



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



“MEDICION DE LA PROFUNDIDAD DE FISURAS  
POR EL METODO DE ULTRASONIDOS”

**TESIS DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECANICO**

Presentada por:

**CECIBELL VELASCO C.**

Guayaquil - Ecuador

1988

## AGRADECIMIENTO

A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA  
DEL LITORAL

Al Ing. OMAR SERRANO V., Director  
de Tesis, por su ayuda y colabo-  
ración para la realización de  
este trabajo.

A todas las personas que de una  
forma u otra colabaron en el  
desarrollo de esta tesis.

DEDICATORIA

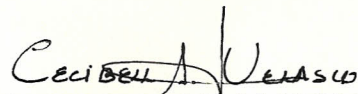
A MIS PADRES

A MIS HERMANOS


DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas  
expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamen-  
te; y, el patrimonio intelectual de la misma a la  
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la  
Espol).

  
.....

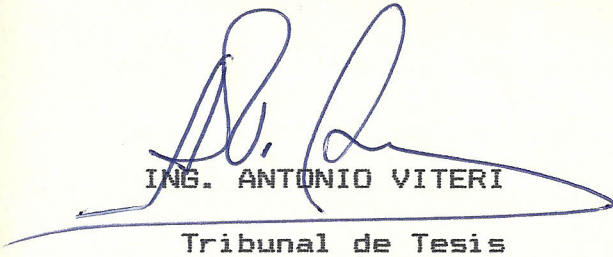
CECIBELL A. VELASCO CEVALLOS



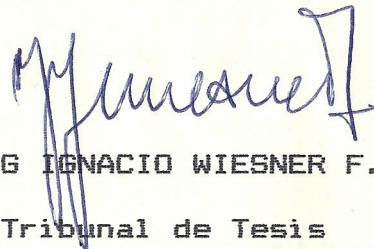
ING. RICARDO CASSIS  
Subdecano encargado del  
Decanato.  
Facultad de Ingeniería Mecánica



ING. OMAR SERRANO VALAREZO  
Director de Tesis



ING. ANTONIO VITERI  
Tribunal de Tesis



ING. IGNACIO WIESNER F.  
Tribunal de Tesis

## R E S U M E N

En este estudio se emplea el método de ensayos no destructivos por ultrasonidos para la medición de profundidad de fisuras. Ordinariamente para esta medición se necesitan dos transductores colocados simétricamente con respecto a la fisura, y en algunos casos se requiere acceso a las dos superficies de la pieza ensayada. Esto es factible cuando la fisura es superficial y crece verticalmente. En este proyecto se desarrolla tres métodos analíticos-experimentales de medición de profundidad de fisuras por el método de Ultrasonidos, en los cuales no se necesita ni simetría ni acceso a las dos caras de la pieza ensayada.

Para la realización de este trabajo se construyeron piezas patrones conteniendo fisuras de diferente profundidad y tamaño. La inspección ultrasónica comprobó la posición de dichas fisuras. Seguidamente se construyeron piezas con fallas artificiales simulando fisuras las cuales fueron ensayadas por Ultrasonidos para verificar el procedimiento analítico desarrollado. Luego se hace un análisis de cada método empleado, encontrándose que las fisuras de mayor tamaño propor-

cionan mediciones más exactas.

El método 1 de transmisión-recepción simultáneos, es el de más fácil aplicación porque requiere del uso de un sólo transductor, aunque las señales ultrasónicas obtenidas están frecuentemente acompañadas de "ruido." En este aspecto el método 3, transmisión-recepción, presenta señales de mayor nitidez, pero requiere el uso de dos transductores. El método 2, transmisión, transmisión-recepción, es el que presenta mayor grado de dificultad en su aplicación. Los tres métodos sin embargo miden con precisión la profundidad de las fisuras detectadas.

Al obtener la profundidad de una fisura es posible evaluar el efecto que esta ejerce sobre la integridad de la pieza ensayada, así como su aptitud para el servicio basado en el estudio de la fractura mecánica.

## INDICE GENERAL

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN .....   |    |
| INDICE GENERAL .....  |    |
| INTRODUCCION .....  | 10 |
| <br>  |    |
| I CAPITULO .....  | 12 |
| FUNDAMENTOS TEORICOS .....  |    |
| 1.1 GENERALIDADES .....   | 12 |
| 1.2 INTRODUCCION A LA FRACTURA MECANICA ....                              | 12 |
| 1.2.1. Fractura Mecánica y Resistencia<br>de Materiales. ....             | 13 |
| 1.2.2. Aplicaciones del estudio de la<br>Fractura Mecánica. ....          | 16 |
| 1.2.3. Uso de la Fractura Mecánica en<br>evaluación no destructiva. ....  | 23 |
| <br>  |    |
| 1.3 DETECCION DE FISURAS POR ULTRASONIDOS.                                | 30 |
| 1.4 MEDICION DE LA PROFUNDIDAD DE FISURAS POR<br>ULTRASONIDOS. ....       | 48 |
| 1.4.1. Método 1: Transmisión recepción<br>simultáneos. ....               | 49 |
| 1.4.2. Método 2: Transmisión, transmisión-<br>recepción simultáneos. .... | 52 |
| 1.4.3. Método 3: Transmisión-recepción.                                   | 55 |



|   |     |
|---|-----|
| 1.5 APLICACIONES. ....                                      | 59  |
| II CAPITULO .....   |     |
| TRABAJO EXPERIMENTAL. ....                                  | 62  |
| 2.1 EQUIPO DE ENSAYO. ....                                  | 62  |
| 2.2 CALIBRACION DEL SISTEMA DE ULTRASONIDOS..               | 66  |
| 2.3 CONSTRUCCION DE PIEZAS PATRONES. ....                   | 71  |
| 2.4 CONSTRUCCION DE PIEZAS CON FALLAS<br>ARTIFICIALES. .... | 73  |
| 2.5 DESARROLLO DE LA INSPECCION. ....                       | 76  |
| III CAPITULO .....  |     |
| DISCUSION DE LOS RESULTADOS. ....                           | 80  |
| CONCLUSIONES .....  | 108 |
| BIBLIOGRAFIA .....  | 110 |

## INTRODUCCION

Los métodos de Ensayos no destructivos (END) de mayor uso en la industria y tecnología son los líquidos penetrantes, partículas magnéticas, radiografía industrial, corrientes inducidas y ultrasonidos, este último es el que se va a usar en esta tesis para el estudio de medición de profundidad de fisuras. El ensayo por ultrasonidos está basado en la propagación de ondas sónicas y ultrasónicas a través de todo cuerpo con propiedades elásticas capaces de retraer las partículas a su posición de reposo.

Los valores de frecuencia hasta 20.000 [ciclos /seg] son audibles, de 500.000-30'000.000 c/s (0.5-30 Mhz.) son los límites de frecuencias usadas en ultrasonidos, por lo que no es posible detectarlas mediante el oído humano. Las ondas ultrasónicas son transmitidas por un transductor que a la vez puede actuar como receptor de los pulsos ultrasónicos reflejados por una discontinuidad. La parte electrónica del sistema es la que produce las señales de salida y las amplifica al ser receptado el tiempo de recorrido como la amplitud de estas señales.

El ensayo no destructivo por medio de ultrasonidos se ha desarrollado a partir de la segunda guerra mundial, actualmente su campo de aplicación se ha extendido en diferentes áreas tales como: verificación de

piezas forjadas, inspección de soldaduras, medición de espesores de superficies sujetas a corrosión, control de calidad, limpieza de alta y baja frecuencia, soldaduras de materiales sin flujos, taladro industrial y dental, sistemas ultrasónicos de alarma, aplicaciones médicas, etc.

La utilización de los ultrasonidos en la localización y medición de profundidad de fisuras es una de las aplicaciones de mayor utilidad, pues dependiendo de la magnitud de una fisura presente en el elemento ensayado se toman las medidas correctivas necesarias. Por ejemplo, la detección de fisuras en piezas forjadas sin mecanizar ni tratar permite rechazar a tiempo la pieza evitando elevados gastos de mecanización.

Ultrasonidos se relaciona con el estudio de fatiga mediante la medición de fisuras obtenida en el ensayo, lo que permite determinar la resistencia tensil a la que debe estar sujeto un elemento, sin que exista peligro de falla. De ahí la importancia de obtener la profundidad de una fisura en una forma analítica y cuantitativa y no de una forma aproximada como se la obtiene corrientemente.

## CAPITULO I

### FUNDAMENTOS TEORICOS

#### 1.1 GENERALIDADES.-

El ensayo por ultrasonidos en materiales utiliza las propiedades de propagación del sonido, reflexión y refracción de vibraciones mecánicas de frecuencias superiores a los 20 KHZ. Los ultrasonidos son ondas acústicas de idéntica naturaleza que las ondas sonoras, diferenciándose de éstas por el rango de frecuencias. Sus características son comparables con las de cualquier onda mecánica.

Conociendo la velocidad de propagación del sonido en el material ensayado es posible evaluar su espesor así como también sus propiedades mecánicas. Pero la mayor aplicación de los ultrasonidos se encuentra en la detección de discontinuidades que permitan tomar medidas correctivas o decisiones de rechazo del material ensayado. (Ref.1)

#### 1.2 INTRODUCCION A LA MECANICA DE FRACTURA.

La mecánica de fractura es una disciplina que puede ser usada para prevenir fallas estructurales. Esta relaciona el tamaño de una fisura en una estructura a la carga que causaría que ésta creciera de una forma inestable. Específicamente la mecánica de fractura permite que las observaciones

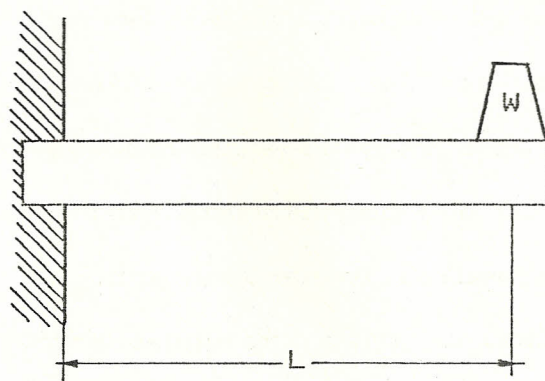
de los Ensayos no Destructivos sean puestos sobre bases cuantitativas para reparar, reemplazar o ignorar los defectos encontrados. Sin tales bases el trabajo de END no sería de gran valor en la evaluación estructural integral. La razón es que la severidad de un defecto depende de su localización en el cuerpo, carga a la que está sometida y a otros factores. (Ref.2)

#### 1.2.1 MECANICA DE FRACTURA Y RESISTENCIA DE MATERIALES.

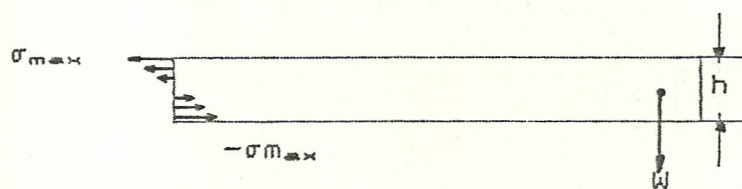
En resistencia de materiales se determina para una estructura específica la capacidad de carga en base al estado de tensiones, para lo cual se calcula el máximo esfuerzo y éste a su vez es comparado con la resistencia del material. El máximo esfuerzo permisible debe ser menor a la resistencia del material para darnos un factor de seguridad adecuado. La similaridad entre esta aproximación y la mecánica de fractura puede ser ilustrado en la Fig.Nº1 (Ref.1). En la figura 1.a el esfuerzo máximo es:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{6WL}{bh^2} \quad (1)$$

donde                    L: Longitud  
                               h: Altura



a)



b)

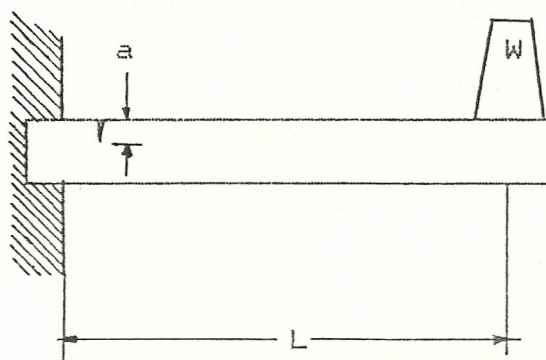


Fig. N91 a) Viga no defectuosa  
 b) Esfuerzo en una viga no defectuosa  
 c) Viga fisurada. (Ref.2)

Ocurre falla cuando el esfuerzo máximo ( $\sigma_{\text{máx}}$ ) es igual al esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ ) del material, el peso tiene que ser lo suficientemente pequeño para que el esfuerzo no sobrepase el esfuerzo de fluencia.

Para asegurar esto, un factor de seguridad  $s$  es introducido, tomando en cuenta la características del material y las sobrecargas, el esfuerzo máximo será entonces menor que  $\sigma/s$  siempre que:

$$W < \left[ \frac{bh^2}{6sL} \right] \sigma_y \quad (2)$$

Al considerar una viga con fisura, localizada en el punto de máximo esfuerzo (Fig. 1c), el parámetro que gobierna la estructura mecánica es el factor llamado "factor de intensidad de esfuerzo" representado por  $K$ . Para pequeñas fisuras un análisis de una viga fisurada tal como la de la Fig. 1c), daría con una razonable aproximación.

$$K = \sigma_{\text{máx.}} \left( \pi a \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

donde  $a$ : profundidad de la fisura

$\sigma_{\text{máx.}}$ : esfuerzo que ocurriría

en ausencia de la fisura.

La relación básica en mecánica de fractura es igualar  $K$  a un valor crítico, esto de-

pende de una propiedad del material llamada "tenacidad a la fractura ( $K_{Ic}$ )". Cuando la igualdad es conseguida la fisura crece de una manera inestable. La estructura puede ser diseñada, asegurando estar libre de fracturas siempre que:

$$K < \frac{K_{Ic}}{S}$$

Si se reemplaza  $\sigma_{max}$  de (1) en (3) se obtiene:

$$W < \left[ \frac{bh^2}{6sL} \right] * \frac{K_{Ic}}{(\pi a)^{1/2}} \quad (4)$$

Esta es la menor carga para una operación segura cuando existe una fisura de profundidad  $a$ . Comparando las ecuaciones 4 y 2, podemos decir que la diferencia entre ellas es que la fractura mecánica introduce un nuevo parámetro físico, el tamaño de la fisura " $a$ ". (Ref.2)

### 1.2.2 APLICACIONES DEL ESTUDIO DE MECANICA DE FRACTURA

Un ensayo no destructivo como ultrasonidos no debe determinar solamente el tamaño de un defecto sino también su localización.

Es importante considerar la ubicación de una fisura en un elemento pues de ello depende que la longitud  $a$  sea más crítica



si se encuentra en el borde de una viga que si se encuentra en el centro, siendo la primera ubicación muy peligrosa ya que podría para un mismo tipo de acero ser 2.5 veces menor la longitud crítica comparada con la segunda ubicación. Por otra parte un material como un acero con un K<sub>ic</sub> mayor que el anterior aunque con menor resistencia a la fluencia y con fisura en el borde tendrá una longitud de ac, mayor que el caso anterior. (Ref3).

El estudio de mecánica de fractura puede ser unida con los Ensayos no Destructivos de dos formas:

- La máxima carga de operación segura que una estructura ingenieril puede soportar por el tamaño y localización de fisuras es determinada por el ensayo no destructivo.

- Para cargas dadas el tamaño de la mayor fisura que puede existir sin que la fractura pueda ser determinada, provee especificaciones que pueden mantener en ventaja una evaluación no destructiva.

Hay tres formas generales por las cuales una fisura puede estar presente dentro de una estructura.

- Durante la solidificación del material de la estructura. Este proceso puede dar lugar a la formación de una fisura inherente.
- Durante la fabricación del componente estructural, por ejemplo: generación de fisuras en una soldadura.
- Durante la vida de servicio del componente estructural, por interacciones mecánicas con otros miembros, por fatiga y por condiciones externas presentes en el fisuramiento.

Dentro del estudio de la fractura mecánica no hay diferencia como una grieta es introducida. Una fisura como una imperfección de un tamaño y posición dados en un cuerpo, se asume que obedece las mismas reglas de fractura sin considerar su origen, tal categoría es útil en el diseño de un programa de END.

Aún cuando los materiales contienen inicialmente defectos ellos son generalmente pequeños. El riesgo de fractura es entonces pequeño, si es que la fractura no surge durante la fabricación y servicio; sin embargo, existen situaciones en las que si se producen fisuras en la vida de servicio

de una pieza.

19

Cuando la resistencia a la fluencia es alta la resistencia a la fractura tiende a ser baja. Cuando existe la necesidad de usar componentes de secciones delgadas, el análisis de estas fracturas mecánicas son esenciales para realizar un correcto balance entre el funcionamiento y confiabilidad de estructuras sensibles al peso. En realidad el uso de la fractura mecánica para la evaluación integral estructural es muy útil debido a la importancia de considerar pequeñas grietas en aplicaciones donde materiales de elevadas propiedades mecánicas son usados para minimizar peso.

Estructuras que usan generalmente materiales fuertes (alto  $K_{Ic}$ ) y teniendo solamente fisuras pequeñas (bajo  $K$ ) permanecerá en el régimen del esfuerzo del material.

Por otro lado si el material es frágil (bajo  $K_{Ic}$ ) la presencia de una pequeña fisura es problamente un gatillo para una falla estructural. La evaluación de mecánica de fractura es entonces crucial. Esencialmente la mecánica de fractura relacio-

na el tamaño de una fisura con la carga que producirá una falla, en un componente dado. Esto se realiza uniendo dos actividades separadas. 1) Un análisis de esfuerzo matemático de la estructura cargada y 2) Las mediciones experimentales de las propiedades de fractura de un material.

Para realizar una evaluación integral estructural es necesario conocer  $K$  y  $K_{Ic}$ , ninguno de los dos parámetros es significativo por sí mismo, La tabla #I indica como calcular  $K$ , conociendo el tipo de estructura, fisura y carga.

Una evaluación no destructiva no sólo debe determinar el tamaño de un defecto sino también su localización. Como un ejemplo se puede considerar una estructura en tensión de un acero AISI4340, con un esfuerzo a la fluencia de 1653.6MPa. y un valor de  $K_{Ic}$  de 55MPa  $m^{1/2}$ . Asumiendo que la fisura está en el centro de la estructura y que es pequeña en relación al total de las dimensiones, la primera condición establecida en la tabla N°I es aplicable es este caso. Si la estructura es suficientemente gruesa para condiciones de esfuerzo plano, entonces la

TABLA I Ref. (2)

FACTORES DE INTENSIDAD DE ESFUERZO SELECCIONADOS DE  
ACUERDO AL TIPO DE ESTRUCTURA, FISURA Y CARGA

| ESTRUCTURA  | FISURA  | CARGA  | FACTOR<br>INTENSIDAD<br>DE ESFUERZO<br>(MPa-m <sup>1/2</sup> )                        |
|---|---|--|---|
| Un cuerpo muy grande sujeto a un esfuerzo de tensión                | Fisura localizada en la parte central de una longitud a   | Esfuerzo de tensión a distancia normal a la fisura | $K = \sigma (\pi a / 2)$ <sup>1/2</sup>   |
| Un cuerpo muy grande sujeto a un esfuerzo de tensión                | Fisura en el borde, de longitud a normal al extremo libre | Esfuerzo de tensión a distancia normal a la fisura | $K = 1.12 \sigma (\pi a)$ <sup>1/2</sup>  |
| Cuerpo delgado como hoja de ancho w sujeto a un esfuerzo de tensión | Localización en forma central de una longitud a           | Esfuerzo de tensión a distancia normal a la fisura | $K = \sigma \frac{\pi a}{2} \frac{1}{2w}$ <sup>1/2</sup>                              |
| Tubo de diámetro D y espesor h                                      | A través la pared fisura axial a lo largo del eje         | Presión interna P                                  | $K = \frac{pD}{2h} (\pi a / 2) * x$ <sup>1/2</sup><br>$x = [1 + 3.22 \frac{a^2}{Dh}]$ |
| Doble viga en cantiliver de altura h y espesor b                    | Fisura longitudinal de longitud a                         | Carga concentrada P                                | $K = \frac{9.5 Pa}{bh}$   |

resistencia a la fractura puede ser tomada como  $K_{Ic}$ .

$$K_{Ic} = \sigma(\pi/2)^2 \sqrt{a_c} \quad (5)$$

Si el esfuerzo aplicado es tomado como 1/3 del esfuerzo de fluencia, entonces  $\sigma = 551.2$  MPa. La longitud crítica de cada fisura interna es entonces dada por:

$$a_c = \frac{2}{\pi} (K_{Ic}/\sigma)^2 \quad (6)$$

$$= \frac{2}{\pi} (55/551.2)^2 = 0.634 \text{ cm}$$

Al comparar el ejemplo anterior con una fisura en el borde de la estructura pero con todas las otras condiciones iguales, se tiene entonces que usando la segunda columna de la tabla N21, la longitud crítica es:

$$a_c = \frac{1}{1.25\pi} (K_{Ic}/\sigma)^2 \quad (7)$$

$$= \frac{1}{1.25\pi} (55/551.20)^2 =$$

$$= 0.254 \text{ cm.}$$

La importancia de la localización de un fisura es claramente vista con estos resultados. Para demostrar la influencia de los materiales, se considera un acero A533B para reactor nuclear. Un material semejante podría tener un esfuerzo a la fluencia

de 423.4 MPa y un valor de  $K_{Ic}$  de 154 MPa- $m^{1/2}$ . Considerando una vez más, la fisura en el borde de la estructura sujeta a una gran carga tensil, permite la aplicación de una carga igual a la resistencia a la fluencia. Esta llevaría a una longitud crítica de:

$$a_c = \frac{1}{2.5\pi} (K_{Ic}/\sigma)^2 \quad (8)$$

$$= \frac{1}{2.5\pi} (154/423.4)^2 = 1.68 \text{ cm.}$$

Esta diferencia notable al emplear materiales diferentes resulta de importante consideración porque permite tener una longitud crítica  $a_c$  mayor, ubicandonos en la región de seguridad y no se producirá fractura.

