



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**Métodos de Inspección Ultrasonica para determinar las  
Condiciones de Seguridad en Instalaciones de Proceso**

Sustentado por:

**DANIEL TORRES PELAYO**

Pasante de la Carrera de  
**INGENIERO QUIMICO**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



FACULTAD DE QUIMICA  
DEPTO. DE PASANTES Y  
EXAMENES PROFESIONALES.

FORMA C

Universidad Nacional  
Autónoma de México

(AUTORIZACION PARA ESCRIBIR DEFINITIVAMENTE EL TEMA REVISADO)

C. Director Genl. de Servicios Escolares  
Universidad Nacional Autónoma de México.  
Presente

Me permito comunicar a usted, que el tema de T E S I S .

Titulado: MÉTODOS DE INSPECCION ULTRASONICA PARA DETERMINAR  
LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD EN INSTALACIONES DE PROCESO.

que presenta: EL CN. DANIEL TORRES DELAYO

Posante de la Carrera de: INGENIERO QUIMICO

Fue aceptado por el Jurado nombrado para dicho examen, el cual quedó integrado en la  
la siguiente forma:

Presidente Prof .	RAUL MEYER STOFFEL
Vocal -	PABLO BARRONIA GONZALEZ
Secretario -	CARLOS DOORIAN MONTEO
1er Suplente *	ESTER LUJAN JIMENEZ RUIZ
2do Suplente *	GERARDO BAZAN NAVARRETE

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitario D.F., a 20 de OCTUBRE de 197 1

EL JEFE DEL DEPTO. DE PASANTES  
Y EXAMENES PROFESIONALES.

QUIM JULIO TERAN Z.

**A la Memoria de mi Padre**

**Con cariño para mi Madre y Hermanos**

**Con respeto para el Ing. Antonio Carranza O.**

**Con mi agradecimiento para los Ingenieros:**

**Pedro Barrón Angeles**

**Facundo Gallegos Flores**

**Con respeto y agradecimiento para el personal  
de la Superintendencia General de Seguridad Industrial de Explotación de Petroleos Mexicanos.**

**Con admiración para el Ing. Carlos Doorman Montero**

**Con todo mi respeto para los Miembros del Jurado**

# I N D I C E

	Pag.
I.- INTRODUCCION . . . . .	1
II.- PRINCIPIOS BASICOS DE LAS PRUEBAS ULTRASONICAS . . . . .	4
III.- GENERACION Y RECEPCION DE ONDAS ULTRASONICAS . . . . .	18
IV.- METODOS Y EQUIPOS DE INSPECCION . . .	30
V.- APLICACIONES . . . . .	54
VI.- INSPECCION DE LA LINEA QUE MANEJA EL CRUDO REDUCIDO DE LA TORRE MA-T1 A LAS BOMBAS MA-P4's INSTALADA EN LA REFINERIA MACERO . . . . .	65
VII.- COMENTARIOS Y CONCLUSIONES . . . . .	80
VIII.- BIBLIOGRAFIA . . . . .	84

## INTRODUCCION

En la elaboración y proceso de los productos químicos, es necesario proporcionar al personal los medios de seguridad adecuados para la prevención de accidentes. Parte de estos medios comprenden desde la evaluación de los riesgos hasta la inspección de los equipos instalados.

La dirección de la empresa confía la labor de inspección a los ingenieros de seguridad, quienes de acuerdo con los productos que se procesan y las necesidades requeribles para su elaboración, son los encargados de estudiar y prevenir los posibles accidentes que pudieran presentarse en las instalaciones, así como la educación, capacitación y seguridad que deben adoptar técnicos y trabajadores en el desempeño de sus actividades para no exponerse a riesgos que redundarían en perjuicio de ellos mismos.

Precisamente entre las labores que pueden desarrollar los ingenieros químicos se cuenta la inspección de las instalaciones industriales en general, tomando en consideración que estos profesionistas tienen conocimientos de los procesos unitarios, diseño y operación de plantas.

Los ingenieros encargados de la inspección con fines de seguridad deben tomar en cuenta factores tales como:



1. - Poder corrosivo de los materiales en proceso.
2. - Condiciones de operación y
3. - Tiempo de operación.

Los métodos básicos para efectuar las inspecciones son los siguientes:

a). - Métodos destructivos. - Consisten en la medición directa de espesores para conocer el desgaste sufrido por las paredes metálicas haciendo uso de calibradores. Su inconveniente es la destrucción que hay que causarle al equipo al tener que perforarlo para hacer estas calibraciones, razón por la cual solo se usan en caso de ser imposible el empleo de otros métodos.

b). - Métodos no destructivos. - Sirven para determinar las condiciones de los equipos y tuberías, sin perforar o causar destrucciones a los mismos.

Entre estos métodos se encuentran las inspecciones por medio de ultrasonido, empleando aparatos electrónicos que aprovechan la propiedad de las ondas ultrasónicas de transmitirse a la velocidad del sonido en líquidos y materiales sólidos pero no en el aire. Gracias a estos aparatos es posible inspeccionar los equipos y determinar su estado de operación rápidamente y sin necesidad de detener los procesos.

El interés provocado por este tipo de inspecciones usando ultrasonido ha dado motivo a la elaboración de este trabajo, en el cual se hace un estudio que abarca desde los principios básicos de las pruebas ultrasoníacas hasta una inspección haciendo uso de un aparato ultrasónico.

## PRINCIPIOS BASICOS DE LAS PRUEBAS ULTRASONICAS

Las pruebas ultrasónicas de los materiales hacen uso de las ondas mecánicas en contraste, ya que cualquier onda mecánica está compuesta de oscilaciones de pequeñas partículas de material. En la figura 1 se muestra el sistema típico de estas pruebas.

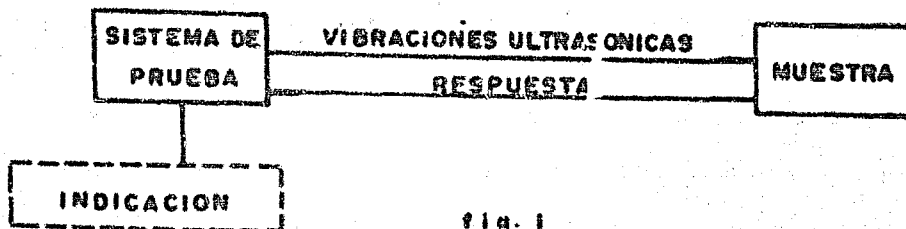


fig. 1

Básicamente en pruebas de ultrasonido se aplican vibraciones ultrasónicas en una muestra. La muestra modifica o cambia estas vibraciones de alguna manera. El cambio resultante se detecta por medio de un sistema de prueba y a través de alguna indicación (como se verá más adelante), las indicaciones son interpretadas y analizadas para obtener ciertos conocimientos de la muestra.

La selección de un sistema de prueba está parcialmente determinado por la facilidad de una muestra para responder o reaccionar a las vibraciones ultrasónicas. Si no se obtiene una respuesta reconocible, es razonable decir que la muestra no se adapta a pruebas ultrasónicas. Para aprender algo de una muestra, se necesita una respuesta o reacción de la muestra que se usa. Si no se tiene la respuesta, no se sabe nada acerca de la muestra. En este caso se debe usar otro tipo de prueba no destructiva.

En pruebas ultrasónicas, es importante tener en cuenta el concepto de desplazamiento, el cual se puede definir como la distancia que se ha movido un cuerpo desde su posición de equilibrio (posición normal). En las pruebas ultrasónicas se debe tener muy en cuenta que este concepto se aplica también en los materiales sólidos.

Las vibraciones ultrasónicas pasan a través de un material sólido a consecuencia del desplazamiento de sus partículas. Para comprenderlo supóngase que el material consiste de una hilera de bolas suspendidas como se muestra en la figura 2.

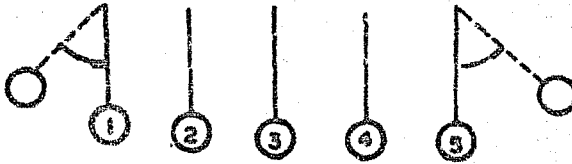


Fig. 2

Si se desplaza la partícula 1 a la izquierda y después se suelta, la energía que se dió a la partícula 1 es transmitida a través de la serie de partículas 2 a 4 y finalmente afecta a la partícula 5. Esta última partícula invierte la acción y transmite la energía a través de la serie de partículas. Nótese que también se tiene una vibración. La estructura de un material está constituida por átomos los cuales tienen posiciones normales, y pueden ser desplazados de estas posiciones. Estos también tornarán a su posición normal.

La transmisión de vibraciones ultrasónicas a través de un material está relacionada a las propiedades elásticas del material. Un movimiento completo hacia adelante y hacia atrás es un ciclo.

Se denominan vibraciones ultrasónicas a aquéllas cuyas frecuencias están arriba de 20,000 cps o sea arriba de la gama de audición humana. Para propósitos ultrasónicos, el sonido es una vibración que transmite energía por pequeños desplazamientos materiales.

Con base a estas definiciones, se puede decir que las pruebas ultrasónicas son el proceso de aplicar sonido ultrasónico a una muestra, con el objeto de saber algo de dicha muestra. Por ejemplo, la muestra puede absorber energía o reflejar energía. En cualquier caso, la reacción de la muestra o respuesta suministra un medio para aprender algo de ella.

La figura 3 muestra la inyección de energía en una muestra. La energía es originada por un transductor, que es un objeto que causa desplazamientos materiales dentro de la muestra. Un transductor receptor capta la respuesta de la muestra o reacción a las vibraciones ultrasónicas.

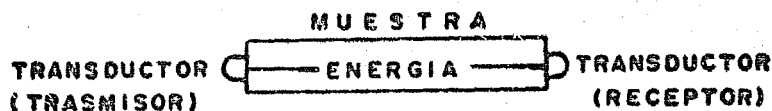


fig. 3

La energía transmitida por un transductor puede ser pulsante o continua. Un transductor inyecta energía en una muestra por un tiempo muy corto (del orden de microsegundos), después hay una pausa por un tiempo corto antes de transmitir una nueva vibración. Esto se llama "sonido pulsante" y se define como un corto grupo de vibraciones antes o después del cual no ocurren vibraciones.

Cuando un transductor transmisor aplica vibraciones en forma continua a una muestra, se le llama "sonido continuo". Ambos sonidos pulsante y continuo son usados en pruebas ultrasónicas dependiendo del método de prueba. La diferencia entre ambos sonidos es en realidad cuestión de tiempo.

El sonido no está limitado a materiales sólidos, por lo tanto, otros medios tales como el agua, grasa, etc., transmiten también vibraciones ultrasónicas. Esto se ilustra por medio del ejemplo que se muestra en la figura 4, en el cual se usa aceite entre el transductor y una muestra de acero.



fig. 4

Debido a que el aire no es buen transmisor del sonido, se usa aceite o grasa entre el transductor y la muestra de acero. El aire baja la velocidad del sonido y se interpone o se opone a que el sonido penetre a la muestra. Por lo que generalmente se utiliza aceite o grasa entre el transductor y la muestra de acero.

El movimiento de vibraciones ultrasónicas no es el mismo para todos los medios. Dicho movimiento es constante para un medio dado pero varía de un medio a otro.

La velocidad de propagación de las ondas, está determinada por la longitud de onda dividida entre el tiempo en que la partícula completa una vibración:

$$c = \lambda / T$$

c es la velocidad de propagación de la onda

$\lambda$  es la longitud de onda

T es el periodo del movimiento armónico.

Ya que la frecuencia es recíproca al periodo, se tiene:

$$c = \lambda f$$

La velocidad con que las ondas viajan a través de un medio es una constante que depende solo de las características físicas del medio, por lo cual las velocidades de las diferentes clases de ondas sonoras, pueden ser calculadas de las constantes de los distintos materiales, si se considera el módulo de elasticidad E (medido en  $Nw/m^2$  o técnicamente en  $Kg f/mm^2$ ), y la relación de Poisson  $\sigma$  (adimensional). Las siguientes fórmulas empíricas ilustran esta idea:

Para ondas longitudinales que son aquéllas en que las partículas ejecutan un movimiento armónico simple en la dirección de propagación, se usa:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \dots \dots \dots (1)$$

En donde  $\rho$  es la densidad y  $c_1$  la velocidad de la onda.

Para ondas transversales (aquellas en que las partículas vibran en dirección perpendicular a la dirección de propagación), se tiene:

$$c_2 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}} \dots \dots \dots (2)$$

En donde  $c_2$  es la velocidad de la onda.

Para ondas de superficie (fórmula aproximada de acuerdo a Bergman)

$$c_0 = \frac{0.87 + 1.12 \sigma}{1 - \sigma} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \sigma)}} \dots \dots (3)$$

Las velocidades del sonido pueden ser obtenidas de las siguientes relaciones:

$$c_t = c_1 \sqrt{\frac{1 - 2\sigma}{2(1 + \sigma)}} \dots \dots \dots (4)$$

$$c_o = c_t \frac{0.87 + 1.12 \sigma}{1 + \sigma} \dots \dots \dots (5)$$

Atenuación de las ondas ultrasónicas en sólidos

Considerando materiales ideales en los cuales la presión del sonido se atenúa solo en virtud de la expansión de la onda, se puede deducir que una onda plana no presenta atenuación, cualquiera que sea la presión del sonido a lo largo de esta trayectoria, el haz sonoro puede decrecer inversamente con la distancia del origen.



Todos los materiales por naturaleza, producen un efecto más o menos pronunciado que adicionalmente disminuye el sonido. Esto es resultado de dos causas, dispersión y absorción, las que pueden ser combinadas por el concepto de atenuación.

La dispersión es un hecho de que el material no es estrictamente homogéneo. Esto se demuestra por los cambios abruptos de impedancia acústica, cuando dos materiales de diferente densidad o velocidad sonora se encuentran en las interfases, puede decirse que la falta de homogeneidad es debida a inclusiones, por ejemplo, inclusiones en los poros, tales defectos pueden ser concernientes al material, intencionales o naturales, como son las porosidades en los materiales incrustados. Existen materiales que por naturaleza no son homogéneos, por ejemplo: fierro fundido.

Cuando en un material se presente un solo tipo de cristales, éste puede ser heterogéneo para ondas ultrasónicas. Si los granos están orientados al azar como en el caso de un material en que el cristal concerniente tiene diferentes propiedades elásticas, consecuentemente tendrá velocidad sonora en diferentes direcciones, es el caso llamado "anisotrópico". En el caso de metales, a menudo la anisotropía elástica es regla, pero en diferentes metales esto se manifiesta en distintos grados.

En un material que tiene grano grande, comparado con la longitud

de onda disipada, esta puede ser visualizada geométricamente, esto es que sobre un límite oblicuo la onda es partida en varios tipos de onda reflejada y transmitida. Este proceso se repite para cada onda en el próximo grano límite. En los rangos de frecuencia usados en prueba de materiales, el tamaño del grano es usualmente más pequeño que la longitud de onda.

La segunda causa de la atenuación o sea la absorción, es una conversión directa de energía sonora en calor. La absorción puede ser entendida como un modo de efecto de rompimiento de las oscilaciones de las partículas.

Ambas pérdidas son conjuntos de limitaciones de las pruebas de materiales, pero que tienen caminos ligeramente diferentes. La absorción pura disminuye la energía transmitida o el eco. Al actuar este efecto, el voltaje transmitido y la amplificación, pueden ser incrementados; o la baja absorción a bajas frecuencias puede ser explotada por este propósito.

El sonido ejerce una presión que se denomina "presión sonora" y que se entiende como el efecto mecánico producido por el desplazamiento de las partículas al oscilar. Esta presión producida por una onda plana, decrece únicamente como un resultado de la atenuación y para propósitos de cálculo puede ser escrita en la siguiente forma de función exponencial:

$$P = P_0 e^{-\alpha d} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$P_0$  y  $P$  son las presiones sonoras inicial y final respectivamente, de una sección de longitud  $d$  y con un coeficiente de atenuación  $\alpha$ .

