propagación de la onda.



2.2. Ondas electromagnéticas y mecánicas.-

La variedad con que se presentan las ondas en la naturaleza admiten clasificarlas de la siguiente manera:

2.2.1. Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas son difíciles de imaginar. Ellas consisten en la propagación de vibraciones transversales debidas a campos eléctricos y magnéticos, por perpendiculares entre sí.

La modalidad tan diversa con que se manifiesta las ondas electromagnéticas, a las cuales pertenecen las ondas radiales, radiaciones de calor, la luz visible y los rayos x, se debe tan solo a la diferencia de longitud de la onda.

2.2.2. Ondas Mecánicas

Las ondas mecánicas componen el segundo grupo importante de ondas. En este caso la propagación se basa en vibraciones mecánicas; es decir vibraciones en las que intervienen fracciones de masa, como moléculas de aire, agua o de un cuerpo sólido, que se mueven periódicamente al rededor de su posición cero. Según como esas fracciones resulten ligadas a su posición cero, ya sea por acción de la gravedad, o por vínculos elásticos (caso de resorte), se denominan ondas de gravedad u ondas elásticas.

2.3. Ondas sónicas o acústicas.-

Las ondas sónicas o acústicas son ondas elásticas. Todas las ondas elásticas de la naturaleza pueden ser consideradas como ondas sónicas de las cuales solamente una parte muy reducida resulta perceptible al oído. El que una onda sónica sea audible depende, además de su intensidad, especialmente de su frecuencia.

2.3.1. Ifrasónicas

$f < 16 \text{ KHz}$. Las vibraciones y ondas elásticas de la baja frecuencia no son audibles. El nombre de ondas infrasonicas es correlativo al de rayos infrarrojos, que en el dominio de las ondas electromagnéticas corresponden a los límites inferiores de la luz visible, a causa de su baja frecuencia; es decir, excesiva longitud de onda.

2.3.2. Audibles

$16 \text{ KHz} < f < 20 \text{ KHz}$. Como se comprenderá, los límites de los sonidos audibles no son tan precisos como se acaba de indicar. Ellos difieren con la sensibilidad de cada

persona y con su edad. Los límites entre 16 KHz. y 20 KHz. responden a un acuerdo general.

2.3.3. Ultrasónicas

$f > 20 \text{ KHz.}$ El límite superior de frecuencia de las ondas ultrasónicas no está definido físicamente. En la práctica depende de la posibilidad de su obtención y captación. Las frecuencias más altas logradas hasta ahora son del orden de los 1000 MHz.

En los ensayos ultrasónicos las frecuencias utilizables comienzan escasamente por encima del límite audible y se extiende hasta los 25 Mhz. aproximadamente. En el caso de los materiales metálicos las frecuencias utilizables varían entre 0.25 Mhz. y 25 Mhz.

Gran parte de las propiedades de las ondas sónicas que se consideraran en adelante no dependen de la frecuencia. Por ello se aplican igualmente a las ondas audibles como a las ultrasónicas.

2.4. Propagación de las ondas sónicas en diversos medios.-

En principio las ondas sónicas pueden propagarse dentro de todos los medios donde exista fracciones de materia; es decir, átomos o moléculas capaces de vibrar elásticamente. De allí que esas ondas tengan lugar en los gases, líquidos y sólidos. Por el contrario no pueden producirse en el vacío por no existir elementos de materia que la sustenten.

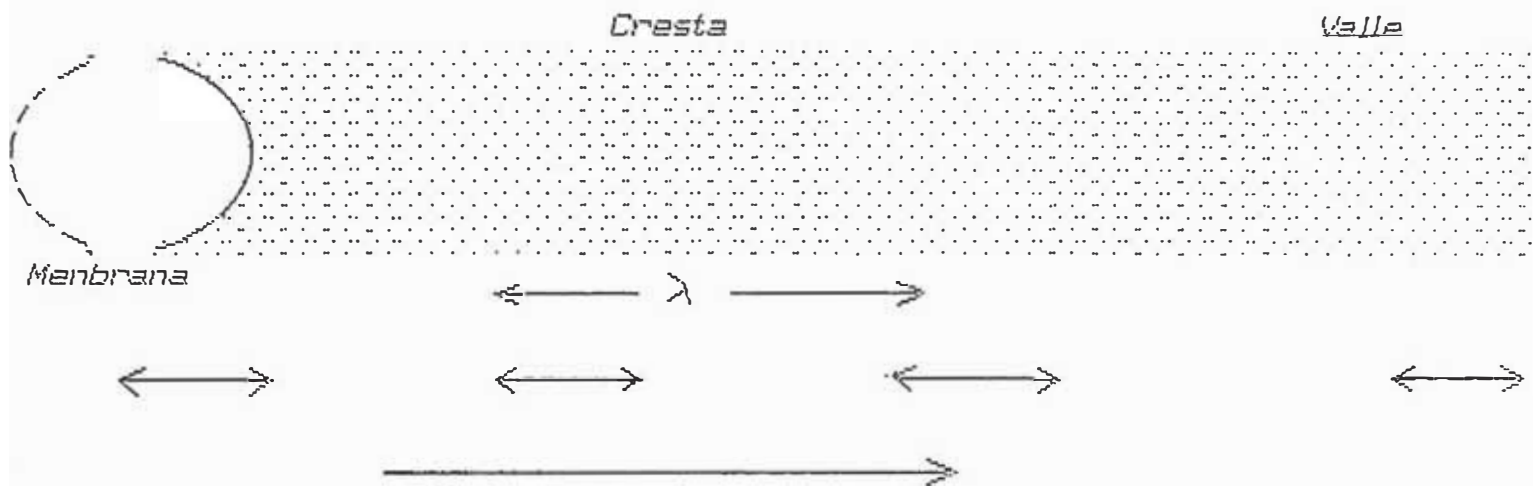
Las ondas sónicas son absorbidas por todos los materiales a causa de la transformación de su energía vibratoria en calor; existiendo algunos con muy fuerte poder de absorción. Por eso resulta discutible el principio de que todo material es apto para la propagación de dichas ondas. Los metales son en general mucho mejores transmisores del sonido que el aire. En oposición a la absorción del sonido, la velocidad de propagación de las ondas sónicas, no depende de la frecuencia. Por ello puede tomarse esas velocidades aproximadamente como constantes del material, condición muy útil en los ensayos ultrasónicos. Sin embargo, esta última propiedad no es rigurosamente exacta pues dicha velocidad depende de la presión, temperatura y otros parámetros, especialmente los gases líquidos. Ahora bien, en muchos materiales sólidos, como en los metales esa influencia es tan pequeña que puede ser despreciada.

Y es el caso que se cumple, felizmente, en la mayoría de los ensayos ultrasónicos.

Respecto a la posibilidad de propagación de los diversos tipos de ondas (longitudinales, transversales, etc.) existe una diferencia fundamental entre los gases, líquidos y sólidos.

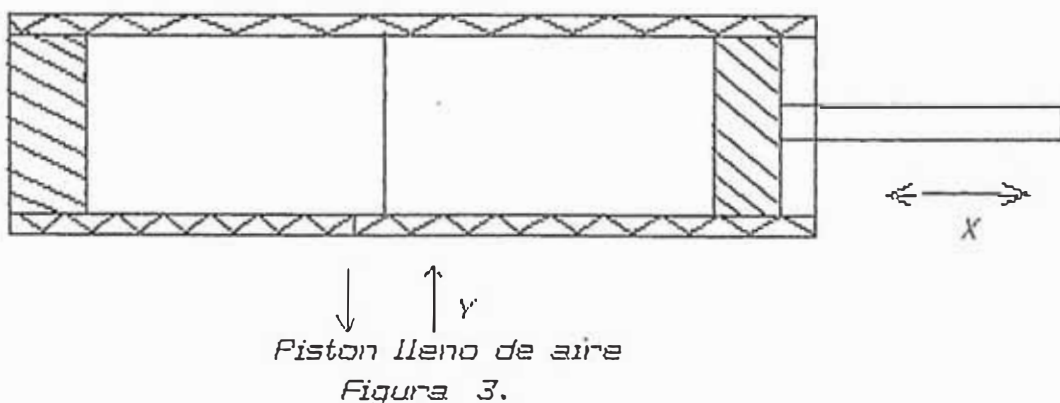
2.4.1. Ondas sónicas en gases y líquidos

Si dentro de un ambiente con aire se hace vibrar un elemento, que puede ser una membrana, el aire inmediato a ella sufrirá compresiones y descompresiones que seguirá el mismo ritmo de vibraciones de la membrana. A la vez se originará una propagación de ondas longitudinales en forma de sobrepresiones y de presiones alternadas, que comenzando por las moléculas más próximas a la membrana se irían transmitiendo a las demás por choques sucesivos. La figura 2 muestra este proceso esquemáticamente.



*Ondas Sonicas Gases. Ondas Longitudinales
Figura 2.*

La propagación de estas ondas longitudinales pueden interpretarse fácilmente si se tiene en cuenta que las moléculas de aire de las zonas comprimidas tratarán de llenar los vacíos de las ondas inmediatas que se encuentren descomprimidos, a fin de restablecer el equilibrio perturbado y lograr la igualdad de presiones en todas las direcciones. Los vínculos elásticos que unen a las moléculas de aire con su posición cero puede observarse también con un experimento (figura 3).



*Piston lleno de aire
Figura 3.*

Si dentro de un cilindro cerrado lleno de aire, se hace actuar un pistón se verá la resistencia que el aire opone al desplazamiento del mismo en cualquiera de los dos sentidos de la dirección x .

En efecto si al mismo cilindro de la figura 3, que contiene aire en su interior, lo suponemos virtualmente seccionado en dos mitades, las moléculas de aire no se opondrán a que agamos deslizar entre sí a ambas mitades en la dirección y . Es decir las moléculas de aire del interior del cilindro no opondrán resistencia a ese resbalamiento transversal, y por tanto no habrá vínculos elásticos que las ligan a su posición cero.

La falta de resistencia del aire al deslizamiento coincide con la propiedad del mismo de tener un módulo de elasticidad transversal G igual a cero.

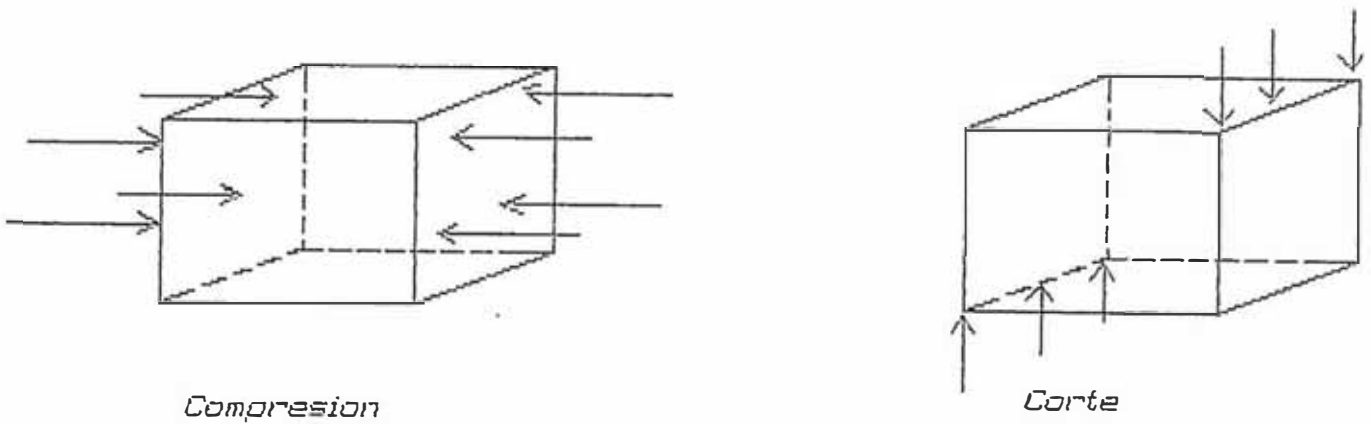
Respecto a la propagación de ondas sónicas, todos los gases y líquidos se comportan como el aire.

En los gases y líquidos las ondas elásticas pueden propagarse solamente como ondas longitudinales y no como transversales.

2.4.2. Ondas sónicas en los sólidos

Si con dirección perpendicular a una superficie metálica se provocara una vibración, esta se propagaría en el metal en forma de ondas longitudinales de modo similar a la propagación de ondas en el aire, debidas a la vibración de una membrana. Si, en cambio, esa excitación de la superficie metálica se hiciera paralelamente a la superficie, la propagación sería con ondas transversales. En ambos casos el vínculo elástico de los átomos metálicos con su posición cero se debe a las denominadas fuerzas del retículo, que trantan de mantener invariables a las distancias entre átomos. Si en un trozo de metal se realizara un ensayo similar al del cilindro lleno de aire, los vínculos elásticos se observarían fácilmente, a causa de la gran resistencia que ese trozo

metálico opondría (figura 4) a esfuerzos de compresión, tracción o corte.



Vinculos elasticos en un material metalico
Figura 4.

Todos los sólidos se comportan de modo similar, de suerte que puede dejarse establecido también: En los sólidos existen ondas longitudinales, transversales y combinaciones de ambas.

2.4.2.1. Ondas longitudinales y transversales.-

Verdaderas ondas longitudinales y verdaderas ondas transversales se propagan únicamente en un sólido, cuando las dimensiones de este en todas sus

direcciones, son muy superiores a la longitud de onda aplicada (propagación de ondas en un medio ilimitado).

2.4.2.2. Ondas de superficie.-

Las ondas de superficie pueden ser consideradas como un tipo especial de ondas transversales. Se propagan solamente en la periferia del sólido y tiene la propiedad de seguir también las irregularidades del mismo, compenetración, es decir la zona cercana a la superficie dentro de la cual tiene lugar. La vibración se mantiene dentro del orden de la longitud de onda. Su velocidad de propagación, es en el caso de las longitudinales y transversales es independiente de la frecuencia y por tanto es una constante del material.

Todos los tipos de onda que pueden desarrollarse en los cuerpos sólidos son utilizables prácticamente en los ensayos ultrasónicos. La elección del tipo de onda depende de su especial adaptación al problema que se presenta,

pero las longitudinales y transversales tienen mayor aplicación. A continuación se indican las fórmulas que expresan las velocidades de propagación en función de algunas propiedades del sólido

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

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \nu)}}$$

Donde:

- C_l : Velocidad de la onda longitudinal.
- C_t : Velocidad de la onda transversal.
- E : Módulo de elasticidad.
- ρ : Densidad del material.
- ν : Coeficiente de Poisson

2.5. Magnitudes del campo sónico

2.5.1. Presión del sonido

La propagación de las ondas sónicas se debia al intercambio de zonas de sobrepresión y depresión. Un punto situado en un medio en el cual se propaga una onda elástica, participará alternativamente de zonas

comprimidas y descomprimidas. La presión en un lugar situado dentro de un medio que propaga ondas sónicas, realiza una vibración; pues cumple con el concepto que se ha dado de ella; el cambio periódico de una magnitud. La amplitud del cambio de presión del sonido la denominaremos presión de sonido P .

2.5.2. Rapidez del sonido.

Los elementos de masa en un medio que transmite sonido realizan vibraciones similares a las del péndulo de resorte de la figura 1, cambiando constantemente la velocidad (figura 1c). La velocidad instantánea que los elementos poseen y que se modifica constantemente y periódicamente se denomina rapidez instantánea del sonido v . Todo cuanto se diga en adelante sobre la rapidez del sonido, se referirá siempre a su amplitud V .

2.5.3. Impedancia acústica

La impedancia acústica Z es la relación entre la presión del sonido y la rapidez del sonido.

$$Z = \frac{P}{v}$$

Esta formula es análoga a la ley de Ohm en electricidad donde, como es sabido, la resistencia es la relación entre la tensión y la intensidad de la corriente. La "impedancia acústica" es una resistencia que opone a la vibración de la onda. La palabra resistencia sugiere a menudo el cambio de una forma de energía en calor (resistencia ohmica y resistencia de frotamiento), y de allí que se esté inclinando a pensar en una absorción que experimente una onda sónica dentro de un medio, y la impedancia en ese mismo medio.