### 1.2.2 USO DE LA MECANICA DE FRACTURA EN EVALUACION NO DESTRUCTIVA

Para ilustrar como el estudio de la mecánica de fractura puede usarse para relacionar la geometría real de una fisura, considérese la sección de una fisura a través de la superficie de una pared, ilustrado en la fig. N°2 (Ref.3).

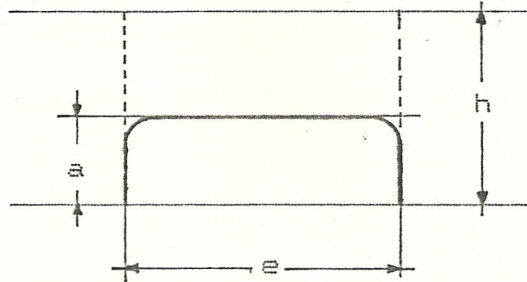


Fig.Nº2 Dimensiones de una fisura a través de la superficie de una pared. (Ref.3)

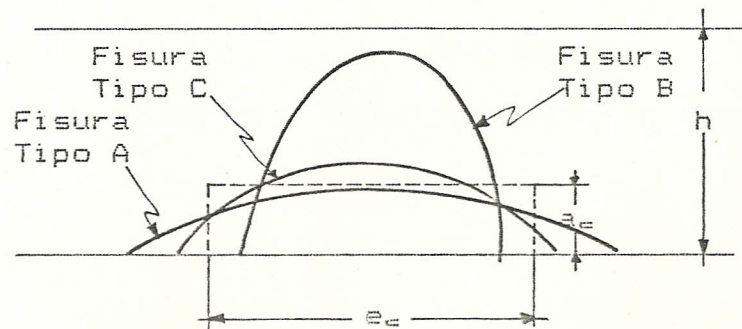


Fig.Nº3 Bases para una estimación conservadora de la dimensiones de una fisura superficial. (Ref.3)



En esta figura la profundidad de la fisura en la dirección de su espesor es denotado por  $a$ , el largo por  $e$  y todo el espesor de la pared por  $h$ , se asume que la pared está sujeta a un esfuerzo de tensión uniforme que actúa a distancia del plano de la fisura en dirección normal al espesor. Un caso de análisis sería considerar la fisura extendida sobre una gran distancia en la dirección normal al espesor. La fisura frontal sería entonces la línea horizontal en la fig.Nº2, por lo que la fisura en consideración sería la profundidad  $a_c$ . Para determinar la fisura crítica de profundidad  $a_c$  para un esfuerzo aplicado  $\sigma$ , la relación aproximada es:

$$K=1.12\sigma(\pi a)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Puede ser igualada para  $K_{Ic}$  y resulta para  $a = a_c$ :

$$a_c = \left[ \frac{K_{Ic}}{1.99\sigma} \right]^2 \quad (10)$$

El crecimiento inestable de una fisura en la dirección de su espesor presenta la estructura con una fisura a través de la pared. Sin embargo no es necesariamente cierto que la fisura continuará propagándose. Esto es porque la velocidad de propagación de la fisura inestable es general-

mente mucho más grande que la velocidad de carga. Se puede sin peligro asumir que una fisura a través de la pared aparecerá al instante de la inestabilidad de la fractura. Puede ser también asumido que el largo de la fisura a través de la pared es igual a  $e$ . El proceso de cómputo requerido para determinar la longitud de fisura crítica  $c_c$  sería encontrado de la relación:

$$K = \sigma J(\pi e) / 2 \quad (11)$$

Los valores de resistencia a la fractura dependen del grado de compresión lateral en el extremo de la fisura, el cual a su vez depende del grueso de la pieza fisurada, el parámetro  $K_{Ic}$  convencionalmente denota el valor de la deformación en un plano grueso y finito, el cual es un valor mínimo. El uso de  $K_{Ic}$  para fisura a través de la pared sería entonces una asunción conservadora.

Los resultados del análisis anterior pueden ser usados para dar una estimación conservadora de las dimensiones de una fisura inicial. En la Fig. N93. (Ref.3) se compara posibles formas de fisuras con sus dimensiones críticas.

La fisura tipo A es benigna aún cuando su dimensión superficial es mayor que la dimensión superficial crítica debido a que su profundidad es menor que  $a_c$ . Similarmente la fisura tipo B es benigna, a pesar que de su profundidad excede  $a_c$  porque su dimensión superficial es menor que  $e_c$ .

Solamente la fisura tipo C no es benigna, ya que su dimensión y profundidad exceden los correspondientes valores críticos.

#### ANÁLISIS DEL DAÑO TOLERABLE

La mecánica de fractura no está limitada a determinar las combinaciones críticas de tamaño-carga de fisura que producen la fractura inestable. Esto también puede ser aplicado para determinar la velocidad de progresión de un defecto de un tamaño benigno a una condición crítica. Esto depende del mecanismo involucrado. Por ejemplo para crecimiento de fisuras por fatiga bajo cargas cíclicas, a menudo se utiliza la velocidad de crecimiento cuya relación es:

$$\frac{d_a}{d_n} = q(K_{max} - K_{min}) \quad (12)$$

donde  $K_{max}$  y  $K_{min}$  indican los valores del factor de intensidad de esfuerzo a los máximos y mínimos niveles de carga respectivamente, mientras que  $q$  y  $m$  son constantes que dependen del material y del medio ambiente.

La habilidad para determinar el tiempo al cual el tamaño de la fisura se aproxima al tamaño crítico es frecuentemente necesario, tal procedimiento generalmente conocido como análisis del daño tolerable, claramente involucra Evaluación no Destructiva.

Una vez realizado un estudio de mecánica de fractura y encontrando  $a_c$  longitud crítica de fisura, se puede realizar un ensayo de ultrasonidos con el cual se encontrará la ubicación real de la fisura y si lo relacionamos con  $a_c$  podríamos predecir cuanto falta para que la fisura sea crítica y tomemos medidas correctivas. Lo anterior se relaciona con la mecánica de fractura, existiendo un claro progreso en cada campo, dependiendo uno del otro. Esta idea es conceptualmente representada en la Fig.Nº4.-

(Ref.3)

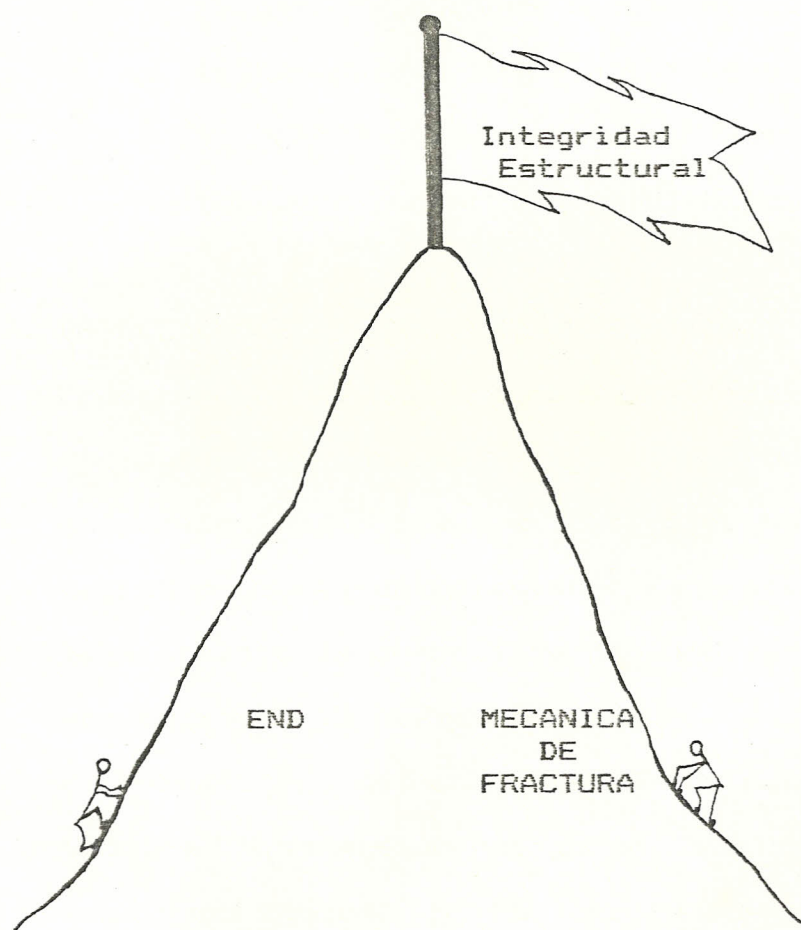


Fig.Nº4 Labor conjunta de los END y Mecánica de fractura para lograr los objetivos propuestos. (Ref.3)

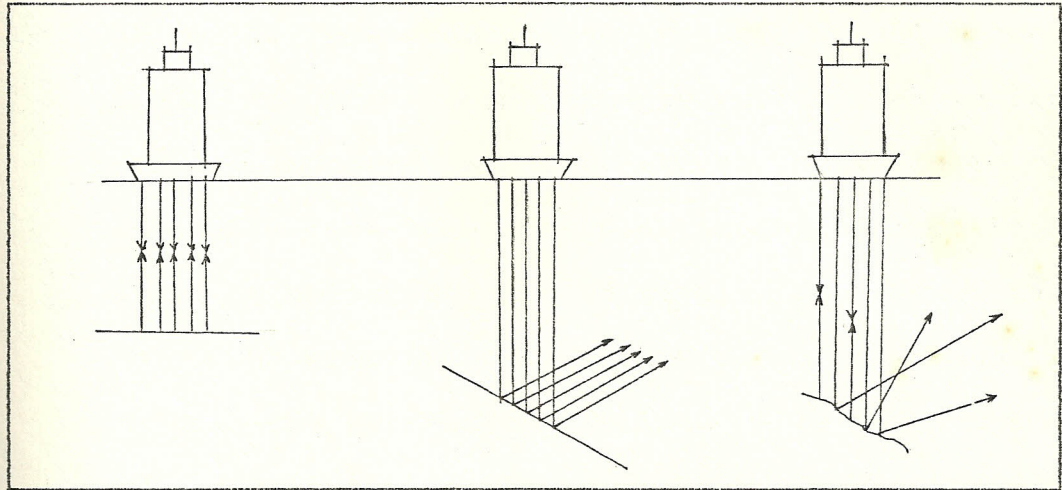
En esta figura especialistas en mecánica de fractura y Evaluación no Destructiva son vistos en un trabajoso seguimiento de una meta extremadamente importante "El aseguramiento de la integridad estructural". (Ref.- 3)

Aunque en algunas ocasiones estos especialistas pueden trabajar separadamente, es de esperarse que en el futuro unan sus esfuerzos para lograr los objetivos propuestos.

### 1.3. DETECCION DE FISURAS POR ULTRASONIDOS

La detección de una fisura por el método de ultrasonidos es influenciada por diversos parámetros, en particular por su orientación, su naturaleza, sus dimensiones en relación a la frecuencia utilizada, tamaño de grano y la profundidad a la que se encuentra en la pieza ensayada.

La orientación de una fisura cuando se usa la técnica transmisión-recepción simultáneos es de suma importancia. Si la grieta es normal a la cara del transductor, no ofrecerá superficie de reflexión, por lo tanto la orientación ideal de la superficie reflectante de la discontinuidad será aquella normal a la dirección de propagación del haz incidente, la cual se puede observar en la fig.N25a. (Ref.1)



a)

b)

c)

Fig.Nº5 Influencia de la orientación y forma de la fisura en la detección por ultrasonidos. (Ref.1)

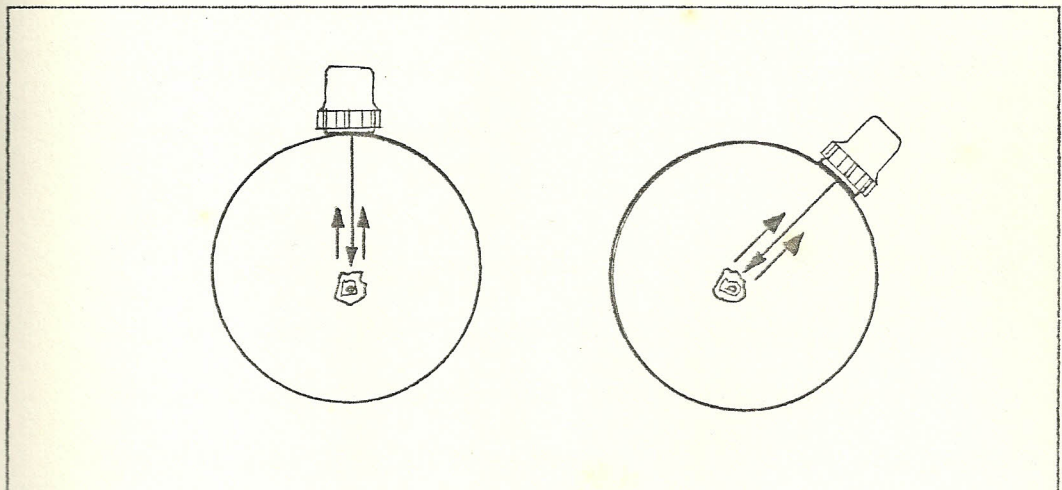


Fig.Nº6 Detección de discontinuidades tridimensionales, independientemente del sentido de llegada del haz ultrasónico. (Ref.4)

Cuando el haz incide sobre el defecto con un ángulo distinto de cero, la energía reflejada detectada por el transductor se reduce notablemente o puede resultar completamente nula. En la fig. NQ5b se muestra el caso de una superficie reflectante lisa con una orientación que hace imposible su detección por la técnica de transmisión-recepción simultáneos. El haz de ultrasonidos se refleja con dirección distinta a la de incidencia, por lo que el haz no vuelve al cristal emisor-receptor. En la misma fig. NQ5c se muestra el caso de un defecto que tiene igual orientación pero su superficie es irregular, rugosa. Estas irregularidades implican la presencia de algunas zonas que son normales a la dirección de la propagación del haz ultrasónico y reflejarán por lo tanto fracciones de energía que pueden llegar al transductor transmisor-receptor, permitiendo la detección del defecto.

En la práctica las fisuras presentan una superficie reflectante rugosa que favorece la detección en el caso de tener una orientación distinta a la normal del haz ultrasónico. Se tiene una superficie rugosa, cuando la altura de las irregularidades de la superficie son mayores que  $1/10$  de la longitud de onda del ensayo. (Ref.1)



## DETECCION DE FISURAS EN DIFERENTES GEOMETRIAS Y ORIENTACION

Las discontinuidades tridimensionales pueden detectarse desde todas las direcciones fig. N°6.- (Ref.4).

Las discontinuidades planas en cambio frecuentemente sólo pueden detectarse con emisión perpendicular al haz, frente a su orientación fig.N°7.- (Ref.4)

Si se conoce la localización y la orientación preferente de las discontinuidades planas por ejemplo, roturas de fatiga, entonces se trata de hallar las posiciones de control desde los cuales pueden localizarse dichas fisuras perpendicularmente con el haz ultrasónico fig.N°8.(Ref.4)

Las grietas perpendiculares a la superficie se detectan normalmente con dificultad al emitir el haz perpendicular hacia ellos, debido a la desviación del haz central desde el transductor, fig.N°9.(Ref.4).

En la Fig.N°10 (Ref.4) se presenta el caso de la detección de una fisura por medio de un transductor angular situado en el lado opuesto de la superficie de la pieza. En este caso la detección es más favorable utilizando un transductor angular de 45°aprovechando el efecto del "espejo angular". Cuando se produce el efecto del espejo angular

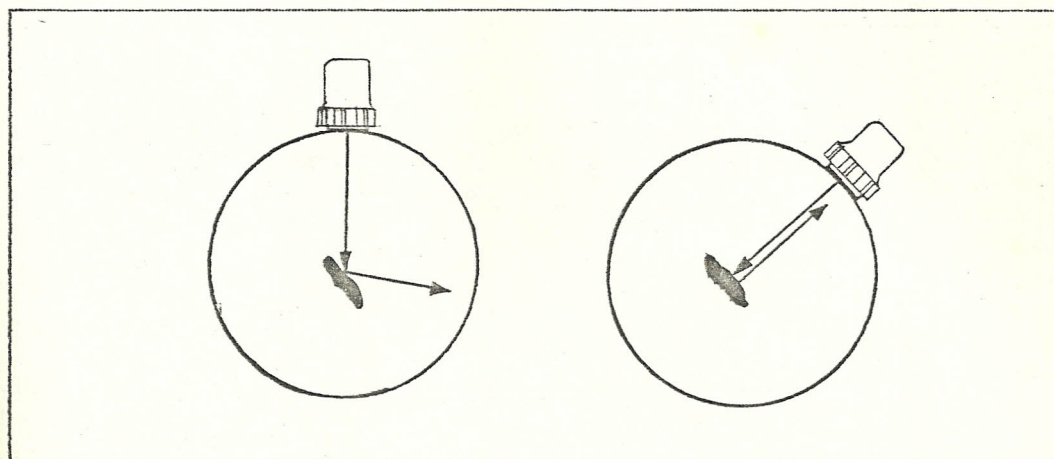


Fig. N07 Detección de discontinuidades planas mediante emisión perpendicular del haz ultrasónico. (Ref.4).

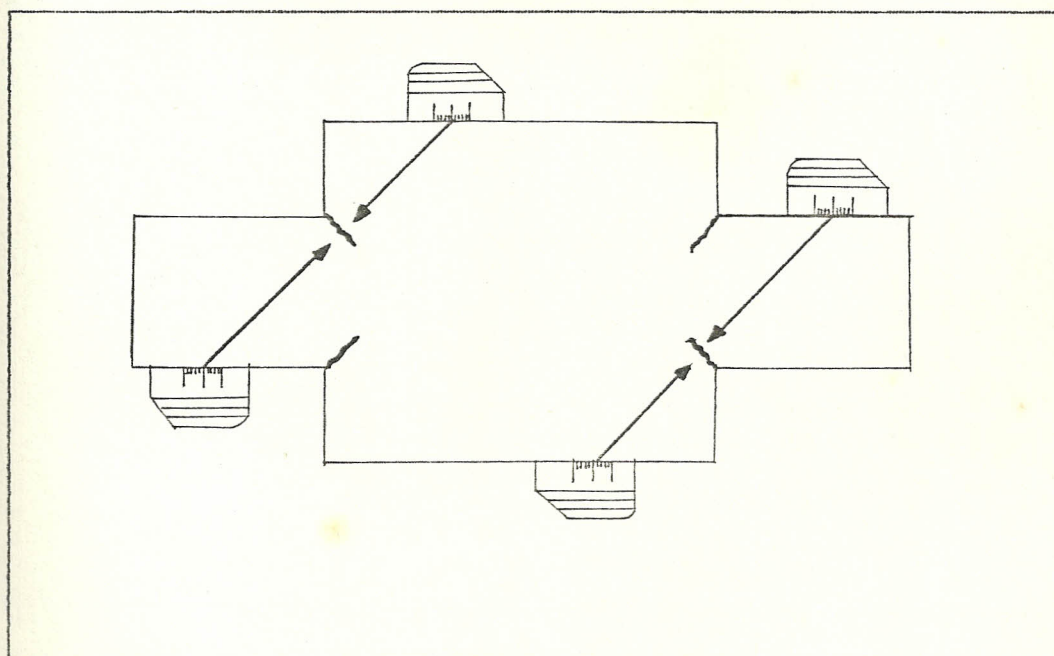


Fig.N08 Verificación de las zonas expuestas a fisuras, teniendo en cuenta su dirección preferente. (Ref.4)

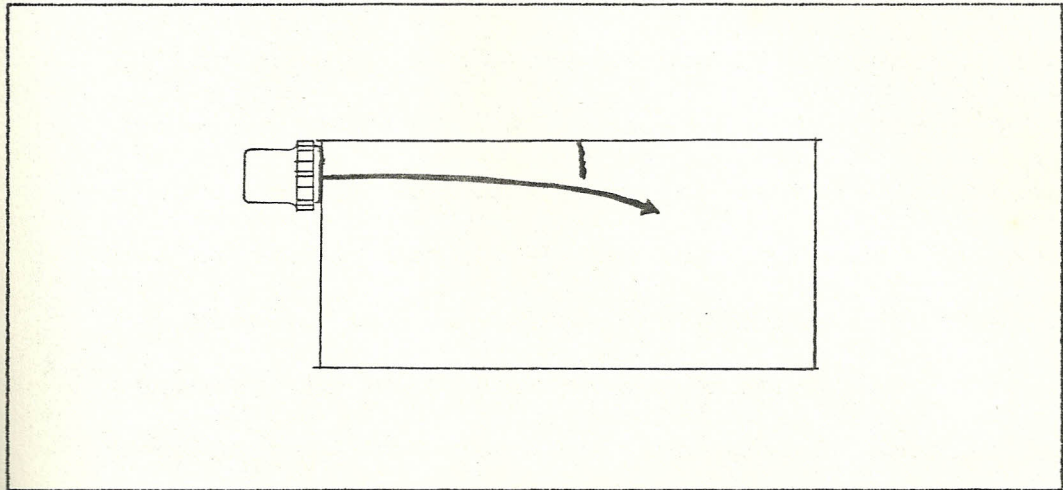


Fig.Nº9 Desviación del haz central del transductor. (Ref.4).