Algunas veces  $\alpha$  es referido a la intensidad o sea la cantidad media de energía transportada por la onda, por unidad de superficie y por unidad de tiempo. En este caso se le llama  $\alpha_I$ , pudiéndose escribir la atenuación de la intensidad de la siguiente manera:

$$I = I_0 e^{-\alpha_I d} \quad \dots \dots \dots (7)$$

Ya que la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión sonora, se tiene:

$$\frac{-\alpha_I d}{e} = \frac{-2\alpha d}{e}$$

entonces:

$$\alpha_I = 2 \alpha$$

El logaritmo natural de la ecuación (6) da:

$$\alpha d = \ln \frac{P_0}{P} \quad \text{Np} \quad \dots \dots \dots (8)$$

Esta es la propiedad de atenuación o la atenuación total sobre la distancia  $d$ , es una expresión en forma neperiana. El coeficiente de atenuación puede ser dado en neper/cm. Siguiendo las mediciones prácticas se usan preferentemente otras unidades, por ejemplo: decibel/mm.

La medida decibel es obtenida si en la ecuación (8) se cambian los

logaritmos naturales por logaritmos de base 10 y multiplicando por 20:

$$\alpha \approx 20 \log \frac{P}{P_0} \text{ dB} \dots \dots \dots (8)$$

Ya que  $\log x = 0.434 \ln x$ , la unidad puede ser convertida en otras unidades de la siguiente manera:

Valor numérico en decibeles = 0.68 valor numérico en neper.

Si el coeficiente es referido a la unidad de longitud mm, los valores numéricos de dB/mm y Neper/cm, son más fáciles de recordar.

Valor numérico en dB/mm = 0.67 valor numérico en Np/cm .

$\alpha$  estará dado a menudo en unidades del orden  $10^{-3}$  dB/mm, debido a que el rango de frecuencia influye en los materiales en cuestión, los valores numéricos que aproximadamente están entre uno o varios cientos de este valor, pueden ser trabajados más fácilmente, por ejemplo: el agua como otros materiales tiene baja atenuación en valores de 1 a  $4 \times 10^{-3}$  dB/mm.

En vista de que en grandes espesores de capas, unas no tienen espacio de trabajo para las ondas planas, deben ser consideradas como ondas esféricas, tomando en cuenta el decrecimiento de la amplitud debido a la divergencia de la onda. La presión del sonido a una distancia (a) de la prueba, es entonces:

$$P = P_0 \pi \frac{H}{a} e^{-\alpha z} \dots \dots \dots (10)$$

En ciertas ocasiones, las ondas transversales son atenuadas más fuertemente que las ondas longitudinales, esto sucede particularmente en plásticos. Otra característica de la atenuación es que se incrementa con la temperatura.

Atenuación en Metales, Anisotropía y Estructura Fundida.

La atenuación, particularmente la dispersada en el material, es una de las dificultades que se encuentran al realizar las pruebas ultrasonías, y en ocasiones constituye un factor limitante de su aplicación, lo cual es de gran importancia práctica ya que por este medio se puede estimar la influencia de la estructura cristalina sobre la atenuación. Hasta aquí no se tiene aún una solución general, debido a que se encuentran dificultades teóricas y de medición, tales como la medida directa del grano, anisotropía y algunos otros parámetros que son difíciles de determinar. A menudo el tamaño del grano no está claramente definido, como lo demuestran secciones pulidas de aceros con sus estructuras complejas.

De acuerdo con Mason y McSkimin, la interpretación teórica de la correlación entre el coeficiente de atenuación, frecuencia y longitud de onda, tamaño  $D_g$  y anisotropía, pueden ser basados en principio asumiendo una verdadera absorción que es proporcional a la frecuencia; lo cual parece adecuado sobre las bases de medida a

bajas frecuencias, muy usadas en las pruebas de materiales. Si la frecuencia de atenuación es subdividida en un coeficiente de absorción y un coeficiente de expansión, se tiene:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s \dots \dots \dots (11)$$

$$\alpha_a = C_1 f^2 \dots \dots \dots (12)$$

Donde  $C_1$  es una constante que no está afectada por el tamaño del grano ni por la anisotropía. Por lo que se refiere a la relación de tamaño del grano y la longitud de onda, hay dos posibilidades para formular la dispersión: debido a que es pequeño  $D_k/\lambda$ , Mason y McSkimin aplicaron el concepto de Rayleigh concerniente a la dispersión de un defecto pequeño en la aglomeración de cristales y obtuvieron:

$$\alpha_s = C_2 F_A \frac{D_k^3 f^4}{\lambda^2} \quad (\text{tan grande como } D_k \ll \lambda) \dots \dots \dots (13)$$

De este modo se indica una dependencia sobre la tercera potencia del diámetro del grano, la cuarta potencia de la frecuencia, considerando la anisotropía como un factor  $F_A$ . Así en el caso del tungsteno y metales ligeros, el factor  $F_A$  es casi cero, por otra parte si el diámetro del grano es mucho más grande que la longitud de onda, el coeficiente de dispersión puede ser independiente de la frecuencia e inversamente proporcional al tamaño del grano:

$$\alpha = C_3 \frac{F}{A} \frac{1}{D_g} \quad (\text{tan grande como } D_g \gg \lambda) \dots (14)$$

Las mediciones parecen limitar a la primera variación aproximadamente a  $D_g < \lambda/3$  y la segunda a  $D_g < 3\lambda$ . Ya que  $D_g^3$  es proporcional al volumen del grano  $V$ , por lo tanto la fórmula puede ser escrita:

$$\alpha = C_1 \frac{1}{D_g^3} + \frac{C_2 F V}{4} \frac{1}{D_g} \text{ para } D_g < \lambda/3 \dots \dots \dots (15)$$

$$C_3 \frac{F}{A} \frac{1}{D_g} \text{ para } D_g > 3\lambda$$

Para pequeños y grandes diámetros de grano, la fórmula parece adecuada; el factor de dispersión desaparece si  $D_g/\lambda$  tiende a cero.

Medidas hechas sobre aluminio y magnesio, que son materiales con estructura simple y un definido tamaño de grano, confirman - cualitativamente la fórmula con constantes calculadas y factor anisotrópico.

Para fines prácticos de pruebas, el resultado puede ser resumido por las siguientes reglas:

1. - La dispersión producida por un material dado se incrementa rápidamente junto con el tamaño del grano, o decrece con la longitud de onda, si el tamaño del grano es más o menos  $1/10$  de la longitud de onda o más grande. A veces este efecto viene a ser un disturbio,

si el material se muestra lejos a la derecha de las series anisotrópicas.

2.- En estructuras complejas, el tamaño del grano puede ser -  
definido como la máxima dimensión estructural que pueda encontrar-  
se.

3.- Una estructura fundida produce atenuaciones más fuertes que  
una estructura deformada.

4.- La atenuación se reduce considerablemente, si se usan bajas  
frecuencias, pero este paso es solo promesa si los defectos más pe-  
queños son detectados y comparados con el tamaño del grano.



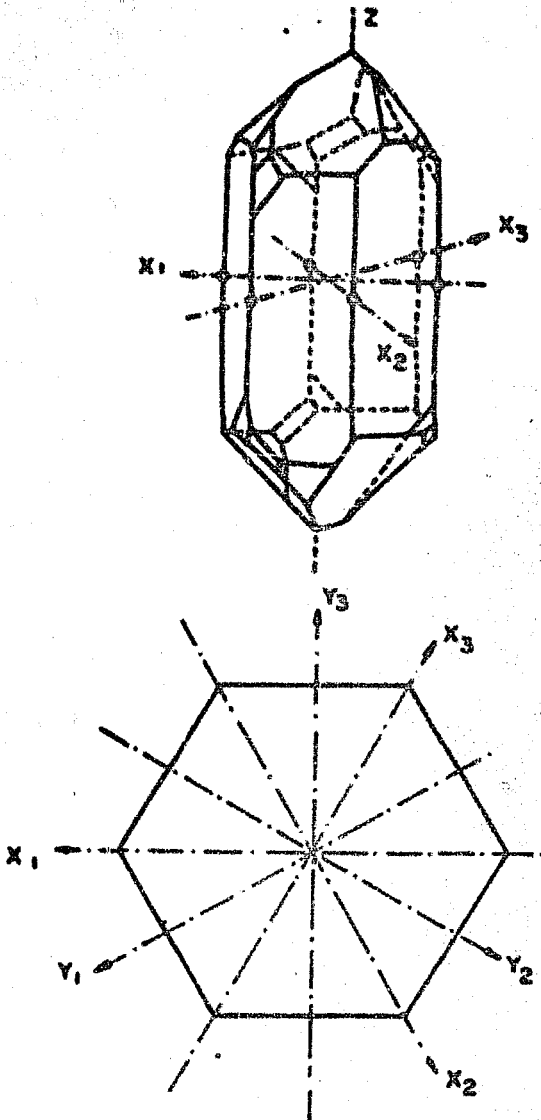
## GENERACION Y RECEPCION DE ONDAS ULTRASONICAS.

**Efecto Piezoeléctrico.** - La habilidad que posee un cristal para convertir energía eléctrica en mecánica se denomina efecto piezoeléctrico.

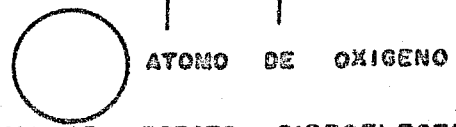
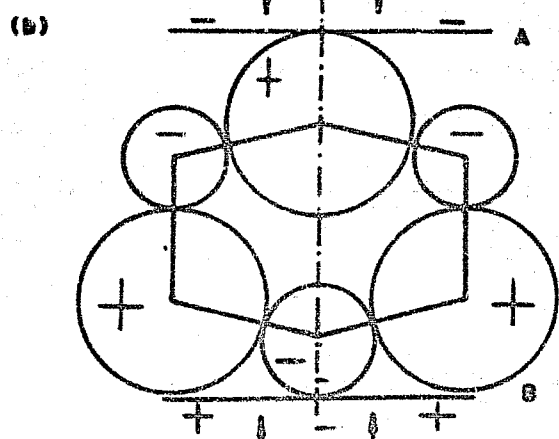
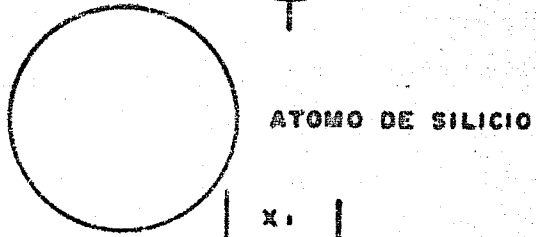
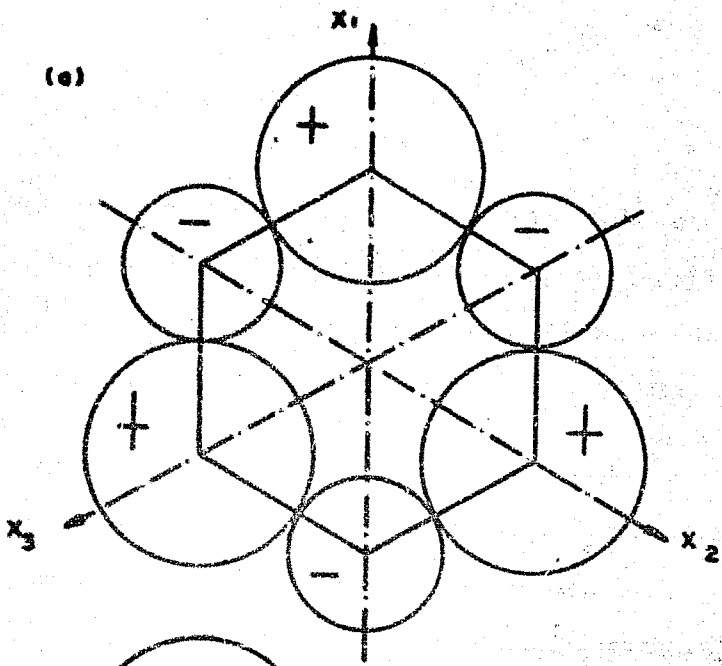
Los cristales de cuarzo muestran el efecto piezoeléctrico, por el cual aparecen cargas eléctricas sobre la superficie del cristal, cuando son sujetos a esfuerzos mecánicos. Este efecto es reversible, y si se aplica voltaje a través del cristal se observará una tensión mecánica. La relación entre las cantidades eléctricas (voltaje y carga) y las correspondientes cantidades mecánicas (tensión y compresión) son lineales.

La aparición del efecto piezoeléctrico proviene de la falta de simetría en la estructura de los cristales. La figura 5 ilustra un cristal de cuarzo en el cual hay tres conjuntos de ejes cristalográficos. Los que pasan a través de las orillas del prisma hexagonal son llamados ejes X (ejes eléctricos), y son perpendiculares a las paredes del prisma; los perpendiculares al eje X son llamados ejes Y (ejes mecánicos). El eje Z, que es perpendicular a los ejes X, Y, es llamado eje óptico.

El principio del efecto piezoeléctrico puede ser explicado con referencia a la figura 6 . La composición química del cuarzo



CRISTAL DE CUARZO CON SUS EJES CRISTALOGRAFICOS  
X, Y y Z.



MECANISMO DEL EFECTO PIEZOELECTRICO.

FIG. 6

esta dada por la fórmula  $\text{SiO}_2$  y puede ser representada por un arreglo de tres átomos de silicio y seis átomos de oxígeno. Los átomos de Si tienen cuatro cargas positivas cada uno de ellos, y los de O tienen dos cargas negativas cada uno. (figura 6a).

Atrás de los átomos de oxígeno hay otros tres que no están ilustrados en la figura. Si el cristal es comprimido a lo largo del eje X, un átomo de Si será prensado entre los átomos de O, y un átomo de oxígeno será prensado entre los átomos de silicio (figura 6b). De esta manera aparecerán cargas sobre los electrodos A y B. Si se aplica un voltaje entre estos electrodos, los átomos de silicio y oxígeno se moverán bajo la influencia de la resultante del campo eléctrico.

Este efecto se aprovecha en la fabricación de transductores los cuales están hechos usualmente en forma de un plato o disco. Las propiedades vibratorias de estos platos dependen de la manera como se corten, así como de la orientación respecto al eje cristalográfico.

El transductor piezoeléctrico como transmisor y receptor de ondas ultrasónicas. - Los transductores pueden enviar y recibir energía, esto es, si se colocan transductores en los extremos opuestos de una muestra, se puede usar un transductor para en-

viar energía (sonido) dentro de la muestra y usar el otro transductor para recibir el sonido, como se muestra en la figura 7 .

En pruebas ultrasónicas es una práctica común, usar el mismo transductor para enviar y recibir sonido. El sonido es transmitido en la muestra y retorna al transductor, como se muestra en la figura 8 .

El transductor en este caso, recibe energía momentáneamente de una fuente eléctrica, vibra por un momento, y de inmediato envía un pulso de sonido hacia la muestra, después deja de vibrar. El sonido así transmitido se refleja dentro de la muestra y regresa al transductor, el cual vibra nuevamente.

Un transductor inyecta un haz de energía dentro de la muestra y este se expande (diverge) al moverse dentro de ella. Esta divergencia es considerada en términos de energía como intensidad dentro del haz, la mayor concentración de energía siempre estará en el centro del haz, disminuirá en cuanto se aleja del centro.

En la figura 9, se muestran dos puntos en un haz. Ambos puntos están a la misma distancia del transductor, pudiendo observarse así la menor intensidad en el punto X con respecto al punto Y .