La impedancia acústica es una constante del material, lo mismo que la velocidad de propagación del sonido. Si un medio posee una baja impedancia, sus elementos de masa vibraran a gran velocidad, con sólo un pequeño cambio de presión del sonido. En otras palabras, ello significa que ese medio ofrecerá poca resistencia a las deformaciones elásticas forzadas por la onda sónica. Esto podría compararse también, con las debidas reservas, al caso del péndulo de resorte. Si

por el contrario, la impedancia del medio es grande, esos elementos de masa vibrarán altamente, a pesar de un elevado cambio de presión del sonido; pues ese medio estará ofreciendo una gran resistencia a las deformaciones elásticas. En ejemplo del resorte, correspondería a una masa grande con un resorte rígido. La impedancia en los cuerpos sólidos es en general mayor que en los líquidos, y estos mayor que en los gases.

Para el cálculo de la impedancia, la fórmula que la define es poco apropiado, pues requiere la medición previa de la presión del sonido y de la rapidez del sonido, lo que en la mayoría de los casos no es fácil de obtener. De la teoría de la propagación de la ondas sónicas se deduce una fórmula muy sencilla para el cálculo práctico:

$$Z = p \cdot c$$

La impedancia acústica es igual al producto del peso específico p por la velocidad del sonido c . De esta fórmula se infiere también que dicha magnitud es una constante del material. En la tabla I figuran los valores de

la velocidad del sonido, del peso específico y de la impedancia de algunos materiales.

2.5.4. Energía específica de una onda sónica

Como quedó indicado la propagación de una onda se caracteriza por un transporte de energía y no de masa. La energía presente en la unidad de volumen del medio (que avanza con la velocidad del sonido) se denomina energía específica E de una onda sónica se le expresa con la fórmula:

$$E = \frac{1}{2} \rho v^2$$

O también, sobre la base de la ecuación que define la impedancia:

$$E = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho \times C^2}$$

2.5.5. Intensidad del sonido

Se designa "intensidad del sonido", I , la cantidad de energía que pasa por unidad de Área (cm^2) de esta superficie, en la unidad

de tiempo (seg.). Esta dada por el producto de la energía específica y la velocidad del sonido, así pues tenemos la fórmula siguiente para la intensidad del sonido.

$$I = \frac{1}{2} p \times C \quad V = \frac{1}{2} \cdot Z \quad V = \frac{P}{2Z}$$

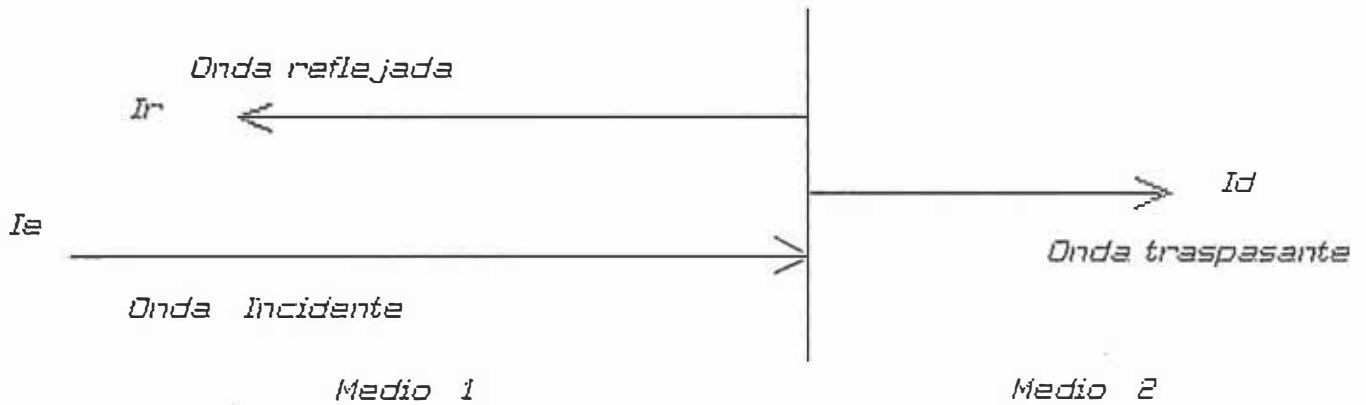
Importante es la relación entre la energía específica, la intensidad del sonido y la presión del sonido pues la altura de un eco en la pantalla de un aparato de impulso-eco, es proporcional a la presión del sonido. Tanto la energía específica E , como la intensidad del sonido Y , son proporcionales al cuadrado de la presión del sonido.

2.6. Reflexión con incidencia vertical. -

Si una onda sónica incide verticalmente sobre una superficie que separa dos medios diferentes, una parte de la energía de la onda se refleja, y vuelve por el mismo camino de la incidente.

El resto de la onda mantiene su dirección atravesando el material. Indicamos con I_e

la intensidad de la onda incidente, con I_r la que refleja, e I_d la que pasa (Figura 5).



*Reflexion con incidencia Vertical
Figura 5.*

Con estas intensidades damos las formulas siguientes que definen la posibilidad reflectante R y la posibilidad traspasante D sobre la superficie que limita los dos materiales:

$$R = \frac{I_r}{I_e}$$

$$D = \frac{I_d}{I_e}$$

De acuerdo con la ecuación de la energía

$$I_r + I_d = I_e$$

y por lo tanto

$$R + D = 1$$

Por la teoría de la propagación de las ondas sónicas se deduce que la posibilidad reflectante y la traspasante en una superficie límite depende únicamente de ciertas relaciones entre las impedancias en ambos miembros se tiene:

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{(m - 1)^2}{(m + 1)^2}$$

$$D = \frac{4(Z_1 Z_2)}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{4m}{(m + 1)^2}$$

Donde:

$$m = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Puede verse fácilmente que cuando las impedancias de las dos son iguales en ambos medios, la onda atraviesa la superficie límite sin ser perturbada. En este $m = 1$ y también:

$$R = 0$$

$$D = 1$$

Si en cambio, ambas impedancias difieren mucho, como ocurre por ejemplo entre el

aire y el hierro, m será muy grande si la onda pasa del hierro al aire y muy pequeña de ser lo contrario. Sin embargo, para ambos casos en que m es muy grande o muy pequeña resulta practicamente:

$$R = 1, \quad \text{y} \quad D = 0$$

En efecto:

Para $m > 1$:

$$R = \frac{(m - 1)^2}{(m + 1)^2} = \frac{m^2}{m^2} = 1$$

$$D = \frac{4m}{(m + 1)^2} = \frac{4m}{m^2} = \frac{4}{m} \approx 0$$

Para $m < 1$:

$$R = \frac{(m - 1)^2}{(m + 1)^2} = \frac{(-1)^2}{(+1)^2} = 1$$

$$D = \frac{4m}{(m + 1)^2} = \frac{4m}{m^2} \approx 0$$

Desde el punto de vista de las intensidades es indiferente el lado de la superficie límite sobre el cual inciden las ondas, ya que los valores de R y D no cambian al penetrarse entre si Z_1 o Z_2 .

Sabemos que la intensidad de una onda sónica es proporcional al cuadrado de la presión del sonido. Para considerar la altura del eco en la pantalla, que depende de la presión del sonido, se utilizará R' "factor reflectante" y D' "factor traspasante". Procediendo de manera análoga que con las intensidades, si designamos P_e la presión del sonido de la onda incidente, P_r de la reflectante y P_d la de la traspasante, tenemos:

$$R' = \frac{P_r}{P_e} = \sqrt{R} = \frac{m - 1}{m + 1} ;$$

$$D' = \frac{P_d}{P_e} = \sqrt{D/m} = \frac{2}{m + 1}$$

2.6.1. Acoplamiento

Para el ensayo de piezas deben utilizarse, ante todo, ondas de suficiente intensidad es decir de suficiente presión del sonido que les permita atravesar el material. Cuando se presiona sobre la pieza con el cabezal este no mantendrá contacto directo con aquella en toda su superficie, sino que habrá siempre entre ambos una capa muy delgada de aire, la cual significa un impedimento casi invisible para las ondas.

Puede apreciarse el porcentaje de presión del sonido que queda aún en el acero de la pieza respecto al obtenido en el cabezal, luego de atravesar las dos superficies límites siguientes: Cabezal (en este caso Titanato de Bario)-Aire y Aire-acero:

$$Z_1 \text{ (titanato de bario)} = 349 \times 10^4 \text{ [g/cm}^2 \times \text{seg.]}$$

$$Z_2 \text{ (aire)} = 0.00398 \times 10^4 \text{ [g/cm}^2 \times \text{seg]}$$

$$Z_3 \text{ (acero)} = 450 \times 10^4 \text{ [g/cm}^2 \times \text{seg]}$$

D'_{12} = Factor traspasante titanato de bario-aire

D'_{23} = Factor traspasante aire - acero

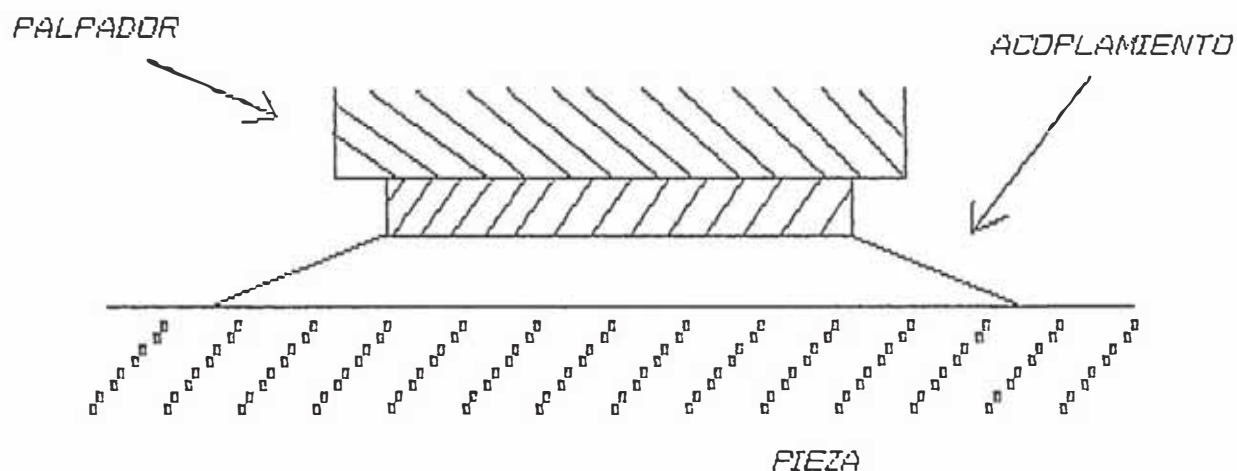
$$D'_{12} = 0.000022221, \text{ para } m_{12} = \frac{Z_1}{Z_2} = 9 \times 10^4$$

$$D'_{23} = 1.999982, \text{ para } m_{23} = \frac{Z_2}{Z_3} = 9 \times 10^{-6}$$

$$D' = D'_{12} \times D'_{23} = 0.004\%$$

(En es ejemplo no se han tomado en cuenta las partes que puedan estar directamente en contacto entre el cabezal y la pieza).

Si bien en la práctica las condiciones no son tan desfavorables, debe tenerse en cuenta que el eco, al volver sobre el aparato sufre otro debilitamiento igual, antes de ser registrado en el mismo. Para reducir esos inconvenientes se utiliza un "medio de acoplamiento" entre el cabezal y la superficie de la pieza, que tiene por objeto desalojar la capa de aire que separa ambas superficies (figura 6). En la práctica se emplea generalmente agua o aceite.



Medio de Acoplamiento
Figura 6.

Si la capa delgada de aire es reemplazada por agua, por ejemplo, tenemos el cálculo aproximado siguiente, similar al anterior:

$$Z_1 \text{ (Titanato de bar. .)} = 349 \times 10^4 \text{ g/cm}^2\text{.seg.}$$

$$Z_2 \text{ (Agua)} = 15 \times 10^4 \text{ g/cm}^2\text{.seg.}$$

$$Z_3 \text{ (Acero)} = 450 \times 10^4 \text{ g/cm}^2\text{.seg.}$$

D'_{12} = Factor traspasante titanato de bario-
agua

D'_{23} = Factor traspasante agua - acero

$$D'_{12} = 0.0823045, \text{ para } m_{12} = \frac{Z_1}{Z_2} = 23.3$$

$$D'_{23} = 1.94174, \text{ para } m_{23} = \frac{Z_2}{Z_3} = 3.3 \times 10^{-2}$$

$$D' = D'_{12} \times D'_{23} = 15.98\%$$

El rendimiento no es elevado todavía, pero si mas de 1000 veces superior al caso del aire, y además cumple con las necesidades de la práctica en la mayoría de los casos.

2.6.2. Reflexión sobre una separación del material.-

Como en una separación del material existen siempre dos superficies límites entre diferentes materiales, aparece generalmente una fuerte reflexión.

Si se tratara por ejemplo de un fisura, llena de aire, en una pieza de acero, la presión del sonido de la onda reflejada alcanzaría a más del 99.9% de la onda incidente:

$$m = \frac{450}{0.00398} = 1.13 \times 10^5$$

$$R' = \frac{m - 1}{m + 1} \cong \frac{10^5 - 1}{10^5 + 1} = \frac{1 - 10^{-5}}{1 + 10^{-5}} \cong (1 - 10^{-5})^2$$

$$R' = 99.998\% \text{ (caso acero - aire)}$$

Con una fisura en el acero, llena de agua, se tiene:

$$m = \frac{450}{15}$$

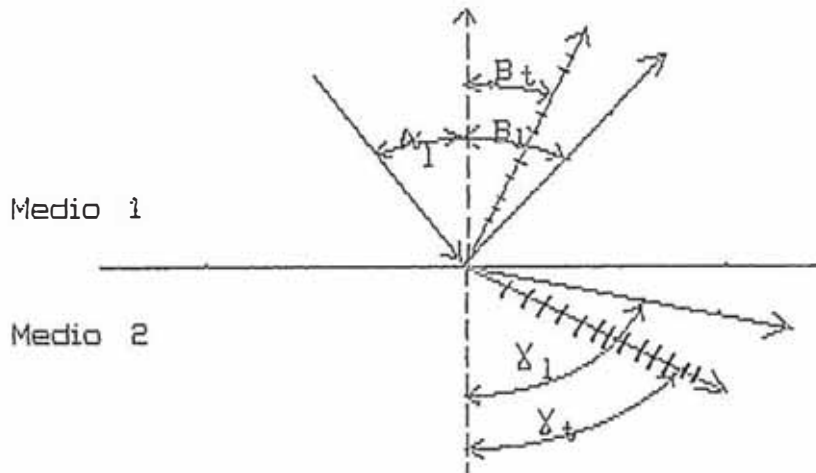
$$R' = \frac{29}{31} = 93.5\% \text{ (Caso Acero Agua)}$$

El espesor de una fisura no tiene prácticamente influencia.

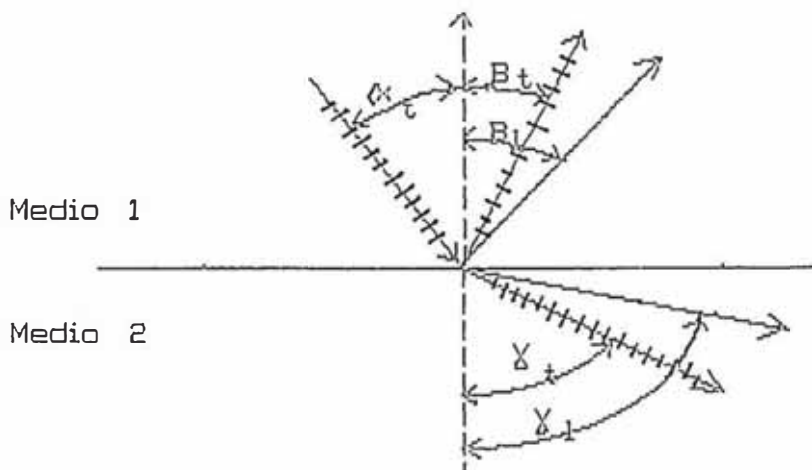
2.7. Reflexión y Refracción con incidencia oblicua.

Con una incidencia oblicua sobre una superficie límite entre dos materiales las

relaciones son mucho mas complejas que con la perpendicular. La figura 7, muestra en forma esquemática esta incidencia para el caso de que ambos medios sean sólidos.



2 Medios Sólidos.
Incidencia Longitudinal
Figura 7a.



Incidencia Transversal
2 Medios Sólidos
Figura 7b.