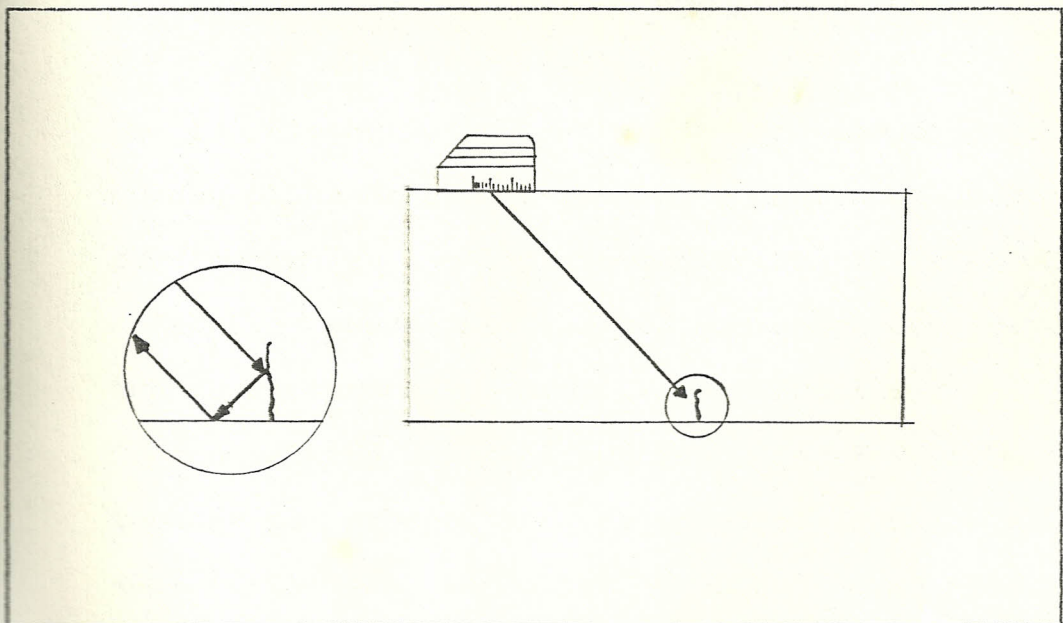


Fig.Nº10 Emisión inclinada del haz aprovechando el efecto de espejo angular de la fisura (Ref.4)

una fisura es detectada aún cuando el haz no incide normalmente, sino por la conversión geométrica del haz cuando incide sobre ella.

En la fig. N°11. (Ref.4) se muestra bulones roscados fisurados en la rosca. En la detección de fisuras puede existir error si la emisión del haz es inclinada, debido a que los ecos de la rosca enmascaran las señales procedentes de fisuras pequeñas. En estos casos puede ser favorable la emisión del haz mediante una pequeña inclinación con un palpador normal provisto por ejemplo de una cuña de 5°. Las indicaciones de la rosca disminuyen claramente y existe una verdadera posibilidad de conseguir señales de las pequeñas grietas.

En la Fig.N°12. (Ref.4) se muestra una discontinuidad plana de gran extensión y orientación perpendicular en sentido transversal al eje. Su detección puede realizarse mediante uso de un transductor normal desde la cara frontal.

Cuando existen discontinuidades pequeñas frecuentemente no podrán ser detectadas, debido a su superficie tan irregular y porque no regresa la suficiente energía al transductor angular. fig.- N°13. (Ref.4).

La fisura mostrada en la figura anterior puede ser detectada con seguridad utilizando la técnica

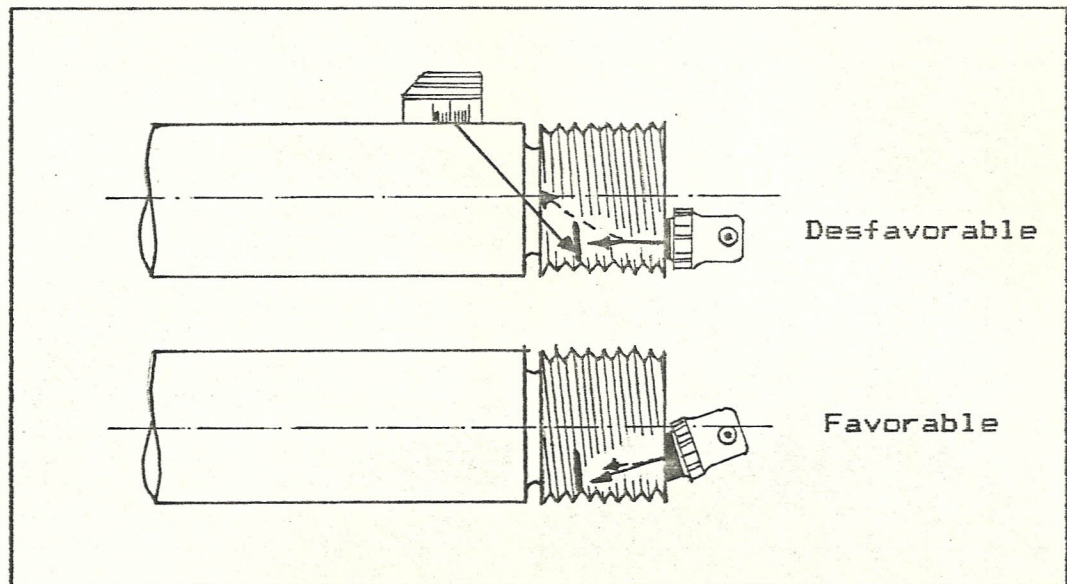


Fig.Nº11 Emisión inclinada del haz mediante transductor normal en ejes roscados para detectar fisuras en su inicio, partiendo del fondo de la rosca. (Ref.4)

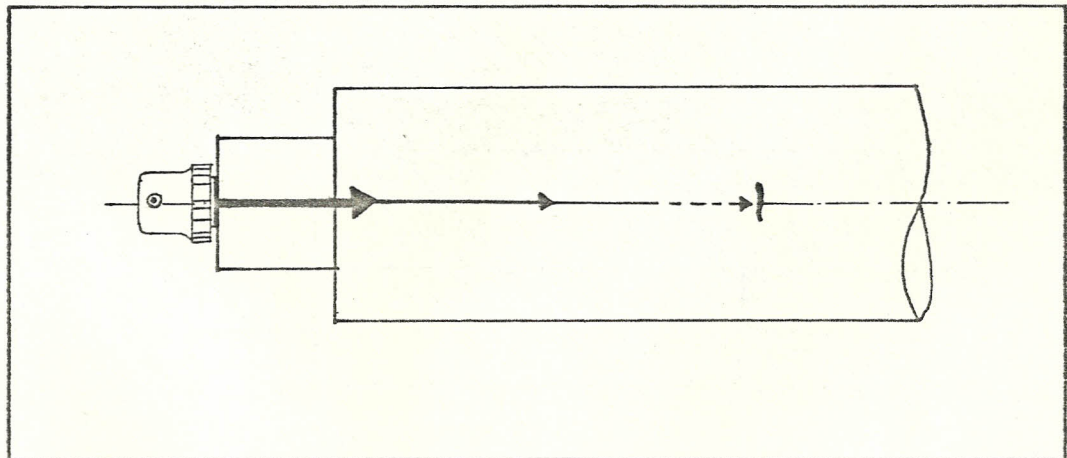


Fig.Nº12 Detección de fisuras utilizando transductor normal a lo largo del eje de una pieza alargada. (Ref.4)

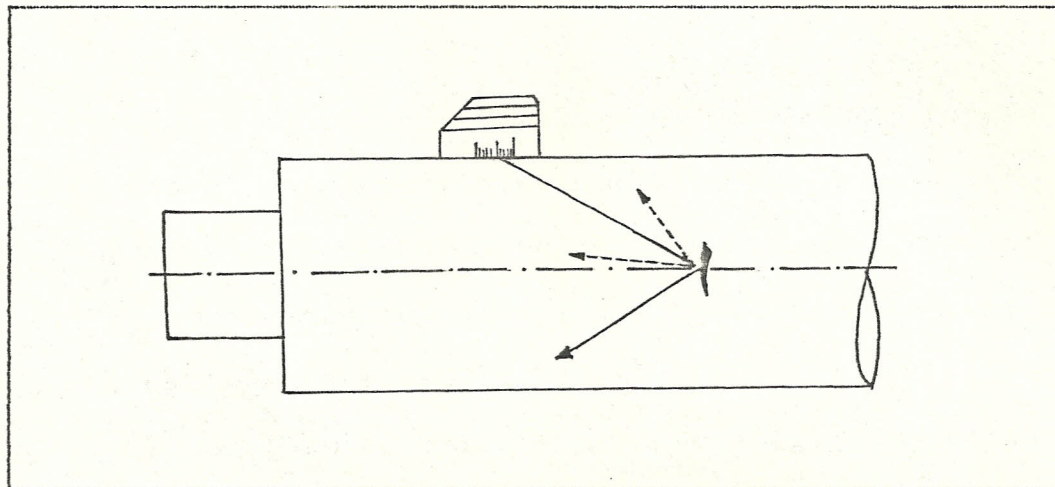


Fig.Nº13 Detección, con emisión inclinada mediante un solo transductor angular de la superficie irregular de la fisura. (Ref.4)

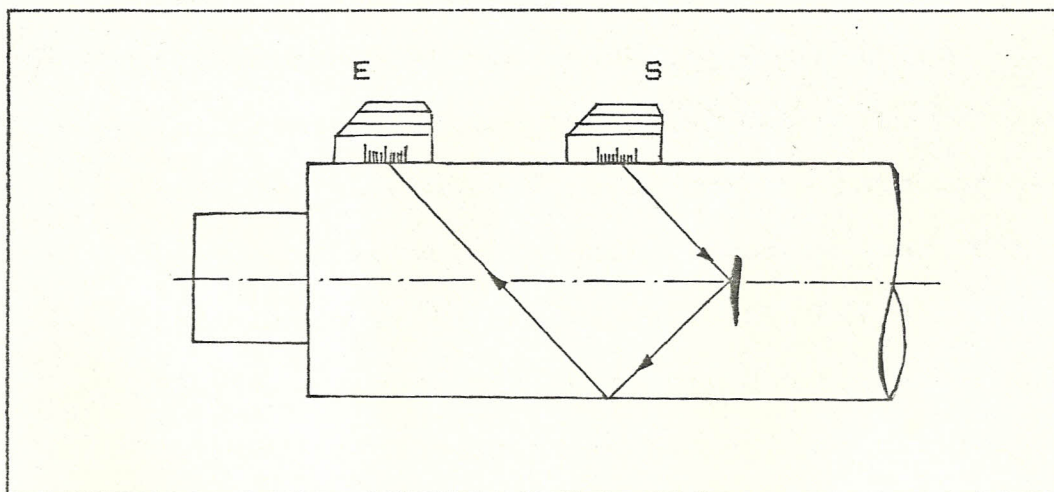


Fig.Nº14 Detección segura de una fisura utilizando el sistema Tandem (método de 2 palpadores). (Ref.4).

Tandem. Esta técnica consiste en utilizar dos transductores idénticos mecánicamente acoplados un emisor y un receptor, tal como se muestra en la Fig. N°14. (Ref.4).

Si se trata de la detección de fisuras longitudinales en superficies convexas de orientación radial abiertas a la superficie fig. N°15. (Ref.4), se puede detectar las mismas gracias a la curvatura de la superficie.

En el caso de grietas transversales que partan de la superficie no suele ser suficiente el poder de resolución en el campo cercano de los transductores angulares habituales fig. N°16a. (Ref.4), por lo que son necesarios transductores de doble cristal también conocidos como transductores angulares estándar (SE). Estos transductores en vez de tener un solo cristal tiene dos, donde el uno es transmisor y el otro receptor fig. N°16b.

Tal transductor garantiza la detección de grietas radiales situadas en la superficie interior de una pieza, al existir la posibilidad de una verificación desde el interior fig. N°17. (Ref.4).

Si por razones de accesibilidad hay que realizar la verificación desde fuera y aún utilizando un transductor menor de  $35^\circ$  no es posible llegar al orificio interior fig N°18. (Ref.4)

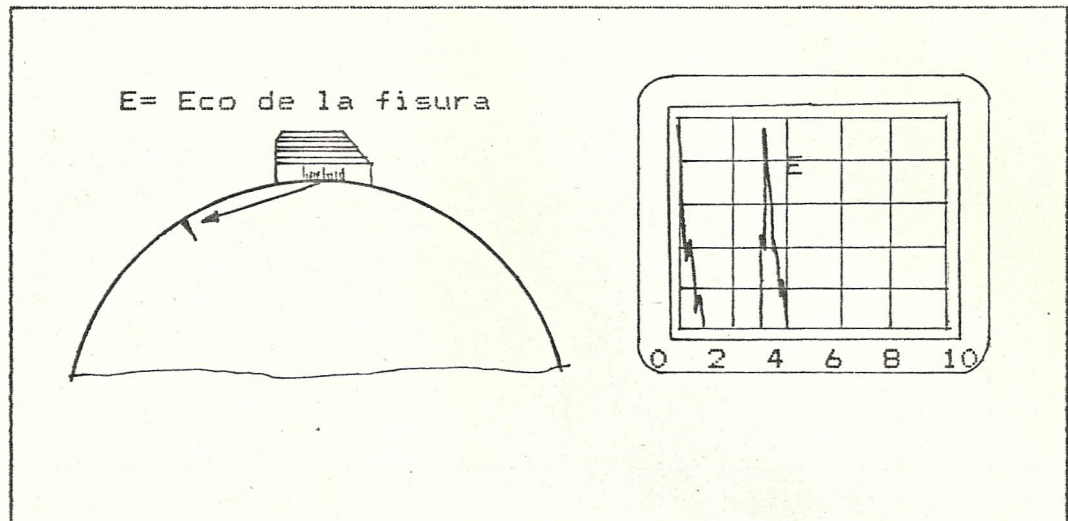


Fig.Nº15 Buena detectabilidad de fisuras longitudinales superficiales por la curvatura superficial. (Ref.4)

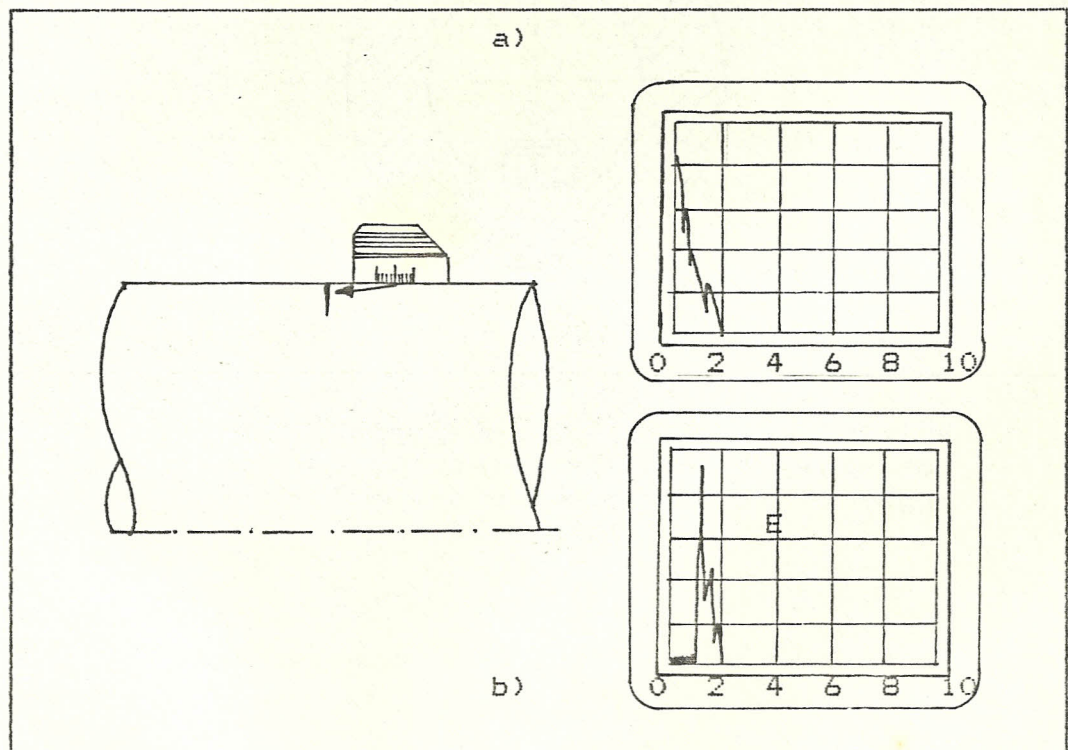


Fig.Nº16 a) Poder resolutivo insuficiente en el campo cercano de la fisura.  
b) Excelente poder resolutivo en el campo cercano del transductor angular SE. (Ref.4).



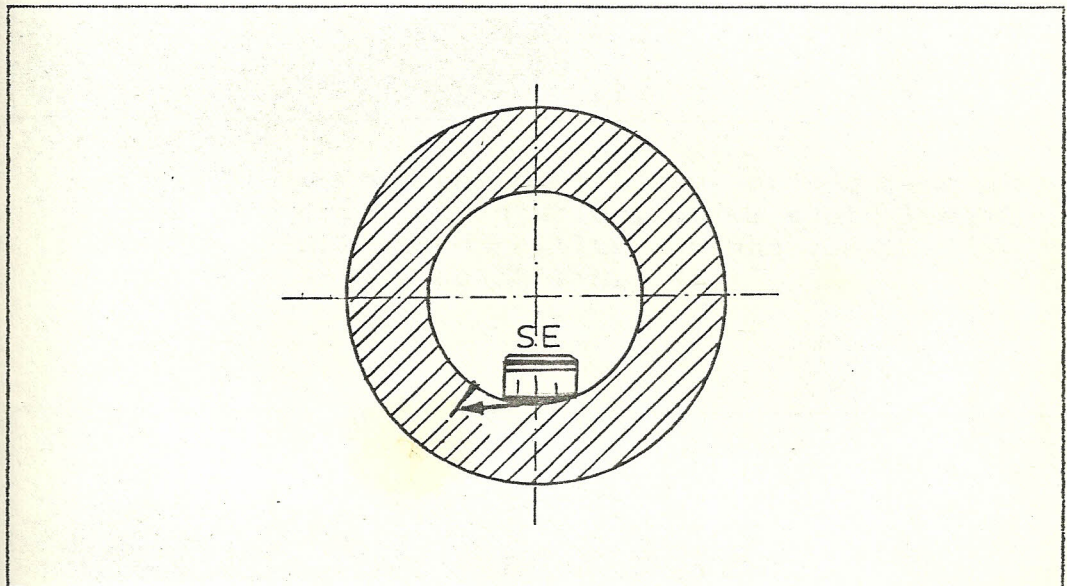


Fig.Nº17 Detección de fisuras radiales situadas en el orificio interior por medio de transductores angulares SE. (Ref.4)

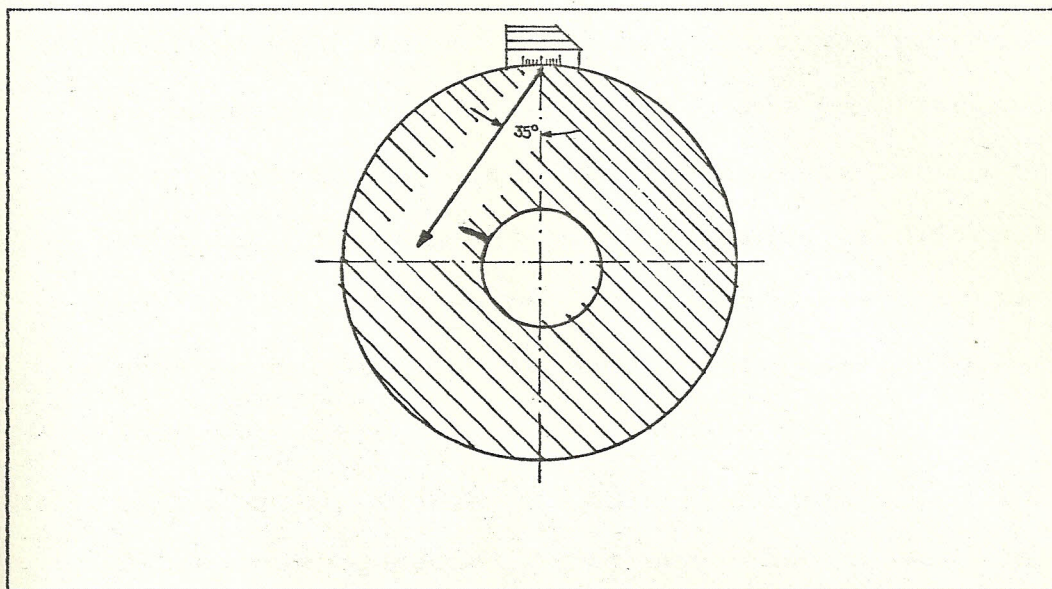


Fig.Nº18 Detección de fisuras sin acceso al orificio interior, no se suele llegar a la zona crítica incluso con un ángulo de 35°. (Ref.4)

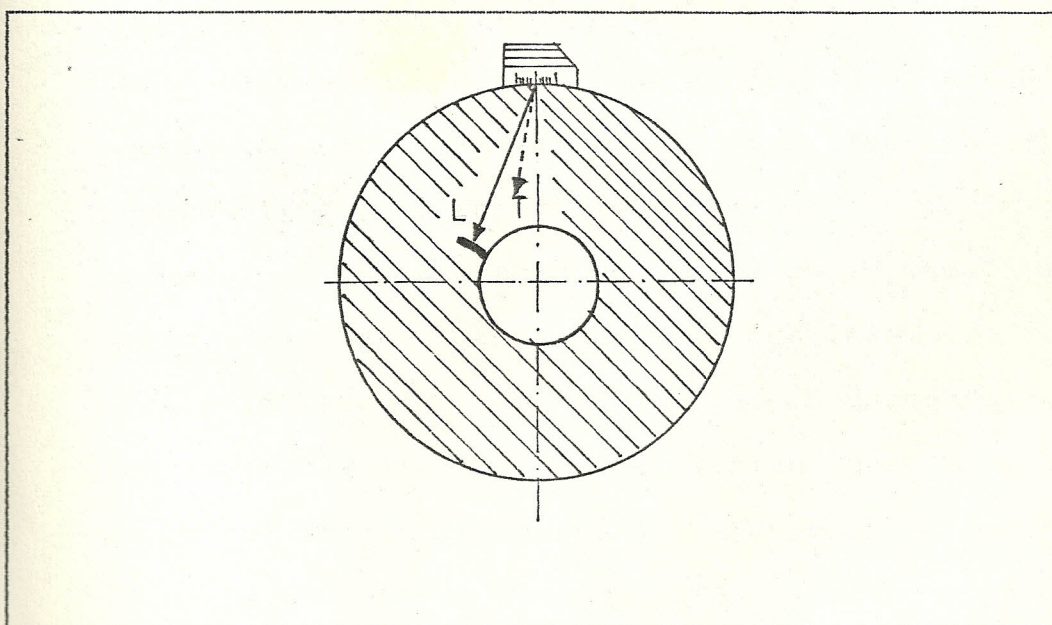


Fig.Nº19 Detección de fisuras utilizando la propagación de ondas Longitudinales (L) y Transversales (T) en un material. (Ref.4)

La detección de la fisura en este caso puede ser posible utilizando un transductor que permita la propagación en el material de ondas longitudinales y transversales. La detección se hace con la onda longitudinal debiendo tener presente la dificultad en la interpretación de las señales a causa de ecos producidos por la onda transversal. Fig.Nº19. (Ref.4).