Usando un tamaño adecuado de transductor y de frecuencia, la divergencia del haz puede ser reducida hasta considerar que el haz

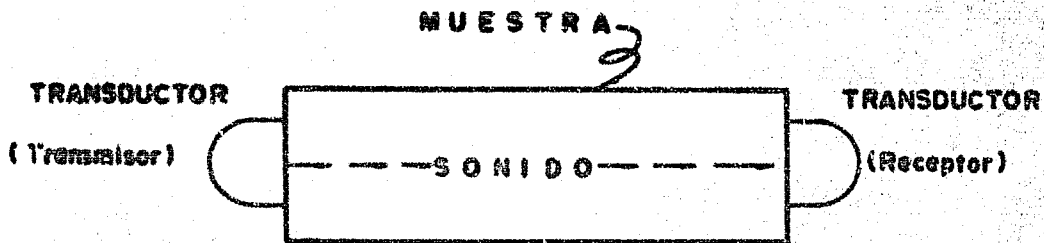


fig. 7

USO DE DOS TRANSDUCTORES

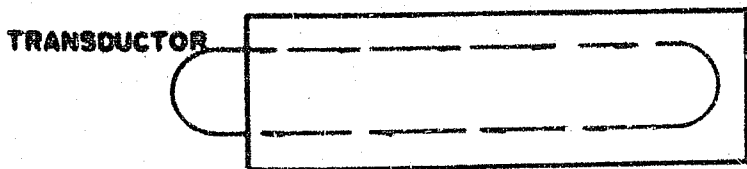


fig. 8

USO DEL TRANSDUCTOR COMO TRANSMISOR  
Y RECEPTOR

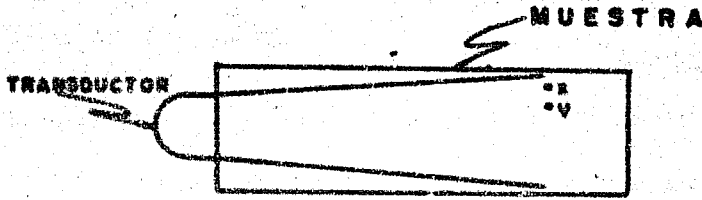


Fig. 9

PUNTOS DE REFERENCIA EN UNA MUESTRA PARA OBSERVAR LAS DIFERENTES INTENSIDADES

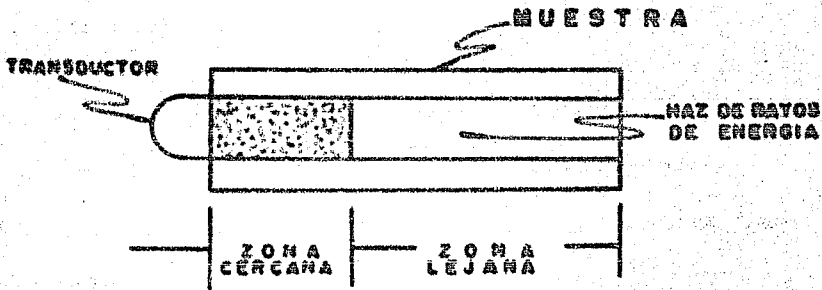


Fig. 10

DIVISION DE UN HAZ EN UNA MUESTRA

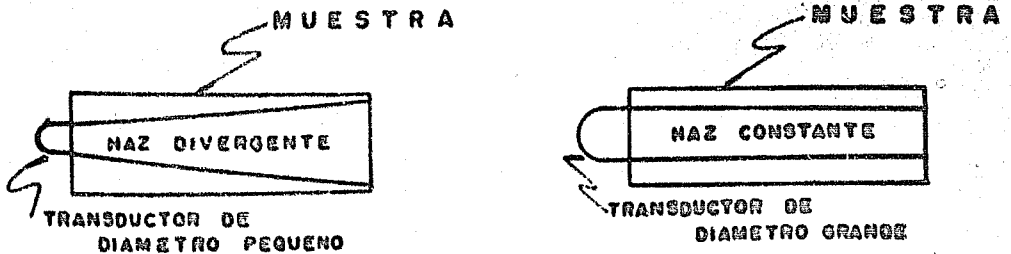


Fig. 11

DIFERENCIA ENTRE LOS TAMAÑOS DEL TRANSDUCTOR

es de forma recta. Esto hace visualizar el sonido ultrasónico como un haz estrecho de energía.

El haz se divide en dos zonas: cercana y lejana; en la lejana la intensidad disminuye rápidamente en cuanto la distancia al transductor aumenta debido a que la muestra absorbe energía.

En la zona cercana, se encuentra que la intensidad varía irregularmente debido a que se presentan áreas de alta y baja intensidad, figura 10.

Es importante hacer notar que el ancho útil de un transductor es menor que el ancho físico del mismo y además hay que tomar en cuenta que el diámetro del transductor afecta la divergencia dentro del medio.

En la figura 11 se puede observar que un transductor de diámetro más pequeño, tiene más ensanchamiento de haz que uno de diámetro mayor.

Cada transductor tiene una frecuencia específica para la cual está diseñado, con el objeto de que vibre con cierta facilidad. También responde sobre una banda de frecuencias que depende de la frecuencia de norma, ésta se denomina "ancho de banda"



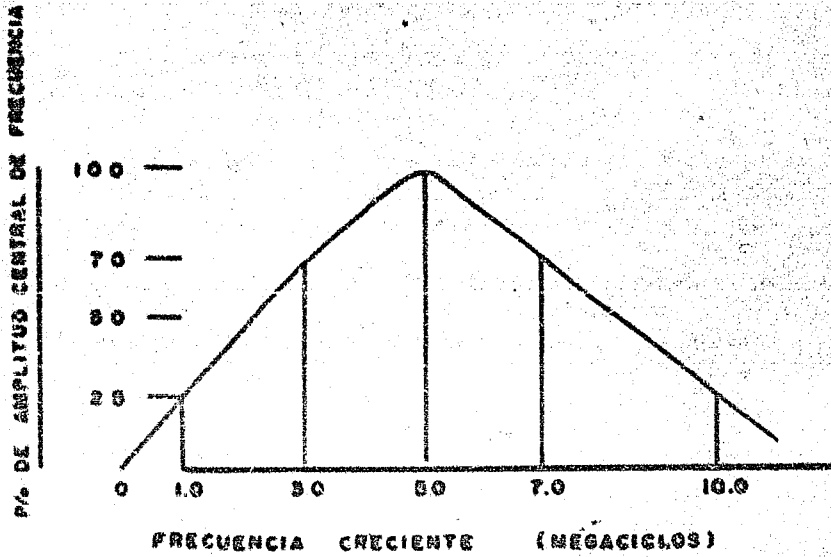


fig. 12

La fig.12 muestra la relación entre amplitud de la frecuencia y el ancho de la banda.

Valores dentro de 70% de amplitud de la frecuencia central están dentro de la banda.

Es de gran importancia en pruebas ultrasónicas conocer el fenómeno de intensidad, el cual se explica por medio de la figura 13.

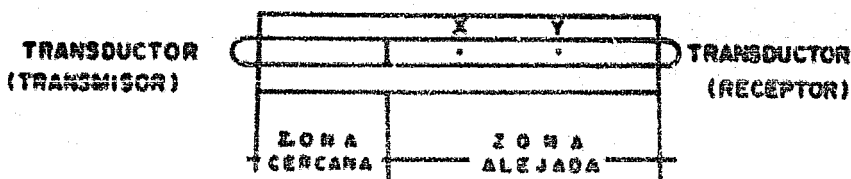


Fig. 13

La intensidad en el punto Y es menor que en el punto X.

Esta intensidad está referida a la fuerza relativa de un haz de sonido en un punto determinado. La cantidad de energía dada al transductor receptor es menor que la energía introducida en la muestra. Esta pérdida de energía es lo que se denomina "atenuación", y es lo que sucede a las vibraciones ultrasónicas cuando se mueven a través del material.

Otro fenómeno que se presenta en estas pruebas es la impedancia acústica, que es la resistencia del sonido de un material o medio, y que está definida como el producto de la densidad ( $\rho$ ) y la velocidad del sonido ( $V$ ) dentro de un material.

$$\text{Impedancia} = \rho V \dots \dots \dots (16)$$

La impedancia varía de un material a otro, dependiendo de la velocidad y densidad. La velocidad del sonido es constante para un medio dado y varía de un medio a otro.

A fin de hacer mínimo un desequilibrio de impedancia entre el transductor y el material de prueba, se utilizan acoplantes que pueden ser sólidos, semisólidos o líquidos, por ejemplo: agua, glicerina, aceite o grasa.

El uso de estos acoplantes trae como consecuencia:

1. - La renovación del aire entre el transductor y el material, reduciendo la relación de impedancia.
2. - La obtención de un medio para transferir las vibraciones del transductor al material de prueba.

Materiales piezoeléctricos. - Los materiales de uso más comunes en la fabricación de transductores son: Titanato de Bario, Meta-niobato de Plomo, Zirconato de Plomo, Zirconato Titanato de Plomo y Cuarzo (que tiene menor eficiencia para generar energía acústica).

La aplicación de la cerámica polarizada en la fabricación de transductores ha hecho más eficiente la generación de energía ultrasónica; por otra parte, los más eficientes receptores de energía ultrasónica son los transductores de sulfato de litio, los que tienen la ventaja de no averjuntarse y de ser poco afectados por productos químicos.

De esta breve exposición de materiales, se concluye que el uso

de un transductor de cerámica como generador y un transductor de sulfato de litio como receptor, son bastante convincentes para pruebas ultrasónicas.

## MÉTODOS Y EQUIPOS DE INSPECCION

En los equipos ultrasónicos se usan tres clases diferentes de transmisiones, que son:

1. - Pulso-eco
2. - Transmisión a través
3. - Resonancia

El principio de la prueba pulso-eco, mostrado en la figura 14, consiste en generar pulsos de sonido ultrasónico por medio del aparato e introducirlos a la muestra por medio del transductor. El sonido viaja a través del material y se refleja desde el lado opuesto hacia el transductor, el cual convierte la vibración sonora en energía eléctrica, el pulso que se refleja aparece en un tubo de rayos catódicos.

El sistema de transmisión a través, está basado en el uso de dos transductores: transmisor y receptor; la figura 15 ilustra en forma simplificada este sistema.

El sistema de resonancia consiste en la utilización de energía reflejada la que sirve para determinar la presencia de discontinuidades. En la determinación de esas discontinuidades se utiliza el fenómeno de resonancia u ondas estacionarias, éstas se producen cuando las ondas longitudinales se introducen a una muestra de espesor conocido. Si la frecuencia del sonido transmitido es tal, que

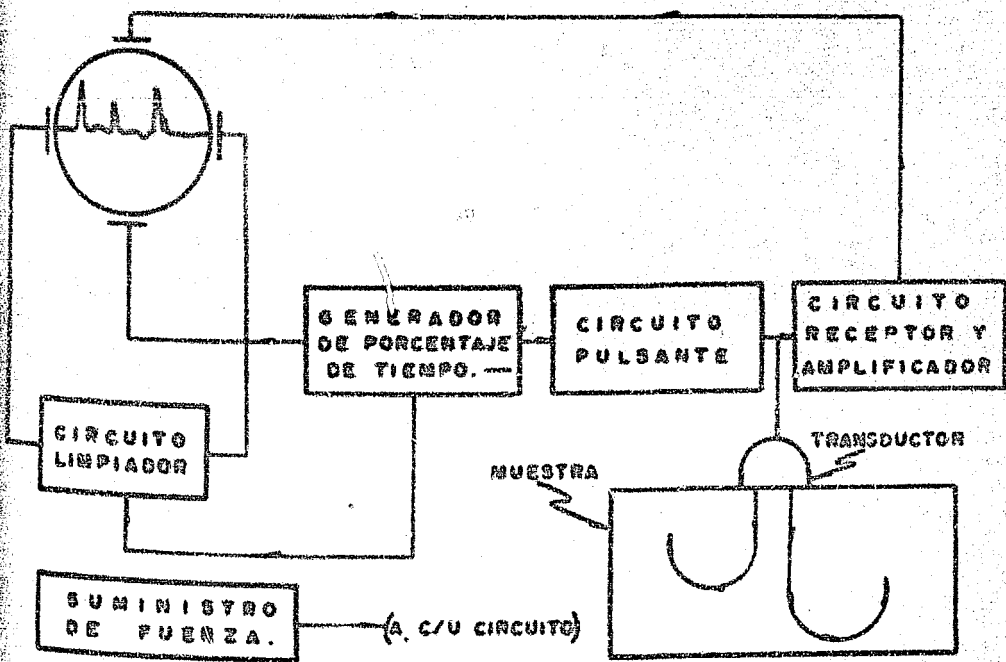
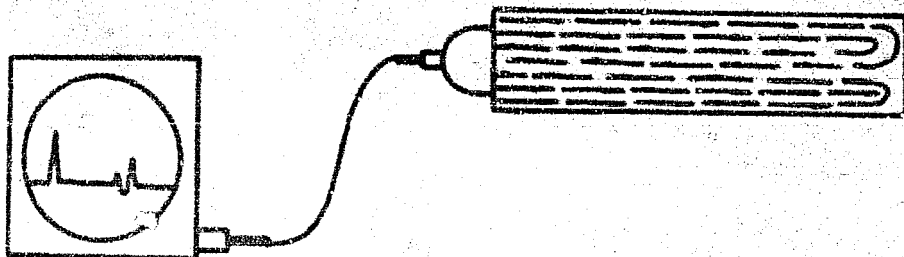


FIG. 14

PRINCIPIO DE LA PRUEBA PULSO-ECO

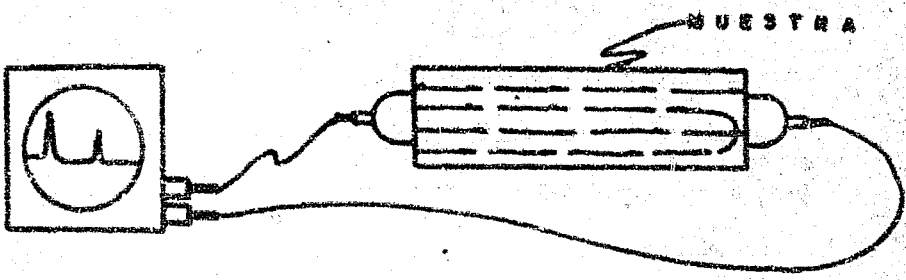


Fig. 15

PRINCIPIO DE LA PRUEBA DE TRANSMISION ATRAVES.

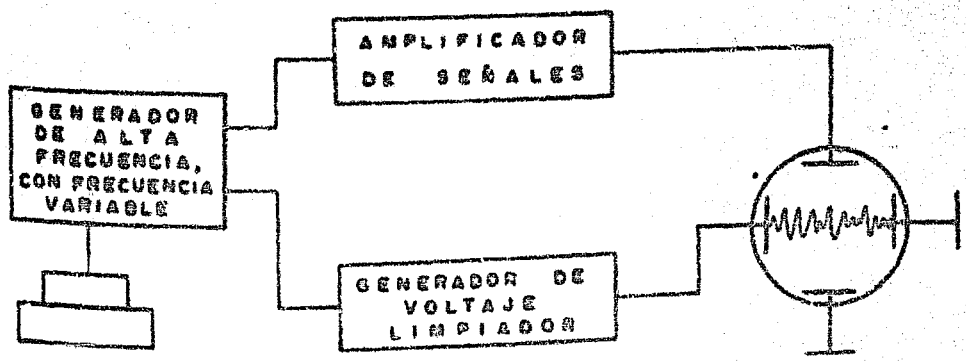
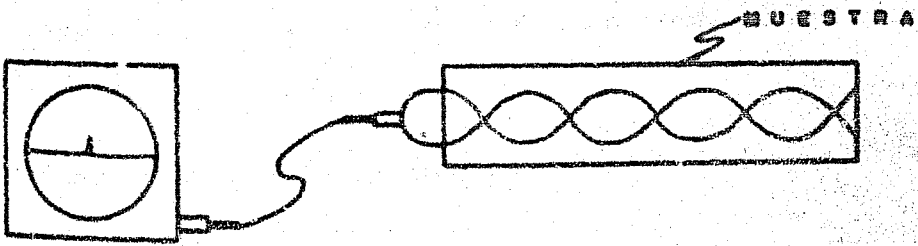


Fig. 16

PRINCIPIO DE LA PRUEBA DE RESONANCIA.

el espesor del material no tenga la mitad de una longitud de onda o múltiplos de ella, las reflexiones del lado opuesto no darán la condición de resonancia y por lo tanto, no habrá indicación en el instrumento. La figura 16 ilustra este sistema de prueba.