En la figura 7a, la onda incidente es longitudinal y en la 7b, transversal. También aquí, parte de la onda es reflejada, mientras que el resto atraviesa la superficie límite.

2.7.1. Desdoblamiento de la onda

Una novedad se presenta en la incidencia oblicua respecto a la normal, y es que tanto la onda reflejada como la traspasante se desdoblen en una longitudinal y otra transversal. Las nuevas ondas aparecen en la superficie límite, y resulta así que una sola onda incidente de origen abarca a cuatro ondas.

De estas cuatro ondas, las dos transversales que procede de una onda longitudinal, se hallan siempre polarizadas en el plano incidente. Es decir que la dirección en que vibran los elementos materiales se halla en el mismo plano que forma la dirección de propagación de la onda incidente con la normal a la superficie límite en un punto de intersección.

De acuerdo con la conservación de la energía, la suma de las intensidades de las

cuatro ondas que se forman debe ser igual a la intensidad de la onda incidente (haciendo abstracción de la absorción). El cálculo de la repartición de las intensidades de las cuatro ondas es tan complicado que no la desarrollaremos aquí. Las relaciones resultan algo más sencillas si en el proceso tiene lugar, parcial o totalmente, en líquidos o gases, pues en ese caso la propagación de ondas transversales no se lleva a cabo.

2.7.2. Leyes de la Reflexión y de la Refracción

En la incidencia oblicua de las dos zonas traspasantes se desvían de la dirección que trae la onda incidente, es decir, se refractan. El Valor de esa desviación, así como el ángulo que toman las otras dos ondas que se reflejan dependen del ángulo de incidencia (α_L en la figura 7a y α_t en la figura 7b), y de la velocidad del sonido de las ondas respectivas. Si designamos β_L y β_t los ángulos de las ondas reflejadas y τ_L y τ_t los de las ondas tranpasantes, resultan las relaciones que veremos a continuación. (Los subíndices L, t, significan longitudinal y transversal. Los

Ángulos se miden respecto a la normal y al plano de la superficie límite).

Reflexión Simple.- Sin transformación de onda:

$$\beta_L = \alpha_l \quad \beta_t = \alpha_t$$

Es la ley simple conocida en óptica como la de reflexión.

$$\beta_L = \alpha_L, \quad \beta_t = \alpha_t$$

Ángulo de reflexión = ángulo de incidencia. Refracción simple, sin transformación de onda.

Incidencia Longitudinal

$$\frac{\text{Sen } r_l}{\text{Sen } \alpha_l} = \frac{C_{l2}}{C_{l1}} \quad (\text{Fig.7a})$$

Incidencia Transversal

$$\frac{\text{Sen } r_l}{\text{Sen } \alpha_l} = \frac{C_l}{C_l} \quad \frac{\text{Sen } r_t}{\text{Sen } \alpha_t} = \frac{C_{t1}}{C_{t1}}$$

(Fig.7a)

(Fig.7b)

Aquí no hay reflexión.

Donde:

C_{l1} = Velocidad de la onda longitudinal en el medio 1.

C_{t1} = Velocidad de la onda transversal en el medio 1.

C_{l2} = Velocidad de la onda longitudinal en el medio 2.

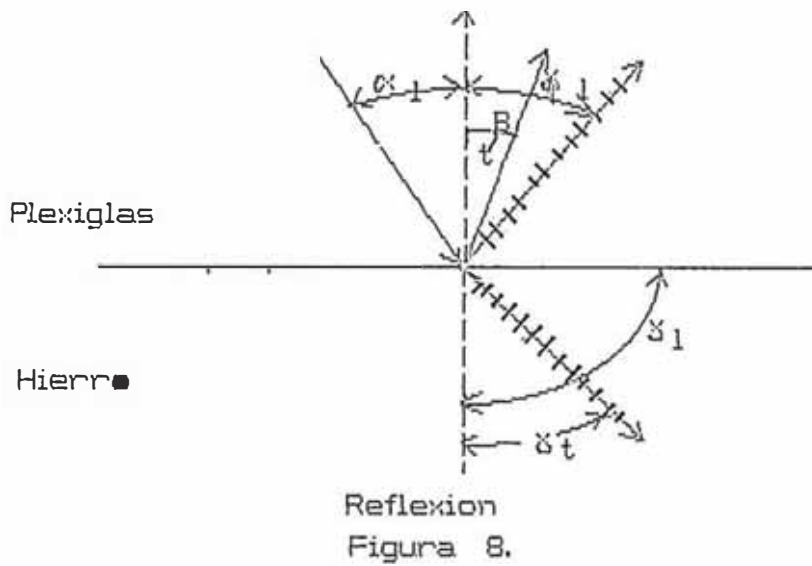
v_2 = Velocidad de la onda transversal en el medio 2.

Corresponde también a la ley de la óptica dada como ley de la refracción de Snellius: Las relaciones entre los senos de los ángulos de refracción e incidencia son iguales a las relaciones entre las velocidades de propagación de las ondas correspondientes.

2.7.2.1. Reflexión total

Al trabajar con el procedimiento impulso-eco, utilizando ondas oblicuas, los ensayos se vuelven muy dificultosos, a causa de la presencia de los dos tipos de ondas, que parten del cabezal con velocidades distintas y ángulos diferentes. En efecto no es fácil reconocer si el eco en la pantalla proviene de una onda longitudinal o de una transversal. Se utiliza para ello cierto recurso sencillo, que evita la propagación de una de las ondas. Basándose en la ley de la refracción, es fácil calcular el ángulo de incidencia necesario de una onda longitudinal, que proviniendo del

plexiglas pasa al hierro, de modo que el ángulo de refracción de la onda longitudinal en el hierro no puede penetrar ya en él sino que siga la orientación de la superficie límite, o sea cuando $r_L = 90$ (Figura 8).



$$\frac{\text{Sen } \alpha_1}{\text{Sen } r_1} = \frac{C_{l_p}}{C_{l_i}}$$

$$\text{Sen } r_1 = 1$$

$$\text{Sen } \alpha_1 = \frac{C_l}{C_l} = \frac{2740}{5900} = 0.464$$

$$\alpha_L = 27.60$$

El ángulo de refracción de la onda transversal toma en este caso el valor:

$$\begin{aligned} \text{Sen } r_t &= \frac{C_t}{C_l} \quad \text{Sen } \alpha_l = \frac{C_t}{C_l} = \frac{3230}{5900} = \\ &= 0.548 \\ r_t &= 33.20 \end{aligned}$$

El ángulo r_t queda expresado solamente por las dos velocidades del sonido en el hierro, habiéndose desaparecido de la fórmula la velocidad en el plexiglas. Esto significa que el valor de r_t es independiente del material del cual proviene la onda que incide oblicuamente sobre el hierro, debiendo preocuparse únicamente de que la onda longitudinal refractada en el mismo, corra a lo largo de la superficie límite. Hagamos que el ángulo de incidencia α_l en el plexiglas, sea mayor a 90° en esas condiciones no habrá ya nada longitudinal refractada, sino únicamente reflejada. La onda longitudinal sufrirá entonces una "reflexión total" y en el hierro quedará solamente la onda transversal. En caso

inverso, es decir, el de una onda longitudinal en el hierro y ninguna transversal, no es posible. De allí que el operar con ondas oblicuas, se lo haga por lo común con sólo ondas transversales, las que forma con la normal el "ángulo de conexión", esto es el ángulo con el cual la onda transversal avanza en el hierro, y que en los equipos industriales es de 35 grados, o algo más. Únicamente así se tiene la garantía de trabajar con una sola onda.

2.7.2.2. Refracción con medio de acoplamiento

En todo el análisis que hicimos hasta ahora sobre la ley de la refracción hemos expuesto, que el trámite de la onda sónica ha sido directo de un sólido a otro y en los últimos ejemplos de plexiglas al hierro. Pero en la práctica se coloca un medio de acoplamiento entre la pieza y el cabezal, por tanto debe aclararse como cambian las relaciones con la inclusión de este otro material. En la figura 9a está representada esquemáticamente la marcha de

una onda sónica a través de una capa interpuesta (medio 2).

Con medio de acoplamiento

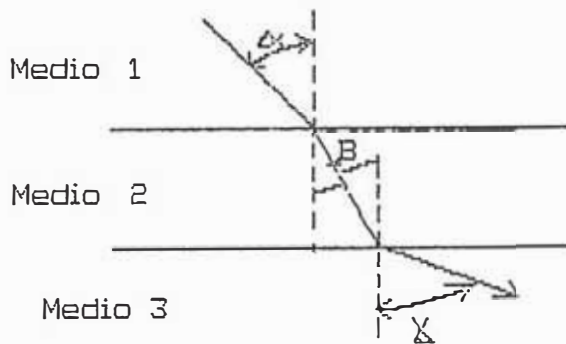


Figura 9a.

(No están representadas todas las ondas reflejadas ni se hace distinción sobre los tipos de diferentes ondas). Para ambas superficies límites sirve la ley de refracción:

$$\frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Sen } \beta} = \frac{C_1}{C_2} \quad ; \quad \frac{\text{Sen } \beta}{\text{Sen } \gamma} = \frac{C_2}{C_3}$$

$$\text{Sen } \beta = \frac{C_2}{C_1} \text{ Sen } \alpha \quad ; \quad \text{Sen } \beta = \frac{C_2}{C_3} \text{ Sen } \gamma$$

Ambas fórmulas pueden reducirse a una sola en la cual desaparezca la dirección de la onda en la capa intermedia (ángulo β) y la velocidad del sonido de las ondas de dicha capa (media 2):

$$\frac{C2}{C1} \text{ Sen } \alpha = \frac{C2}{C3} \text{ Sen } \tau$$

$$\frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Sen } \tau} = \frac{C1}{C3}$$

Como puede verse, se obtiene simplemente la ley de la refracción para el paso directo del primer medio al tercero.

Con abstracción de un pequenísimos desplazamiento paralelo de la onda, desaparece todo efecto de capa intermedia. (figura 9b)

Sin medio de acoplamiento

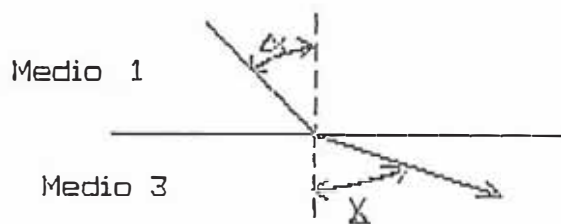


Figura 9b.

2.8. Consecuencias importantes de la reflexión y refracción en los ensayos ultrasónicos.-

2.8.1. Conexión perpendicular.-

Cuando la conexión es perpendicular (ángulo de conexión 0 grados) el cabezal se denomina cabezal normal (la dirección de propagación del haz del sonido es normal a la superficie).

Se obtienen ondas longitudinales, y solo con ellas se trabaja en la conexión perpendicular. Es decir, que en la incidencia normal de una onda sónica sobre una superficie, no se produce otro tipo de onda.

Los cabezales normales que producen ondas transversales sólo se utiliza en casos determinados, por su acoplamiento es muy penoso; además esas ondas transversales no pueden propagarse en medios líquidos.

2.8.2. Conexión oblicua.-

Los "cabezales angulares" producen también ondas longitudinales; sin embargo en la pieza de ensayo se propagan únicamente ondas transversales. La zona angular abarca entre los 35 y 80 grados pues con ángulos menores aparecen también ondas longitudinales, y con ángulos mayores se originan ondas de superficie. El ángulo de refracción es el que

actúa, "ángulo de conexión" y no el ángulo de incidencia.

En la práctica el "ángulo de conexión" es el que lleva la onda transversal dentro de la pieza de ensayo, es decir el ángulo es el que tiene significado para quien opera con ensayos ultrasónicos. Las ondas reflejadas en el plexiglas interesan sólo al fabricante de los cabezales, pues éste debe procurar que dentro de lo posible, ningún eco molesto aparezca en la pantalla.

CAPITULO III

GENERADORES Y RECEPTORES DE ULTRASONIDO

Las ondas sonoras se generan o captan mediante un elemento denominado transductor, éste convierte una forma de energía en otra. Por tanto los transductores acústicos se utilizan para transformar la energía acústica en otras formas de energía, tales como eléctrica, mecánica y térmica, o la inversa, estos en aquella.

Un transductor reversible es aquel que puede realizar la conversión de energía en ambas direcciones. Son dos de uso más frecuente:

1) *Osciladores cristalinos:*

Estos utilizan el efecto piezoelectrico, que es reversible, el intervalo de frecuencia utilizado es muy amplio, siendo el límite superior de 10,000 megaciclos por segundo.

2) *Osciladores magnetoestrictivos:*

Estos aparatos hacen utilización del fenómeno de la magneto estricción, que es también reversible. Para la mayoría de las aplicaciones, el límite de frecuencia superior es del orden de 100,000 kc/s, pero utilizando transductores de película delgada se ha logrado generar frecuencias de decenas de miles de megaciclos por segundo.

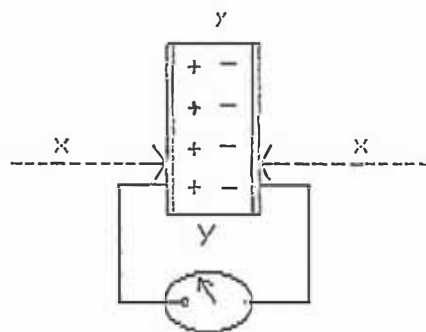
3.1. Efecto pieza eléctrico.-

Se produce en los cristales que tiene uno o más ejes polares o carecen de centro de simetría. Cortese una lámina rectangular o disco de tal cristal con sus superficies paralelas o normales a un eje polar.

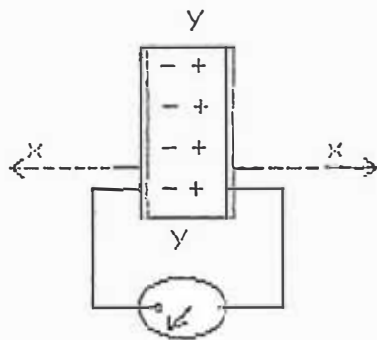
Sometiendo ésta lámina a un esfuerzo mecánico, aparecen sobre las superficies paralelas cargas eléctricas iguales u opuestas. Siempre que el cristal no se alargue más allá de su límite elástico, la magnitud de la densidad de carga es directamente proporcional al esfuerzo aplicado.

El cristal piezo-eléctrico es generalmente Cuarzo, o la Turmalina natural, etc. Tanto en el cuarzo como en las otras sustancias se genera el efecto piezo-eléctrico, así una pequeña placa cortada de un cristal de cuarzo natural siguiendo orientaciones determinadas presenta la particularidad de que si sobre dos caras opuestas de la placa se ejerce una sollicitación de compresión o de tracción, estos se cargan eléctricamente, estableciéndose una tensión eléctrica entre ambas.

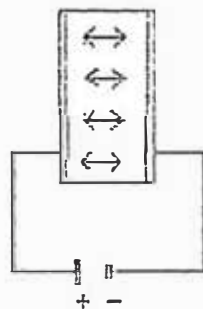
Si se recubre ambas caras de la placa de cuarzo con láminas metálicas, es posible medir la tensión eléctrica aludida, de este modo, al ejercer un esfuerzo de compresión sobre las placas en la dirección X-X, se generará una corriente eléctrica positiva.



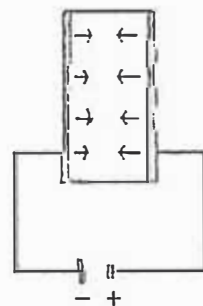
Inversamente, un esfuerzo de tracción sobre las placas del cristal dará lugar a una corriente eléctrica negativa entre los mismos.



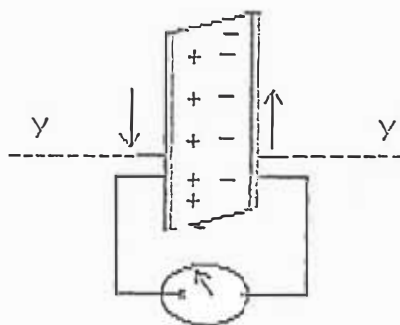
De igual manera, si se aplica una corriente eléctrica positiva a las placas del cristal se produce en éste un estiramiento.