#### ANISOTROPIA, TAMAÑO DE GRANO Y LONGITUD DE ONDA.

Estos tres conceptos describen las causas de la dispersión de los ultrasonidos, de la cual parten frecuentemente las dificultades para un control ultrasónico. Un material cristalino resulta elásticamente anisótropo, al tener sus cristales diferentes propiedades elásticas según la dirección bajo la cual se reciba desde fuera un esfuerzo mecánico, fig Nº20. (Ref.4). Si tales cristales están alineados, entonces el material por regla general es transparente por lo menos en una dirección, fig.Nº20a. En cambio si los cristales tienen orientación irregular se puede presentar una considerable dispersión del sonido por la reflexión del haz ultrasónico en cada borde del grano, fig. Nº20b. Otra consideración importante es el tamaño medio del grano de la estructura, fig.Nº21. Si el diámetro medio del grano "d" no es mucho más pequeño que la longitud de onda " $\lambda$ " de la

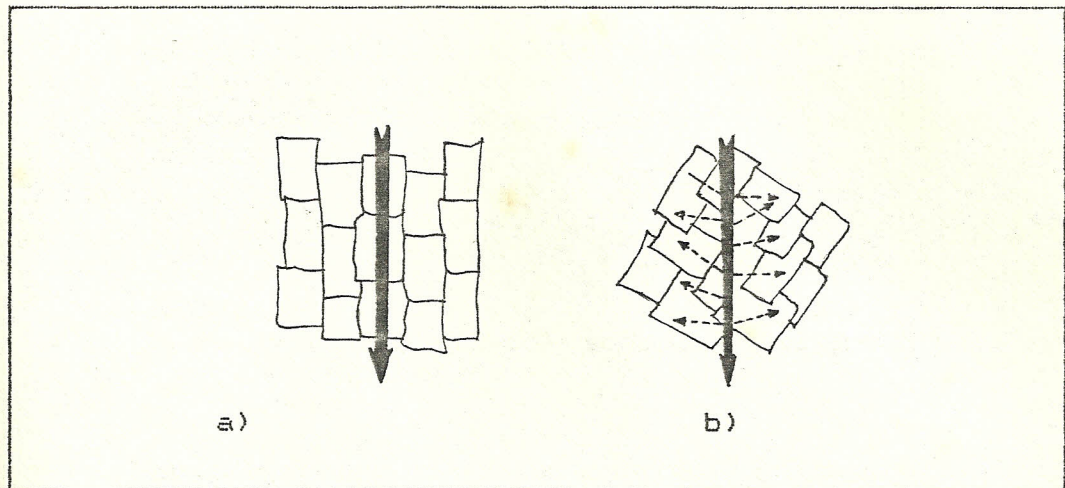


Fig.Nº20 a) En los materiales elásticamente anisotropo existe buen paso del haz ultrasónico por la orientación de los cristales.  
 b) Fuerte dispersión de los ultrasónicos al hallarse los cristales dispuestos en forma irregular. (Ref.4)

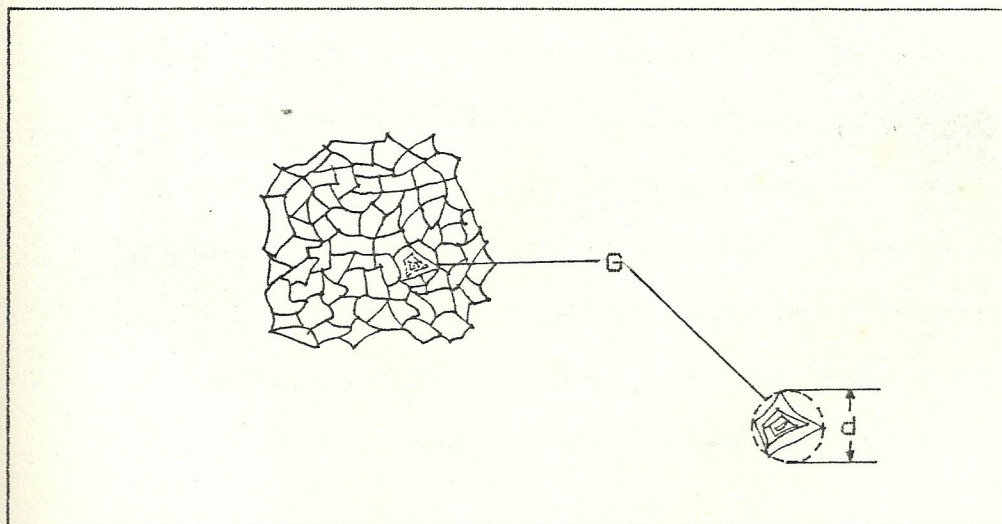


Fig.Nº21 Tamaño medio de grano  $G$  de una estructura cristalina  $d$ = diámetro medio del grano. (Ref.4)

onda ultrasónica se produce una dispersión del sonido en  $d \approx 0.5 \lambda$ . La longitud de onda  $\lambda$  se puede calcular como sigue:

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

donde:

$c$  = velocidad del sonido en el material.  
 $f$  = frecuencia.

Por lo que, para encontrar grietas o defectos éstas deberán ser mayores que las discontinuidades o variaciones naturales del tamaño de grano dentro del material. Dentro de ciertos límites la unidad ultrasónica es capaz de distinguir entre reflexiones debidas a grietas grandes o pequeñas mediante variaciones en la frecuencia o por diferencias en las amplitudes de las señales reflejadas. Es evidente que si el material está lleno de porosidades de 3mm., es imposible encontrar una grieta que sea de menor longitud, incluso grietas de 3mm. Si la estructura de una pieza a ensayar es basta, originará una fuerte atenuación y una notable dispersión de los ultrasonidos, no pudiéndose observar nada digno de mención en la pantalla, aparte de la conocida "hierba". En este caso no se apreciará una fisura. Con un tratamiento térmico adecuado se puede obtener una estructura de grano fino en toda la pieza eliminando el ruido, siendo posible obtener ecos de fondo de las piezas con imágenes

claras y sin ruido. (Ref.4).

#### CONSIDERACIONES DEL TAMAÑO DE LA FISURA.

Una fisura puede ser detectado cuando sus dimensiones son tales que permiten reflejar el haz ultrasónico que se emplea en el ensayo. Teóricamente existe la posibilidad de detectar una fisura cuando sus dimensiones transversales con respecto al haz ultrasónico son mayores que  $1/4$  de la longitud de onda. Discontinuidades con dimensiones superficiales a dicho límite reflejan el haz ultrasónico según las leyes normales de la acústica mientras que aquellas que tienen dimensiones menores no producen reflexión y por lo tanto no son detectables.

Puesto que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, la detección de los defectos pequeños esta estrechamente vinculada con la frecuencia del examen, mientras más elevado es la frecuencia del haz ultrasónico mayor es la sensibilidad de detección.

Para que una fisura pueda ser detectada, debe constituir un obstáculo para la propagación del haz ultrasónico de manera que la refleje total o parcialmente.

La reflexión del haz depende de la relación entre la impedancia acústica del medio que se examina y la impedancia acústica del medio que constituye la discontinuidad. Si el material ensayado es homogéneo, excepto en lo que se refiere a las fisuras, o si éstas son mayores que cualquier discontinuidad natural dentro del material, un instrumento ultrasónico las puede localizar normalmente con facilidad si cumple con las exposiciones anteriores. (Ref.1).

#### EVALUACION DE LA PROFUNDIDAD

La evaluación de la profundidad a que se encuentra una fisura es posible mediante las dos técnicas transmisión-recepción y transmisión-recepción simultáneos.

La fisura refleja una parte del haz provocando la aparición del eco en la pantalla. La amplitud del eco depende de muchos factores; orientación, dimensión, naturaleza, posición etc. La posición en la pantalla, en cambio es únicamente proporcional a la distancia a la que se encuentra del transductor, es decir a su profundidad. La profundidad es evaluada con suficiente precisión si se ha calibrado correctamente el aparato.

La presencia de dos o más ecos de fisuras en el ensayo por reflexión se presentan entre el pulso de transmisión y el eco de fondo, no siempre indi-

ca que existen otras fisuras a distintas profundidades detectadas simultáneamente. En realidad estos ecos pueden indicar reflexiones múltiples de un mismo defecto. Estas reflexiones se distinguen por presentarse a intervalos iguales.

La profundidad a que se encuentra una fisura influye notablemente en la detección de la misma. Así las fisuras subsuperficiales no se evidencian si caen dentro de la zona muerta del transductor. Las fisuras que se encuentran a gran profundidad son detectadas con dificultad por la reducción de la sensibilidad debida a la absorción de energía ultrasónica de parte del material o a causa de la divergencia del haz. (Ref.1).

#### 1.4 MEDICION DE LA PROFUNDIDAD DE FISURAS POR ULTRASONIDOS

La profundidad de una fisura puede ser calculada midiendo el tiempo de viaje entre la transmisión y recepción del haz ultrasónico en la fisura. Ordinariamente para esta medición dos transductores tendrían que ser localizados simétricamente con respecto a la fisura. Se describirá tres métodos para eliminar este contratiempo simétrico, difícil de salvar cuando la fisura no crece verticalmente o cuando no es una fisura superficial. En este caso un transductor primero tiene que ser movido para detectar una señal, entonces con la distancia



entre ellos mantenida constante pueden ser movidos juntos, para asegurar simetría alrededor de la fisura, por lo que sería necesario un dispositivo que mantenga la distancia entre los dos transductores, lo cual sería un inconveniente en fisuras no superficiales, donde el método tendría que ser repetido dos veces, una vez para la parte superior y otra para la base de la fisura. Sin embargo, la ventaja del arreglo simétrico es que el análisis matemático involucrado en el cálculo de la profundidad de la fisura es simple. Se realizará el estudio de tres métodos para eliminar la necesidad de simetría. (Ref.5)

#### 1.4.1 METODO 1: TRANSMISION-RECEPCION SIMULTANEOS

Se colocan los transductores a cada lado de la fisura, cada uno actúa como transmisor receptor simultáneamente. El tiempo de viaje entre el punto de entrada del haz en el material y la fisura es medido, como se conoce la velocidad del sonido del material, la distancia puede ser calculada Fig.Nº22. (Ref.5).

Sea el plano  $z=0$  que corresponda al tope de la superficie del material a ser inspeccionado, sea  $(x,z)$  la localización de la fisura y  $(x_1,0), (x_2,0)$  la localización de

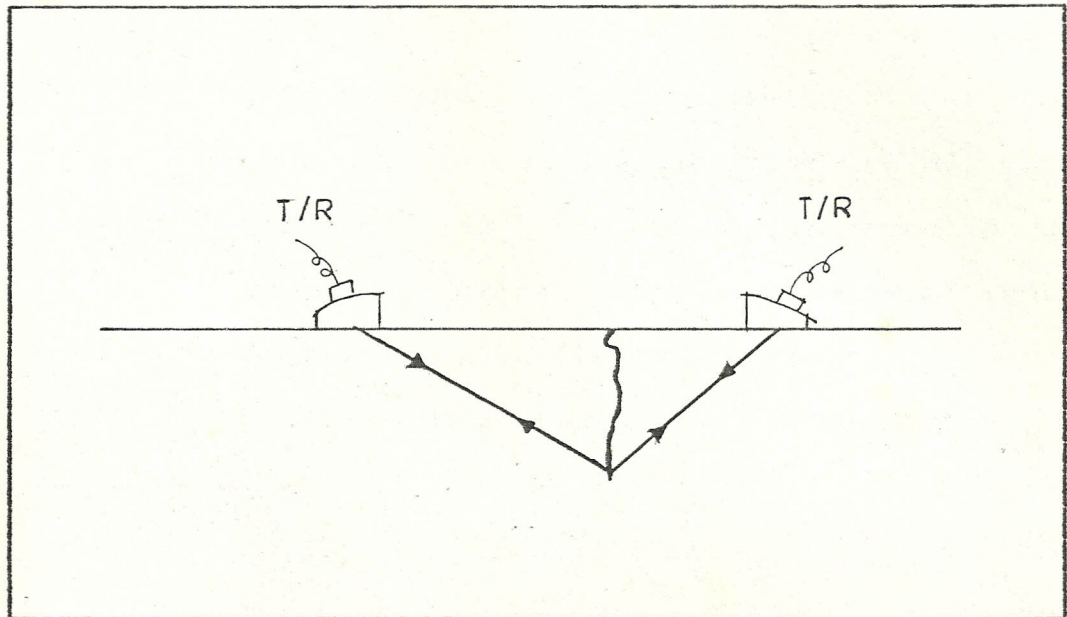


Fig.Nº22 Localización de una fisura usando los transductores como transmisor-receptor simultáneamente. (Ref.5)

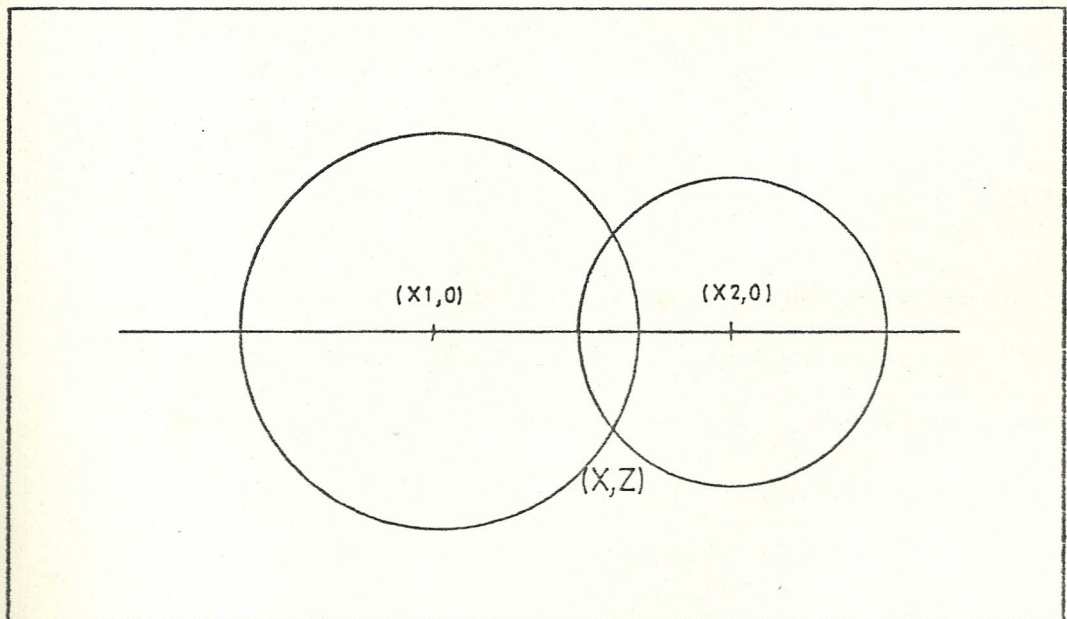


Fig.Nº23 La localización de la fisura  $(x,z)$  es dada por el punto de intersección de los dos círculos dentro del material (Ref.5)

los dos transductores Fig. N223. (Ref.5). Se dibuja círculos tomando las coordenadas y la posición de los dos transductores como centro y la ruta viajada por el haz como radio de los círculos. La intersección de los dos círculos dentro del material indicará la localización de la fisura.

Las ecuaciones de los dos círculos son:

$$(x-x_1)^2 + z^2 = c_1^2 \quad (14)$$

$$(x-x_2)^2 + z^2 = c_2^2 \quad (15)$$

donde  $c_1$  y  $c_2$  son los radios de los dos círculos. Eliminando  $z$  de las dos ecuaciones se tiene:

$$x = \frac{1}{2} \left[ x_2 + x_1 + \frac{c_1^2 - c_2^2}{x_2 - x_1} \right] \quad (16)$$

La profundidad de  $z$  puede ser encontrada de la ecuación.

$$z = \pm [c_1^2 - (x-x_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

De la cual se obtiene dos soluciones para  $z \leq 0$  y  $z > 0$ , los cuales representan los dos puntos de intersección de los dos círculos. Al estar la fisura dentro del material  $z < 0$  es la solución correcta, por lo que el signo menos debe ser usado en la ecuación 17.

Sustituyendo 16 en 17 obtenemos:

$$z = - \left[ c_1^2 - \frac{1}{4} (x_2 - x_1 + \frac{c_1 - c_2}{x_2 - x_1})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Si sólo la distancia entre los puntos de incidencia de los dos transductores es conocido  $d = x_2 - x_1$ , la profundidad de la fisura  $z$ , puede ser determinada reescribiendo la ecuación

$$z = - \left[ c_1^2 - \frac{1}{4} (d + \frac{c_1 - c_2}{d})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Para este método, no es necesario tener dos transductores, un transductor puede colocarse en ambos lados de la fisura consecutivamente para realizar mediciones.