De los tres métodos mencionados, el que tiene mayor aplicación en la industria es el sistema pulso-eco, debido a la bondad del mismo y a la disponibilidad de los aparatos. Por lo tanto, para los fines que motiva este estudio, será este método el que se trate con mayor detalle.

Para el método pulso-eco existen dos tipos de prueba que son: el de contacto e inmersión.

Las pruebas de contacto consisten en colocar el transductor en contacto directo con las muestras y para llevarlas a cabo se requieren los siguientes objetos:

1. - Un instrumento de prueba.
2. - Un acoplante adecuado.
3. - Un espécimen de prueba.

Este procedimiento de prueba se ilustra en la figura. 17.

La prueba de inmersión consiste en colocar en un medio líquido (generalmente agua) la muestra y el transductor. El líquido actúa



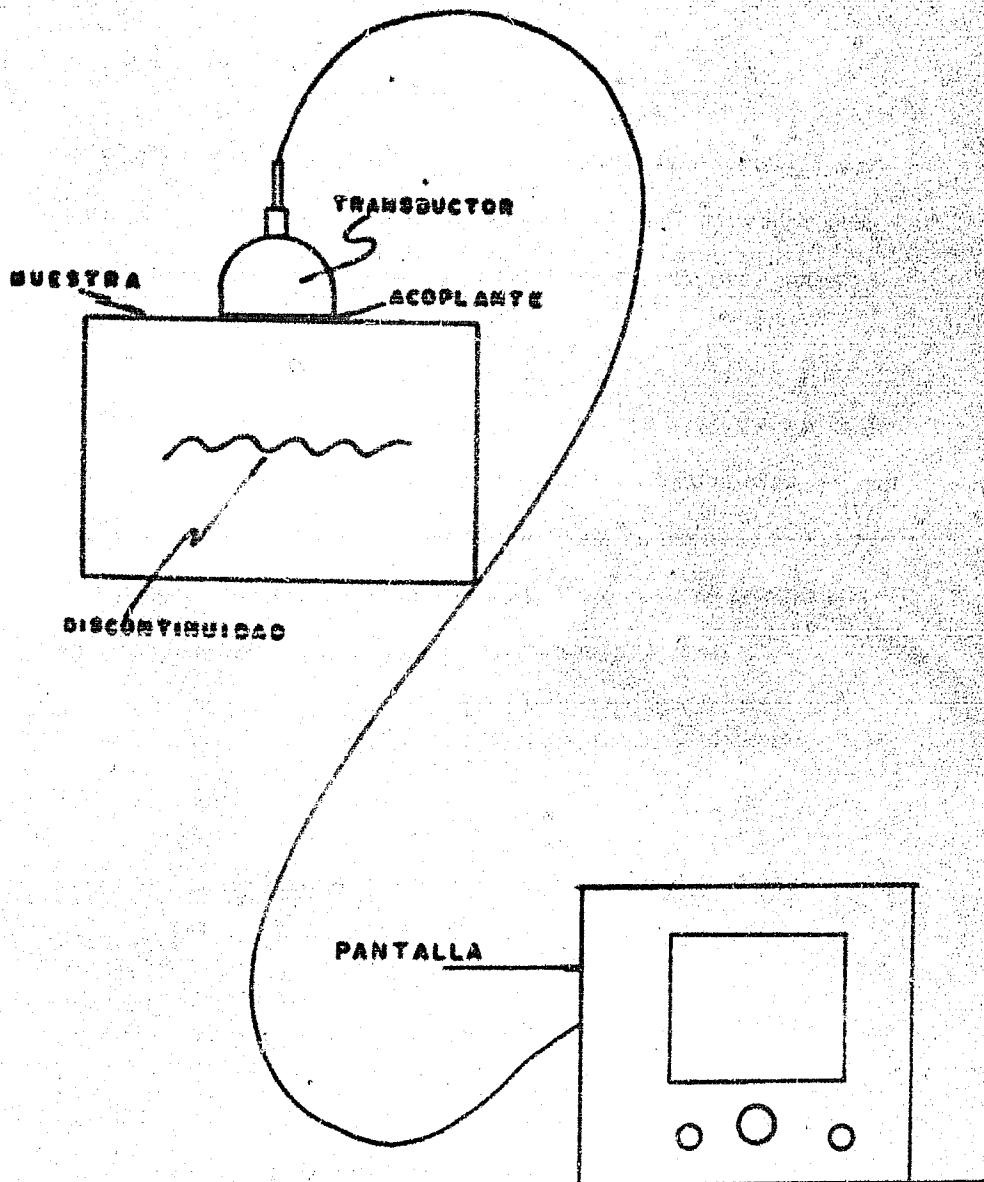


Fig. 17

ARREGLO PARA ILUSTRAR EL METODO DE CONTACTO.

como acoplante del transductor en la transmisión de energía a la muestra. Para efectuar la prueba se hace uso de un tanque grande para acomodar la muestra y el transductor, como se muestra en la figura 18.

Las pruebas pulso-eco son particularmente adaptables a la determinación de la integridad estructural de los materiales, ya que por este medio se detectan discontinuidades en acabado de artículos y medida de espesores en general. Las razones por las cuales es conveniente utilizar este tipo de pruebas, son:

1. - Alta sensibilidad, lo cual permite detectar defectos pequeños.
2. - El poder de penetración permite examinar materiales muy delgados.
3. - La precisión para determinar la posición de la discontinuidad.
4. - Respuesta rápida automatizada.
5. - Se requiere únicamente acceso a una de las superficies de la muestra.

Las limitaciones básicas de estas pruebas son:

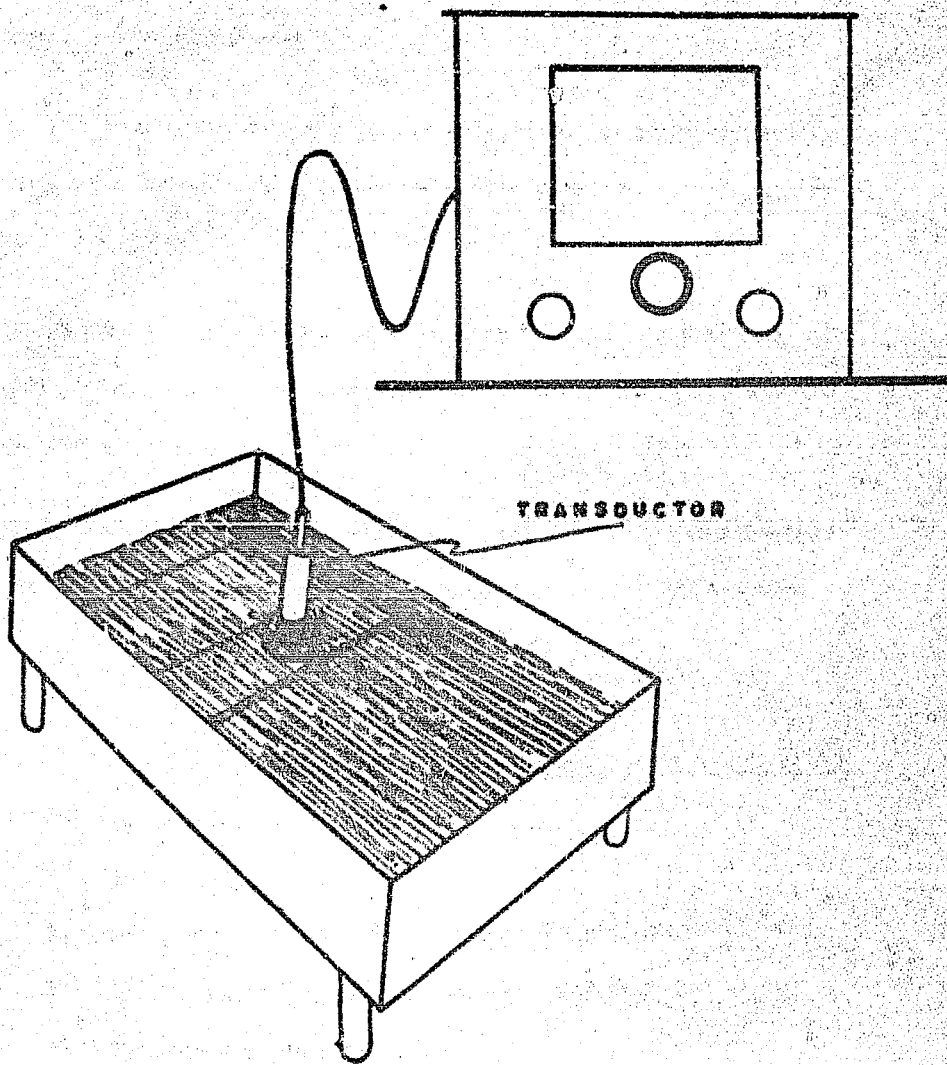


FIG. 13

ARREGLO PARA ILUSTRAR EL METODO DE INMERSION.

1. - La irregularidad geométrica de la muestra (tamaño, contorno, complejidad, etc.)

2. - Una estructura interna no apropiada, tal como el tamaño del grano, porosidad, inclusiones o precipitados finos dispersos en la muestra.

Entre las ventajas que caracterizan al sistema pulso-eco, además de las cinco ya mencionadas y en comparación con los otros dos métodos son:

1. - No se tienen problemas de orientación por el uso de transductores separados como en el método de transmisión a través.

2. - Es más preciso que el método de resonancia.

#### Ventajas y desventajas de las pruebas de contacto e inmersión.

##### Prueba de contacto

1. - Es portátil.
2. - Requiere un mínimo de instrumentos y accesorios.
3. - Tiene capacidad para pruebas de ondas de superficie.
4. - Tiene mayor penetración.
5. - La rápida ejecución de la prueba en muestras grandes.

##### Desventajas de la prueba de contacto:

1. - La difícil uniformidad de acoplamiento entre la superficie

de prueba y el transductor, causa pérdidas de sensibilidad.

2. - Los acoplantes dejan una capa grasosa que después hay que remover.

3. - Tiene una zona muerta, mayor en la muestra, que en las pruebas de inmersión, debido a la saturación del tubo de rayos catódicos por el pulso inicial.

4. - No se puede variar el ángulo del transductor como sucede en las pruebas de inmersión.

#### Ventajas de la prueba de inmersión

1. - Permite el uso de frecuencias más altas, lo cual hace posible pruebas más rápidas que dan mayor sensibilidad a discontinuidades pequeñas.

2. - Fácil variación del ángulo del transductor.

3. - Se pueden probar muestras de forma irregular.

4. - Mejor resolución en discontinuidades cercanas a la superficie.

5. - Puede ser automático en exámen y registro.

#### Desventajas de la prueba de inmersión.

1. - Estar constituido de un gran número de instrumentos y accesorios.

2. - Presenta una gran reducción de la amplitud de la indicación de la discontinuidad debida a la cantidad de energía sonora reflejada en la interfase agua-muestra.

3. - No es posible introducir muestras grandes en el tanque.

De lo anterior se deduce que la prueba más apropiada para inspeccionar equipos instalados, es la de contacto.

Factores que afectan a las pruebas ultrasónicas.

- 1. - Velocidad del sonido en la muestra.
- 2. - Impedancia acústica del material.
- 3. - Forma de la muestra o condición de la superficie.
- 4. - Atenuación del sonido en la muestra y nivel de ruido.

Para que la aplicación de una prueba ultrasónica sea aceptable, es necesario cubrir los siguientes requisitos:

- 1. - Clara definición de la prueba a desarrollar.
- 2. - Operadores bien entrenados y supervisados.
- 3. - Bloques de referencia estándares y adecuados, o muestras de referencia para compararlas con el material en estudio.
- 4. - Un buen procedimiento de prueba.
- 5. - Estándares realísticos aceptables.

Los bloques de referencia mencionados, deben de contener los siguientes requisitos:

- a). - Adaptarse a la aleación y condiciones iniciales del material por probar.
- b). - Poseer un determinado tratamiento térmico.
- c). - Soportar un cierto grado de trabajo en frío o caliente.

Las características que se investigan en las discontinuidades que se presentan en una muestra, están definidas por:

1. - La profundidad de la discontinuidad en la muestra.
2. - El tamaño y la forma de la discontinuidad.
3. - La impedancia acústica de la discontinuidad en relación a la muestra.
4. - La orientación de la discontinuidad con respecto a la superficie frontal de la muestra.

#### Construcción y Operación de un Instrumento Pulso-eco

Básicamente un instrumento pulso-eco consiste, de un osciloscopio con generadores correlacionados para los voltajes de desviación, unidad transmissora, un amplificador, y necesariamente conectado a una fuente de poder o batería.

Los pulsos de voltaje eléctrico producidos por el transmisor y mandados al través de un cable, son suplidos por vibraciones mecánicas al efectuar la prueba. Siguiendo la misma trayectoria del eco, los pulsos eléctricos llegan al instrumento, en donde son amplificados y proyectados sobre la pantalla de un tubo de rayos catódicos.

Para entender mejor la construcción y operación de este aparato se hace uso de la figura 10.

La sección de repaso, genera voltajes de desviación para el tubo de rayos catódicos, y simultáneamente el control de voltaje

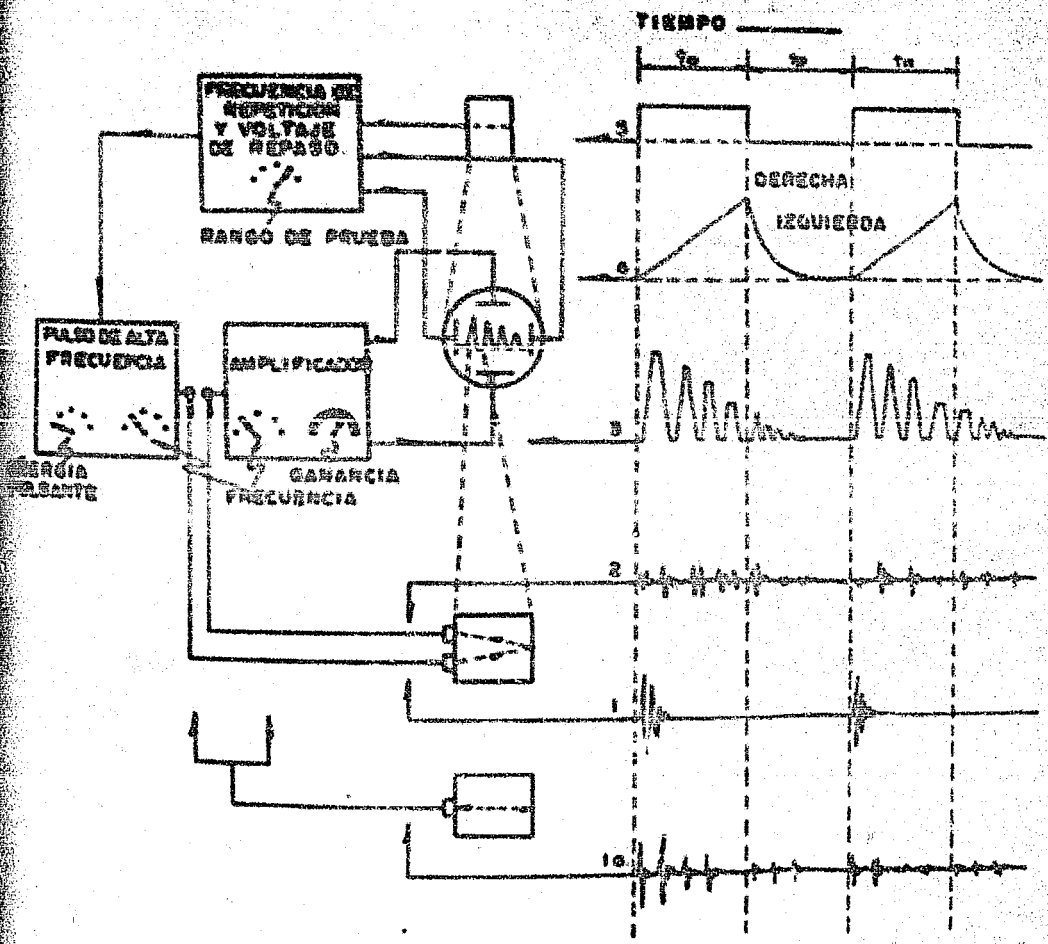


Fig. 19

SISTEMA BASICO DE LAS PRUEBAS PULSO-ECO.



del transmisor de alta frecuencia transmite periódicamente la frecuencia de repetición, mediante el cual, el transmisor inyecta pulsos de alta frecuencia a la prueba. La secuencia del proceso es precisamente la que se muestra en la figura 19, en la que 1 indica el voltaje del transmisor.