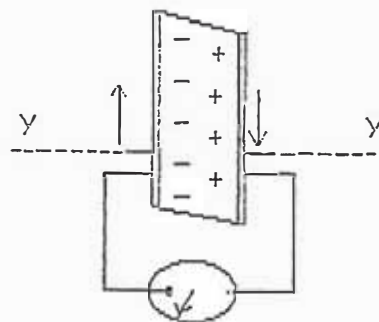
Una corriente eléctrica negativa se traduce en una contracción del cristal.



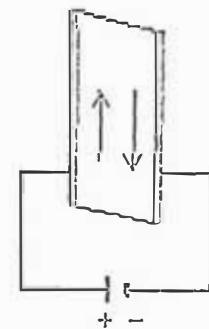
Todo lo anterior se verifica cuando el cristal corresponde a una sección perpendicular al eje X. Si se tratara de una sección perpendicular al eje Y se obtendrían:



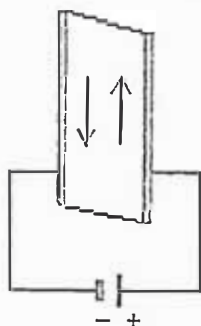
*Compresion
genera corriente
electrica (+)*



*Traccion
genera corriente
electrica (-)*

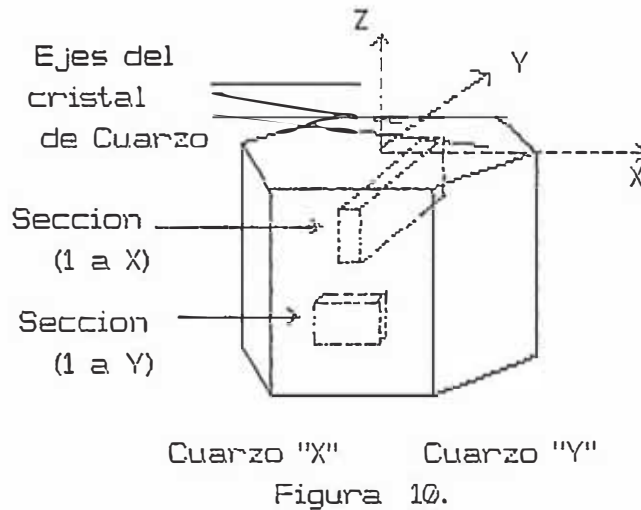


*Corriente
electrica (+)
estiramiento*



*Corriente electrica negativa
contraccion del cristal*

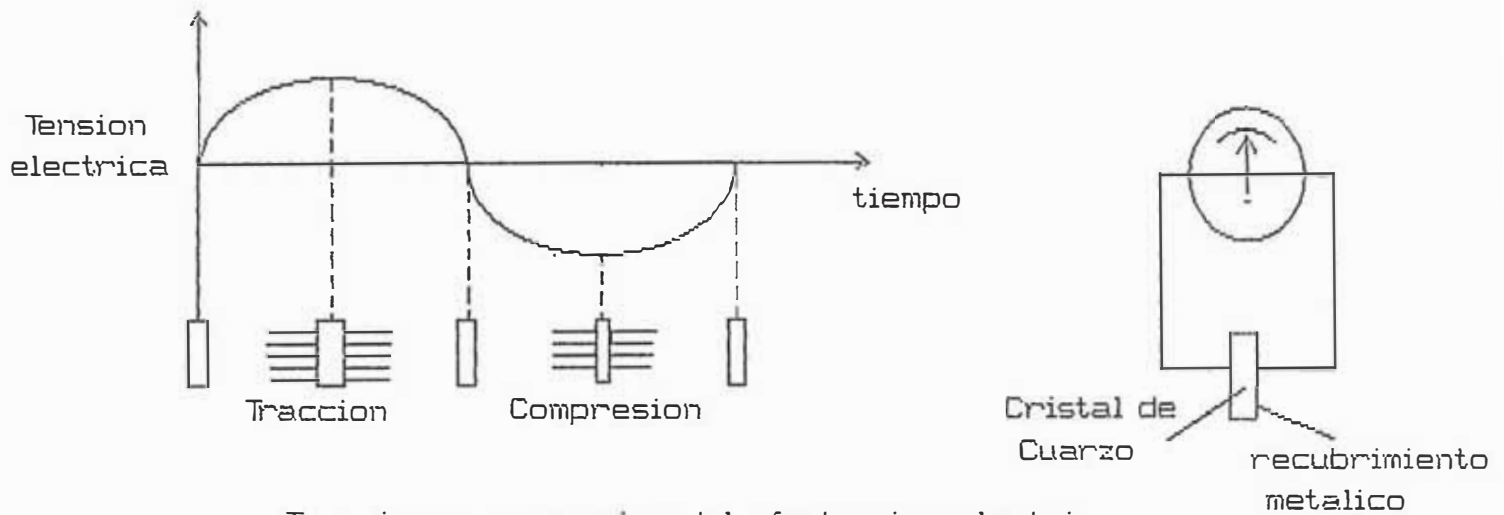
El efecto piezo-eléctrico que se logra con el pequeño cristal de Cuarzo se consigue tan sólo cuando éste ha sido extraído de un cristal natural de modo tal (figura 10



Una sección de cuarzo X, cuando las caras son perpendiculares al eje X.

Una sección de cuarzo Y, en que las caras opuestas del cristal son perpendiculares al eje Y.

Cuando se desea obtener impulsos ultrasónicos con el procedimiento general de pulso-eco, se excita la placa eléctricamente durante un tiempo muy corto, para evitar que la vibración se prolongue excesivamente, las placas se amortiguan mediante la interposición de sustancias fuertemente amortiguables (figura 11).



Traccion y compresion del efecto piezoelectrico
Figura 11.

3.2. Efecto magnetoestrictivo.

La magnetoestricti3n se produce en los materiales ferromagn3ticos y ciertos materiales no met3licos denominados ferritas. El efecto magnetoestrictivo se produce cuando una varilla o barra de material ferro o ferromagn3tico se somete a un campo magn3tico experimentando una variaci3n de longitud. Reciprocamente, esfuerzo mec3nico aplicado a una varilla o barra produce una variaci3n en la intensidad de imanaci3n.

El efecto magnetoestrictivo, es muy acusado en materiales como el niquel, hierro y cobalto. El que haya aumento o una disminuci3n de longitud depende por completo de la naturaleza del material y de la intensidad del campo magn3tico

aplicado. La variación de longitud es independiente de la dirección del campo.

En general, el efecto se hace menor con el aumento de la temperatura y desaparece a la temperatura de Curie.

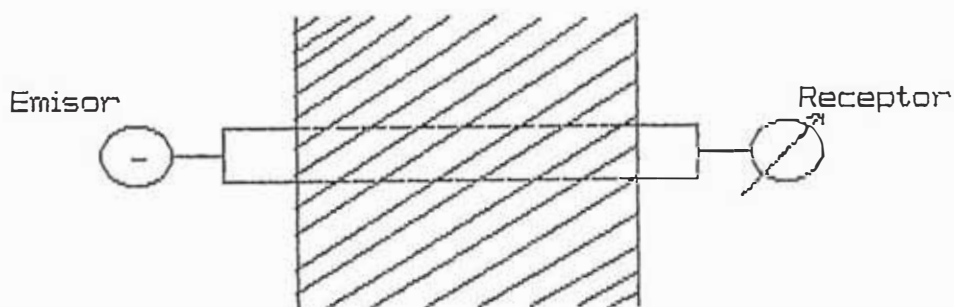
Al ser este efecto también recíproco de suerte como en el que de la piezoelectricidad, puede servir tanto para la emisión como para la recepción de ondas ultrasónicas.

CAPITULO IV

TECNICAS DE ENSAYO Y LIMITACIONES DE LAS DISTINTAS TECNICAS.

4.1. Método de transmisión

Despues de haber logrado introducir una onda longitudinal en un objeto a verificar, por medio de una tensión alterna del palpador y a través del medio necesario de acoplamiento, es imprescindible medir la presión sonora en cualquier punto para poder sacar nuestras conclusiones en cuanto al estado de la pieza. La medición de la presión del sonido puede efectuarse por ejemplo en el lado posterior de la pieza a verificar (figura 12).

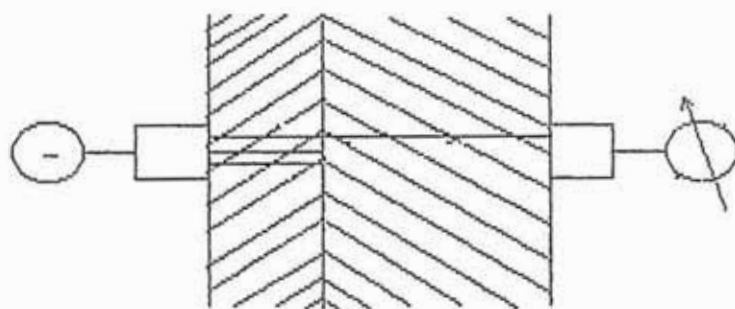


*Método de Transmisión
Figura 12.*

Como receptor de la presión del sonido sirve un palpador de idéntica construcción que el cabezal emisor. Si se acopla el palpador emisor con un poco de aceite a la pared posterior del objeto a verificar, la placa piezoeléctrica recibe las variaciones de la presión sonora y se genera en sus electrodos la correspondiente tensión eléctrica alterna. Esta tensión alterna proporciona la presión del sonido se mide en un instrumento eléctrico. En el palpador receptor se produce así el llamado piezo-efecto, mientras que los procesos producidos en el palpador emisor se consideran como piezo-efectos a la inversa.

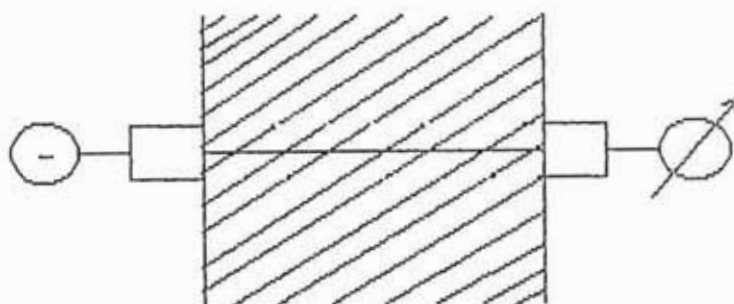
4.1.1. Factor de reflexión y de transmisión

La disposición de la figura 12 descrita representa una sencilla instalación de control por medio de la cual puede controlarse el material situado entre el palpador emisor y el palpador receptor para detectar deficiencias. Supongamos, de momento, que el campo situado entre los dos palpadores fuese material homogéneo (figura 13).



Reflexion de las Ondas
Figura 14.

En este caso, el instrumento de medición de la recepción señalaría una transmisión del 100%, es decir, que no existen deficiencias en el material. Si suponemos una superficie límite entre los dos palpadores, encontrándose a la izquierda de la superficie límite el material 1 y a la derecha de la misma al material 2, entonces es fácil imaginarse que solamente una parte de la presión del sonido llega al palpador receptor, mientras que el resto es reflejada en la superficie límite (figura 14).



Material Homogeneo
Figura 13.

En este caso el instrumento de medición de la recepción señala una transmisión inferior al 100%, es decir, que debe haber deficiencias.

La cuestión de qué cantidad de sonido pasa y que cantidad es reflejada, depende de los dos materias 1 y 2 y precisamente de sus impedancias acústicas. La impedancia acústica de los materiales queda definida como producto de la velocidad de propagación del sonido y la densidad de la correspondiente materia.

$$Z = p \cdot C$$

Z = impedancia acústica

p = densidad

C = velocidad de propagación del
sonido

Si la materia 1 de nuestro ejemplo tiene una impedancia acústica Z_1 y la materia 2 una de Z_2 , entonces resulta un factor de reflexión R y un factor de transmisión D en consonancia con las siguientes expresiones:

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

El procedimiento de control anteriormente descrito, que se suele llamar sistema de intensidad o de transmisión, es utilizado para la verificación automática de objetos idénticos que surgen en grandes series. En cambio casi siempre, es inapropiado para las comprobaciones manuales lo que tiene varias causas. Por una parte resulta molesto el manejo de dos palpadores distintos.

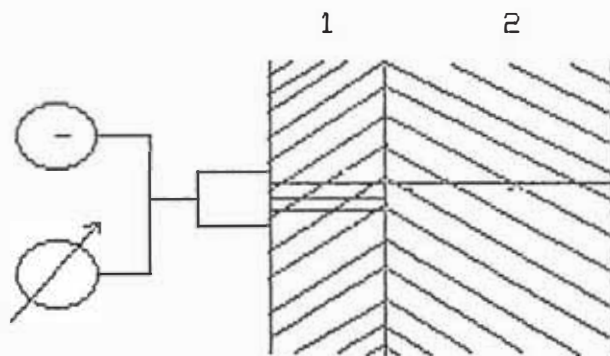
Por otra parte, no se obtiene ninguna respuesta en cuanto a la profundidad de una deficiencia en un determinado objeto a verificar.

4.2. Método de impulso y sus ecos

Las desventajas anteriormente mencionadas no existen en el procedimiento de impulsos y sus ecos, por lo que todos los aparatos a manejar manualmente trabajan por este sistema.

Las razones para su adaptación a sido las siguientes:

Como los palpadores emisores no se distinguen en nada de los receptores se emplean un sólo cabezal para emitir y recibir. Por este motivo pueden desistirse del segundo receptor palpador en el lado posterior de la pieza sometida a verificación. Ahora bien, por la misma causa nos vemos obligados a medir aquella parte de la presión ultrasónica que ha sido reflejada, en lugar de hacerlo con la parte de los ultrasonidos que ha pasado (figura 15).

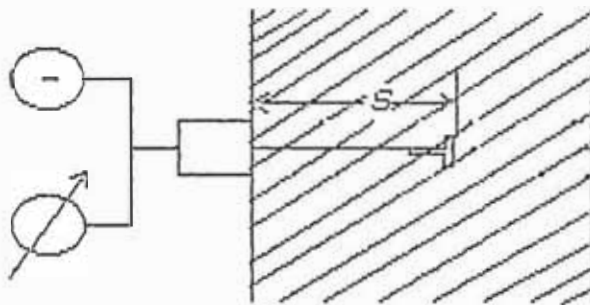


Impulsor - Eco
Figura 15.

Para conseguir una medición correcta es imprescindible que el palpador no emita durante la misma. Por esto precisamente ha surgido la necesidad de desistir de la emisión de un haz continuo y de emplear en su lugar impulsos ultrasónicos. El palpador trabaja por tanto,

primeramente como emisor, transmitiendo un impulso sonoro, al regresar aquella parte del impulso reflejado en una superficie límite, el palpador trabaja como receptor y hace seguir al instrumento de medición la tensión de impulso recibida y reflejada. A continuación, el palpador emite el próximo impulso ultrasónico.

Localización. El empleo de impulsos ultrasónicos tiene todavía otra ventaja; se puede medir el tiempo de recorrido t de los impulsos hasta un reflector y su vuelta de allí, y determinar, a raíz de este tiempo de recorrido, la distancia del reflector (figura 16).



Distancia Falla-Superficie
Figura 16.

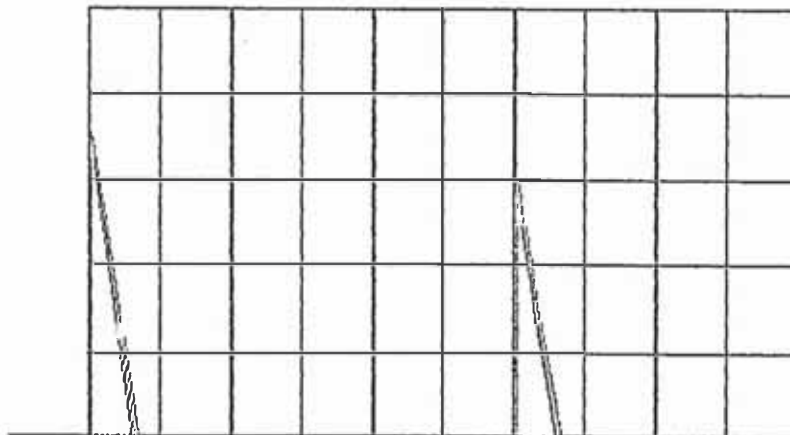
Normalmente existe solamente una sola clase de material entre el palpador y el reflector y los impulsos recorren dicho material a base de una velocidad constante. La distancia S a que se

encuentra el reflector del palpador puede calcularse de acuerdo a la siguiente fórmula

$$S = \frac{1}{2} C \cdot t$$

Para poder aplicar este método nos hace falta aún un aparato de medición que haga las veces de voltímetro y cronómetro.