#### 1.4.2 METODO 2: TRANSMISION, TRANSMISION -RECEPCION SIMULTANEOS

Primero uno de los dos transductores actúa como transmisor y el otro como receptor y el tiempo de viaje es medido. Entonces uno de los transductores funciona como un transmisor-receptor simultáneos, luego el tiempo de viaje del haz es medido. Sea  $(p_1, 0)$  y  $(p_2, 0)$  la ubicación de los transductores. Fig. N224. (Ref.5). En el caso transmisión-recepción es posible dibujar una elipse con foco  $(p_1, 0)$  y  $(p_2, 0)$ . Luego se usa un transductor como transmisión-recepción simultáneos y se obtiene un círculo

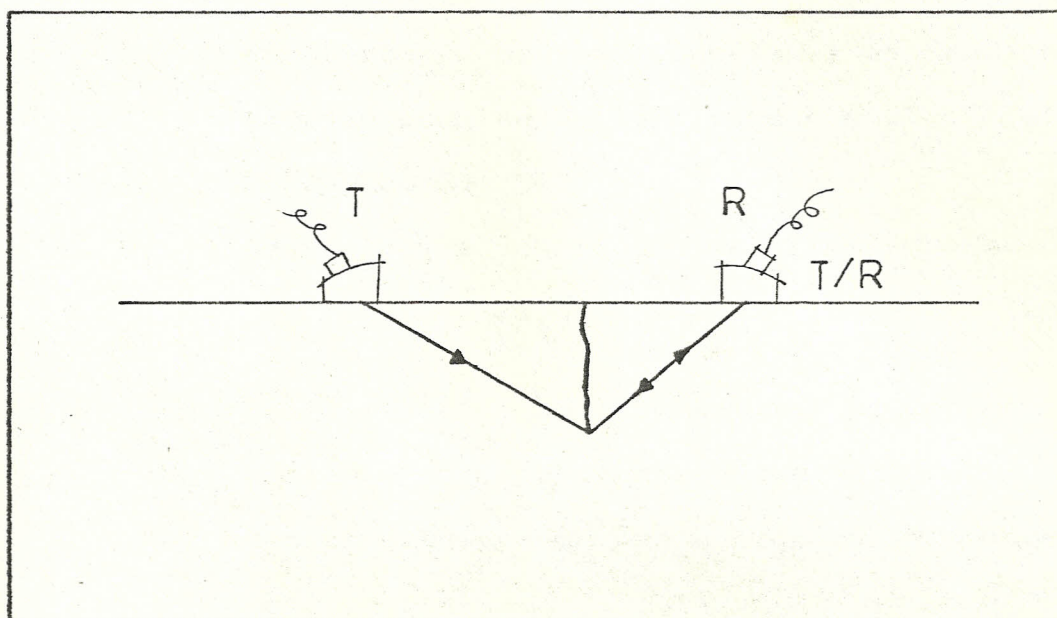


Fig.Nº24 Localización de una fisura usando los transductores como transmisor-receptor y uno de ellos como transmisor-receptor simultáneamente. (Ref.5)

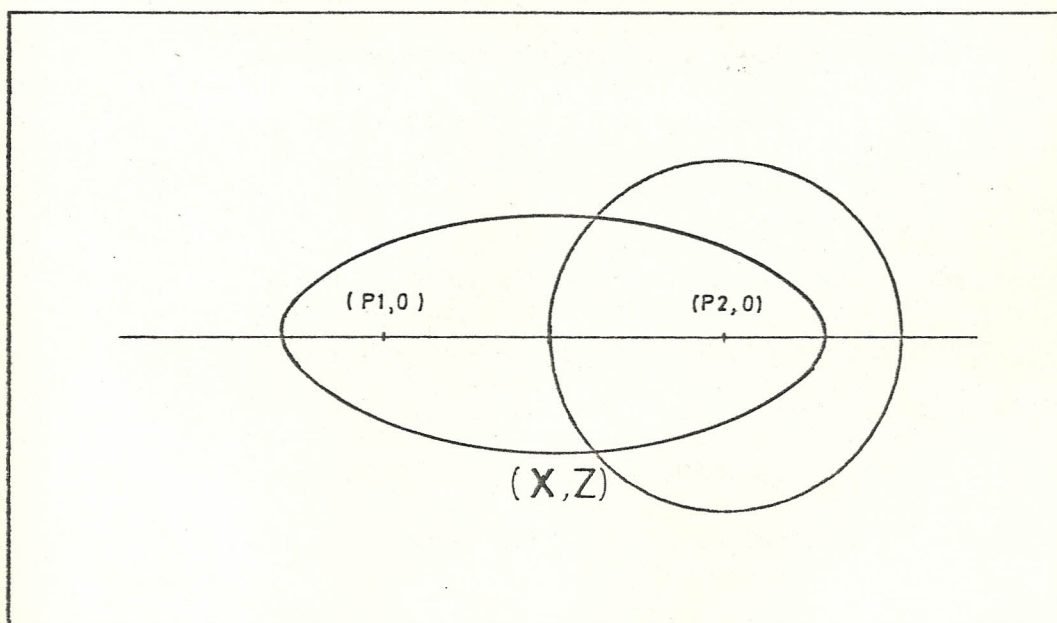


Fig.Nº25 La localización de la fisura  $(x,z)$  es dada por el punto de intersección de la elipse y el círculo dentro del material. (Ref.5)

cuyo centro es la ubicación del mismo. La localización de la fisura(x,z) es dado por la intersección de la elipse con el círculo Fig.Nº25. (Ref.5).

Sea (x1,0) el centro de la elipse donde:

$$(x_1, 0) = \frac{p_1 + p_2}{2}, 0 \quad (20)$$

2a: longitud del eje mayor

2b: longitud del eje menor

Las propiedades de una elipse muestran que:

$$a_1 = \frac{l_1}{2} \quad (21)$$

$$b_1 = \left[ \left( \frac{l_1}{2} \right)^2 - \left( \frac{p_2 - p_1}{2} \right)^2 \right] \quad (22)$$

donde: l1: distancia viajada por el haz desde el transmisor hasta el receptor.

La ecuación de la elipse es:

$$\frac{(x - x_1)^2}{a_1^2} + \frac{z^2}{b_1^2} = 1 \quad (23)$$

Sea (x2,0) y c2 el centro y radio del círculo, la ecuación del círculo es dado por:

$$(x - x_2)^2 + z^2 = c_2^2 \quad (15)$$

donde x2 = p2

Eliminando z de la ecuación 23 y 15 se obtiene:

$$x = \frac{-M_1 \pm (M_1^2 - 4L_1N_1)^{\frac{1}{2}}}{2L_1} \quad (24)$$

donde:

$$L_1 = b_1^2 - a_1^2 \quad (25)$$

$$M_1 = 2(a_1^2 x_2 - b_1^2 x_1) \quad (26)$$

$$N_1 = b_1 x_1^2 + a_1^2 c_2^2 - a_1^2 x_2^2 - a_1^2 b_1^2 \quad (27)$$

Despejando  $z$  de la ecuación 15 se obtiene:

$$z = \pm [c_2^2 - (x_2 - x_1)^2]^{1/2} \quad (28)$$

En la ecuación 24 se debe usar el signo positivo para no obtener raíces imaginarias de  $x$  ni de  $z$ . La ecuación 28 corresponde a los dos puntos de intersección de la elipse y el círculo, en la cual el signo negativo es usado por estar la fisura dentro del material obteniéndose:

$$x = x_2 + 1/L_1 \{ -b_1^2 (x_2 - x_1) + [ -a_1^2 b_1^2 c_2^2 + a_1^2 b_1^{2n} + a_1^{2n} c_2^2 - a_1^{2n} b_1^2 + a_1^2 b_1^2 (x_2 - x_1)^2 ]^{1/2} \} \quad (29)$$

Si la distancia entre los centros de los dos transductores es conocida  $x_2 - x_1 = d/2$ , reemplazando esta ecuación en 28, se obtiene que:

$$z = - \left( c_2^2 - \frac{1}{L^2} \{ -b_1^2 d/2 + [ -a_1^2 b_1^2 c_2^2 + a_1^2 b_1^{2n} + a_1^{2n} c_2^2 - a_1^{2n} b_1^2 + a_1^2 b_1^2 (d/2)^2 ]^{1/2} \} \right)^{1/2} \quad (30)$$

donde:  $n = 4$

La ecuación N930 da la profundidad de la fisura.

#### 1.4.3 METODO 3: TRANSMISION RECEPCION

Se usa dos transductores, uno como transmisor y el otro como receptor y con la distancia viajada por el haz, la profundidad  $z$

puede ser calculada. Los transductores se ubican a ambos lados de la fisura y se toma los datos necesarios, luego se vuelve a repetir la medición en otro punto, sin importar que ellos no sean los puntos de máxima amplitud Fig. N°26. (Ref.5).

Sean los puntos  $(p_{11},0)$  y  $(p_{12},0)$  las localizaciones originales de los transductores, los cuales son los focos de la elipse 1. Sea  $(p_{21},0)$  y  $(p_{22},0)$  las nuevas localizaciones de los transductores siendo estos los focos de la elipse dos. La localización de la fisura  $(x,z)$  es entonces dado por el punto de intersección de las dos elipses dentro del material Fig. N°27.- (Ref.4).

Sea  $(x_1,0)$  el centro de la primera elipse

$$(x_1,0) = \left( \frac{p_{11} + p_{12}}{2}, 0 \right) \quad (31)$$

Sean  $2a_1$  y  $2b_1$  las longitudes del eje mayor y menor respectivamente donde:

$$a_1 = l_1/2 \quad (21)$$

$$b_1 = \left[ \left( \frac{l_1}{2} \right)^2 - \left( \frac{p_{12} - p_{11}}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (32)$$

donde  $l_1$  : es la distancia viajada por el haz ultrasónico desde el transductor al receptor.



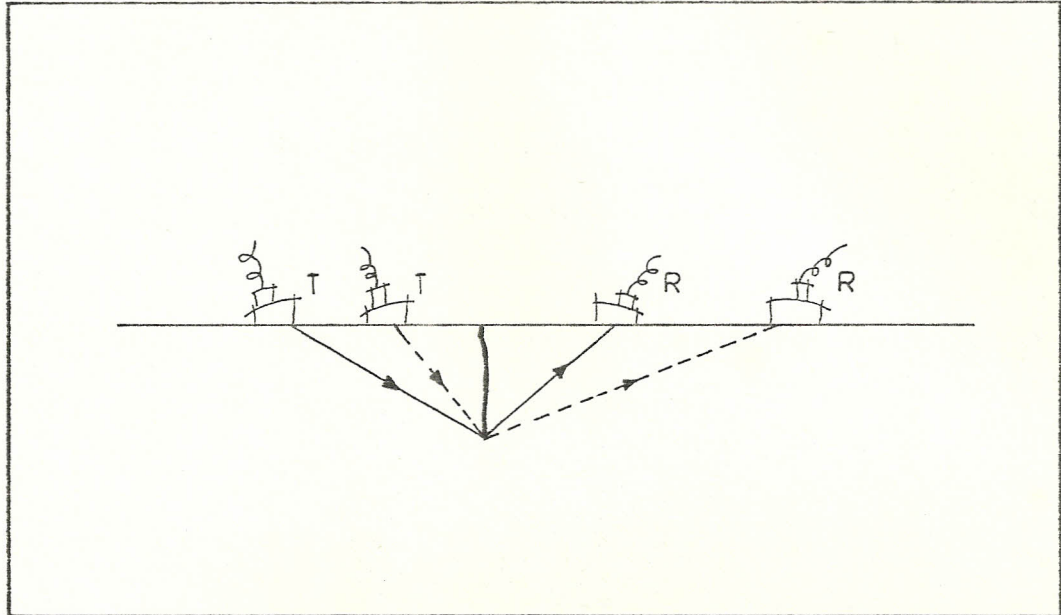


Fig.Nº26 Localización de una fisura colocando los transductores en dos posiciones y usando ellos como transmisor-receptor (Ref.5)

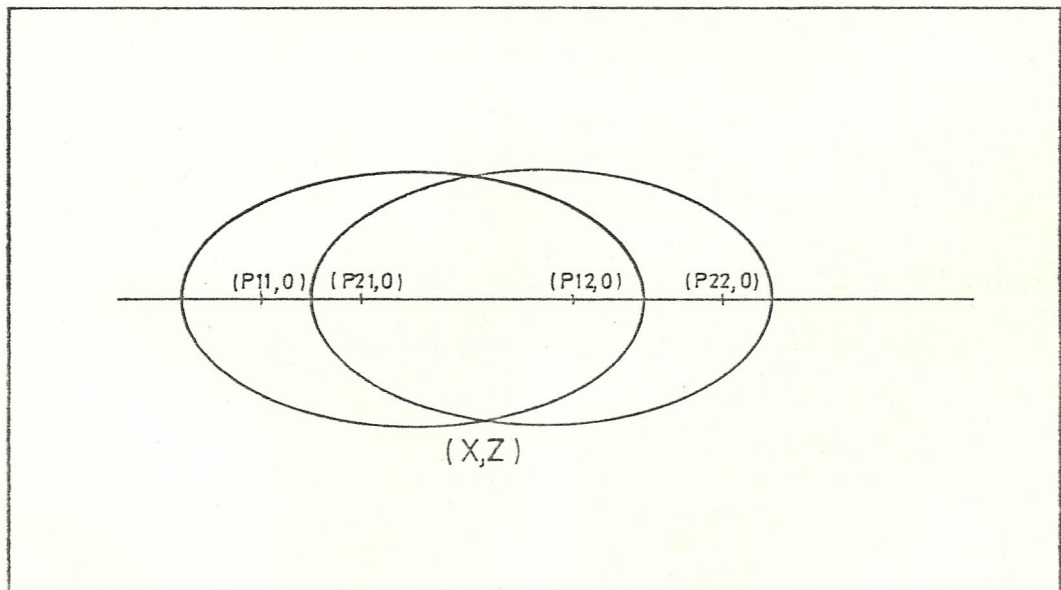


Fig.Nº27 Localización de la fisura  $(x,z)$  dada por el punto de intersección de las elipses dentro del material. (Ref.5)

La ecuación de la elipse es:

$$\frac{(x - x_1)^2}{a_1^2} + \frac{z^2}{b_1^2} = 1 \quad (33)$$

Similarmente sea:

$$(x_2, 0) = \left( \frac{p_{11} + p_{22}}{2}, 0 \right) \quad (34)$$

Sea  $2a_2$  y  $2b_2$  las longitudes del eje mayor y menor respectivamente.

$$a_2 = l_2/2 \quad (35)$$

$$b_2 = \left[ \left( \frac{l_2}{2} \right)^2 - \left( \frac{p_{22} - p_{21}}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (36)$$

Donde  $l_2$  es la distancia viajada por el haz ultrasónico en la trayectoria desde el transductor al receptor. La ecuación de la elipse esta dado por:

$$\frac{(x-x_2)^2}{a_2^2} + \frac{z^2}{b_2^2} = 1 \quad (37)$$

Eliminando  $z$  de la ecuación 33 y 37 después de eliminación algebraica se obtiene:

$$x = \frac{-M \pm [M^2 - 4L_2N_2]^{1/2}}{2L_2} \quad (38)$$

$$L_2 = a_2^2 b_1^2 - a_1 b_2^2 \quad (39)$$

$$M_2 = -2a_2^2 b_1^2 x_1 + 2a_1^2 b_2^2 x_2 \quad (40)$$

$$N_2 = a_2^2 b_1^2 x_1^2 + a_1^2 a_2^2 b_2^2 - a_2^2 b_2^2 x_2^2 - a_1^2 a_2^2 b_1^2 \quad (41)$$

La ecuación 38 conduce a dos soluciones para  $x$ , de una de ellas se obtiene solución imaginaria de  $z$ , por lo que es usado el signo positivo para la obtención de  $x$ .

El valor de  $x$  de la ecuación 38 es reemplazado en la ecuación 33, obteniéndose  $z$ :

$$z = \pm b_1 \left[ 1 - \frac{(x - x_1)^2}{a_1^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

La ecuación 42 corresponde a los dos puntos de intersección de las dos elipses, debido a que la fisura está dentro del material el signo que debe utilizarse es el negativo.

Experimentalmente, este método llevaría a un valor exacto de profundidad de la fisura, sin embargo existe un error en el desplazamiento lateral debido a la proximidad de  $p_{11}$  y  $p_{21}$  y la de  $p_{12}$  y  $p_{22}$ .

### 1.5 APLICACIONES

La detección y medición de profundidad de fisuras por ultrasonidos es de suma importancia para salvaguardar la integridad de estructuras y componentes metálicas. La detección de fisuras en la verificación de piezas forjadas en bruto por ejemplo, sin mecanizar y sin tratar, permite rechazar a tiempo la pieza evitando elevados gastos de mecanización.

La localización de fisuras es una herramienta necesaria al hacer revisiones de mantenimiento en estructuras montados en un sistema que no tiene su superficie accesible. Los ensayos se pueden realizar inmediatamente después de haberse efectuado el montaje con el fin de comprobar si el proceso de mecanizado o montaje ha contribuido, o no a la producción de grietas de fatiga dentro de él. El empleo más común es para comprobaciones periódicas de materiales sometidos a esfuerzos durante el servicio que prestan.

Ejemplo de ello son los ensayos en ejes y vástagos. En estos componentes las fisuras de servicio son generalmente fisuras superficiales. De una manera similar, el ensayo ultrasónico se ha empleado para comprobar si existen fisuras en las planchas de acero empleadas en los cascos de los grandes buques, en los rodillos empleados en los trenes de laminación de acero, en los ejes de grandes maquinarias como generadores, álabes de turbina hidráulica de vapor en las cuales la utilización de este método permite descubrir fisuras sin necesidad de desmontarlos, y en muchas aplicaciones similares.

Otro importante factor en la localización y medición de profundidad de fisuras es que hace posible evaluar el efecto que ésta ejerce sobre la inte-

gritud de la pieza ensayada, así como su aptitud para el servicio basado en el estudio de la fractura mecánica. Dependiendo de la magnitud de la fisura se toman las medidas correctivas necesarias. (Ref. 6, 7, 8).

## CAPITULO II

## TRABAJO EXPERIMENTAL

## 2.1 EQUIPO DE ENSAYO

Para realizar la medición de la profundidad de las fisuras se utilizó los siguientes equipos:

## EQUIPOS

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Marcas                             | :Kraütkramer, modelo USK6<br>Sonic, modelo Mark I.  |
| Gama de frecuencias                | :0.5-15 MHz.  |
| Amplificación                      | :Ajuste basto en etapas de<br>0-20-40 DB.<br>Ajuste fino en etapas de 2DB<br>entre 0 y 40 DB. |
| Supresión                          | :Regulable entre un 0 y un<br>30% de la pantalla.   |
| Campos de control                  | :25 a 250mm. en acero 250 a<br>2500mm en acero.   |
| Alimentación                       | :Por batería de plomo, pi-<br>las de NiCd o pilas secas.                                      |
| Rango de temperatura<br>de trabajo | :-15°C a 40°C.  |
| Escala de la pantalla:             | 70*55mm.  |

La fig.Nº28 muestra el equipo Krautkramer USK6 utilizado en este estudio.

#### TRANSDUCTORES

| Modelo    | Angulo<br>(grados) | Frecuencia<br>(Mhz.) | Dimensión<br>(mm.) |
|-----------|--------------------|----------------------|--------------------|
| MB58-N    | Normal             | 5                    | 10 dia.            |
| MWB       | 45                 | 4                    | 8*9                |
| MWB       | 45                 | 4                    | 8*9                |
| Mh3       | Normal             | 5                    | 2.54               |
| Miniatura | 45                 | 5                    | ---                |
| Miniatura | 45                 | 5                    | ---                |

En la fig.Nº29 se muestra los transductores de la marca Kraütkramer.

ACDPLANTE : ADEITE SAE 20

#### CABLES COAXIALES

#### BLOQUES DE CALIBRACION

El bloque del Instituto Internacional de Soldadura (IIS/IIW) ó V1 se muestra en la Fig.Nº30a y el V2 se muestra en la figura.Nº30b.

El Kraütkramer USK6 es un equipo ultrasónico portátil compuesto por un tubo de rayos catódicos (TRC) y un cuadro de mandos donde se alojan botones giratorios y conmutadores basculantes así como otros elementos necesarios para su manejo, de tal modo que en él se puedan realizar estudios de defectología, medición de espesores, profundidad

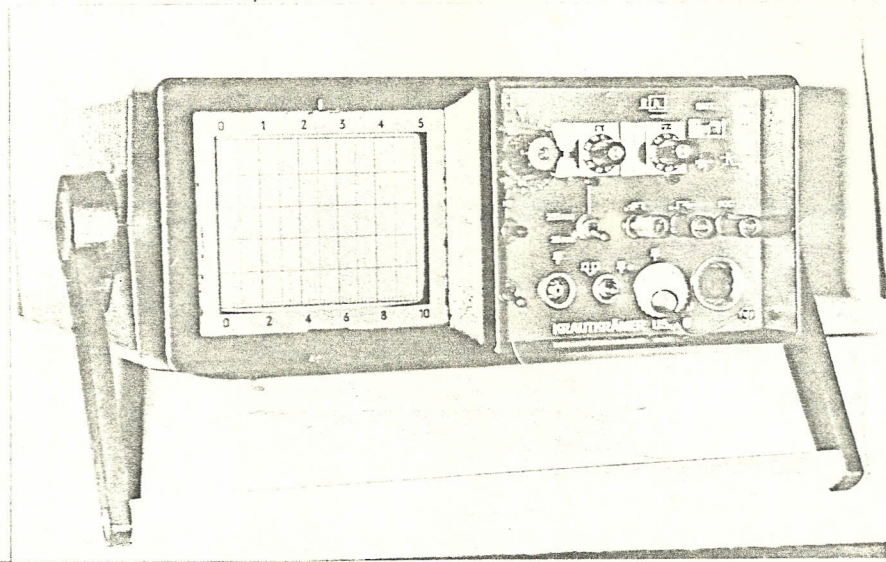


Fig.No28 EQUIPO DE ULTRASONIDOS KRAUTKRAMER USK-6

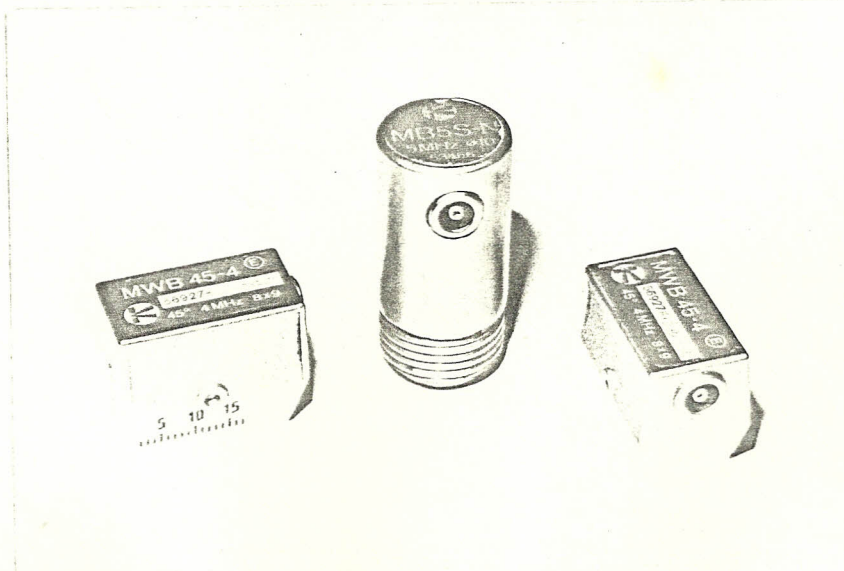


FIG.No 29 TRASNDUCTORES UTILIZADOS EN LA INSPECCION ULTRASONICA.