La desviación de tiempo para el tubo electrostático de rayos catódicos, está usualmente en un lugar simétrico sobre los dos platos desviadores del tiempo base, ambos reciben el mismo voltaje pero con signo opuesto. Sólo los tubos de pequeña proyección en instrumentos más pequeños, usan desviaciones asimétricas, que requiere diseño especial del tubo para evitar la distorsión excesiva y la falta de definición.

El número 4 de la figura 19, indica la secuencia del voltaje de repaso, en el cual un período comprende el tiempo de operación y el intervalo. Durante el tiempo de operación, el voltaje de repaso se eleva linealmente y de este modo se desvía el rayo electrónico de izquierda a derecha. En un intervalo de tiempo arbitrario, con relación al tiempo inicial, regresa el voltaje de repaso. Para prevenir que el regreso del rayo produzca un trazo en la pantalla, la sección de repaso controla simultáneamente la brillantez del rayo por medio de una onda de voltaje cuadrada, de tal manera que la brillantez sólo permanece durante el período de operación (número 5, figura 19).

La imagen 3 de la figura 19 muestra los datos recibidos del amplificador, que son simétricamente alimentados al plato de medición para la desviación vertical. Estos datos constan de las marcas causadas por el movimiento del pulso transmitido y los ecos subsecuentes. El tiempo de tránsito está determinado por el espesor del espécimen de prueba. La duración del tiempo de operación depende del rango de prueba y está ajustado con la unidad de voltaje de repaso, y puede ser continuo, por pasos o por el uso de ambos métodos de control.

#### Unidad transmisora.

La unidad transmisora recibe el pulso controlado desde la sección de repaso, ligeramente después de la salida ascendente del voltaje de desviación y control de brillantez, de tal manera que el aumento del pulso transmitido, aparece sobre la pantalla ligeramente a la derecha del tiempo base. El aumento del pulso transmitido sirve como cero al tiempo dilatado o escala de espesores.

La unidad transmisora más sencilla es una válvula llena de gas, como el llamado tiratrón, que genera un voltaje surgido de una súbita descarga de un capacitor cargado de 100 a 1,000 volts.

La disminución de la amplitud de las ondas puede ser incre--

mentadas por una desviación paralela a la bobina de inducción del circuito resonante, que permite cambiar la amplitud de la oscilación, la resistencia del pulso juntamente con la longitud del pulso.

En resumen el pulso del tiratrón es usado primeramente para abrir una válvula de salida de alto poder y así obtener una forma similar del pulso transmitido. A menudo se tiene la ventaja de que la válvula asume una muy alta impedancia, por lo cual, el tiratrón produce una alta desionización que disminuye la impedancia.

En aplicaciones que requieren pulsos largos; estos pueden ser producidos por medio de un oscilador, o por el paso de voltaje de un transmisor oscilador continuo durante el tiempo de transmisión del pulso.

En ocasiones la impedancia de la prueba depende mucho del material piezoeléctrico usado, por ejemplo: el titanato de bario tiene muy baja impedancia, en cambio, el cuarzo tiene muy alta impedancia. Para solucionar este problema, se instala en el probador junto con la bobina que determina la frecuencia, un reactor de impedancia en forma de un autotransformador.

#### Amplificador.

El pulso normal del transmisor a la salida, tiene un voltaje de 100 a 1,000 volts y el voltaje del eco a la entrada del amplificador

es mucho más pequeño, aproximadamente de  $1/1,000$  a 1 volt. Ya que el tubo de rayos catódicos requiere voltajes de unos 100 volts para su modulación total, el amplificador debe tener una ganancia de aproximadamente 100 decibales.

Los pulsos se proyectan en la pantalla en forma de alta frecuencia, es decir, con deflexión a ambos lados de una línea central cero, como se muestra en 1-a de la figura 18, o en la forma corregida mostrada sobre la línea cero (3 de la figura 18).

Los trazos cortos que se presentan en la pantalla, son difíciles de interpretar, por lo cual se tiene la necesidad de amplificarlos, esto se logra conectando al amplificador un oscilador heterodino, el que le da ganancia a la longitud de onda, por variación de la posición de la respuesta del eco o la del pulso inicial.

El amplificador de alta frecuencia puede ser del tipo de banda ancha, es decir, cubriendo todas las frecuencias ultrasónicas que ocurren, por ejemplo de 1 a 10 MHz. Esto produce interrupciones demastado innecesarias al se cambia la frecuencia.

Se tiene la ventaja de que los pulsos cortos con su banda de frecuencia ancha, pasan a través de la banda con pequeña distorsión. Pero también se tienen desventajas, tales como la amplificación de ruidos, lo cual limita la posibilidad de amplificación.

Si el tiempo base sobre la pantalla indica claramente ruido, cualquier amplificación adicional es inútil, ya que el ruido enmascara ecos pequeños.

Un amplificador de banda angosta permite una alta amplificación. Además los armónicos de la frecuencia de prueba generalmente predominan en la banda de frecuencia de ecos, esto es, cuando se compara con los armónicos de la onda sonora transmitida, particularmente si ellos son causados por muy pequeños puntos de interferencia, preferentemente atrás de las altas frecuencias. Estos producen ruidos indeseables, los cuales se detectan a lo largo de la pantalla en forma de un cierto contraste.

Una de las características de la amplificación es la de mostrar la altura del trazo del eco como una función del voltaje de entrada. Es conveniente tener un patrón lineal de comparación tal como el mostrado en la figura 20-a, ya que esto hace posible identificar el tamaño de las fallas y localizar profundidad de las del mismo tipo con base a la altura del eco.

En esta gráfica (figura 20) se puede observar:

- a). - La amplificación lineal.
- b). - La amplificación a la entrada.
- c). - La amplificación logarítmica.

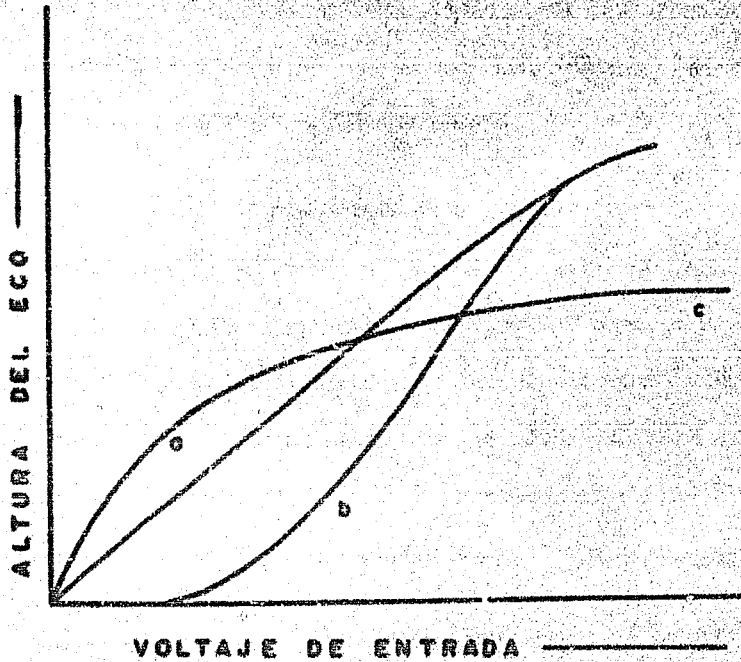


Fig. 20

GRAFICA DE AMPLIFICACION.

Las condiciones de la línea (b figura 20) muestra que el voltaje del eco recibido puede ser indicado en su totalidad, después de aventajar un cierto voltaje de entrada. Esto puede causar en ocasiones malas interpretaciones si se tienen bajos voltajes, los que se eliminan con la experiencia del operador.

Es de uso común en la evaluación de la altura del eco usar métodos electrónicos de medición, en los cuales la máxima amplificación dada es reducida por medio de un calibrador atenuador de frecuencia independiente. En la medición, todo eco se ajusta a un patrón arbitrario idéntico para cada uno de los casos; la altura marcada en la escala de la pantalla es aproximadamente medio nivel, y el valor del atenuador se lee en decibeles.

Con estos aparatos, es posible comparar alturas de los ecos en una relación de 1:10,000 (-80 decibeles), con una presión aproximada de 1% (-0.1 decibeles).

En un amplificador se puede eliminar defectos tales como ilusiones en la pantalla, generando un pulso electrónico artificial de atravesamiento variable y produciendo una desviación continua desde la derecha hacia el pulso transmitido o hacia el eco.

**Probadores.**

Los probadores contienen transductores piezoeléctricos que con-

vienen voltajes de alta frecuencia en ondas ultrasónicas. Estos probadores pueden ser de haz recto o angular.

Los probadores de haz recto, introducen la onda ultrasónica en el espécimen, a 90° respecto a la superficie frontal. Mediante la figura 21 se ejemplifica este tipo de probadores. Obsérvese la transmisión de la señal a la muestra y la reflexión de una discontinuidad en la pantalla.

En el caso de pruebas de ángulo, el transductor está adaptado a una especie de cuña, que es una cámara de Lucita, mediante la cual el sonido transmitido se introduce a la muestra en un ángulo dado respecto a la superficie frontal. Como se observa en la figura 22.

El ángulo de incidencia de las ondas sonoras en la superficie, está determinado por el ángulo fijo de la Lucita.

Para calcular el ángulo requerido del transductor, es necesario:

- 1.- Conocer el ángulo deseado en la muestra.
- 2.- Conocer la velocidad del sonido en la Lucita, y
- 3.- Conocer la velocidad del sonido en el material.

El ángulo de refracción es menor, conforme la velocidad del sonido se va haciendo igual en la muestra como en la Lucita.



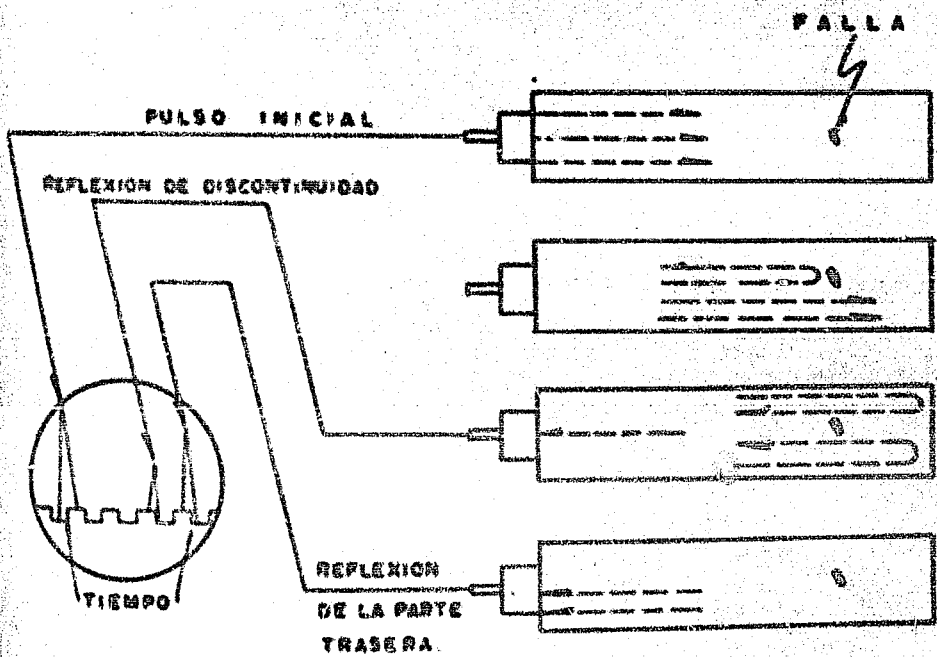
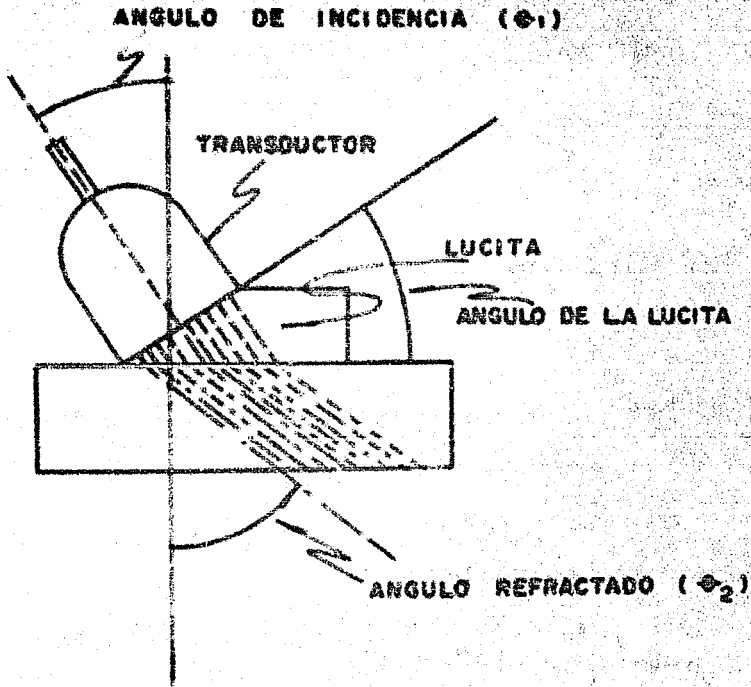


Fig. 21

INTRODUCCION DE LA ONDA ULTRASONICA EN LAS MUESTRAS MEDIANTE EL USO DE UN PROBADOR DE HAZ RECTO.



ARREGLO PARA DEMOSTRAR LAS PRUEBAS ANGULARES.

fig. 28

Esto se interpreta de acuerdo con la ley de Snell, expresada en la forma siguiente:

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{V_2 \text{ sen } \theta_1}{V_1} \dots \dots \dots (17)$$

en donde:  $V_1$  velocidad en el primer medio

$V_2$  velocidad en el segundo medio

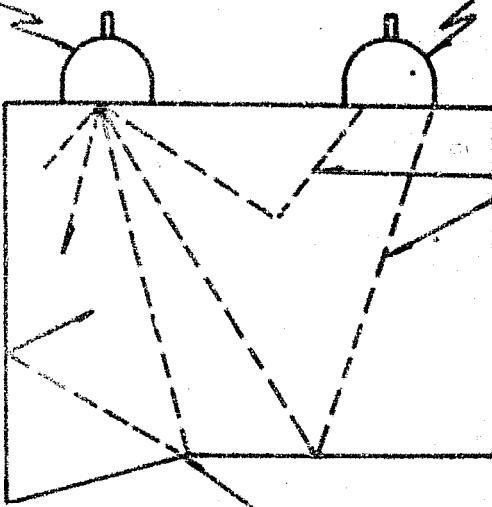
Conforme esta relación se aproxima a 1, el seno de los dos ángulos se aproxima a la igualdad.