El oscilógrafo es tal instrumento de medición. Si hacemos que el punto luminoso se desplace a velocidad constante por la pantalla, desde el lado izquierdo hasta el derecho deflexionándolo con el impulso de emisión y con el impulso de reflexión en sentido vertical; entonces al haber elegido correctamente la velocidad de desplazamiento del punto luminoso, obtenemos en la pantalla del oscilógrafo una línea base de tiempo y dos picos (figura 17).



Eco de Reflexion
Figura 17.

El primer pico corresponde al punto de emisión y el segundo al primer impulso que ha quedado reflejado. En los impulsos reflejados, se habla generalmente de ecos. Si el eco procede a la pared posterior del objeto sometido a verificación, se habla del eco de fondo. Si el eco en cambio, procede de cualquier punto situado entre la superficie y la pared posterior de la pieza, se habla del eco intermedio.

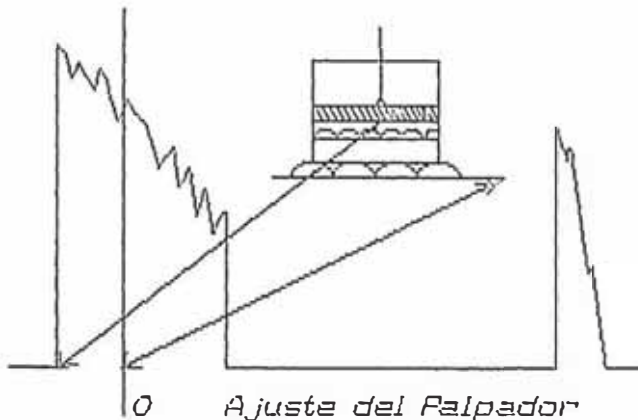
En el caso, se trata de un eco de fondo y la distancia entre el impulso de emisión y el eco de fondo corresponde al espesor de la pieza verificada. Podemos dividir por tanto, la escala de la pantalla en sentido longitudinal para efectuar la lectura del grosor del objeto cuyo espesor desconocemos, y para determinar la profundidad de los puntos de reflexión.

4.2.1. Ajustes

En todas estas consideraciones no hemos tenido en cuenta el hecho de que la situación del impulso de emisión no ha de coincidir forzosamente con la superficie de

nuestra pieza, ya que el mismo queda reproducido en la pantalla en el momento de salir del palpador o, dicho aún con más exactitud al ser emitido por la plaquita piezo-eléctrica.

Entre el cristal del palpador de la superficie de la pieza a verificarse encuentra, por cierto, un trayecto previo formado por el agente de acoplamiento y la placa protectora del cabezal, (figura 18).



Ajuste del Palpador

Figura 18.

El impulso ultrasónico ha de recorrer previamente este trayecto hasta llegar a la superficie del objeto a controlar.

Para un ajuste exacto de la escala de la pantalla es imprescindible considerar trayecto previo. Como este trayecto, en la mayoría de los casos es una magnitud desconocida, el ajuste exacto de la escala ha de llevarse a cabo de una forma indirecta. Para este fin, se elige una velocidad de desplazamiento, más lenta del punto luminoso para obtener por lo menos dos ecos en la pantalla. Es fácil de comprender que de una sola pared posterior puede recibir varios ecos de fondo, si se tiene en cuenta que no toda la presión del sonido reflejada por primera es absorbida totalmente por el palpador. La mayor parte de la presión del sonido es reflejada varias veces entre la superficie y la pared posterior del objeto sometido a verificación, y cada vez, al alcanzar el sonido restante la superficie de la pieza, el palpador absorbe una pequeña parte de su presión. Si se gradúa a continuación la distancia entre el primer y segundo ecos de fondo en consonancia con el grosor de la pieza y se procura además, que el segundo eco de fondo este situado a una distancia de punto cero de la escala equivalente al doble de la distancia del punto cero donde se produce el primer eco de fondo,

entonces, el punto cero corresponde a la superficie de la pieza sometida a verificación, y el trayecto previo se forma automáticamente entre el impulso de emisión y el punto cero de la escala (figura 19).

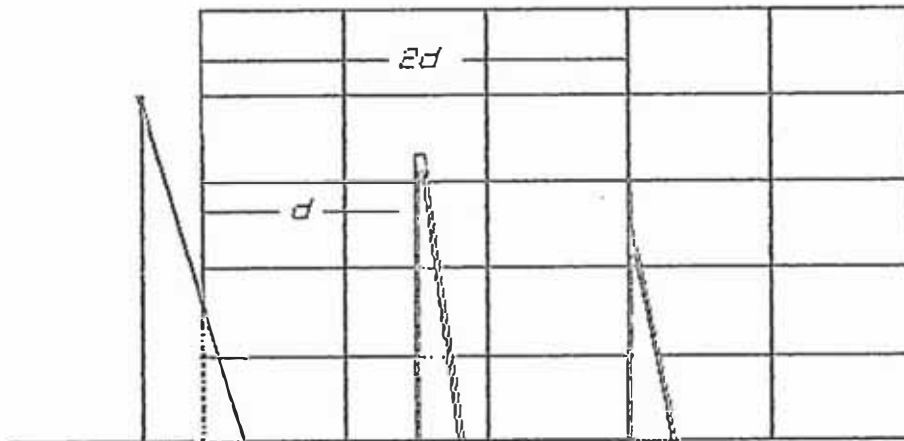
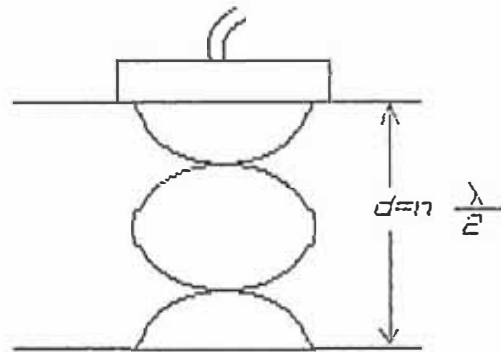


Figura 19.

4.3. Método de resonancia.

Este método hace uso del fenómeno de resonancia u ondas estacionarias que son producidas cuando un rayo continuo de energía ultrasónica es introducida en una muestra de espesor correcto (figura 20).



*Metodo de Resonancia
Figura 20.*

Cuando el espesor "d" de un material entre dos superficies límite paralelas, por ejemplo una plancha es exactamente igual a la mitad de la longitud de onda de la energía ultrasónica incidente, la muestra vibrará con su frecuencia natural. Estas vibraciones reaccionan en el transmisor y pueden ser registradas. Esta se aplica también si el espesor "d" es un múltiplo de la mitad de una longitud de onda en cuyo caso armónicas más altas, son puestas. Consiguientemente la variación continua de la longitud de onda del rayo ultrasónico incidente desde longitudes de onda grande progresivamente aún más cortas revelará puntos de resonancia y desde estos el espesor de muestra puede ser determinado. Si la plancha tiene laminaciones en un punto dado o si hace un aglutinante defectuoso en planchas estafadas el único espesor que es medido será el de la superficie de la plancha a la discontinuidad.

El método es usado principalmente para mediciones de espesores de pared unilateral en donde el acceso es posible desde un lado solamente.

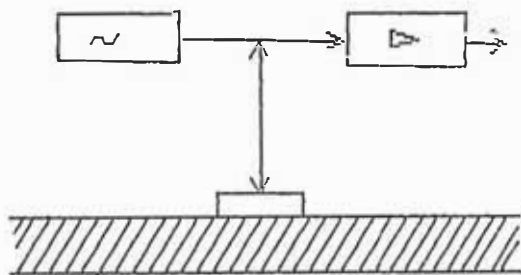
4.4. Metodo transmisión - recepción (SE)

Con el palpador normal y el procedimiento impulso-eco, se encuentran límites tanto en la medición de espesores de pared como en la detección de defectos, por lo que tenemos que utilizar otro método para la medición de espesores reducidos y para la detección de deficiencias situadas cerca de la superficie.

La causa principal para el fracaso del método de ecos sucesivos en la medición de espesores pequeños se halla en la anchura del impulso de emisión que tapa una gran parte del comienzo de la escala haciendo así difícil o imposible reconocer los ecos en este campo. Este campo muerto de la pantalla, originado por el impulso de emisión no es, desgraciadamente el único inconveniente para las mediciones con palpadores normales, puede agrandar dicha zona muerta.

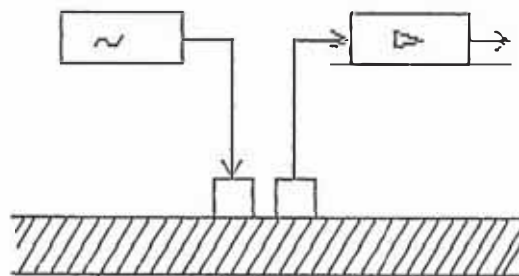
Como el palpador normal tiene solamente un cristal que sirve simultáneamente de emisor y receptor, hace falta que exista una conexión eléctrica entre el emisor y el cristal del palpador entre el receptor y dicho cristal.

Esto significa al mismo tiempo que también el emisor y el amplificador están conectados entre sí (figura 21). La elevada tensión de emisión, que es de aproximadamente 2,000 v. se halla en el momento de la emisión y también en el amplificador, cuya entrada en realidad, está diseñada para tensiones de la magnitud de m.v. ya que las tensiones originadas por los ecos son de esta magnitud. Las elevadas tensiones del emisor resultan demasiado grandes para el amplificador y lo tapan durante algún tiempo. Durante este tiempo las pequeñas tensiones originadas por los ecos no pueden amplificarse, es decir, no aparecen en absoluto en la pantalla.



*Transmisión - Recepción
Figura 21.*

Los dos defectos anteriormente mencionados no deben surgir en el nuevo método. El método SE cumple esta condición a causa de la siguiente modificación frente al método de ecos sucesivos. Ya no se utiliza un solo cristal como emisor y receptor y se separan estas funciones. Un cristal sirve exclusivamente como emisor y otro segundo cristal exclusivamente como receptor. Si cada cristal fuese instalado en un palpador por separado, no haría falta más que conectar galvánicamente el emisor con el palpador receptor, (figura 22). Ya no hace falta la conexión entre el emisor y el amplificador.



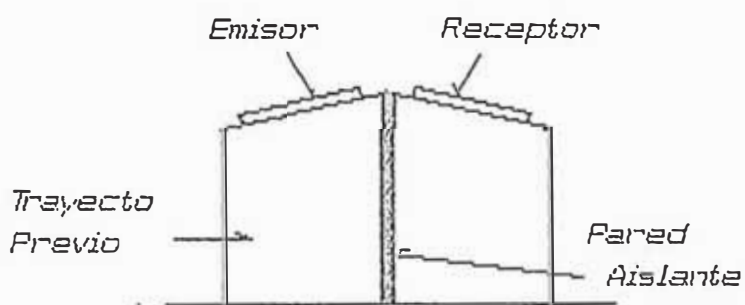
*Palpador con dos Cristales Separados
Figura 22.*

Por esto precisamente ya no queda "tapado" el amplificador, pues la tensión de emisión no puede llegar al amplificador. Las oscilaciones de

impulso de emisión siguen, por cierto, todavía, pero ya no molestan por que únicamente a través de una reflexión en la pieza sometida a control pueden llegar al cristal receptor y a través de éste a la pantalla.

4.4.1. Palpador SE

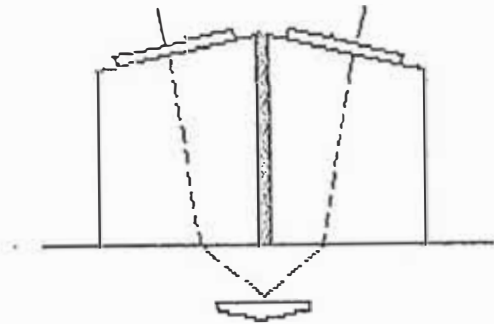
La verificación con dos palpadores distintos es, como fácilmente se comprende, poco cómoda. Por este motivo se reúnen ambos cristales en un solo palpador, lo que es perfectamente factible si se procura una impecable separación acústica de ambos sistemas. La construcción así llamado palpador SE parece en la figura 23.



Palpador SE
Figura 23.

Se observará que los dos cristales están inclinados y que el palpador, en ambos

lados de la pared de separación acústica tiene unos trayectos previos relativamente largos. Esto se debe a las siguientes causas: a raíz de la inclinación de los cristales se consigue un enfoque gracias al cual es posible obtener la máxima sensibilidad del palpador inmediatamente debajo de la superficie del objeto a controlar (figura 24).



*Maxima Resolución en el Campo
Cercano
Figura 24.*

El trayecto previo hace que el haz penetre con su parte divergente en la pieza, incrementándose así al máximo el poder resolutivo en el campo cercano (figura 25). El trayecto previo permite además, al estar fabricado de una forma estanca al agua, una rectificación de la superficie del palpador para adaptarle a los objetos no planos o el

desgaste del palpador hasta casi llegar a los cristales. El trayecto previo nos trae todavía otra ventaja; podemos reproducir todavía, a través de un acoplamiento capacitivo o inductivo, el impulso de emisión en la pantalla, sin que nos moleste. El trayecto previo corresponde, como sabemos a un determinado recorrido del punto luminoso entre el impulso de emisión y el punto de nuestra escala es equivalente a la superficie del objeto sometido a control. Si dicho trayecto es lo suficientemente grande entonces aquella parte de la escala correspondiente al campo situado inmediatamente debajo de la pieza sometida a verificación, queda completamente libre y todos los ecos procedentes de dicho campo son perfectamente visibles.

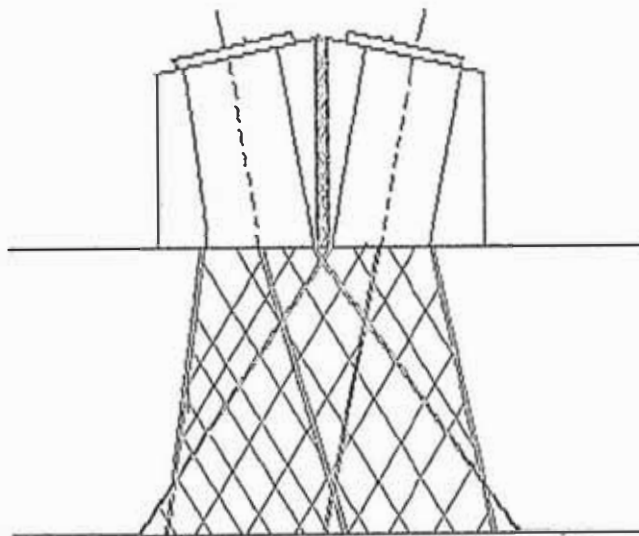


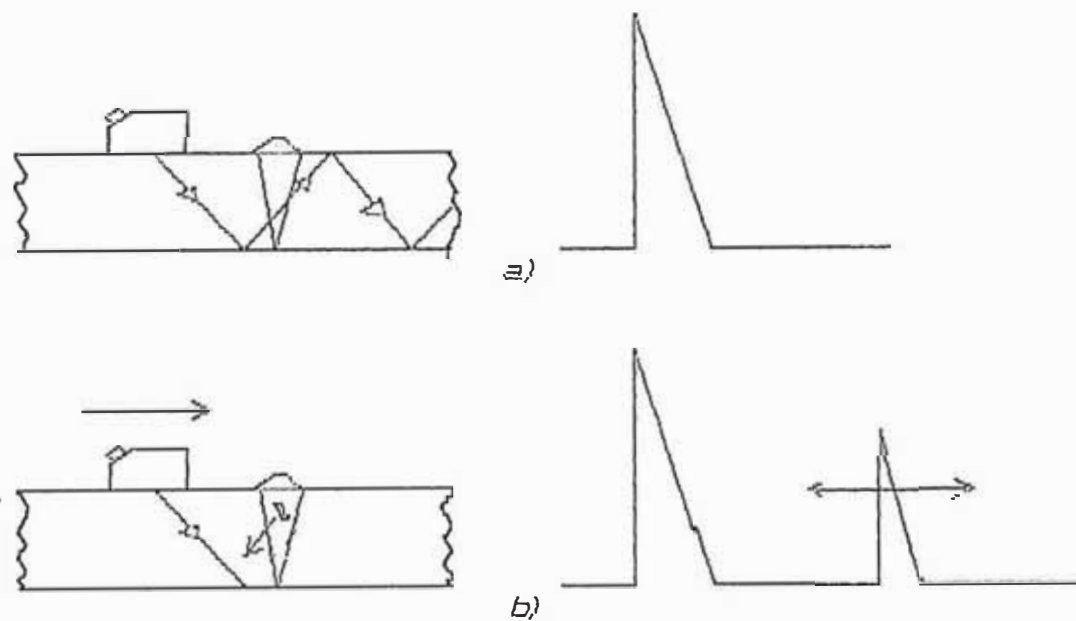
Figura 25.