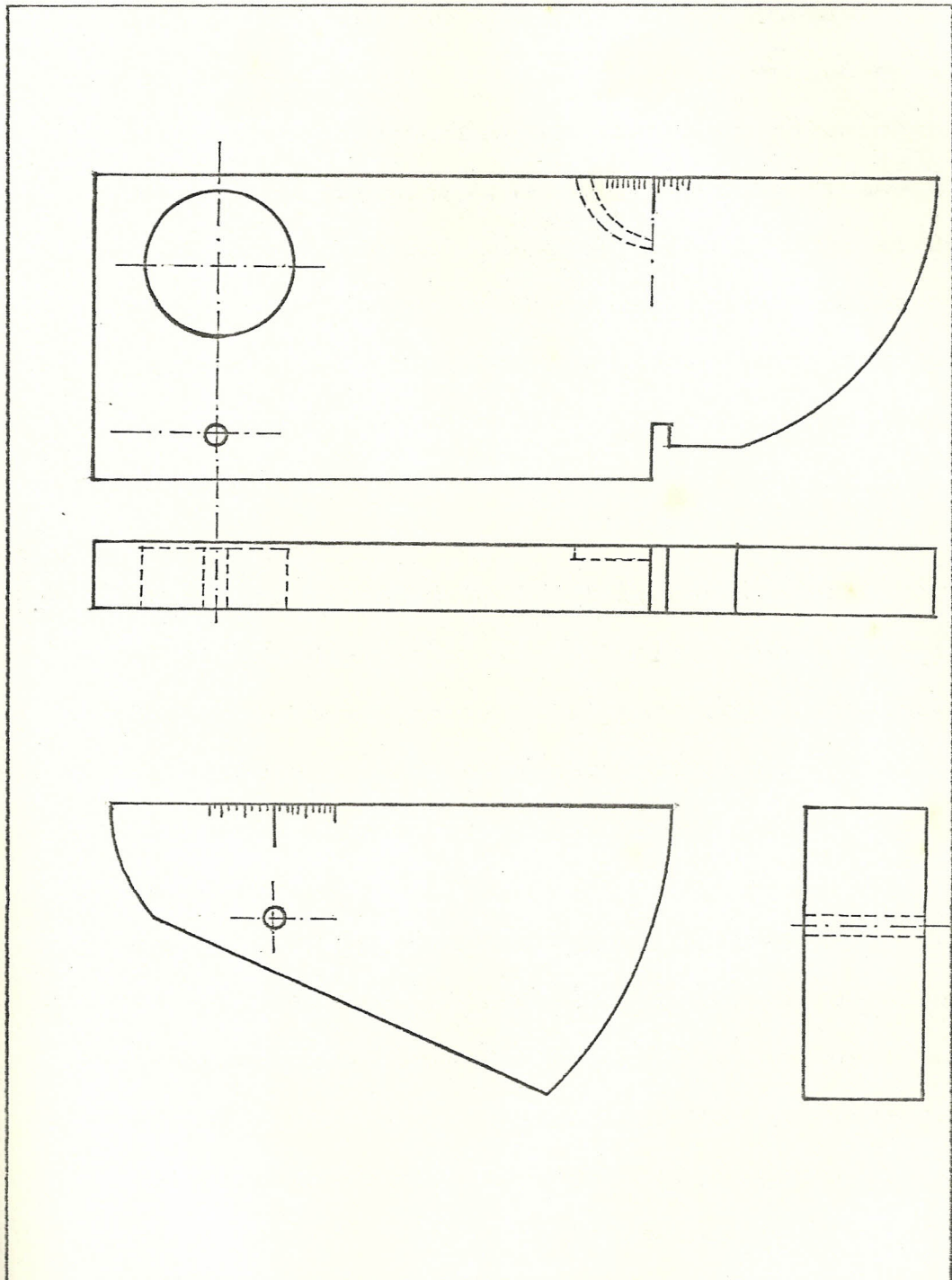


Fig. No. 30 BLOQUES DE CALIBRACION  
a) IIW o V1  
b) V2

de fisuras y demas ensayos basados en la propagación y reflexión de las ondas ultrasónicas.

Los transductores utilizados en el ensayo en adición a las características anotadas anteriormente poseen un cristal piezoeléctrico de Titanato de Bario protegido por una suela para evitar el desgaste. Los transductores miniatura facilitan la inspección al necesitar una superficie menor para acoplarse en el material a ensayar y ser liviano en su manejo.

El equipo Sonic MARK I utilizado es de características similares al anterior con la ventaja que en éste se escoje la gama de frecuencia y se dispone de un eliminador de ruido con el cual se pueden obtener mejores lecturas de los ecos de las fisuras.

## 2.2 CALIBRACION DEL SISTEMA PARA EL ENSAYO

Se realiza la calibración conjunta del equipo transductor y cable de conexión a ser utilizados en el trabajo de inspección. Debe realizarse la calibración cuando se varie algún parámetro, así como también cada cierto período de utilización del sistema.

Los pasos para realizar la calibración son los siguientes.

- Ajuste de la base de tiempo o campo de barrido.  
Determinación del punto de salida de emisión del haz ultrasónico.
- Calibración en acero.
- Transferencia de la escala de distancia con transductor angular según el material de ensayo.

#### AJUSTE DE LA BASE DE TIEMPO O CAMPO DE BARRIDO

Para la calibración de base de tiempo con transductores angulares, se puede hacer uso de los bloques, normalizados por el instituto internacional de la Soldadura (IIW) ó V1 y el V2 mostrados en la Fig N°30a y b respectivamente.

Con el bloque V1 se calibra la escala de la base de tiempo para valores de 225mm o más, mientras que con el V2 se calibra para valores menores que 225mm.

#### DETERMINACION DEL PUNTO DE SALIDA

El procedimiento es el siguiente: Se coloca el transductor de haz angular en la posición C de la fig.N°31, se mueve el transductor para obtener un eco de máxima altura a partir del radio de 101.6 mm del bloque V1. Alcanzando este eco de máxima altura el punto de incidencia del transductor corresponderá con el cero marcado sobre el bloque.

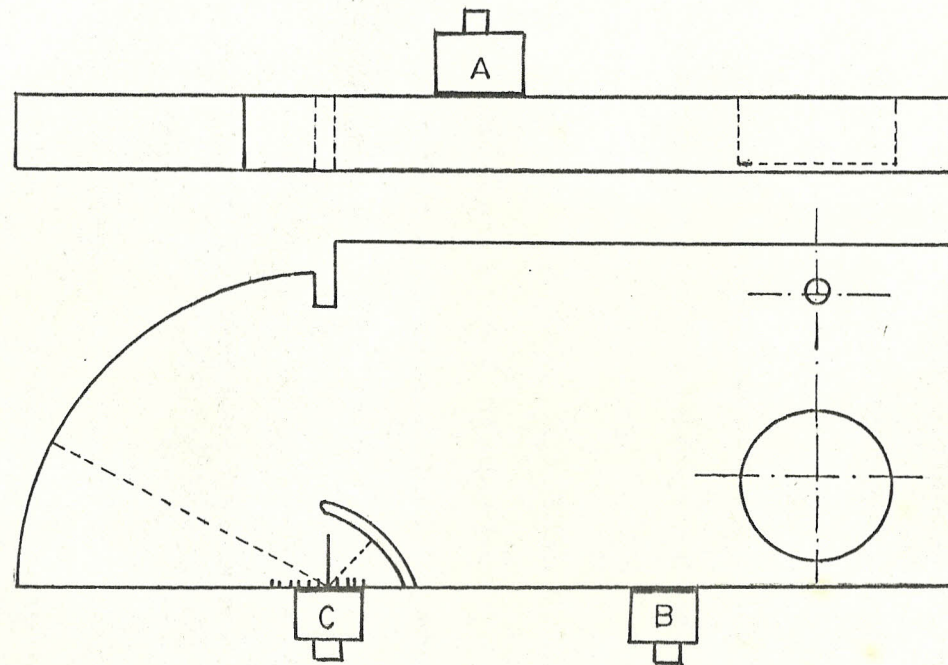


Fig. 31 POSICIONES DE LOS TRANSDUCTORES NORMAL Y ANGULAR EN EL BLOQUE V1 PARA DETERMINAR EL PUNTO DE SALIDA DEL HAZ

### CALIBRACION EN ACERO

Calibrar a una escala adecuada, para lo cual se escogió el radio de 101.6mm. en escala 1:2 con ondas normales, utilizando el bloque V1. Las 50 divisiones de la pantalla son 101.6 por lo que cada división representa 2.032mm.

Una vez calibrado con ondas normales pasamos a calibrar con ondas transversales. se debe corregir el error existente debido al plexiglás, para lo cual se debe considerar que la relación entre ondas normales a longitudinales es 1.86 en el bloque V1.

$$V_1 = 1.8385 V_t \quad (43)$$

La distancia del bloque en la posición A es de 93.4mm, a una escala de 1:2 sería  $93.4 \times 2 = 186\text{mm}$ , al transformar este valor en ondas trasversales se obtiene  $186 / 1.8385 = 101.6$  que es la distancia del radio por lo que debe aparecer una sola señal en la pantalla.

Dos señales en el rango de la pantalla con ondas normales una señal con ondas transversales en la ubicación C. fig.Nº31.

### TRANSFERNCIA DE LA ESCALA DE DISTANCIA CON TRANSDUCTOR ANGULAR SEGUN EL MATERIAL DE ENSAYO.

Con la ayuda de un calibrador, realizar la medición de una longitud de referencia en el material

de la pieza de ensayo, según el ángulo de emisión del transductor utilizado, disponiendo de un borde o agujero bien preparado.

Con el equipo realizar la medición de esta longitud de referencia en la pieza de ensayo  $d_a$ =distancia aparente.

Calcular el factor de propagación de la onda transversal en el material de ensayo, mediante la relación:

$$f_t = d_r / d_a \quad (44)$$

donde  $d_r$  es la distancia real medida obtenida de la ecuación:

$$h^2 = a^2 + b^2 \quad (45)$$

$$d_r = (60.8^2 + 60.8^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$= 85.84 \text{ mm.}$$

$$d_a = 44.5 \text{ mm}$$

reemplazando en la ecuación 44 se obtiene:

$$f_t = 85.84 / 44.5 = 0.9508$$

Finalmente se calcula la distancia efectiva en el material ensayado mediante la relación:

$$d_e = f_t \cdot d \quad (46)$$

$$d_e = 0.9508 \cdot 2.032 = 1.932$$

Siendo 1.932 el factor que multiplica al número de divisiones que se obtiene en la pantalla cuando se utiliza aluminio fundido para este caso en particular utilizando un transductor de 45°.

### 2.3 CONSTRUCCIÓN DE PIEZAS PATRONES.

Se construyeron dos piezas patrones uno de aluminio y otro de acero conteniendo fisuras artificiales. El objeto de la construcción de estos bloques fue conocer la profundidad real de fisuras para experimentar con los métodos descritos y comparar los resultados.

En ambos bloques para su construcción se utilizó el proceso de electroerosión debido a que el espesor de las fisuras era del orden de décimas de milímetro lo cual no se puede conseguir utilizando una máquina fresadora por no existir fresas que de tal magnitud.

Se construyó el porta electrodo el cual se muestra en la Fig.Nº32.

Los electrodos utilizados fueron láminas de cobre de 0.2 y 0.3 mm de espesor. El tiempo requerido para realizar una fisura depende de la profundidad deseada. A mayor profundidad la penetración se vuelve más difícil debido a que es necesario limpiar más frecuentemente la fisura porque los residuos del material hacen que no exista buen contacto entre el electrodo y el material que se está erosionando.

La profundidad de las fisuras obtenidas en el bloque de aluminio fue: 9.9, 14 y 19 mm. En el bloque de acero 9, 15.6, 13 y 10.7mm.

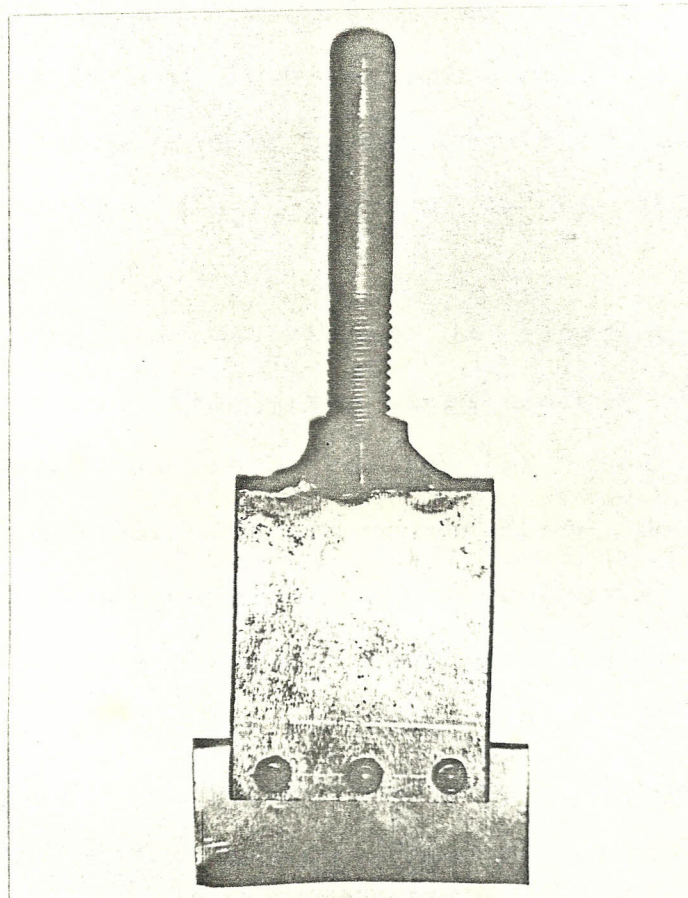


Fig. Nº32 PORTAELECTRODO CON LAMINA DE COBRE



En la Fig.Nº33 se ilustra el bloque de aluminio y en la Fig.Nº34 se ilustra el bloque de acero.

#### 2.4 CONSTRUCCION DE PIEZAS CON FALLAS ARTIFICIALES

Para la construcción de piezas con fallas artificiales se utilizó ILZRO, el cual es una aleación Zinc y 27% Aluminio. Se colocaron placas de cobre en el interior del bloque simulando fisuras, no obteniéndose buenos resultados debido a que la impedancia del cobre y la del ILZRO son similares. FigNº35.

Escogiendo materiales de impedancia acústica de marcada diferencia se seleccionó al cobre y plexiglás así como también al níquel y plexiglás, FigNº 36. En la construcción de este bloque se hizo una base de aproximadamente 10mm sobre el cual se pegaron láminas de diferente tamaño de cobre y níquel simulando estas láminas planos de fisuras. Después de esto se llenó el recipiente con la resina y se obtuvo de esta forma un bloque de plexiglás.

Cuando se llenó el recipiente con la resina se produjo un concentrador de esfuerzos al colocar las placas de cobre en columna, lo que hizo que se produjera una expansión del plexiglás obteniéndose una fisura real.

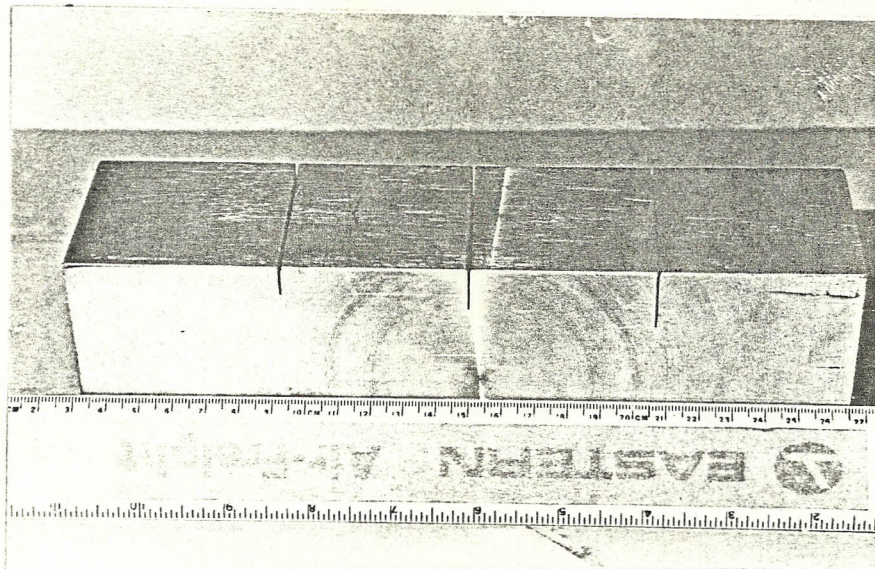


Fig. N°33 BLOQUE PATRON DE ALUMINIO CON  
FISURAS SUPERFICIALES

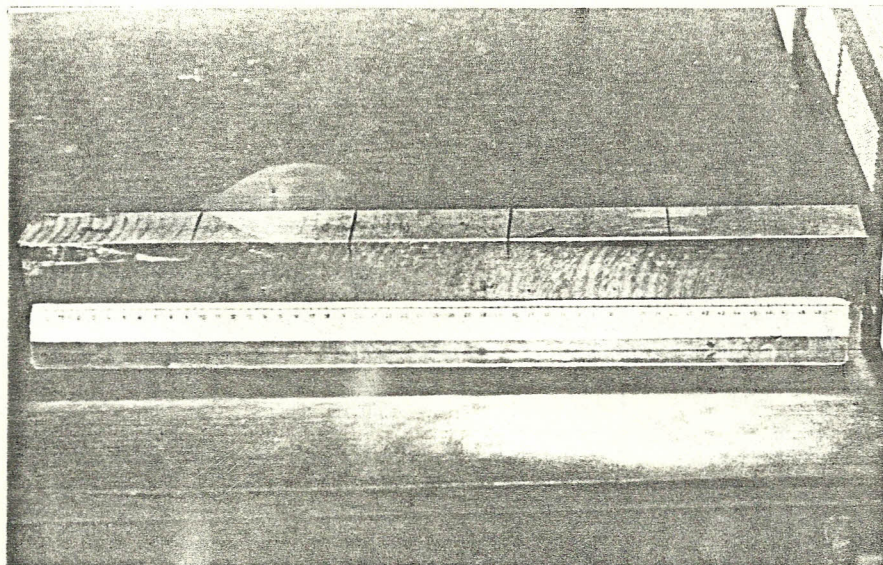


Fig. N°34 BLOQUE PATRON DE ACERO CON  
FISURAS SUPERFICIALES

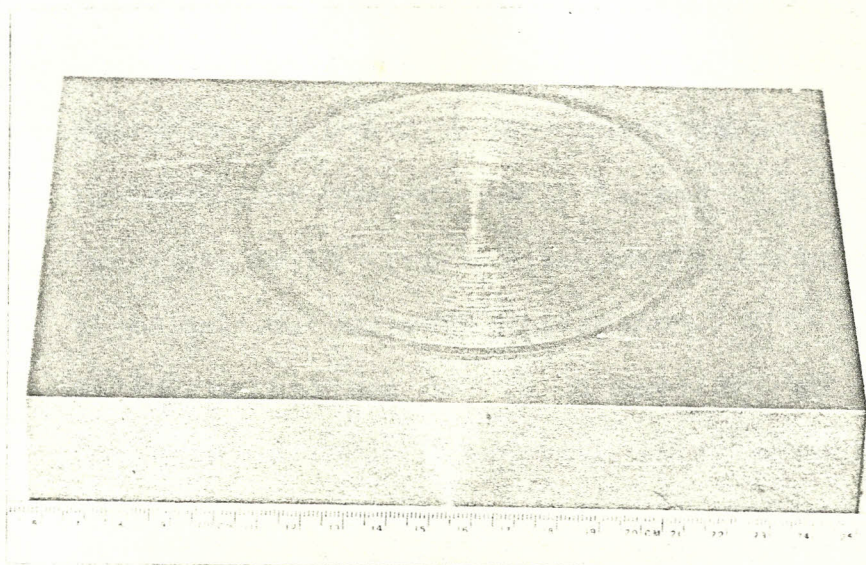


Fig. Nº35 BLOQUE DE ILZRO CON FALLAS ARTIFICIALES

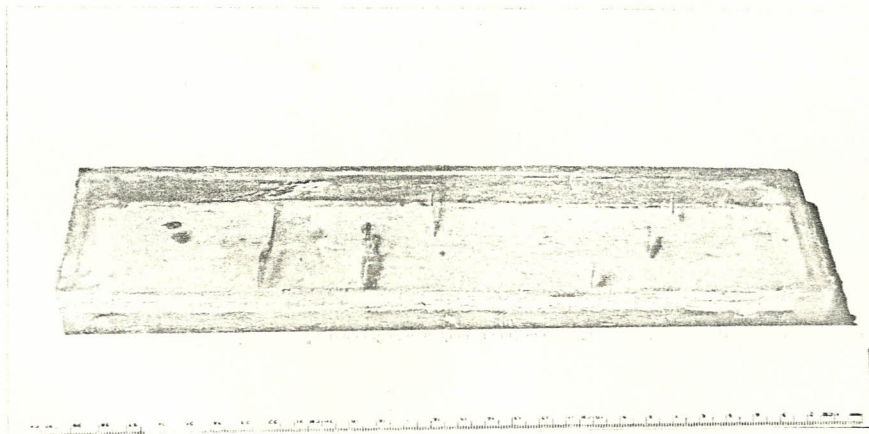


Fig. Nº36 BLOQUE DE PLEXIGLAS CON FALLAS ARTIFICIALES

## 2.5 DESARROLLO DE LA INSPECCION

Primeramente se calibró el equipo con el bloque patrón VI en acero a una escala adecuada. En esta tesis se calibró 1:2.03. Luego se procedió a tomar los datos necesarios para la medición de la profundidad de la fisura y su localización de acuerdo al método que se este utilizando.