Cuando se escoge un ángulo para la Lucita, es necesario evitar aquellos que produzcan ondas longitudinales y cortantes al mismo tiempo, ya que es muy difícil interpretar sus indicaciones en la pantalla.

Cuando es necesario localizar fallas cercanas a la superficie, se usan dos transductores, el principio básico de esta prueba está mostrado en la figura 23 .

TRANSDUCTOR TRANSMISOR

TRANSDUCTOR RECEPTOR

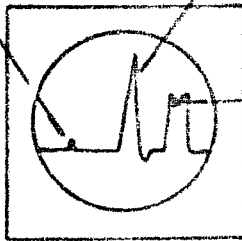


ECOS DESDE SUPERFICIES  
PARALELAS A LA SUPER-  
FICIE, REGRESAN AL —  
TRANSDUCTOR. —

RAYO ULTRASONICO REFLECTADO LEJOS  
DEL TRANSDUCTOR POR UNA SUPERFICIE  
NO PARALELA A LA SUPERFICIE ENTRAN-  
TE. —

PULSO TRANSMITIDO

FALLA



REFLEXION DE LA  
SUPERFICIE TRASERA

fig. 25

USO DE DOS TRANSDUCTORES, Y SUSEÑAL PRODUCIDA  
EN LA PANTALLA.

## APLICACIONES

Las pruebas ultrasónicas pueden ser aplicadas a materiales de forma, tamaño y composición variables, y aún aquéllos de diferente estructura interna. La efectividad de estas pruebas es limitada por la forma y rugosidad exterior de los materiales; por lo que en ocasiones es necesario preparar la parte superficial de los materiales para poder aplicar las pruebas.

Una aplicación en la que se aprovecha la prueba ultrasónica es en la inspección de materiales de fundición utilizando ondas de baja frecuencia, debido a que éstas no se dispersan en la estructura granular gruesa del material fundido.

Pruebas de forjados. - Se llevan a cabo con frecuencia de uno a cinco megaciclos, con la onda de sonido normal a la superficie y a 90 grados de la dirección de máximo trabajo. En estos materiales las fallas aparecen por lo general paralelas a la superficie de prueba y presentan la mejor orientación para reflejar las ondas sonoras.

Pruebas de barras. - Se verifican en forma similar a la de los forjados. Esta prueba puede aplicarse desde el extremo de la barra por probar, en tal forma que la onda se transmita a través de su longitud. Si las condiciones lo permiten deberán probarse los dos extremos de la barra para mayor seguridad de la prueba. Cuando se detecten buenas reflexiones posteriores al enviar la onda a lo

largo de la barra (sin indicaciones de discontinuidad), éstas podrán ser consideradas sin discontinuidades gruesas.

Una prueba de extremo a extremo con una reflexión posterior grande sin indicaciones largas de discontinuidad, no asegura que la barra no tenga discontinuidades. Estas pueden estar orientadas paralelamente a la longitud de la barra y para su detección se requiere, en ocasiones, la aplicación de otros métodos.

Otra manera de probar barras es mediante la aplicación del transductor en posición lateral a la barra, de tal manera que el sonido transmitido se refleje en el lado opuesto. La aplicación de este método depende de una buena superficie de contacto entre la barra y el transductor, esto se logra en ocasiones mediante el uso de zapatas curvas, las que se ajustan en forma apropiada a la barra.

Inspección de placas. - La técnica angular es útil en la inspección de placas. Estas inclusive pueden ser inspeccionadas completamente en un tiempo corto mediante la introducción angular del sonido en lados opuestos a la placa, como se muestra en la figura 24.

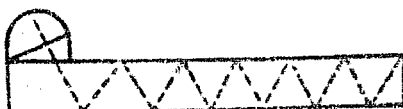


fig. 24

Por este método pueden ser encontradas varias discontinuidades, sólo se dificultan aquellas fallas que son paralelas a la superficie.

Si la placa tiene discontinuidades grandes no es conveniente perder tiempo en la aplicación de la técnica angular.

Las discontinuidades localizadas, se comparan con un estándar y de esta comparación se decide si la muestra probada se rechaza o no. Este estándar es una probeta con un agujero de referencia, de tal modo que la amplitud del sonido reflejado desde una falla o discontinuidad sea de tamaño conocido.

Otra forma de inspeccionar placas, es moviendo el transductor a lo largo de las cuatro esquinas de la placa, en estas condiciones la falla es localizada usando marcadores en la pantalla para medir la distancia, o moviendo los dedos a lo largo de la placa frente al transductor. Este movimiento causa una pequeña señal en la pantalla que puede ser en dirección de la discontinuidad. Cuando el sonido producido por los dedos esté directamente sobre la falla, ésta se amortigua y produce generalmente una señal en la pantalla.

Para probar materiales cuyos espesores tengan aproximadamente la mitad de una longitud de onda (de las ondas de superficie), se utilizan transductores de ángulo variable, con el objeto de producir ondas de placa.

Para especímenes con fallas superficiales, se utiliza la técnica de ondas de superficie. Mediante este método es posible hacer el examen en forma longitudinal y transversal. Si las superficies son curvas, las ondas se reflejan en el lado opuesto de la placa.

### Pruebas de tubería

En estas pruebas el sonido refractado recorre la pared del tubo, como se muestra en la figura 25.

La propagación del sonido es zigzagueando, debido a las ondas cortantes o longitudinales. Las ondas comunmente usadas son las longitudinales, ya que las cortantes no siguen la curvatura del espécimen.

•

Las fallas que se localizan en la muestra se detectan en la pantalla, tal y como se muestra en la figura 26, en la cual se puede observar que a menor de 180 grados las fallas aparecen a la izquierda de la indicación de revolución y a más de 180 grados aparecen a la derecha.

Es conveniente hacer notar que los estándares de tuberías no existen en forma comercial, por lo cual es necesario prepararlos previamente.

Estos estándares deben ser del mismo material y de calidad ultrabónica igual a la muestra, en la que se preparan agujeros de referencia



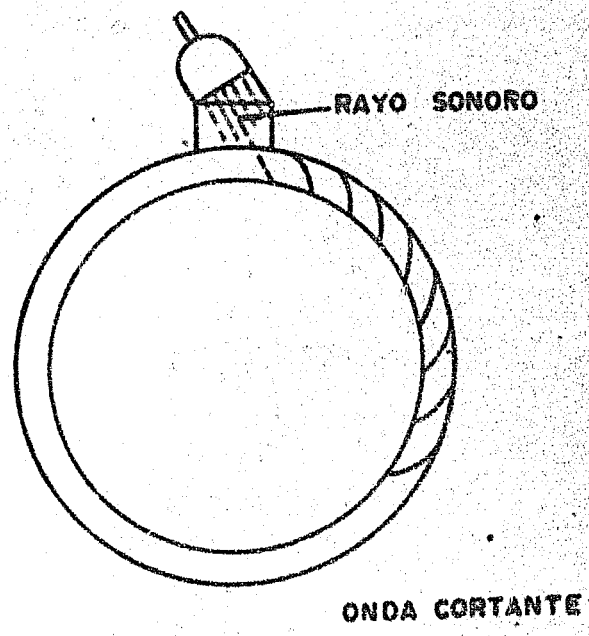
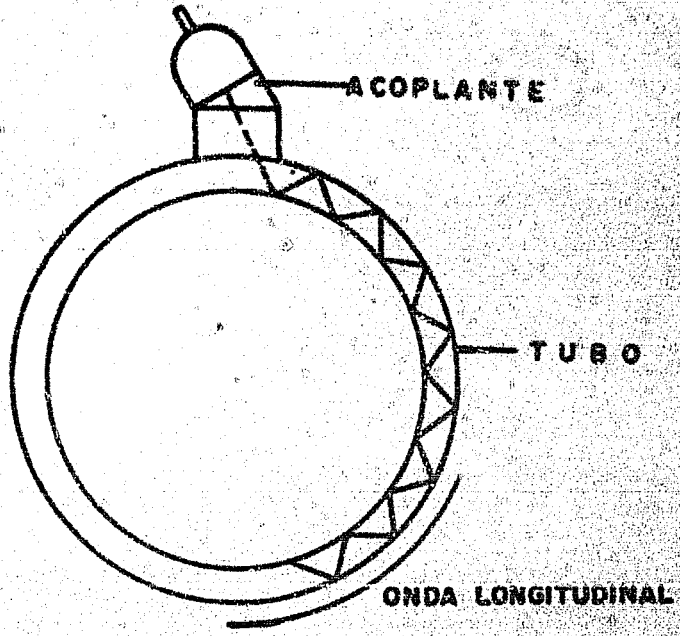


fig. 25

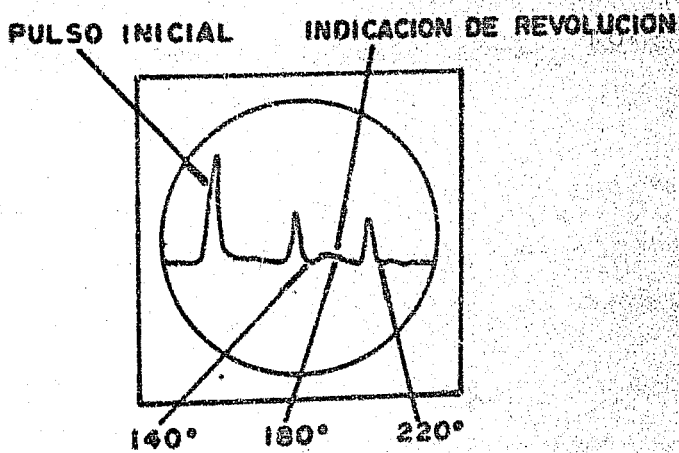
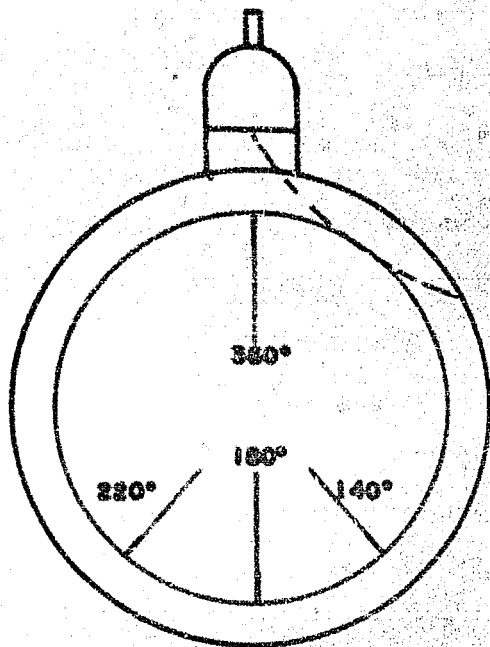


fig. 26

FORMA EN QUE SE VE EN LA PANTALLA LA FALLA ENCONTRADA EN UN TUBO.

en forma longitudinal.

Entre estas pruebas, cabe hacer mención de aquellas que se aplican para la determinación de espesores de tuberías en operación, y que están sujetas a la acción erosiva o corrosiva de fluidos; esta determinación se logra por medio de la aplicación de transductores de haz recto, con los que se determina el espesor real de la tubería aprovechando las lecturas directas que detectan estos aparatos, las que se comparan con el espesor original de dicha línea; a fin de substituir los tramos de tuberías que lleguen al límite de retiro previamente establecido.

#### Pruebas de soldaduras

Las soldaduras pueden presentar en general, fallas por las siguientes causas: porosidad, fusión, inclusiones de escoria y penetración incompleta.

El rango de frecuencia que se toma como base para hacer estas inspecciones es usualmente de 1, 2.25 ó 5 megaciclos, dependiendo desde luego de la naturaleza de los defectos antes mencionados y del material soldado.

La técnica más usada para probar soldaduras es la angular, y sólo en ocasiones muy especiales se utilizan transductores de haz recto que se aplican en superficies pulidas.

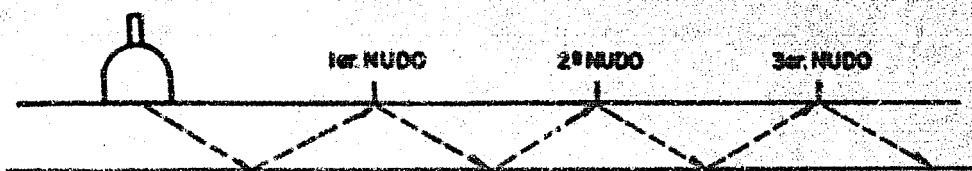
Los principales acoplantes usados en estas pruebas son aceites o agua con un agente humectante. La aplicación de este último es muy satisfactoria, en vista de que no deja manchas; pero si la superficie no es lisa, es necesario usar aceites. Cuando se localicen fallas de penetración, se debe cambiar la frecuencia o la posición del transductor.

Para mayor comprensión de la técnica de inspección de soldaduras, obsérvese la figura 27.

La distancia entre nodos, se determina por el ángulo de la Lucita. Conocida esta distancia, se puede determinar el área sobre la cual se mueve el transductor, dibujando dos marcas paralelas a la soldadura, una a la mitad de la distancia entre nodos y otra al total de esta distancia partiendo desde el centro de la costura.

En estas líneas marcadas, el transductor puede moverse de una marca a otra en zig zag hasta tener la longitud total. El contacto entre el transductor y la muestra debe ser uniforme. Figura 28.

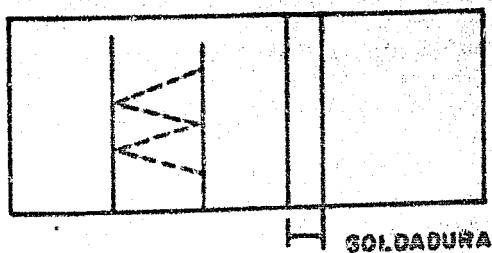
En estas pruebas, el ángulo de incidencia debe ser seleccionado tan grande como sea posible, sin llegar a  $90^\circ$ . Los ángulos pequeños sólo se usan en láminas gruesas, con objeto de reducir la distancia entre nodos, ya que si esta es grande pierde sensibilidad el aparato de prueba.



INSPECCION DE UNA SOLDADURA

Fig. 27

MARCAS



MARCAS DE REFERENCIA EN UNA PLACA SOLDADA,  
PARA MOVER UN TRANSDUCTOR.

Fig. 28

Localización de defectos en las soldaduras por medio de la aplicación de pruebas angulares. - La posición de un defecto dentro de una soldadura puede localizarse con base a la ubicación del transductor y con la ayuda de la lectura de la distancia del eco ( $W$ ), esta lectura se hace desde el pulso inicial de transmisión hasta la observación del pulso del eco. La trayectoria efectiva del haz para una distancia ( $a$ ) de la falla con respecto al transductor, puede calcularse de acuerdo con la fórmula (18) que se deduce de la figura 29.

$$W = a \frac{1}{\sin \alpha}$$

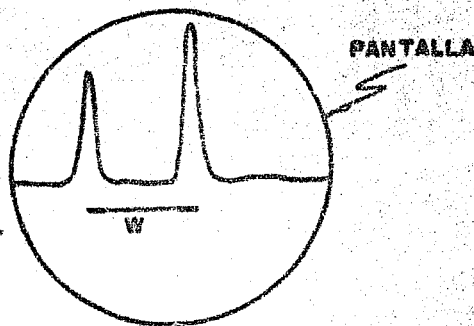
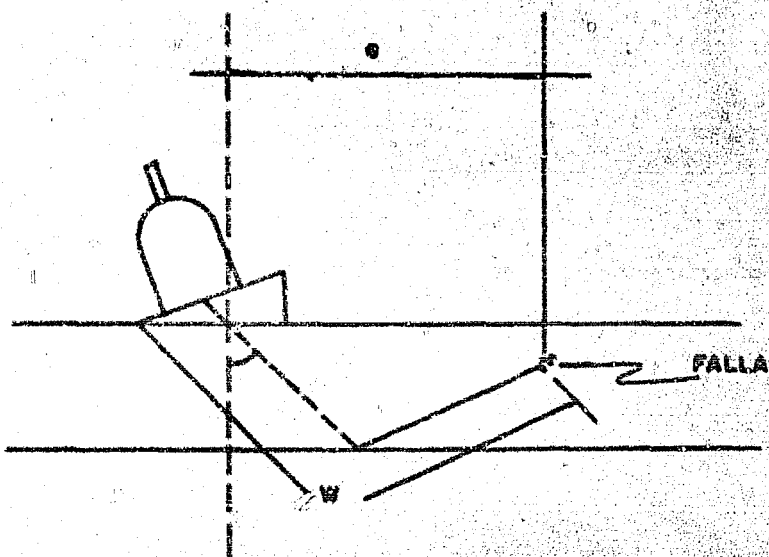
De donde:  $a = W \sin \alpha$  . . . . . (18)

En el que:  $\alpha$  = ángulo formado por el haz y la vertical.