CAPITULO V

INTERACCION DE LAS ONDAS CON LA SOLDADURA

La inspección de soldadura por fusión, mediante el ensayo ultrasónico, se realiza aplicando técnicas de reflexión pulso-eco, con ondas transversales utilizando palpadores angulares.

En la figura 26, se ha esquematizado la disposición típica que corresponde al ensayo de soldaduras.



*Ensayo de soldadura por reflexión Pulso-Eco
Figura 26.*

El haz de ultrasonidos en forma de pulsos de corta duración, ingresa a la chapa soldada con un cierto ángulo, sufre una primera reflexión en la cara opuesta de la chapa atravesando luego la sección de la soldadura y sufriendo sucesivas reflexiones, continua su propagación en la chapa como puede verse en la figura 26.a, en la cual se ha representado a la derecha la imagen que correspondería observar en la pantalla del equipo.

Si en la sección de la soldadura existe un defecto, parte o la totalidad de la energía ultrasónica, según la amplitud del defecto, es reflejado y vuelve al palpador que actuando como receptor recoge la señal y lo transmite al equipo.

El esquema de la marcha del haz ultrasónico en este caso se puede ver en la figura 26.b, en la cual a la derecha se ha indicado la imagen que correspondería observar en la pantalla del equipo.

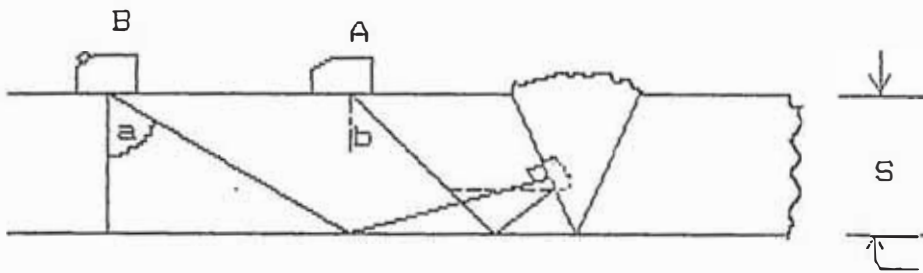
Para cubrir toda la sección transversal de la soldadura, el palpador debe ser acercado y alejado del eje de la misma, lo suficiente como para lograr que el haz bórre la soldadura desde la raíz hasta la sobremonta. La distancia del eco de defecto, al eco de transmisión en la pantalla del equipo es proporcional a la profundidad que se encuentra el defecto en el cordón.

5.1. Angulo de ensayo

La selección del ángulo de ensayo, dado aproximadamente por el ángulo nominal del palpador, esta condicionada por el compromiso entre dos condiciones primordiales: 1) Que la exploración del total de la sección de soldadura debe hacerse con el menor recorrido del haz. 2) Que el haz debe encontrar al plano del defecto con un ángulo lo más próximo a lo normal.

En la figura 27, se indican los trayectos correspondientes a los palpadores con diferente ángulo nominal. Se puede observar que para el caso expuesto a pesar de que el trayecto que recorre el haz proveniente del palpador A, de menor ángulo nominal, es menor que el correspondiente al del palpador B, éste último de mayor ángulo presenta condiciones más favorables para la detección del defecto indicado.

En efecto, en este caso el haz, debido a la preparación de la junta, incide casi normalmente al defecto de la falta de fusión que se debe localizar, mientras que el haz proveniente de la sonda "A" saldría reflejado del defecto con una dirección que no le permite retornar al palpador.



*Angulo Favorable para la deteccion de
un defecto de falta de Fusion
Figura 27.*

En la tabla que sigue se dan valores aconsejados para la inspección de soldaduras por fusión en chapas de diferentes espesores conjuntas a tope. En la misma tabla se indican los valores de Tga y del camino proyectado STga. del haz ultrasónico.

Espesor (mm.)	Angulo gr.	STga (mm.)
< 5	80	< 28
< 5, 15 >	70	14 - 40
15 - 30	60	26 - 52
30 - 60	45	30 - 60
> 60	35	> 42

5.2. Dimensiones del palpador

La selección de las dimensiones nominales del palpador, y por lo tanto del cristal, debe hacerse teniendo en cuenta que:

- Palpadores de mayor diámetro permiten una mayor velocidad de inspección y dan un haz de menor divergencia pero que permite menor exactitud en la determinación de la posición y tamaño del defecto.
- Palpadores de menor diámetro permiten mejor adaptación a las superficies curvas y una mejor determinación de la posición y tipo de defecto, pero el haz tiene mayor divergencia y la energía disponible es menor.

5.3. Procedimiento de exploración

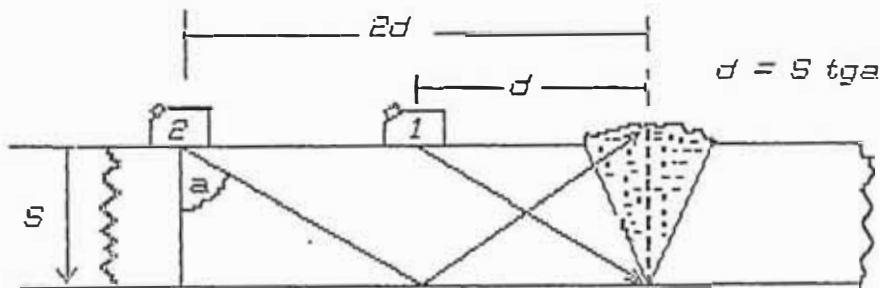
Seleccionando el palpador que mejor se adapta al caso particular del ensayo, es necesario establecer qué desplazamientos se deben aplicar al palpador para asegurar la exploración de toda la sección de soldadura.

5.3.1. Desplazamiento transversal del palpador

El primer movimiento fundamental que se imprime al palpador es el sentido perpendicular al eje del cordón de soldadura. De esta manera se debe lograr que el haz explore toda la sección de la soldadura con una flexión simple.

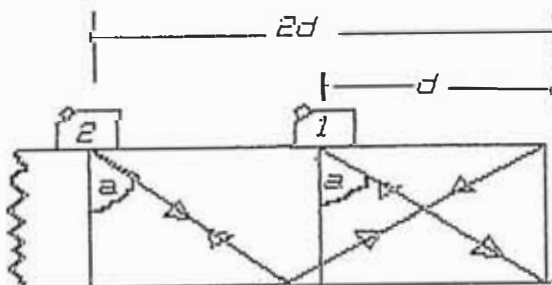
El palpador es desplazado en una faja cuya posición y ancho queda determinadas por el espesor de la chapa y el ángulo del palpador. Por distancias d y $2d$ indicadas en la figura 28a, pueden ser determinadas analíticamente conociendo el espesor "S" y la tangente del haz con la relación:

$$d = S \operatorname{Tg} a$$



*Desplazamiento Transversal del palpador respecto al eje de cordón de soldadura
Figura 28a.*

Alejando el palpador del borde aparece a una distancia mayor, exactamente al doble del valor d , una nueva reflexión de máxima intensidad que corresponde al canto superior al cual llega el haz previa reflexión como se indica en la figura 28b.

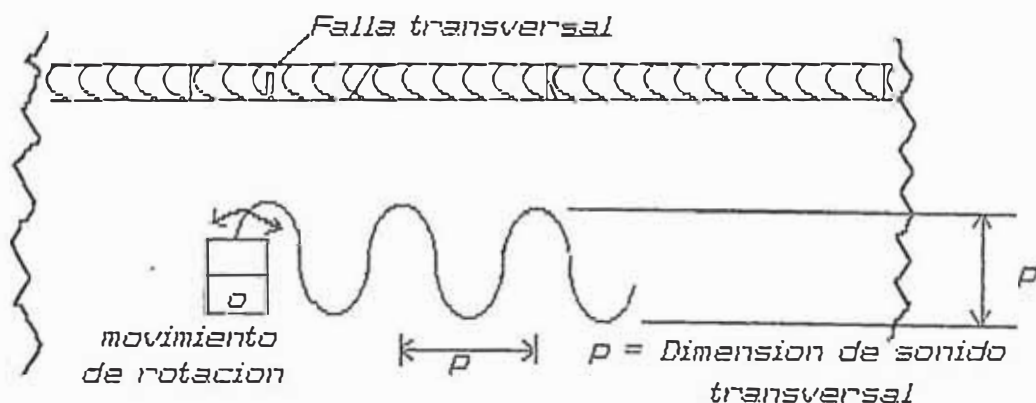


Desplazamiento Transversal

Bueno esta operación será posible siempre que se disponga de un trozo de chapa de espesor igual al que se debe examinar, permite determinar, sobre la pantalla del tubo de rayos catódicos la zona de control.

5.3.2. Desplazamiento longitudinal del palpador

El palpador debe ser desplazado además en forma paralela al cordón a fin de examinar toda la longitud de la soldadura. Este desplazamiento unido al transversal antes descrito da como resultante un desplazamiento casi senoidal con un paso menor fue la dimensión transversal del cristal, (Fig 28c.).



Movimiento del palpador en el análisis longitudinal

5.3.3. Rotación del palpador

Durante el desplazamiento senoidal o zigzag descrito se aconseja imprimir al palpador una ligera rotación alternativa de a 15 a 20 grados para facilitar la detección de defectos de orientación particular, como fisuras e inclusiones.

Es necesario tener presente que con el tipo de desplazamiento descritos aún con rotación, las fisuras transversales no serán detectadas, por lo cual si se prevé este tipo de defectos debe considerarse desplazamiento adicionales.

5.3.4. Localización de los defectos

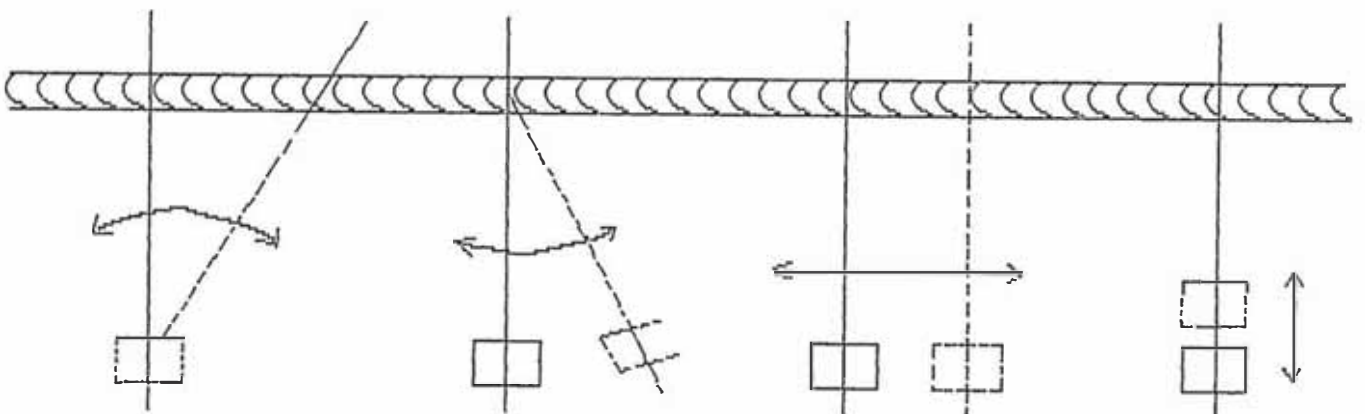
El examen se inicia con desplazamiento rápido del palpador, de acuerdo con el programa de exploración, cuando se obtiene una señal de reflexión originada por un defecto, el palpador debe ser movido hacia atrás y hacia adelante; y eventualmente rotado hasta conseguir la máxima señal.

La ubicación del palpador en la posición de máxima reflexión y el camino recorrido por el haz ultrasónico reflejado por el defecto permiten evaluar la posición del mismo.

5.3.5. Identificación del tipo de defecto

Encontrada la posición del palpador para la cual el defecto es indicado con la máxima señal se procede a identificar su tipo mediante movimientos adecuados del palpador.

Estos movimientos, como se indica en la figura 29; son rotación (1), orbital (2), lateral (3) y transversal (4).

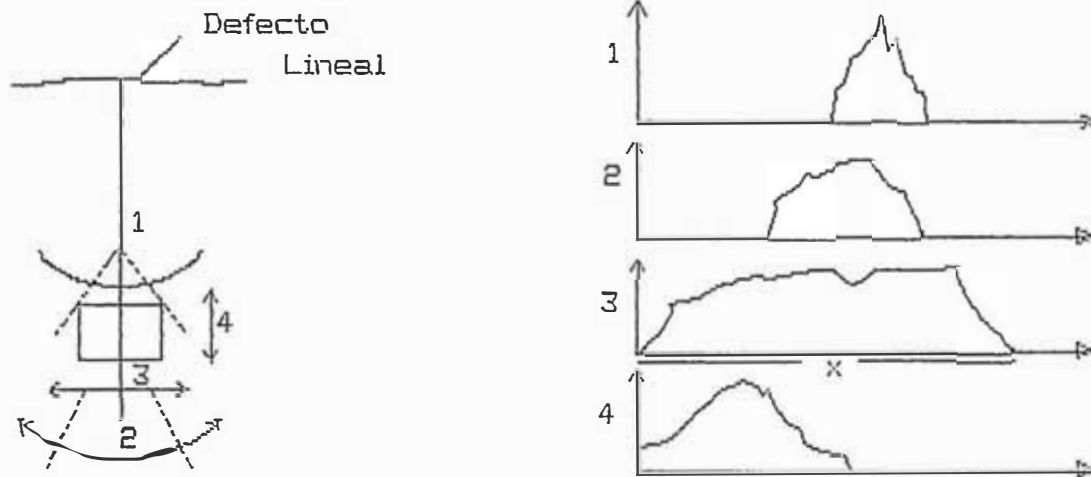


Movimientos a imprimir al palpador para el reconocimiento de defectos

Figura 29.

Moviendo el palpador, el defecto es interceptado por distintas zonas del haz ultrasónico y por lo tanto da origen a ecos de distintas amplitudes y en posiciones diversas. La sucesión de estos ecos en la pantalla determina la curva envolvente de dichos ecos, la cual por su forma y posición permite reconocer el tipo de defecto en cuestión.

Las figuras 30 y 31 ilustran esquemáticamente el comportamiento de las reflexiones para distintos movimientos con dos defectos típicos diferentes, uno lineal y otro esférico.



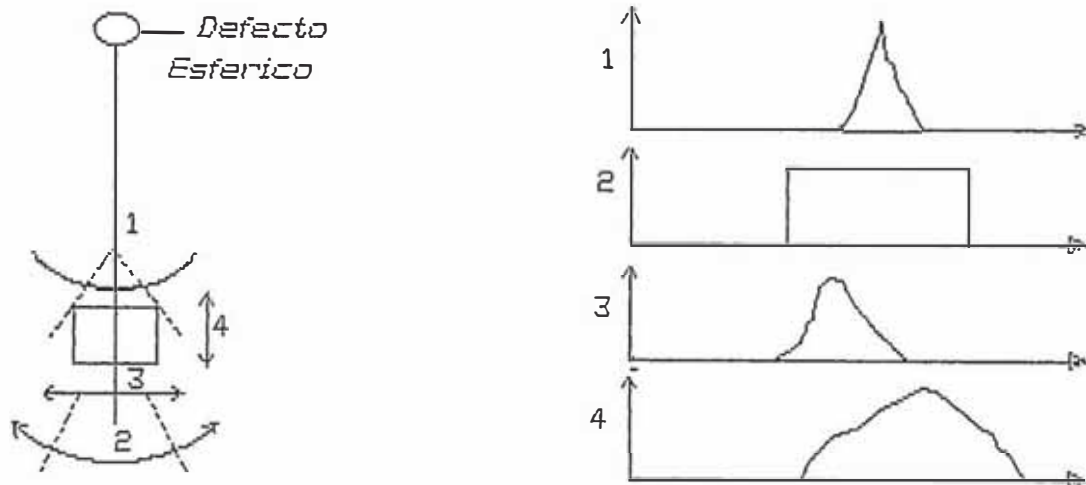
*Curvas envolventes para los cuatro movimientos básicos al explorar un defecto lineal
Figura 30.*

En el caso defecto lineal (figura 30) al imprimir un movimiento rotacional (1), con centro en el palpador, la indicación decrece rápidamente aún para pequeñas rotaciones del palpador ya que el haz deja de incidir normalmente y la reflexión no llega al palpador.