En la realización de la inspección se utilizaron los tres métodos descritos anteriormente para la localización de las fisuras. La apertura de las fisuras por conveniencia fue definidas en  $x=0$ . Esta asunción no sería posible cuando las fisuras no sean superficiales como ocurre en la mayoría de los casos reales.

Para ilustración se realizarán todos los calculos por los tres métodos, para una fisura presente en el bloque de aluminio.

### METODO 1 TRANSMISION RECEPCION SIMULTANEOS.

Datos

$$C1 = 12 * 1.932 = 23.18$$

$$C2 = 13 * 1.932 = 25.12$$

$$D = 17.35 \text{mm}$$

$$X1 = -19.51 \text{mm}$$

En este método los datos a obtener son  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $d$ , y  $x$ . Donde  $c$  son los radios de los círculos obtenido del eco mostrado en el oscilograma multipli-

cado por el factor efectivo, por lo que 12 y 13 representa el número de divisiones en el osciloscopio y 1.932 es el factor efectivo para este material.  $d$  es la distancia entre los transductores emisor receptor.

En este método no es necesario dos transductores sino uno, realizando la toma de lecturas una a continuación de otra.

Los datos obtenidos son reemplazados en la ecuación 19 obteniéndose el valor de  $z$  el mismo que dió un valor 13.85 mm., que comparándolo con el valor real (14.2mm.) de la profundidad de la fisura dió un valor de 1.07% de error.

El valor de  $x$  obtenido es de 0.58 mm., un valor bastante cercano al real el cual se escogió en 0mm.

#### METODO 2 TRANSMISION, TRANSMISION-RECEPCION.

Datos:

$$L = 9.7 * 1.932 = 18.74$$

$$C = 10.8 * 1.932 = 20.86$$

$$D/2 = 12.45 \text{ mm}$$

En este método los datos a tomar son:  $l$ ,  $c$  y  $d/2$ ; donde  $l$  es la distancia viajada por el haz desde el transductor transmisor al receptor obtenida de la emisión del eco en el oscilograma,  $c$  es el radio del círculo obtenido de igual forma que  $l$ ,

tanto los valores de  $c$  como de  $l$  deben multiplicarse por el factor efectivo por tratarse de un material diferente de acero,  $d/2$  es la distancia medida entre la ubicación del transductor emisor al receptor realizado con un vernier para mayor exactitud. Al introducir estos datos en la ecuación 24 se obtiene el valor de  $x$  el cual nos da un resultado de  $-9.24\text{mm}$ , reemplazando este valor en la ecuación 30 se obtiene el valor de  $z$  el cual nos da un valor de  $13.8\text{mm}$ , que comparándolo con el valor real de  $z$  ( $14.2\text{mm}$ ), se obtiene un porcentaje de error de  $1.43\%$ .

### METODO 3 TRANSMISION-RECEPCION

Datos

$$\begin{array}{ll} L_1 = 10 \times 1.932 = 19.32 & P_{12} = 10.2\text{mm} \\ L_2 = 9.8 \times 1.932 = 18.93 & P_{21} = -9.95\text{mm} \\ P_{11} = -14.8\text{mm} & P_{22} = 14.85\text{mm} \end{array}$$

En este método se toman como datos  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $p_{11}$ ,  $p_{12}$ ,  $p_{21}$  y  $p_{22}$ . Siendo  $l$  la distancia viajada por el haz ultrasónico desde el transductor transmisor al receptor, los subíndices representan las distancias en los puntos 1 y 2 respectivamente. Esta distancia se obtiene al observar el inicio del eco en el oscilograma y al multiplicar el número de divisiones por el factor efectivo calculado anteriormente. El número de divisiones medidas direc-

tamente en la pantalla del osciloscopio es el número 10 y 1.932 es el factor efectivo calculado anteriormente para el bloque de aluminio.

Las lecturas de  $p_{11}$  y  $p_{21}$  se obtienen al medir desde el eje de referencia hasta la posición del transductor. Esta medición se la hace con un calibrador con los extremos para interiores. El primer subíndice indica el número de la medición y el segundo subíndice índice la posición. El signo negativo en  $p_{11}$  y  $p_{21}$  es debido a que se escogió positivo hacia la derecha del eje de las  $x$  y negativo hacia la izquierda.

Introduciendo estos datos en la fórmula 38 se obtiene el valor de  $x$  del cual se toma el signo positivo por que el signo negativo nos llevaría a una solución imaginaria de  $z$ , obteniéndose un valor de  $x = 2.10\text{mm}$ .

Reemplazando este valor en la ecuación 42

$$z = \pm b_1 \left[ 1 - \frac{(x - x_1)^2}{a_1^2} \right]^{1/2} \quad (42)$$

se obtiene que  $z$  nos da un valor de 14.34 mm.

Comparado con el valor real (14.2mm.), se obtiene un porcentaje de error de 0.99%.

El valor obtenido de  $z$  es bastante exacto no ocurriendo así con el valor de  $x$  puesto que las mediciones de  $p_{11}, p_{12}, p_{12}, p_{22}$  están muy próximas entre sí lo cual da origen a errores en la ubicación en el eje de las  $x$ .

## CAPITULO III

## DISCUSION DE RESULTADOS

Los tres métodos descritos en los capítulos I y II sirven para medir la profundidad de fisuras tanto en el plano horizontal como vertical.

Las tablas mostradas a continuación presentan resultados en las que se aprecia un porcentaje del 4% de error aproximadamente, con respecto a los datos reales de la profundidad de las fisuras.

La profundidad de las fisuras también fue medida usando un transductor normal del lado de abajo de los bloques de prueba, estos datos se encuentran en las tablas posteriores como Z real.

METODO 1 TRANSMISION RECEPCION SIMULTANEDS.

Las tablas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 presentan los datos obtenidos al utilizar el método 1 transmisión-recepción simultáneos.

En la tabla N<sup>o</sup> 2 se presenta los datos obtenidos al utilizar el método 1 para encontrar la profundidad de las fisuras. Este método es el de más de más fácil utilización pues se lo puede realizar con un sólo transductor, obteniéndose ambas localizaciones de desplazamientos verticales y horizontales de la fisura. Cuando se utiliza el transductor como emisor y receptor se observa mayor ruido por lo que es difícil la lectura de  $c_1$  y  $c_2$  en el oscilograma.



TABLA # 2

| METODO 1: TRANSMISION-RECEPCION SIMULTANEOS |        |                |       |
|---|--------|----------------|-------|
| MATERIAL: ACERO                             |        |                |       |
| TRANSDUCTOR:                                |        |                |       |
| DIMENSION: 8*9mm.                           |        |                |       |
| FRECUENCIA: 4MHZ                            |        |                |       |
| FISURAS                                     | DATOS  | LECTURAS (mm.) |       |
|   |        | 1              | 2     |
| 1<br>(PROFUNDIDAD:<br>9.00mm)               | C1     | 12.18          | 10.15 |
|   | C2     | 10.15          | 11.16 |
|   | D      | 13.00          | 12.30 |
|   | X      | -0.04          | -0.58 |
|   | Z      | 8.96           | 8.67  |
|   | ZREAL  | 9.00           | 9.00  |
|   | %ERROR | 0.44           | 3.67  |
| 2<br>(PROFUNDIDAD:<br>15.6mm)               | C1     | 22.33          | 22.35 |
|   | C2     | 20.32          | 22.35 |
|   | D      | 29.80          | 30.30 |
|   | X      | -0.36          | 1.24  |
|   | Z      | 15.22          | 16.40 |
|   | ZREAL  | 15.60          | 15.60 |
|   | %ERROR | 2.44           | 5.13  |
| 3<br>(PROFUNDIDAD:<br>13.00mm)              | C1     | 18.27          | 18.29 |
|   | C2     | 17.25          | 18.29 |
|   | D      | 23.10          | 25.40 |
|   | X      | 0.49           | 0.50  |
|   | Z      | 13.47          | 13.15 |
|   | ZREAL  | 13.00          | 13.00 |
|   | %ERROR | 3.62           | 1.15  |
| 4<br>(PROFUNDIDAD:<br>10.70mm)              | C1     | 13.19          | 16.24 |
|   | C2     | 10.24          | 14.22 |
|   | D      | 20.00          | 21.35 |
|   | X      | -0.06          | 0.05  |
|   | Z      | 10.66          | 10.76 |
|   | ZREAL  | 10.70          | 10.70 |
|   | %ERROR | 0.37           | 0.56  |

TABLA #3

 =====  
 METODO 1: TRANSMISION-RECEPCION SIMULTANEOS

MATERIAL: ALUMINIO

TRANSDUCTOR:

DIMENSION: 8\*9mm.

FRECUENCIA: 4MHZ

| FISURAS                        | DATOS  | LECTURAS (mm.) |       |       |
|--------------------------------|--------|----------------|-------|-------|
|                                |        | 1              | 2     | 3     |
| 1<br>(PROFUNDIDAD:<br>9.90mm)  | C1     | 13.52          | 11.59 | 13.52 |
|                                | C2     | 13.52          | 13.52 | 13.52 |
|                                | D      | 17.00          | 15.00 | 19.90 |
|                                | X      | 0.70           | 0.13  | -0.75 |
|                                | Z      | 10.51          | 9.98  | 9.15  |
|                                | ZREAL  | 9.90           | 9.90  | 9.90  |
|                                | %ERROR | 6.16           | 0.81  | 7.58  |
| 2<br>(PROFUNDIDAD:<br>14.00mm) | C1     | 15.46          | 21.25 | 15.46 |
|                                | C2     | 19.30          | 25.12 | 15.46 |
|                                | D      | 21.10          | 37.85 | 12.60 |
|                                | X      | -0.83          | -0.57 | 0.24  |
|                                | Z      | 13.58          | 13.32 | 14.11 |
|                                | ZREAL  | 14.00          | 14.00 | 14.00 |
|                                | %ERROR | 3.00           | 4.86  | 0.79  |
| 3<br>(PROFUNDIDAD:<br>19.00mm) | C1     | 25.12          | 25.12 | 25.12 |
|                                | C2     | 23.18          | 25.12 | 27.05 |
|                                | D      | 30.10          | 32.85 | 35.65 |
|                                | X      | -0.34          | -0.05 | 0.02  |
|                                | Z      | 18.70          | 18.96 | 19.02 |
|                                | ZREAL  | 19.00          | 19.00 | 19.00 |
|                                | %ERROR | 1.58           | 0.21  | 0.08  |

 =====

TABLA #4

| METODO 1: TRANSMISION-RECEPCION SIMULTANEOS |        |                |       |       |
|---|--------|----------------|-------|-------|
| MATERIAL: ACERO                             |        |                |       |       |
| TRANSDUCTOR:                                |        |                |       |       |
| DIMENSION: Miniatura.                       |        |                |       |       |
| FRECUENCIA: 5MHZ                            |        |                |       |       |
| FISURAS                                     | DATOS  | LECTURAS (mm.) |       |       |
|   |        | 1              | 2     | 3     |
| 1<br>(PROFUNDIDAD:<br>9.00mm.)              | C1     | 12.60          | 12.19 | 12.60 |
|   | C2     | 13.21          | 12.19 | 13.21 |
|   | D      | 18.35          | 16.40 | 18.50 |
|   | X      | 0.01           | -0.03 | -0.07 |
|   | Z      | 9.01           | 8.97  | 8.93  |
|   | ZREAL  | 9.00           | 9.00  | 9.00  |
|   | %ERROR | 0.11           | 0.33  | 0.78  |
| 2<br>(PROFUNDIDAD:<br>15.6mm.)              | C1     | 22.35          | 22.35 | 22.35 |
|   | C2     | 20.32          | 21.34 | 22.35 |
|   | D      | 29.20          | 30.85 | 31.90 |
|   | X      | -0.08          | -0.14 | 0.05  |
|   | Z      | 15.52          | 15.45 | 15.65 |
|   | ZREAL  | 15.60          | 15.60 | 15.60 |
|   | %ERROR | 0.51           | 0.96  | 0.32  |
| 3<br>(PROFUNDIDAD:<br>13.00mm.)             | C1     | 19.30          | 19.30 | 18.29 |
|   | C2     | 18.29          | 18.29 | 17.27 |
|   | D      | 27.10          | 27.70 | 27.00 |
|   | X      | 0.01           | -0.35 | -0.51 |
|   | Z      | 13.01          | 12.60 | 12.48 |
|   | ZREAL  | 13.00          | 13.00 | 13.00 |
|   | %ERROR | 0.08           | 3.08  | 4.00  |
| 4<br>(PROFUNDIDAD:<br>10.70mm.)             | C1     | 14.43          | 15.24 | 16.26 |
|   | C2     | 14.22          | 14.22 | 14.22 |
|   | D      | 18.90          | 20.70 | 21.35 |
|   | X      | 0.00           | -0.28 | 0.05  |
|   | Z      | 10.70          | 10.41 | 10.76 |
|   | ZREAL  | 10.70          | 10.70 | 10.70 |
|   | %ERROR | 0.00           | 2.71  | 0.56  |

TABLA # 5

| METODO 1: TRANSMISION-RECEPCION SIMULTANEOS |        |                |       |       |
|---|--------|----------------|-------|-------|
| MATERIAL: ALUMINIO                          |        |                |       |       |
| TRANSDUCTOR:                                |        |                |       |       |
| DIMENSION: MINIATURA.                       |        |                |       |       |
| FRECUENCIA: 5MHZ                            |        |                |       |       |
| FISURAS                                     | DATOS  | LECTURAS (mm.) |       |       |
|   |        | 1              | 2     | 3     |
| 1<br>(PROFUNDIDAD:<br>9.90mm.)              | C1     | 13.52          | 11.59 | 12.56 |
|   | C2     | 11.59          | 15.46 | 13.52 |
|   | D      | 6.80           | 8.40  | 8.25  |
|   | X      | -0.06          | 0.73  | 0.35  |
|   | Z      | 9.84           | 10.31 | 10.16 |
|   | ZREAL  | 9.90           | 9.90  | 9.90  |
|   | %ERROR | 0.61           | 4.14  | 2.63  |
| 2<br>(PROFUNDIDAD:<br>14.00mm.)             | C1     | 23.18          | 23.18 | 19.32 |
|   | C2     | 21.25          | 23.18 | 23.18 |
|   | D      | 17.35          | 18.35 | 16.50 |
|   | X      | -0.11          | 0.11  | -0.13 |
|   | Z      | 13.85          | 14.14 | 13.88 |
|   | ZREAL  | 14.00          | 14.00 | 14.00 |
|   | %ERROR | 1.07           | 1.00  | 0.86  |
| 3<br>(PROFUNDIDAD:<br>19.00mm)              | C1     | 26.08          | 25.12 | 25.12 |
|   | C2     | 27.05          | 22.99 | 23.18 |
|   | D      | 17.75          | 15.10 | 15.75 |
|   | X      | 0.42           | -0.37 | -0.37 |
|   | Z      | 19.39          | 18.67 | 18.67 |
|   | ZREAL  | 19.00          | 19.00 | 19.00 |
|   | %ERROR | 2.05           | 1.74  | 1.74  |

TABLA # 6

| =====                                       |        |                |       |       |
|---|--------|----------------|-------|-------|
| METODO 1: TRANSMISION-RECEPCION SIMULTANEOS |        |                |       |       |
| MATERIAL: PLEXIGLAS                         |        |                |       |       |
| TRANSDUCTOR:                                |        |                |       |       |
| DIMENSION: 8*9                              |        |                |       |       |
| FRECUENCIA: 4MHZ                            |        |                |       |       |
| MATERIAL IN: COBRE                          |        |                |       |       |
| FISURAS                                     | DATOS  | LECTURAS (mm.) |       |       |
|   |        | 1              | 2     | 3     |
| =====                                       |        |                |       |       |
| 1<br>(PROFUNDIDAD:<br>41.50mm.)             | C1     | 46.03          | 50.92 | 47.83 |
|   | C2     | 47.83          | 46.29 | 49.38 |
|   | D      | 46.00          | 46.90 | 52.00 |
|   | X      | -0.94          | -0.47 | -0.02 |
|   | Z      | 41.04          | 41.16 | 41.04 |
|   | ZREAL  | 41.50          | 41.50 | 41.05 |
|   | %ERROR | 1.12           | 0.82  | 0.02  |
| =====                                       |        |                |       |       |
| 2<br>(PROFUNDIDAD:<br>27.39mm.)             | C1     | 35.49          | 33.95 | 33.95 |
|   | C2     | 32.40          | 33.95 | 32.40 |
|   | D      | 38.20          | 38.80 | 35.80 |
|   | X      | 0.72           | 0.64  | 0.72  |
|   | Z      | 27.97          | 27.85 | 27.90 |
|   | ZREAL  | 27.39          | 27.39 | 27.39 |
|   | %ERROR | 2.12           | 1.68  | 1.86  |
| =====                                       |        |                |       |       |
| 3<br>(PROFUNDIDAD:<br>21.9mm.)              | C1     | 23.15          | 24.68 | 23.15 |
|   | C2     | 24.68          | 23.15 | 23.15 |
|   | D      | 24.00          | 23.00 | 20.70 |
|   | X      | -2.98          | -1.75 | -1.63 |
|   | Z      | 20.64          | 20.90 | 21.27 |
|   | ZREAL  | 21.90          | 21.90 | 21.90 |
|   | %ERROR | 5.75           | 4.57  | 2.87  |
| =====                                       |        |                |       |       |

TABLA # 7

=====

METODO 1: TRANSMISION-RECEPCION SIMULTANEOS

MATERIAL: PLEXIGLAS

TRANSDUCTOR:

DIMENSION: 8\*9mm.

FRECUENCIA: 4MHZ

MATERIAL IN:NIQUEL

| FISURAS       | DATOS  | LECTURAS (mm.) |       |       |
|---------------|--------|----------------|-------|-------|
|               |        | 1              | 2     | 3     |
|               | C1     | 33.95          | 37.03 | 35.49 |
|               | C2     | 35.49          | 35.49 | 35.49 |
|               | D      | 35.25          | 40.60 | 37.60 |
| 1             | X      | -2.91          | -1.75 | -1.91 |
| (PROFUNDIDAD: | Z      | 29.80          | 30.02 | 30.10 |
| 31.21mm.)     | ZREAL  | 31.21          | 31.21 | 31.21 |
|               | %ERROR | 4.52           | 3.81  | 3.56  |
|               | C1     | 27.77          | 29.23 | 29.32 |
|               | C2     | 30.86          | 30.86 | 29.32 |
|               | D      | 29.20          | 32.80 | 30.20 |
| 2             | X      | -2.60          | -2.06 | -2.16 |
| (PROFUNDIDAD: | Z      | 25.27          | 25.20 | 25.12 |
| 26.30mm.)     | ZREAL  | 26.30          | 26.30 | 26.30 |
|               | %ERROR | 3.92           | 4.18  | 4.49  |

=====

En este método resultó difícil obtener el eco de las fisuras de una forma en que se pudiera leer el inicio de las mismas de una forma aceptable, por lo que se realizó apenas dos mediciones por fisura. Los valores de  $x$  y  $z$  obtenidos son aceptables siendo éste el primer método que debe utilizarse. Si la superficie de la fisura es dentada producirá ondas de sonidos refractadas desde los puntos agudos proyectados en tal caso ocurrirán dificultades en la identificación de las ondas refractadas desde la fisura.

En la tabla N<sup>o</sup>3 se presenta la profundidad de fisuras en un bloque de aluminio utilizando el equipo Kraüt Kramer, los resultados de  $x$  y de  $z$  tienen valores muy cercanos al valor real. Se observa que la fisura N<sup>o</sup>1 tiene un mayor porcentaje de error que la fisura número 3 por ser de menor profundidad lo cual hace que la señal sea menos detectable. El valor de error promedio obtenido para la fisura número 3 es menor al 1%.

En la tabla N<sup>o</sup>4 y 5 se presentan los datos obtenidos al utilizó el equipo Sonic y transductor miniatura de 45 y 5 Mhz.

En la tabla N<sup>o</sup>4 se presenta el bloque de acero, consiguiéndose mejores valores tanto para  $x$  como para  $z$ , con un porcentaje promedio menor del 1% por lo explicado anteriormente.

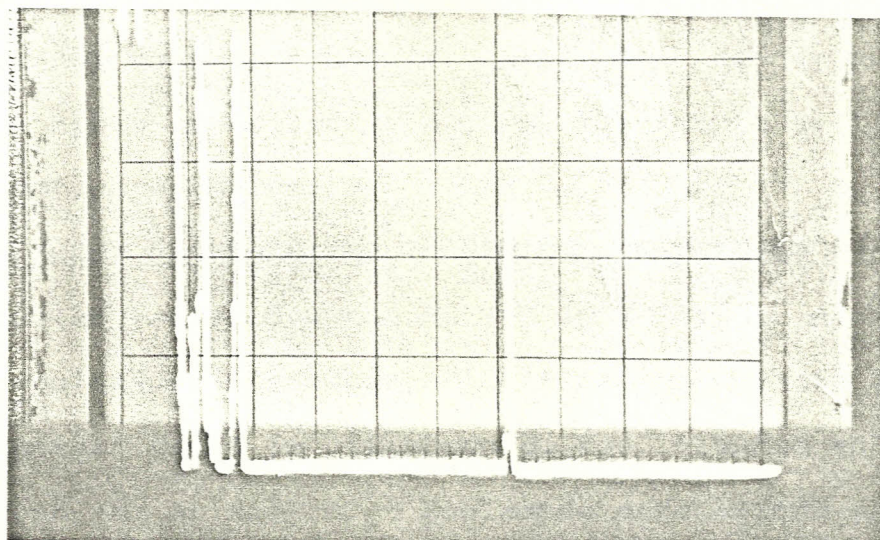
En la tabla N25 se obtiene de igual forma mejores resultados tanto para  $x$  como para  $z$ . Se observa como era de esperarse que para fisuras de mayor profundidad el valor obtenido se acerca más al real. Al utilizarse el equipo Sonic se elimina el ruido presente en este tipo de aluminio de grano basto.