$W$  = distancia entre el pulso inicial y el pulso causado.

$a$  = distancia entre el probador y la falla.

De la ecuación (18) se deduce que cuando se conoce el ángulo de la lucita y la distancia ( $W$ ), resulta fácil determinar geoméricamente la posición del defecto dentro de la soldadura. Sin embargo este método no se aplica en la práctica debido a que el procedimiento de cálculo requiere demasiado tiempo; por lo que se substituye ventajosamente por la Regla Localizadora de Defectos, la que sirve para proporcionar lecturas directas de las profundidades y distancias del transductor al defecto, una vez que se haya determinado la distancia ( $W$ ) en la pantalla fluorescente. La figura 30 ilustra este tipo de reglas.



DETERMINACION DEL LUGAR DE LA FALLA EN SOLDADURAS,  
USANDO PRUEBAS ANGULARES.

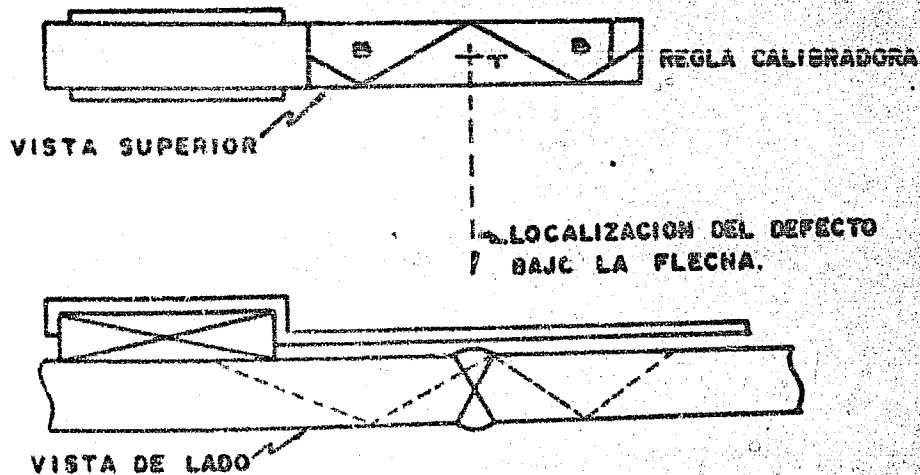
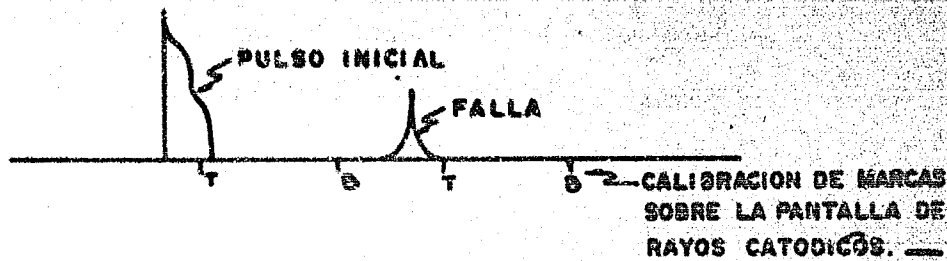


fig. 30



## INSPECCION DE LA LINEA QUE MANEJA EL CRUDO REDUCIDO DE LA TORRE MA-T1 A LAS BOMBAS MA-P4'S, INSTALADA EN LA REFINERIA MADERO.

Esta inspección se efectuó tomando en cuenta los problemas que en general presentan las plantas destiladoras primarias de crudo, entre los cuales se encuentra la acción corrosiva y erosiva de los ácidos que se forman y flúidos que afectan considerablemente a los equipos y tuberías.

En términos generales se puede definir la corrosión, como la destrucción de un metal, ya sea por una acción química directa o por la acción electrofísica entre el metal y el medio que lo rodea.

Por lo que respecta a la erosión, ésta se puede definir como la acción física del fluido manejado que ataca los equipos y materiales, cuyo carácter dañino aumenta con la velocidad de flujo, cambios de dirección del mismo y su contenido de material abrasivo.

El estudio se efectuó con base a estas definiciones y aprovechando la aplicación de un aparato ultrasónico, con el que se determinó el espesor en diferentes puntos de la línea y para localizar las partes débiles de la misma. Poniendo desde luego el mayor interés en los codos, que son los lugares donde se verifican cambios de dirección del fluido, así como en las partes inferiores de la tubería, en donde se localizan acumulaciones de líquidos corrosivos.

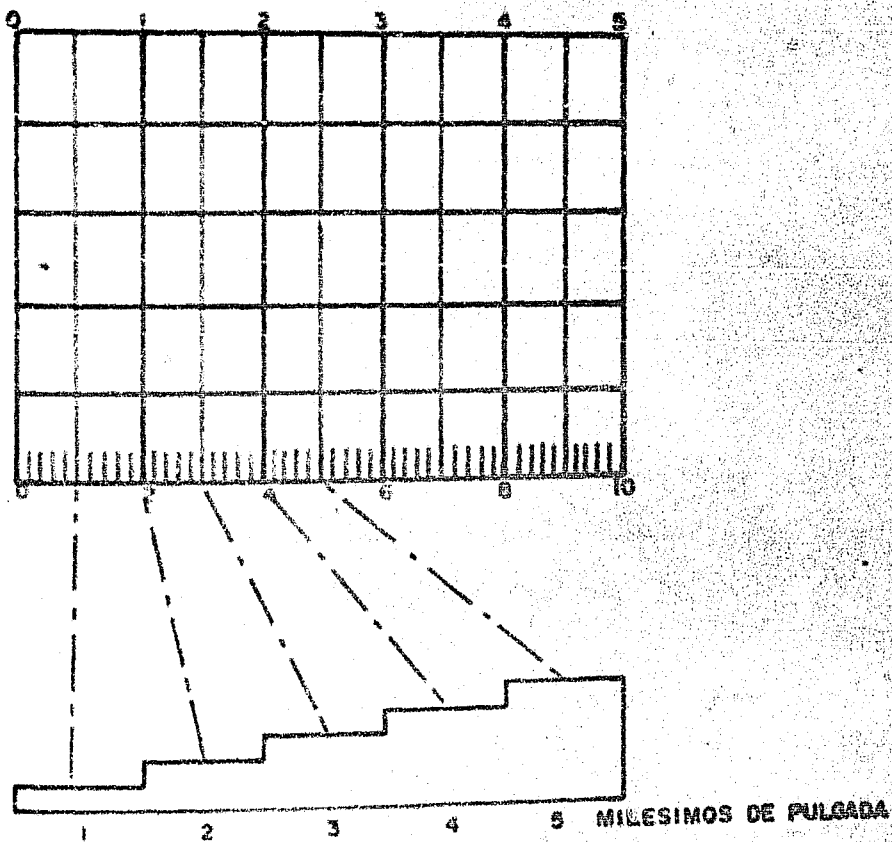
**DESCRIPCION Y USO DEL EQUIPO ULTRASONICO EMPLEADO**

Se utilizó en las determinaciones el aparato Krautkramer modelo USK3M, detector ultrasónico de fallas tipo miniatura, con los siguientes aditamentos:

- Transductor de haz recto \_\_\_\_\_ MSEBGT
- Cable del probador \_\_\_\_\_ 70-80 ohm
- Bloque de referencia \_\_\_\_\_ de acero al bajo carbón
- Acoplante \_\_\_\_\_ grasa con silicón

Procedimiento de calibración del aparato

1. - Se coloca el transductor en el bloque de .3 pulgadas, teniéndose una ganancia aproximada de 40 dB. Esto causa una señal sobre la pantalla, la cual se ajusta a una altura de 3/4 de la altura total de la misma. Se mueve el margen izquierdo de la señal con el control de retraso en cero, de tal manera que la línea quede en la posición 3 de la pantalla, como puede observarse en la figura 31.
2. - Se sitúa el transductor sobre el paso de .5 pulg. sobre el bloque de referencia y la señal aparecerá 25 marcas a la derecha del cero. De esta manera se obtiene una calibración completa.
3. - Finalmente para comprobar que el aparato está bien calibrado, se mueve el transductor hacia arriba y hacia abajo del bloque de calibración, y el margen izquierdo de cada señal aparece correctamente



CALIBRACION EN LA PANTALLA USANDO EL \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ BLOQUE DE REFERENCIA. \_\_\_\_\_

fig. 31

en la línea base correspondiente, tal como se señala en la figura 31. Es necesario incrementar o disminuir la sensibilidad para obtener señales adecuadas a los cinco pasos del bloque de referencia.

### Medida del espesor

1. - Cuando las señales aparecen en la pantalla, en sus propias líneas base, al aplicar el transductor en varias partes del bloque de calibración, el instrumento está listo para medir espesores. El bloque y el material de prueba deben tener similar transmisión de la velocidad del sonido.

2. - La sensibilidad de las lecturas es de .010 pulgadas y la escala tiene subdivisiones de .020 pulgadas entre las subdivisiones más pequeñas de la línea, de tal manera que las señales pueden ser leídas sobre ésta, o entre las líneas de división. Las mitades de subdivisiones de la pantalla tienen un valor de .010 pulgadas.

## DESCRIPCION DE LA LINEA

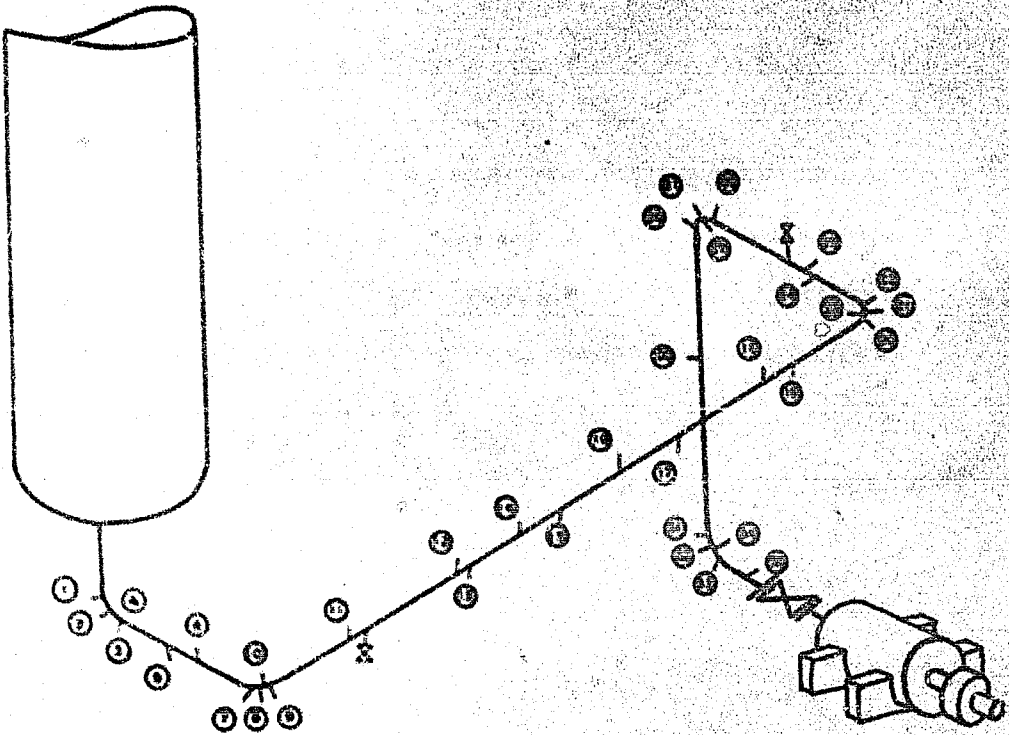
La línea conduce el crudo reducido del fondo de la torre destiladora MA-T1 a la succión de las bombas MA-P6's, se encuentra operando a una temperatura de 356°C y a una presión de 1.5Kg/cm<sup>2</sup> (21.3 lb/pulg<sup>2</sup>).

El diámetro nominal de la tubería es de 12 pulgadas, cédula 40, y su espesor original es de 0.406 pulgadas. Está fabricada de acero al bajo carbón con adición de silicio y manganeso de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM-106-A, en la cual se tiene la siguiente composición química:

### A S T M - 106 - A

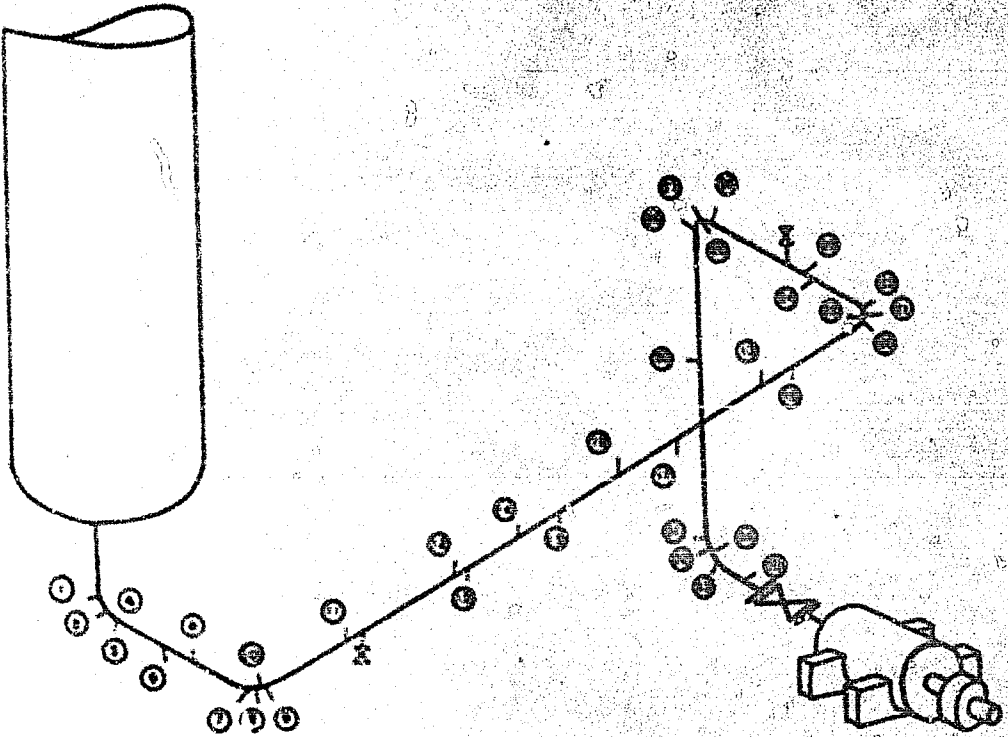
ELEMENTO:	<u>C</u>	<u>P</u>	<u>Mn</u>	<u>S</u>	<u>Si</u>
PORCENTAJE:	0.25	0.048	0.027	0.059	0.1
			0.93		

En la figura 32 se aprecia el levantamiento isométrico de esta línea y se indican los puntos en que se realizó su inspección.