Rotando el palpador con centro en el defecto (2) y movimiento orbital, la curva envolvente es bastante parecida a la anterior con ondulaciones irregulares y cae rápidamente, EN efecto la fisura, para pequeñas rotaciones de la sonda puede presentar superficies elementales normales al haz incidente.

Con movimiento lateral (3) la reflexión permanece durante toda la extensión del defecto con ligeras variaciones debidas a irregularidades del mismo.

Con movimiento transversal (4) desde la máxima reflexión la señal disminuye irregular pero progresivamente.



*Curvas envolventes para los cuatro movimientos básicos al explorar un defecto esférico
Figura 31.*

En el caso del defecto esférico figura 31, imprimiendo a la sonda un movimiento de rotación (1) la indicación cae inmediatamente, la curva envolvente es muy aguda.

Para el desplazamiento orbital (2) con centro en el defecto la curva permanece constante ya que desde cualquier posición del palpador el defecto presenta una superficie semejante.

Con desplazamiento longitudinal (3) la curva envolvente se estrecha pero con su zona de máximo bastante roma, mientras que con desplazamiento transversal (4) se tiene desde la posición de máxima reflexión una disminución inicial lenta que luego se acelera hasta la extinción total.

5.4. Defectos mas frecuentes en las juntas soldadas

5.4.1. Cavidades y poros

Cavidades producidas por inclusiones gaseosas, pueden dividirse como sigue:

- Poros de morfología esferoidal
- Poros de morfología alargada

La presencia de gases en el metal de la soldadura puede ser ocasionada por una

incorrecta técnica al soldar, electrodo húmedo o un mal control de la corriente del arco.

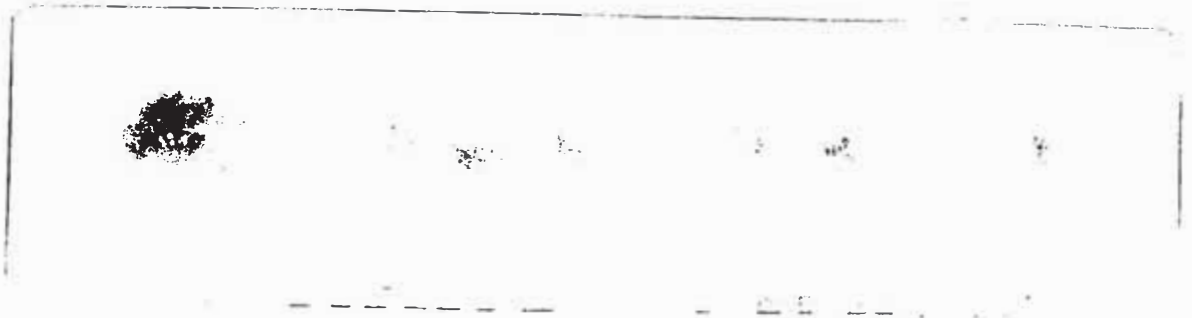
5.4.2. Inclusiones

Son heterogeneidades por materiales extraños sólidos aproximados en la masa del metal, durante el proceso de soldadura pueden ser:

- Escoria
- Oxidos
- Otros metales

Son oxidos producidos por el arco de soldadura. Estos oxidos ayudan a tomar las impurezas del metal derretido y forman una capa para controlar el enfriamiento de la soldadura.

Pueden presentarse aislada o en racimos o tener una distribución lineal a lo largo de la soldadura.



5.4.3. Falta de penetración

Ocurre cuando no hay fusión completa entre el metal base de la raiz y la soldadura depositada. Muchas veces la raiz de la junta no alcanza la temperatura de fusión y otras veces

a que el electrodo golpea la junta a cierta distancia de la raiz (fuente demasiado estrecha o diametro del electrodo muy grande).

La falta de penetración causa la falla de la soldadura, cuando la raiz de ésta se encuentra sometida a esfuerzos de flexión.

Este defecto es muy serio y depende de las condiciones de servicios para determinar su aceptabilidad.

5.4.4. Falta de fusión

Puede ocurrir entre el metal base y el de aporte o entre dos pasos de soldadura.

Es originada cuando el metal base o el paso anterior de soldadura no han alcanzado su temperatura de fusión antes de depositar el nuevo pase de soldadura, con el objeto de obtener continuidad metalurgica entre el metal base y soldadura.



5.5.5. Grietas

Las grietas en soldadura son usualmente producidas por los esfuerzos internos causados por la contracción durante el enfriamiento de la soldadura, pueden presentarse a lo largo de la soldadura o transversalmente.



CAPITULO VI

INSPECCION DE LAS TUBERIAS DE PRESION DE UNA CENTRAL HIDROELECTRICA

La Central tendrá una potencia de 1.6 Mw, ubicada en Piura; según planos técnicos tenemos las siguientes partes:

6.1 Estructuras y Equipos

6.1.1. Presa de derivación

Este baraje de derivación se realiza con el fin de levantar el nivel de agua del río y facilitar su entrada a la Bocatoma de derivación y el canal de alimentación.

Los aumentos de nivel necesario para la derivación dependen de las siguientes consideraciones. Una vez establecido un apropiado tirante "h" de agua en el canal de

conducción se ubicará el vertedero del baraje a una elevación sobre el fondo del río, igual a:

3h, cuando el caudal es muy pequeño.

2.71, cuando el caudal sea igual 1 m³/seg.

2h, cuando el caudal sea > que 1 m³/seg.

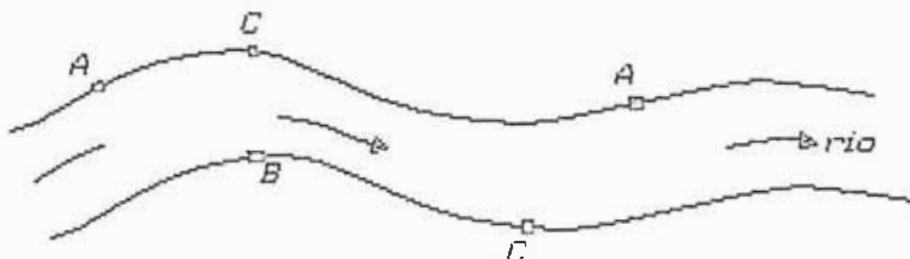
Sería deseable que se construyera el baraje con base en la roca firme del cause, sin embargo, sino se puede encontrar esta roca a muy poca profundidad se deberá construir el baraje sobre el aluvión del cause; pero cuidando que la base tenga una longitud suficiente para que el agua percolación en la superficie de contacto, entre la base y el aluvión tenga una velocidad tan pequeña que no pueda arrastrar las partículas más finas lo cual con el tiempo determinaría la destrucción del baraje mismo. El diseño y las dimensiones de un baraje que responda a estas condiciones de seguridad se indican en la tabla (apendice).

En el baraje mismo se debe disponer una compuerta que permita la eliminación de los depósitos sólidos que se hubiese formado frente al orificio de Toma.

6.1.2. Bocatoma

Criterios de ubicación de Bocatoma.-

En tramos rectilíneos de un río se puede ubicar el eje de la bocatoma formando 60-90 grados con la dirección de la corriente; pero en tramos de trazos ondulantes se debe considerar las condiciones de las siguientes ubicaciones.



Ubicación A.- Sitios convenientes.

Ubicación B.-

Sitios inconvenientes, por que durante los periodos de avenida, entra a la bocatoma piedras mientras que después de la avenida se forma frente a la misma bocatoma un banco de arena que impide o hace difícil el uso del agua para la derivación.

Ubicación C.-

Sitios inconvenientes, porque durante la avenida los materiales flotantes grandes y las piedras impactan directamente contra las

estructuras del baraje y de la bocatoma, ocasionando fuertes erosiones que pueden constituir un peligro.

6.1.3. Desarenador

Cumple la función de desarenar al río de las posibles piedras, o grumos inadecuados que pueden dañar la central, además es aconsejable contruir un aliviadero.

6.1.4. Canales y tuneles

Son los conductos por los cuales circula el agua que ha sido captado por la bocatoma, se necesita usar excavaciones y encampados para la derivación de las aguas del río.

6.1.5. Camara de carga

Es una carga donde recepciona el volumen de agua de diseño y es la que va ha alimentar la tubería de presión.

6.1.6. Diseño y detalle de fabricación de la tuberria de presión

La tubería de presión, como mostraba en los dibujos del diseño de ingeniería básica del tipo juntas de dilatación.

La tubería de presión consistirá en un tubo simple con una bifurcación incorporada.

Tuberías conjuntas de dilatación, se colocarán en tramos rectos entre los bloques de anclaje.

Las tuberías podrán ser fabricadas de tubos normalizados y/o enrollados planchas conjuntas soldadas a tope.

El espesor mínimo, en ningún caso será menor de 8 mm, este requisito es para limitar la distorsión de tramos largos de las tuberías durante su manejo y transporte de obra.

La longitud de fabricación está determinada para la facilidad de transporte y acceso de obra. Se considerará que un margen por corrosión y desgaste de 2 mm, sea suficiente en condiciones normales de operación.

En el caso que el análisis de agua demuestre características especialmente corrosivas o abrasivas, se aumentará el espesor de la tubería y se indicará en los planos.

Orificios o elementos de inspección de tuberías de alta presión se ubicarán donde se indica en los planos con tubería con diámetros interiores menores de 1000 mm; la abertura de inspección consistirá en una sección de la tubería de presión con pestañas de pernos móviles.

6.1.6.1 *Materiales de construcción:*

Tuberías, Bridas y Pernos

(a) Tubería Normalizada

ASTM A106 GR A D B	} Para servicio de temperatura normal
API 5L 333 b B	

ASTM A333 GR 1 b 6LTD45	} Para servicio de Temperatura Menor
-------------------------	--

(b) Tuberías Fabricadas con Planchas

ASTM A283 GR C hasta 16 mm. de espesor	}	Para servicio de temperatura Normal
ASTM A285 GR C		
ASTM A515 GR5 5 & 60		

ASTM A 516 GR 55 & 60 LTD015	}	Para Ser- vicio de Temperat. Menores
DIN A 17135 GR GR A St35		

(c) Materiales para Bridas

Forjaduras ASTM A181 GR1
PLANCHA ASTM a 518 GR 55 & 50

(d) Materiales para Enpernado

ASTM A 193 GR B7
PERNOS ASTM A 194 GR 2M

Anillos de empuje, planchas, anillos de refuerzo, argollas etc. Serán fabricados con materiales de planchas cuyos valores de esfuerzo permitidos son iguales o mejores que aquel del material usado en la estructura de la tubería.

6.1.6.2. Preparación de la plancha:

a) Todos los materiales deberán estar libres de escamas, suciedad, grasa, aceite

y otros materiales extraños; cualquier material que muestre corrosión diseminada por oxidación será rechazado.

b) El biselado de los cantos a ser soldados se realizará con biseladora o cortadora de flama, la preparación de hoyos para buzones u orificios de inspecciones se realizará de preferencia con cortadora de flama.

c) Las superficies de canto no contendrán grietas, quebraduras, laminaciones, escorias u otros defectos. Toda aspereza en los cantos de las planchas serán removida; cantos afilados serán redondeados o biselados.

Tratamiento al calor (pre-calentamiento y post soldado)

(a) Tratamiento con pre-calentamiento (durante el soldado)

Juntas en tuberías de 20mm de espesor o más serán sujetadas a una temperatura de precalentamiento y entre cada aplicación de metal de soldadura 100 grados celsius como mínimo. El soldado deberá ser

continuo hasta que la junta haya soldado a una profundidad de 10mm como mínimo.

(b) Tratamiento Post-Soldado (para relevar esfuerzos)

Juntas en tuberías de acero-carbono cuyo grosor sea 32mm o menos, y cuyo análisis químico en el caldero de colada muestra 0.25% máximo de carbono, no necesitan de tratamiento al calor post-soldado a menos que requiera de protección contra fracturas, frágiles corrosión por esfuerzos o efectos similares.

6.2 Procedimiento de Ensayo

6.2.1 Calibración

Como operación previa al proceso de inspección por ultrasonidos es necesario proceder, en primer lugar, a una comprobación satisfactoria del estado de funcionamiento del equipo. Esta comprobación incluirá el ajuste de la linealidad vertical de la pantalla, la proporcionalidad del control de amplificación (ganancia) y la apertura del haz. Efectuada esta comprobación es necesario relizar la calibración, en su conjunto, del equipo

palpador o palpadores y cables de conexión que vayan a ser utilizados en el trabajo de inspección de que se trate.

Esta calibración, de acuerdo con las recomendaciones establecidas en el código ASME (sección V, artículo 4), deberá repetirse siempre que se produzca cualquier valoración en las condiciones en que inicialmente fue realizada. Es decir, la calibración será necesaria siempre que se cambie, bien de operador o bien de cualquiera de los elementos que constituyen el sistema: equipo, palpador o palpadores, cables de conexión o medio acoplante. También se exige una comprobación de la misma cada cuatro horas de trabajo y al término de la jornada, pudiendo realizarse esta comprobación, solamente sobre uno dos puntos requeridos para la calibración total.

Adicionalmente, se realizará una comprobación de las características de linealidad vertical en pantalla y proporcionalidad de amplificación con una periodicidad de tres meses.

6.2.1.1. Bloques de Calibración o Referencia

Para la realización práctica, tanto de la comprobación del equipo como de la calibración del sistema, existen varios tipos de bloques o piezas de referencia. Sin embargo, teniendo en cuenta que nos estamos refiriendo fundamentalmente al examen por ultrasonido de uniones soldadas, los bloques de calibración que podrán ser utilizados son los siguientes:

- a) Bloque normalizado por el Instituto Internacional de la Soldadura (I.I.S./I.I.W).
- b) Bloque de ASME.
- c) Bloques auxiliares para referencia.

En cualquier caso, el material con que se construye el bloque de calibrado, debe ser igual o ultrasonicamente equivalente al que se va a examinar. Para el caso de las soldaduras y a los defectos de la calibración, se consideraran como equivalentes los materiales comprendidos de los grupos P1, P3 Y P5 (ASME, sección

(IX, tabla QW-422). El acabado superficial de estos bloques será también equivalente al del recipiente o componente a examinar.

6.2.1.2. Bloque normalizado por el IIS/IIW

El bloque normalizado por el instituto Internacional de la Soldadura, como consecuencia de los trabajos realizados por su comisión y ensayos, medidas y control de las uniones soldadas, para llegar al establecimiento de una pieza patrón para el calibrado y control de los equipos de ultrasonidos que trabajan por el método de impulso-eco, se fabrica y mecaniza de acuerdo a las indicaciones que se da en la figura, en la cual se puede ver los dos tipos bloques existentes, denominados V1 Y V2.

El bloque V1 servirá para realizar y comprobar la calibración en distancias y para la calibración del punto y ángulo de salida del eje del haz de ultrasonido emitido por un palpador angular en condiciones normales. La principal misión del bloque V2 es el

de 200mm. que es el campo mínimo para el que se pueda utilizar el bloque V1.

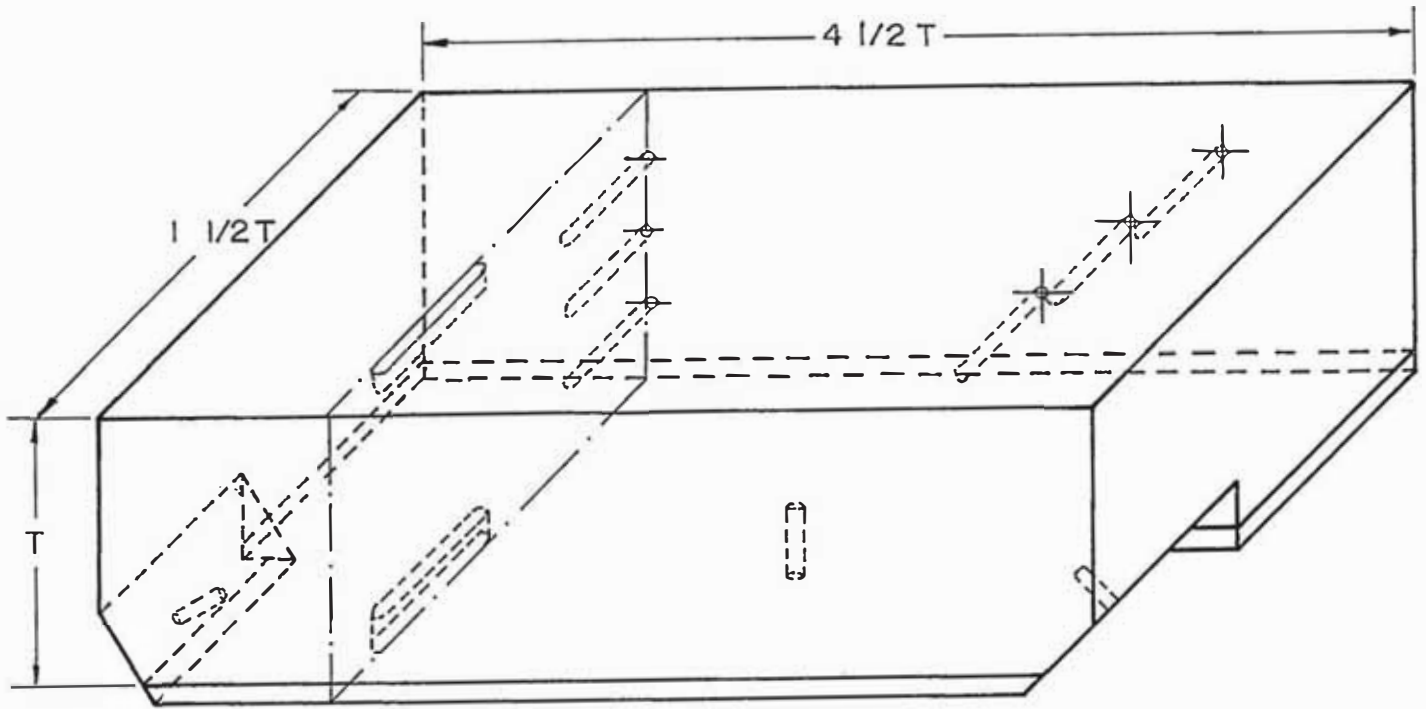


FIGURA 32

6.2.1.3. Bloques de Tipo ASME

Los bloques de calibración tipo ASME estarán contruidos y mecanizados de acuerdo con las indicaciones que se dan en la figura 32. Por cuanto el material del que se partirá para su construcción, debemos recordar y añadir que el plaqueado o el rebestimiento de acero inoxidable se depositará siguiendo el mismo procedimiento empleado para el plaqueado del componente, sobre el cual se a de

efectuarse la inspección, si es que este lo tiene. Así mismo el acabado superficial y el tratamiento técnico posterior a la soldadura han de ser equivalentes. Estos bloques tendrán básicamente, de acuerdo con lo que en la figura 32 se indica, tres taladros y tres entallas para la calibración con palpador angular y otros tres taladros para calibración con palpador normal. También podrá llevar otros reflectores para la determinación de los bordes del haz o como referencia complementaria.

La función principal de los bloques tipo ASME es servir para la obtención de la curva de calibración, amplitud en distancia (C.A.D) y el establecimiento del nivel de distancia.

6.2.2 Calibración del Sistema

Como ya se ha indicado anteriormente, como Sistema se entiende el conjunto formado por el equipo, el palpador o palpadores que vayan a ser utilizados y los cables de conexión. Este conjunto o Sistema

debe ser considerado como una sola unidad y como tal debe ser calibrado, siendo necesario una nueva calibración siempre que se varíe o sustituya cualquiera de los elementos considerados.

La secuencia de las operaciones de calibración inicial específicas para cada ensayo es la siguiente:

- a) Comprobación del punto de salida y el ángulo del haz de ultrasonido
- b) Calibración del campo de barrido.
- c) Obtención de las curvas de calibración amplitud-distancia (C.A.D)
- d) Niveles de ganancia a emplear en la exploración y evaluación
- e) Comprobación de la calibración para el caso de reflectores planos próximos a la superficie (entalles)

6.2.3. Niveles de aceptación para la interpretación de juntas soldadas

Los niveles de aceptación más utilizados en nuestro medio para la interpretación de juntas soldadas están dadas por las normas ASME Y API.

Las normas ASME usadas para calificar juntas soldadas en recipientes a presión, considera como inaceptables cualquiera de los siguientes defectos de soldadura:

1) Cualquier tipo de rajaduras D 70 NA de fusión o penetración incompleta.

2) Inclusiones alargadas de escoria, cuya longitud se mayor que:

* $1/4$ de pulgada para valores de t hasta $3/4$ de pulgada.

* $1/3$ de t para $3/4 t < 2 1/4$ pulgada.

* $3/4$ de t cuando $t > 2 1/4$ de pulgada.

Siendo t el espesor de la parte más delgada de la soldadura.

3) Cualquier grupo de inclusiones alineadas cuya agrupación presenta un longitud superior a t , en longitud igual a $12t$, excepto cuando la separación entre dos defectos sucesivos excedan al valor de

6L , siendo L la longitud del mayor defecto del grupo.

4) Porosidad cuando sea mayor a la establecida como aceptable en las cartas de porosidad ASME (ver anexo).

Las normas API std 1104 son utilizadas para la inspección de soldaduras de oleoductos e instalaciones anexas. Dichas normas establecen los siguientes patrones de aceptabilidad de los defectos localizados :

1) La penetración incompleta no debe exceder de 1" en una longitud de 12" continuas de soldadura. Si la longitud es menor de 12" , entonces la penetración incompleta no debe exceder el 8% de la longitud de la soldadura.

2) Para tuberías de 2 3/8" de diametro y más grandes: Cualquier inclusión alargada de escoria no debe exceder de 1" en longitud o 1/16" en ancho. La longitud total de inclusiones alargadas no debe exceder de 2" en una longitud de 12" de soldadura continua.

3) Para tubería menores de 2 1/2" de diámetro exterior: Las inclusiones alargadas de escoria no deben exceder de 1/16" de ancho o tres veces el valor nominal del grosor de la pared en longitud.

El máximo ancho de cualquier inclusión aislada de escoria no debe exceder la mitad del valor del grosor nominal de la pared y la longitud total de estas inclusiones no debe exceder al doble del valor nominal de la pared.

4) La máxima dimensión de una porosidad aislada no debe exceder del 25% del espesor de la pared del tubo, la distribución de porosidades no debe exceder a las determinadas por las cartas de porosidad API.

5) No debe aceptarse soldaduras que contengan rajaduras cualquiera que sea el tamaño o ubicación.

INSPECCION DE RAYOS X :

Son 500 mts

Longitud a placa = 400 mm.

Estimado del # de placas del equipo 5,000.

1) Incidencia. Equipo

$$\frac{\$ 27,600}{5,000} = \$ 5.52 \text{ c/placa.}$$

2) Número de placas en la inspección

$$\frac{5000 \times 100 \text{ cm}}{400 \text{ mm.}} = 1,250 \text{ placas}$$

3) Incidencia Dosimetro

$$\frac{\$ 172.5}{5000} = 0.0345 \text{ \$/placa}$$

4)

Mobilidad \$ 250

5) Costo por Placa

$$\frac{\$ 14,444.53}{1250} = \$ 11.55/\text{placa}$$

POR ULTRASONIDO

1) Equipo de ultrasonido \$ 17,409.

Cuantos metros de vida util = 20,000 mts.

$$\frac{\$ 17,409}{20,000 \text{ mts}} = 0.87045 \text{ \$/mt.}$$

2) Costo Palpador

$$\frac{\$ 149.5}{1000} = 0.149 \text{ \$/mt.}$$

3)

$$\frac{\$ 10}{500} = 0.02 \text{ \$/mt.}$$

4) Por lo tanto Costo por metro inspeccionado

$$\frac{1,728.08}{500} = 3.456 \text{ \$/mt.}$$

6.4 Cualificación y Certificación del Personal de ensayos no destructivos

EL objetivo es establecer los requisitos generales de un programa de cualificación y certificación de la experiencia y formación que se consideran necesarias para los diferentes métodos de ensayo no destructivo.

Métodos de ensayos no destructivos

La cualificación y certificación del personal de E.N.D. sea aplicable a:

- a) Radiología industrial (RI).
- b) Partículas magnéticas (PM).
- c) Ultrasonidos (US).
- d) Líquidos penetrantes (LP)

Niveles de Cualificación

Para cada método de E.N.D. se establecen tres niveles de cualificación, cada uno de los cuales puede ser dividido a su vez en sub niveles que sean necesarios para las aplicaciones específicas de cada empresa.

Los tres niveles de cualificación son las siguientes:

- a) Nivel I.- El personal de nivel I deberá estar cualificado de acuerdo con procedimientos descritos, calibrar equipos y realizar ensayos de evaluaciones específicas, registrando los resultados obtenidos.

Deberá realizar su trabajo bajo la supervisión de personal certificado con nivel II o III en ese método de E.N.D.

b) Nivel II.- El personal de nivel II deberá estar certificado para poner a punto los equipos e interpretar y evaluar los resultados de los ensaos de acuerdo con los códigos, normas y especificaciones aplicables.

Deberá conocer profundamente el alcance y las limitaciones del método y será responsable de la formación y supervisión de los niveles I, y del personal en periodo de formación. Deberá estar capacitado para preparar procedimientos e instrucciones escritas y para organizar e informar investigaciones E.N.D.

c) Nivel III.- El personal de nivel III deberá estar capacitado y ser responsable del establecimiento de las técnicas de la interpretación de los códigos, normas y especificaciones, y de la designación del método y de la técnica especificada de E.N.D. a emplear. Será responsable de la operatividad de los E.N.D para los cuales este cualificado y

sea de su incunvencia, y deberá estar capacitado para evaluar los resultados de acuerdo con los códigos, normas y especificaciones aplicables. Deberá tener la experiencia suficiente en materiales, fabricación y/o tecnología de productos para poder establecer técnicas y asistir a los responsables del diseño en el establecimiento de los criterios de aceptación cuando estos no existan. Es deseable que este familiarizado con los otros métodos del E.N.D. comunmente utilizados. Deberá ser responsable de la formación y del examen de los niveles I y II. Las funciones de impartir los cursillos de formación y de calificar los exámenes pueden ser delegadas en un representante del nivel III debidamente seleccionado, haciendolo constar en el expediente de cualificación

INFORME SOBRE INSPECCION ULTRASONICA

USUARIO : Proyecto C. H. Tubería "Quiroz"

MATERIAL : Tuberías de acero.

Datos Técnicos:

Prueba efectuada : Defectos de soldadura en tramos de tubería.

Método Empleado : Ultrasonido.
Equipo Empleado : Ecograph : 1004
Palpador normal - 4 Mhz.
Palpador angular 70 - 4 Mhz.

Resultados :

- 1.- Se ha efectuado la detección de fallas en las uniones soldadas de tubos de acero en un 100% en soldaduras longitudinales y circulares, en espesores de **planchas entre** 9.5 mm - 12.4 mm, encontrándose fallas de soldaduras tal como se muestra en **los diferentes** tramos en los esquemas que acompañamos (**Ver** sección planos).
- 2.- **Las** fallas encontradas despues de reparadas fueron nuevamente chequeadas comprobándose que fueron eliminadas.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

* EL ensayo de materiales por ultrasonido es practicamente instantaneo, ya que el tiempo empleado por las ondas en su transmisi6n a travéz del material es sólo de micro segundos, por grande que sea el espesor de la muestra.

La principal demora esta en el manipuleo de los materiales.

* En oposici6n de los otros métodos de ensayo no destructivos el ultrasonido no presenta un cuadro directo de las fallas. Los ensayos ultras6nicos se basan en la interpretaci6n correcta de ciertas manifestaciones, debidas a la presencia de fallas y de sus características.

* El resultado de un ensayo ultras6nico no constituye por lo general un documento objetivo sino una informaci6n

subjetiva, cuya finalidad no puede comprobarse a menudo con certeza sin recurrir a otros medios.

* La aplicación del control por ultrasonido se basa en la competencia técnica del operador y en su actitud de interpretar los resultados.

* Antes de la aplicación de alguno de los métodos de ensayo el operador debe tener una idea clara de la clase y cantidad de fallas que se espera describir en la muestra. Esto determinará el número de puntos de prueba y el cuidado con que los resultados deben ser examinados.

* Un eco no debe ser considerado inmediatamente, como evidencia de un defecto, sino por el contrario el origen del eco debe ser buscado mediante varias pruebas desde diferentes posiciones conjuntamente con las consideraciones del aspectos metalurgicos del caso.

* Para el caso de la planchas gruesas a medida el incremento de tonelajes y la severidad de recepción, se comprueba que el control manual llega a ser demasiado larga y costoso. Se tiene que pensar por lo tanto en la automatización del control ultrasónico.

Una ventaja importante de los métodos ultrasónicos de medición de espesores está en que solamente es necesario

el acceso a una superficie de la muestra. Esto es especialmente útil en la medida de la extensión de la corrosión en el interior de los conductos.

* Los espesores de los cascos de los barcos pueden medirse desde su interior, evitando así el proceso costoso y la pérdida de tiempo que entraña a tomar muestras en dique seco.

* Antes de iniciar cualquier método de ensayo ultrasónico es necesario preparar, acondicionar correctamente la superficie del espécimen, a fin de lograr un buen acoplamiento y por lo tanto evitar falsas respuestas.

* En la detección de pequeñas fallas; es conveniente el uso de palpadores con cristales de pequeña área, ya que de esta manera se eleva el grado de sensibilidad.

* Sea cual fuere el método de ensayo utilizado, el ensayador debe recordar la regla fundamental de la verificación por ultrasonidos; que dice: Siempre debe tocarse un reflector en forma perpendicular.

* Como un factor de suma importancia, debemos decir, que se requiere de un gran bagaje de conocimientos y

experiencia por parte del operador para poder interpretar correctamente los resultados de un ensayo.

* El ensayo ultrasónico es usado ventajosamente en aplicaciones similares a los de los rayos X o usado conjuntamente con este método. Las ondas ultrasónicas se propagan en línea recta a través de cuerpos sólidos sin sufrir prácticamente disminución de intensidad, en distancias de varios metros. Los rayos X a diferencia del ultrasonido son absorbidos en distancias de centímetros, aun en condiciones favorables.

BIBLIOGRAFIA

Libros y Publicaciones

- 1.- Blitz, Jack. Fundamentos del los ultrasonidos. Madrid, Editorial Alhambra, S.A., 1969, 292 pags.
- 2.- Carlin Benson. Ultrasonics. 2da. ed., Nueva York, McGraw-Hill, 1960.
- 3.- Krautkramer, Josef y Herbert. Ultrasonic Testing of Material, Nueva York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1969, 521 pags.
- 4.- Krautkramer, J. y H. Ultrasonic Non-Destructive Testing Material An Introduction into the Method, Cologne. Krautkramer, 309 pags.
- 5.- Mundry, E. Ultrasonido Sociedad Alemana de Ensayos No Destructivos, Berlin, Instituto Federal de Ensayo de Materiales, INTI, 1968.

- 6.- McMaster, Robert Non-Destructive Testinng Handbook.
2 vol., Nueva York, The Ronald Press Co., 1959.
- 7.- Krautkramer Española S. L., Cursillo de Introducción
a los Métodos de control por ultrasonidos.
- 8.- Centrol Nacional de Investigaciones Metalúrgicas.
Examen por ultrasonido de uniones soldadas. Revista
de soldadura, Vol VI.
- 9.- Ensayo de Materiales y Control de Defectos en la
Industria del Metal, H. Studemann, Editorial Urmo,
Bilboa. 1970
- 10.- Los Rayos X y El Ultrasonido en las Pruebas no
Destructivas de Materiales, Philips Peruana SA.
Lima. 1972.