CIRCUITO MAT IN

FIG. 32



CIRCUITO MAT 1b

FIG. 32

## CALCULO DEL LIMITE DE RETIRO

Para determinar el espesor de una tubería, se aplica una modificación de la fórmula teórica obtenida para el cálculo del esfuerzo tangencial exclusivamente a la presión interna del fluido, denominada "fórmula común para la presión de ruptura".

La figura 32, representa la mitad de un cilindro de longitud (L) considerado como cuerpo libre y en la que se ha descompuesto los elementos de fuerza radiales, debido a la presión interna en sus componentes perpendiculares al plano formado por la cara interior del cilindro, en el que se tiene:

$$p \cdot r / A; \quad F_{np} = A p \sin^2 \theta \quad L p r L \sin^2 \theta$$

La fuerza total normal al plano, será la suma de las fuerzas elementales actuando en media circunferencia. Integrando entre los límites  $\pi$  y 0 se tendrá:

$$F_1 = \int_0^{\pi} p \cdot r \cdot L \cdot \sin^2 \theta \cdot p \cdot r \cdot L \int_0^{\pi} \sin^2 \theta \cdot d\theta = p \cdot r \cdot L \left[ -\cos \theta \right]_0^{\pi} = 2p r L \cdot p L$$

A esta fuerza, se opone otra de igual magnitud en la otra mitad del cilindro, actuando en sentido opuesto a  $180^\circ$  de la primera. Esta fuerza opuesta  $F_1$ , produce un esfuerzo tangencial  $S_1$  en las paredes del cilindro igual a la fuerza  $F_1$ , dividida entre el área sobre la cual está distribuida. Esta área es  $2tL$  y  $S_1$  tendrá el valor de:

$$S_1 = F_1 / 2tL$$

$$\text{ó } F_1 = 2tLS_1$$





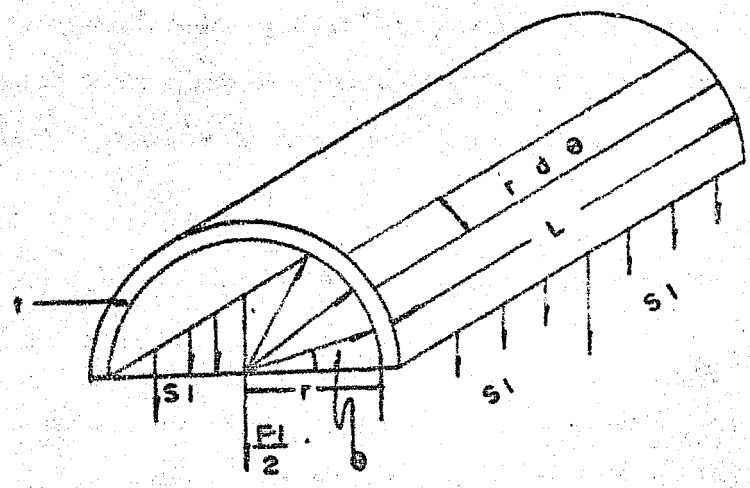
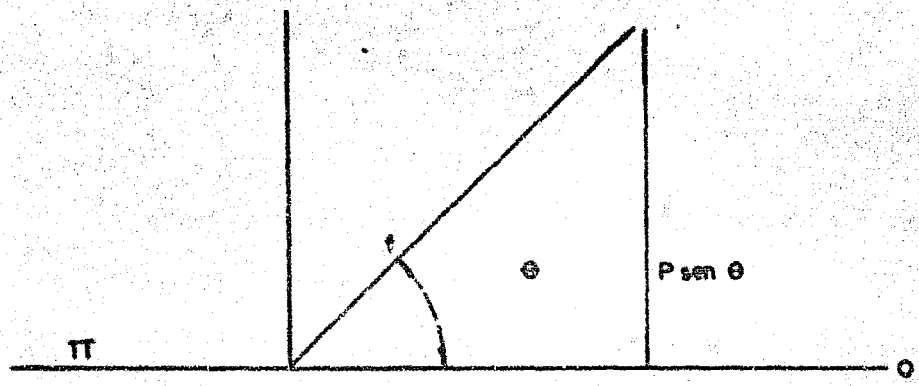


Fig. 33

Igualando valores se tiene:

$$pLd = 2tS_1 \quad \therefore \quad S_1 = \frac{pd}{2t} \quad \dots \dots \dots (19)$$

en donde:

$S_1$  = Esfuerzo de la fibra del material en psig.

$p$  = Presión interna del fluido en psig.

$d$  = Diámetro interior de la tubería en pulgadas.

$t$  = Espesor de pared de la tubería en pulgadas.

La Sociedad de Ingenieros Mecánicos Americanos (ASA) por conducto de su comité B31, que estudia los códigos para tubería a presión, unificó los criterios para el cálculo de espesores y estableció las diferencias en los requerimientos mínimos de seguridad, manufactura y esfuerzos permisibles de trabajo para aquellas tuberías instaladas en lugares específicos.

Esta ecuación teórica calculada es similar a la fórmula de Barlow, con la diferencia de que en esta última se emplea el diámetro exterior de la tubería.

#### Datos y Secuencia del Cálculo

Para procedimientos de cálculo se hizo uso de la corrección de la fórmula de Barlow recomendada por el código ASA B31.3 1966, en la que se obtiene:

$$t = \frac{PDo}{2(SE+PY)} \dots \dots \dots (20)$$

en donde:

t = Espesor mínimo requerido por esfuerzos mecánicos.

D = Diámetro exterior = 12.75 pulgadas.

S = Esfuerzo permisible = 11650 psi (obtenido de la tabla 302.3.1A del código)

E = Factor longitudinal de junta = 1 (de la tabla 302.4.3)

Y = Coeficiente para materiales ferrosos dúctiles = 0.4 (de la tabla 304.1.1).

Temperatura de operación del sistema = 672°F

Substituyendo valores en la ecuación se tiene:

$$t = \frac{21.3 \times 12.75}{2(11650 + 21.3 \times 0.4)}$$

$$= \frac{271.57}{2(11650 + 8.52)}$$

$$= \frac{271.57}{23317.04}$$

= 0.016 pulg. (Espesor necesario de la tubería de 12 pulg. para operar por presión interna).

Límite absoluto de retiro leído en la tabla No. III de la Norma de Seguridad AVIII-4 de Petróleos Mexicanos 0.200 pulg.

Debido a que el límite obtenido en el cálculo es menor al reco--

mandado por la Norma citada, se empleará el límite absoluto de retiro para determinar el cambio de las partes de la tubería con espesores menores de 0.200 pulg.

mandado por la Norma citada, se empleará el límite absoluto de retiro para determinar el cambio de las partes de la tubería con espesores menores de 0.200 pulg.

RESULTADOS DE LA INSPECCION EFECTUADA EN  
FEBRERO DE 1971

PUNTO	ESPESOR MEDIDO EN MILESIMOS DE PULGADA	OBSERVACIONES
1	212	(Toda la línea con aislamiento térmico)
2	212	
3	212	
4	210	
5	204	Parte exterior con corrosión leve
6	204	
7	212	
8	212	
9	210	
10	212	
20	214	
21	212	
22	212	
23	204	
24	212	Parte exterior con corrosión leve
25	208	
26	208	
29	210	
30	214	
31	214	
32	214	
34	212	
35	210	

TABLA I

NOTA: Los puntos están referidos al circuito mostrado en la figura 32.

## ANALISIS DE LOS RESULTADOS

El espesor original de la línea es de 408 milésimos de pulgada y el espesor encontrado por desgaste en algunos puntos de la misma tubería en febrero de 1971 fue de 204 milésimos de pulgada. Valor que es ligeramente mayor que el espesor de retiro absoluto previamente calculado, por lo que se recomienda una nueva inspección en un periodo de 6 meses, para que de acuerdo con este estudio y los resultados que se obtengan del mismo, se determinen aquellos tramos de la tubería que no garanticen seguridad. Como antecedentes se anexa la tabla II, en la que se observan los estudios realizados en fechas anteriores.

Por lo que se refiere a la parte exterior de esta tubería, se observaron pequeñas corrosiones que probablemente existían desde la instalación de la línea, ya que no son de mucha importancia. En lo que respecta al recubrimiento anticorrosivo, éste se encontró ligeramente deteriorado, pero es notorio que no ha sido atacado por corrosión.

De los resultados obtenidos en esta inspección, se concluye que en la próxima inspección se recomendará la sustitución de algunos tramos de la tubería, por lo que se deberá prever dichos cambios, a fin de que se ejecuten en su debida oportunidad y sin que se llegue a exponer la instalación a riesgos que redunden en perjuicio de la producción y del personal que labora en dichas instalaciones.

**TABLA DE ESPESORES OBTENIDOS EN VARIAS INSPECCIONES A LA LINEA.**

**CALIBRACION**

**F E C H A S**

<u>No.</u>	<u>1/62</u>	<u>1/63</u>	<u>8/63</u>	<u>1/64</u>	<u>9/64</u>	<u>1/65.</u>	<u>1/66</u>
1	400		340		304	276	208
2	402		340		302	280	208
3	402		344		302	274	210
4	400		340		304	280	210
5	400		340		308		
6		360		332		272	210
7		358		332		272	210
8		358		330		278	208
9		358		332		278	208
10		352		330		276	208
11	400		342		300		
12	400		344		300		
13	398		344		302		
14	400		342		300		
15	400		342		304		
16		356		332			
17		356		330			
18		352		330			
19		352		330			
20		350		326			
21	398		338		304	278	210
22	398		338		302	276	208
23	398		338		302	276	208
24	398		338		302	274	206
25	398		340		308	278	208
26		352		330		278	210
27		350		328		276	208
28		350		330		278	208
29		352		326		274	206
30		350		330		278	210
31	400		338		302		
32	398		338		300		
33	398		338		300		
34	398		340		302		
35	398		340		302		



Para completar este estudio, se incluyen las siguientes definiciones de la Norma de Seguridad A-VIII-4 de Petróleos Mexicanos.

1. - Límite absoluto de retiro. - Es el espesor de la pared de una tubería de cierto diámetro, establecido con base en la experiencia, por debajo del cual se considera que no puede operar con seguridad, independientemente de los esfuerzos originados por la presión interna.

2. - Límite de retiro. - Es el espesor con el cual deben retirarse los tramos de tubería de un servicio determinado.

3. - Espesor mínimo requerido. - Es el espesor calculado de la pared de la tubería, de acuerdo con el código aplicable al caso, para las condiciones de diseño, sin tomar en cuenta espesores adicionales para desgaste.

4. - Margen de corrosión. - Es el espesor de la pared de una tubería que se adiciona al límite de retiro y que está destinado a compensar el desgaste originado por corrosión, abrasión o erosión.

5. - Desgaste. - Es la pérdida de material que sufren las paredes de la tubería, por la acción química del producto contenido.

## COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

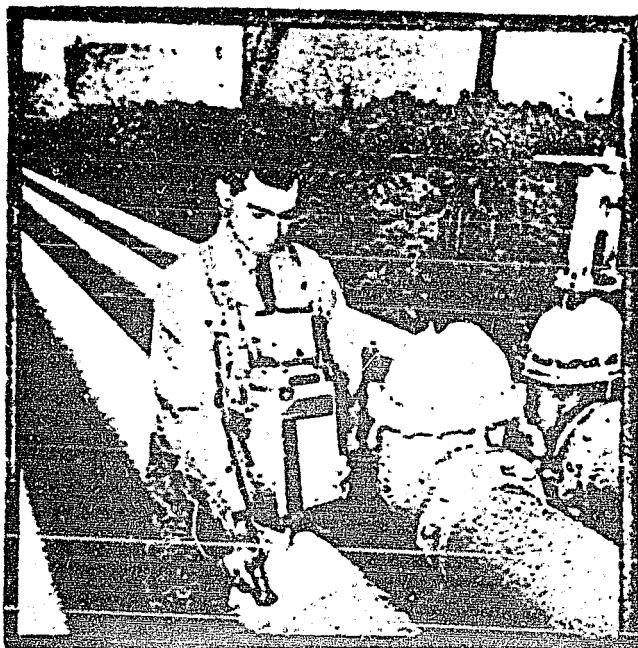
En la industria existen varios flúidos que causan a los equipos corrosión y erosión . Estos fenómenos deben ser conocidos y controlados desde el punto de vista de la seguridad industrial, tomando en consideración que pueden causar fatales accidentes.

Los accidentes pueden ser evitados efectuando inspecciones periódicas y adecuadas a los equipos de proceso, estos mismos servicios se aplican a las tuberías conductoras de flúidos conectadas a dichos equipos. Para llevar a cabo estas inspecciones se hace uso de aparatos eficaces entre los que se encuentran los equipos ultrasónicos.

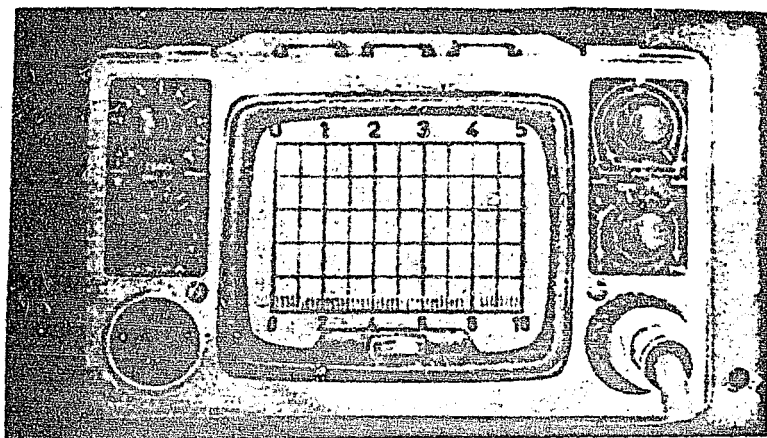
Una buena aplicación de los métodos de inspección ultrasónica generalmente proporciona resultados eficientes, debido a la veracidad de información que de ellos se obtiene, tanto para conocer el espesor de las paredes metálicas, así como para efectuar ensayos de materiales para descubrir sus imperfecciones.

La comodidad para manipular estos instrumentos, su facilidad de transporte y la ventaja que brindan para inspeccionar las instalaciones, son las características que garantizan la aplicación de los métodos de inspección ultrasónica en cualquier tipo de plantas.

En el presente trabajo se exponen los principios básicos del ultrasonido, el funcionamiento de los aparatos y su aplicación. Como una práctica de estos métodos se emplea un aparato ultrasónico, para inspeccionar la tubería de la línea de fondos localizada en la planta primaria de crudo reducido de la refinería Ma dero; obteniéndose de ella resultados satisfactorios.



Fotografía que ilustra el empleo de un aparato ultrasónico en pruebas de campo.



Pantalla del aparato ultrasónico mostrado en la fotografía superior.

## BIBLIOGRAFIA

1. - Armistead George, *Safety in Petroleum Refining and Related Industries*, John G. Simmonds & Co., Inc. New York, 1959.
2. - Branson, *Manual de Instrucción Programada (Pruebas Ultrasonicas)*, General Dynamics, 1969.
3. - Crocker Sabin M. E., *Piping Handbook*, Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1945.
4. - Filipczynski Leszek, *Ultrasonic Methods of Testing Materials*, Butterworths, London, 1966.
5. - Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer-Verlag New York, 1969.
6. - Perry, J. H., *Chemical Engineers Handbook*, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, 1950.
7. - Richardson E. G., *Ultrasonic Physics*, Elsevier Publishing Co. London, 1952.
8. - Vigoureux P., *Ultrasonics*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1951.
9. - The American Society of Mechanical Engineers, ASA B 31.3, 1966.
10. - Resúmenes de las pláticas impartidas por acuerdo de la Dirección General de Petróleos Mexicanos, relacionadas con la seguridad, 1967.
11. - Norma AVIII-4 de Petróleos Mexicanos, 1970.