En las tablas 6 y 7 se presentan los datos obtenidos al emplear el método 1 y utilizar el equipo Kraütkrämer y un transductor de  $45^\circ$  y 4 Mhz.

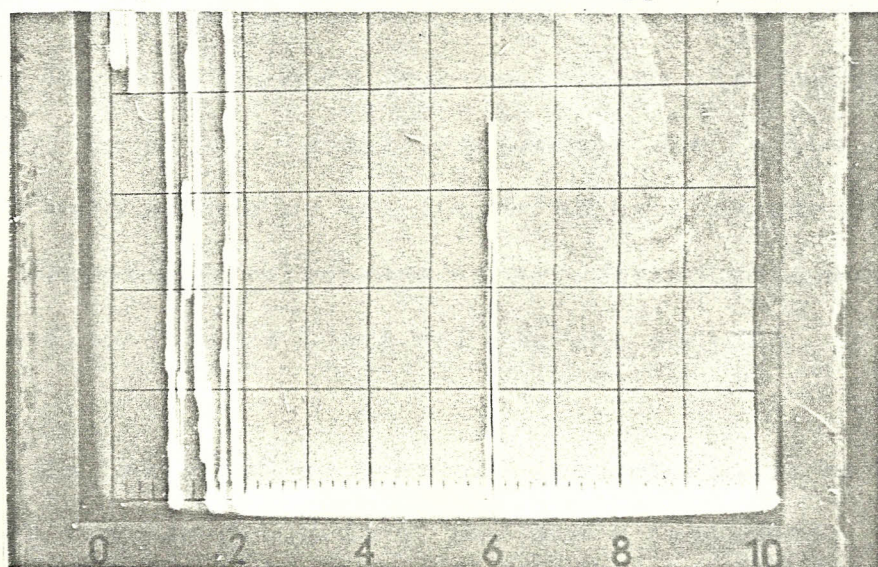
En la tabla N26 se presenta la medición de fisuras internas en un bloque de plexiglás, en el cual se encuentran incrustados en su interior láminas de cobre de diferentes tamaños simulando planos de fisuras de distinta profundidad. Esta medición sólo pudo ser hecha con el método N21 por que con los demás métodos se producía distorsión de la onda. Los resultados obtenidos son buenos siendo las fisuras de mayor profundidad la que presenta mejores resultados. La fisura número 1 presenta un promedio de 0.65% de error y la de menor profundidad, la número 3, dá un promedio de 4.4% de error.

En la fig.N237 se muestra las señales de  $c_1$  y  $c_2$  que determinan la medición de la profundidad de la fisura y lectura número 1 con lo cual se obtiene una profundidad de  $z$  igual a 41.04mm, valor que comparado con el real (41.5mm) da un porcentaje de error de 1.12%.





1 división = 1.543mm.  
 $c_1 = 46.03\text{mm}$



1 división = 1.543mm  
 $c_2 = 47.83\text{mm}$

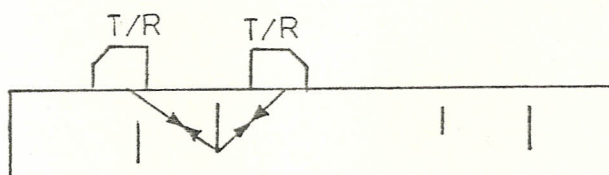


Fig.Nº37 Señales obtenidas en la medición de la profundidad de una fisura en plexiglás utilizando el método 1. Determinación de los valores de  $c_1$  y  $c_2$ .

En la tabla N27 se presenta mediciones de fisuras internas en un bloque de plexiglás con incrustaciones de níquel semejando planos de fisuras lo cual dá resultados aceptables.

METODO2 TRANSMISION, TRANSMISION RECEPCION SIMULTANEOS.

En las tablas números 8, 9, 10 y 11 se presentan los resultados obtenidos al utilizar el método 2 para encontrar tanto la ubicación de las fisuras en el eje x como en el eje z. Empleando este método se producen errores en la determinación de x. En la medición del eco de 1 se emplea dos transductores, el uno transmite el haz y el otro lo recibe, siendo la posición en la cual se mide c la del transductor que recibe el haz.

En este método un transductor se utiliza como transmisor y receptor simultáneamente produciéndose que el eco de la fisura quede fuera del haz del sonido.

En la tabla N28 se presenta los resultados obtenidos de las fisuras del bloque de acero empleando el equipo Kraütkramer y dos transductores de 45° y 4 Mhz. Con este método se obtienen mejores resultados de la profundidad de las fisuras, el porcentaje de error promedio es de 1.4%. Se observa que la fisura de mayor profundidad da valores más exactos del valor de z, comparándola con la de menor profundidad. El valor obtenido de x es errado, ya que se obtienen resultados de x que van desde un 9% al 15% de error. En el método

TABLA #8

| =====                                       |        |                |       |        |
|---|--------|----------------|-------|--------|
| METODO 2 TRANSMISION, TRANSMISION-RECEPCION |        |                |       |        |
| MATERIAL: ACERO                             |        |                |       |        |
| TRANSDUCTOR:                                |        |                |       |        |
| DIMENSION: 8*9 mm.                          |        |                |       |        |
| FRECUENCIA: 4MHZ                            |        |                |       |        |
| FISURAS                                     | DATOS  | LECTURAS (mm.) |       |        |
|   |        | 1              | 2     | 3      |
| =====                                       |        |                |       |        |
| 1<br>(PROFUNDIDAD:<br>9.00mm.)              | L1     | 16.24          | 16.24 | 16.24  |
|   | C1     | 14.21          | 12.38 | 14.21  |
|   | D/2    | 13.30          | 12.95 | 12.85  |
|   | X      | -10.71         | -8.09 | -8.17  |
|   | Z      | 9.20           | 9.35  | 9.51   |
|   | ZREAL  | 9.00           | 9.00  | 9.00   |
|   | %ERROR | 2.22           | 3.89  | 5.67   |
| =====                                       |        |                |       |        |
| 2<br>(PROFUNDIDAD:<br>15.6mm.)              | L1     | 20.30          | 20.30 | 22.33  |
|   | C1     | 19.08          | 19.60 | 21.31  |
|   | D/2    | 12.70          | 25.90 | 15.95  |
|   | X      | -8.24          | 2.39  | -14.40 |
|   | Z      | 15.45          | 15.61 | 15.59  |
|   | ZREAL  | 15.60          | 15.60 | 15.60  |
|   | %ERROR | 0.96           | 0.06  | 0.06   |
| =====                                       |        |                |       |        |
| 3<br>(PROFUNDIDAD:<br>13.00mm.)             | L1     | 18.77          | 18.27 | 20.30  |
|   | C1     | 16.24          | 16.24 | 17.26  |
|   | D/2    | 12.57          | 12.45 | 15.33  |
|   | X      | -6.08          | -9.45 | -11.29 |
|   | Z      | 13.08          | 13.19 | 13.05  |
|   | ZREAL  | 13.00          | 13.00 | 13.00  |
|   | %ERROR | 0.62           | 1.46  | 0.36   |
| =====                                       |        |                |       |        |
| 4<br>(PROFUNDIDAD:<br>10.70mm.)             | L1     | 18.27          | 16.24 | 16.24  |
|   | C1     | 17.25          | 18.27 | 15.83  |
|   | D/2    | 14.90          | 12.28 | 12.20  |
|   | X      | -13.46         | -9.81 | -11.53 |
|   | Z      | 10.54          | 10.51 | 10.71  |
|   | ZREAL  | 10.70          | 10.70 | 10.70  |
|   | %ERROR | 1.50           | 1.78  | 0.09   |
| =====                                       |        |                |       |        |

TABLA #9

| =====  |        |                |        |       |
|--|--------|----------------|--------|-------|
| METODO 2: TRANSMISION, TRANSMISION-RECEPCION |        |                |        |       |
| MATERIAL: ALUMINIO                           |        |                |        |       |
| TRANSDUCTOR:                                 |        |                |        |       |
| DIMENSION: 8*9mm.                            |        |                |        |       |
| FRECUENCIA: 4MHZ                             |        |                |        |       |
| FISURAS                                      | DATOS  | LECTURAS (mm.) |        |       |
|  |        | 1              | 2      | 3     |
| =====  |        |                |        |       |
| 1<br>(PROFUNDIDAD:<br>9.90mm.)               | L1     | 15.55          | 15.55  | 15.55 |
|  | C1     | 13.53          | 13.52  | 13.72 |
|  | D/2    | 12.28          | 12.33  | 11.98 |
|  | X      | -10.07         | -9.65  | -9.47 |
|  | Z      | 9.45           | 9.34   | 9.79  |
|  | ZREAL  | 9.90           | 9.90   | 9.90  |
|  | %ERROR | 4.55           | 5.66   | 1.11  |
|  | =====  |                |        |       |
| 2<br>(PROFUNDIDAD:<br>14.00mm.)              | L1     | 18.93          | 19.13  | 18.74 |
|  | C1     | 21.25          | 20.29  | 20.86 |
|  | D/2    | 12.48          | 12.43  | 12.45 |
|  | X      | -8.89          | -10.68 | -9.24 |
|  | Z      | 13.98          | 14.48  | 13.80 |
|  | ZREAL  | 14.00          | 14.00  | 14.00 |
|  | %ERROR | 0.14           | 3.43   | 1.43  |
|  | =====  |                |        |       |
| 3<br>(PROFUNDIDAD:<br>19.00mm.)              | L1     | 23.96          | 24.15  | 25.02 |
|  | C1     | 25.12          | 25.12  | 27.05 |
|  | D/2    | 14.95          | 15.43  | 12.20 |
|  | X      | -13.06         | -13.89 | -8.04 |
|  | Z      | 18.66          | 18.54  | 21.54 |
|  | ZREAL  | 19.00          | 19.00  | 19.00 |
|  | %ERROR | 1.79           | 2.42   | 13.36 |
|  | =====  |                |        |       |

TABLA #10

| METODO 2: TRANSMISION, TRANSMISION-RECEPCION |        |                |        |        |
|--|--------|----------------|--------|--------|
| MATERIAL: ACERO                              |        |                |        |        |
| TRANSDUCTOR:                                 |        |                |        |        |
| DIMENSION: MINIATURA                         |        |                |        |        |
| FRECUENCIA: 5MHZ                             |        |                |        |        |
| FISURAS                                      | DATOS  | LECTURAS (mm.) |        |        |
|  |        | 1              | 2      | 3      |
|  | L1     | 14.22          | 15.04  | 13.21  |
|  | C1     | 13.21          | 13.82  | 12.60  |
|  | D/2    | 10.65          | 11.58  | 9.35   |
| 1  | X      | -9.30          | -10.65 | -8.31  |
| (PROFUNDIDAD:                                | Z      | 9.38           | 9.58   | 9.30   |
| 9.00mm.)                                     | ZREAL  | 9.00           | 9.00   | 9.00   |
|  | %ERROR | 4.22           | 6.44   | 3.33   |
|  | L1     | 22.35          | 22.56  | 22.35  |
|  | C1     | 21.34          | 22.35  | 21.34  |
|  | D/2    | 16.05          | 16.50  | 15.98  |
| 2  | X      | -14.60         | -16.15 | -14.57 |
| (PROFUNDIDAD:                                | Z      | 15.52          | 15.38  | 15.60  |
| 15.6mm.)                                     | ZREAL  | 15.60          | 15.60  | 15.60  |
|  | %ERROR | 0.49           | 1.41   | 0.00   |
|  | L1     | 18.29          | 20.32  | 17.27  |
|  | C1     | 18.69          | 20.12  | 17.48  |
|  | D/2    | 13.08          | 15.45  | 11.10  |
| 3  | X      | -12.49         | -14.72 | -8.32  |
| (PROFUNDIDAD:                                | Z      | 12.78          | 13.19  | 13.06  |
| 13.00mm.)                                    | ZREAL  | 13.00          | 13.00  | 13.00  |
|  | %ERROR | 1.69           | 1.46   | 0.46   |
|  | L1     | 16.26          | 14.43  | 14.22  |
|  | C1     | 17.27          | 13.84  | 14.22  |
|  | D/2    | 11.85          | 9.60   | 9.15   |
| 4  | X      | -10.34         | -8.53  | -8.09  |
| (PROFUNDIDAD:                                | Z      | 11.08          | 10.74  | 10.86  |
| 10.70mm.)                                    | ZREAL  | 10.70          | 10.70  | 10.70  |
|  | %ERROR | 3.55           | 0.37   | 1.50   |

TABLA #11

| METODO 2 TRANSMISION, TRANSMISION-RECEPCION |        |                |       |        |
|---|--------|----------------|-------|--------|
| MATERIAL: ALUMINIO                          |        |                |       |        |
| TRANSDUCTOR:                                |        |                |       |        |
| DIMENSION: MINIATURA                        |        |                |       |        |
| FRECUENCIA: 5MHZ                            |        |                |       |        |
| FISURAS                                     | DATOS  | LECTURAS (mm.) |       |        |
|   |        | 1              | 2     | 3      |
| 1<br>(PROFUNDIDAD:<br>9.90mm.)              | L1     | 15.84          | 15.26 | 15.46  |
|   | C1     | 9.66           | 19.51 | 21.23  |
|   | D/2    | 10.65          | 10.68 | 10.75  |
|   | X      | -1.45          | -4.58 | -2.45  |
|   | Z      | 9.55           | 10.00 | 9.37   |
|   | ZREAL  | 9.90           | 9.90  | 9.90   |
|   | %ERROR | 3.54           | 1.01  | 5.35   |
|   | =====  |                |       |        |
| 2<br>(PROFUNDIDAD:<br>14.00mm.)             | L1     | 21.25          | 30.91 | 21.25  |
|   | C1     | 27.05          | 21.25 | 28.01  |
|   | D/2    | 13.88          | 10.98 | 13.90  |
|   | X      | -4.92          | 16.24 | -3.56  |
|   | Z      | 14.60          | 13.71 | 14.04  |
|   | ZREAL  | 14.00          | 14.00 | 14.00  |
|   | %ERROR | 4.29           | 2.07  | 0.29   |
|   | =====  |                |       |        |
| 3<br>(PROFUNDIDAD:<br>19.00mm.)             | L1     | 27.05          | 13.21 | 23.76  |
|   | C1     | 28.98          | 23.18 | 27.05  |
|   | D/2    | 18.85          | 15.58 | 14.95  |
|   | X      | -16.00         | 17.15 | -11.36 |
|   | Z      | 19.29          | 18.70 | 18.26  |
|   | ZREAL  | 19.00          | 19.00 | 19.00  |
|   | %ERROR | 1.53           | 1.58  | 3.89   |
|   | =====  |                |       |        |

2 se obtienen mejores resultados de  $z$  y resultados errados de  $x$  por lo que se podría realizar los dos métodos para obtener valores de  $z$  y  $x$  muy cercanos a su valor real.

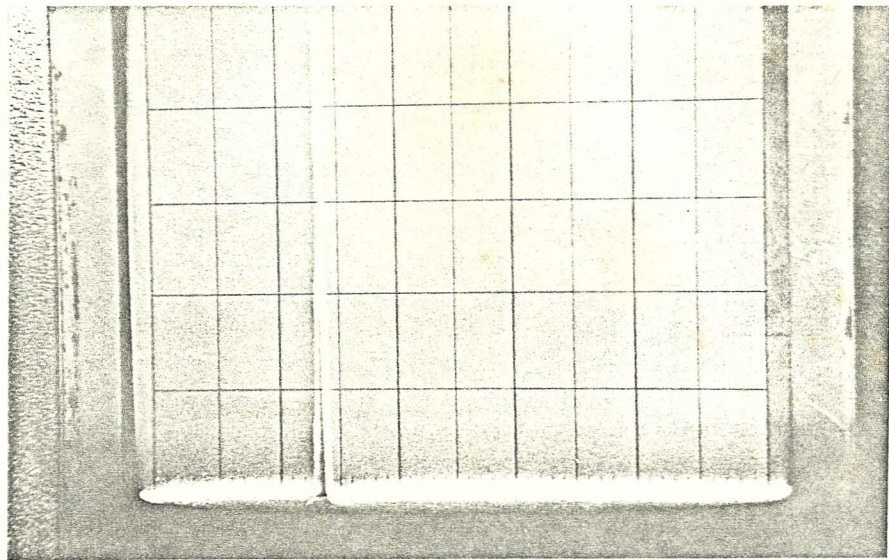
En la tabla N<sup>o</sup>9 se presenta los datos y resultados de las mediciones de las fisuras del bloque de aluminio, empleando el mismo equipo. La observación del inicio del eco de  $l$  y  $c$  es de mayor dificultad.

En la fig. N<sup>o</sup>38, se muestra las señales obtenidas en las mediciones de la profundidad de la fisura número 3, lectura 2 en la cual se obtiene una profundidad de 19mm., con un porcentaje de error del 0% . Cuando se utiliza la técnica transmisión-recepción se determina el valor de  $l$  lo cual es mostrado en la figura N<sup>o</sup>38a, se observa en ésta eliminación de ruido, mientras que en la fig. N<sup>o</sup> 38b se muestra la señal de  $c$  realizado con la técnica transmisión-recepción simultáneos en la cual se observa ruido en el inicio de la escala.

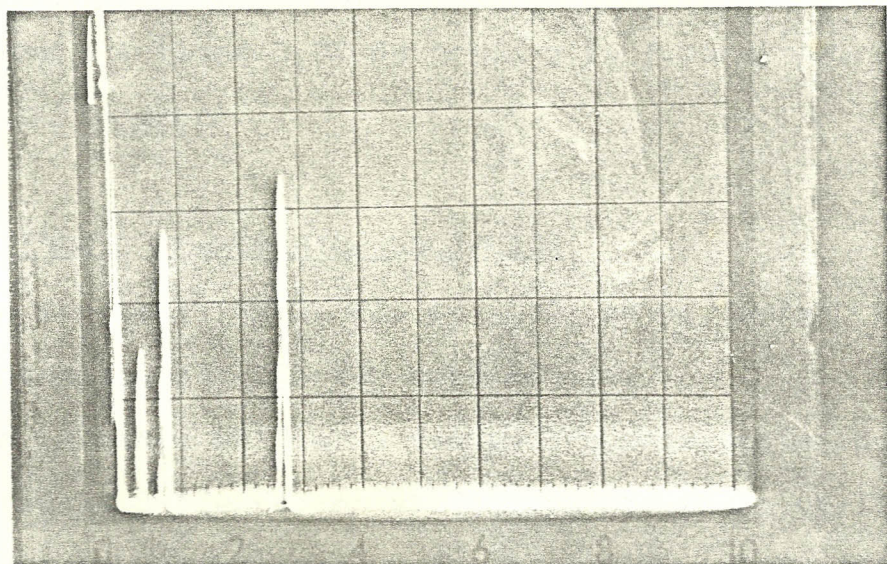
El material utilizado influye en la mejor o menor recepción del eco de la fisura, así como también la forma de la fisura.

En las tablas 10 y 11 se presentan los datos obtenidos al utilizar el equipo Sonic y dos transductores miniatura de 45° y 5 Mhz. con lo cual se obtiene mejores resultados en el valor de  $z$ .

Cuando la orientación de la fisura causa problemas y se observa en el oscilograma varias señales, se puede



1 división = 1.932mm  
 l = 25.12mm



1 división = 1.932mm  
 c = 25.12mm

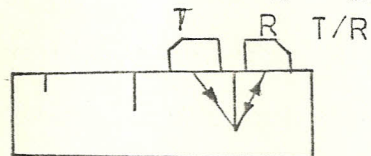


Fig.Nº38 Señales obtenidas en la medición de la profundidad de una fisura en aluminio utilizando el método 2. Determinación de los valores de l y c.



utilizar este método en conjunto con el método 1 para verificación.

En la tabla N°10 se presenta los resultados obtenidos de las mediciones de las fisuras del bloque de acero. La fisura N°1 tiene un error promedio de 4.6%, mientras la fisura número 3 tiene 1.2% de error. Estos resultados vuelven a reflejar que fisuras de mayor profundidad producen mejores resultados en la determinación de las mismas.

En la tabla N°11 se presenta los resultados obtenidos al emplear el bloque de aluminio. El porcentaje de error decrece con el aumento de la profundidad, así la número 1 tiene 3.3% de error y la fisura número 2 tiene 2.2% de error.

#### METODO 3 TRANSMISION-RECEPCION.

En las tabla N°12, 13, 14 y 15 se presentan los datos obtenidos al utilizar este método.

En la tabla N°12 se presenta los datos obtenidos de las fisuras presentes en el bloque de acero utilizando el equipo Kraütkramer y dos transductores de 45° y 4Mhz. Observando los resultados se aprecia que el porcentaje de error varía entre 0.26% -7.48%, en un mismo método. Se debió obtener mejores resultados para este método ya que se obtienen las mejores recepciones de los ecos de las fisuras debido a la eliminación de ruido. Este método tiene la desventaja de necesitar un mayor número

| =====                           |        |                |        |        |        |
|---------------------------------|--------|----------------|--------|--------|--------|
| TABLA #12                       |        |                |        |        |        |
| METODO 3: TRANSMISION-RECEPCION |        |                |        |        |        |
| MATERIAL ACERO                  |        |                |        |        |        |
| TRANSDUCTOR:                    |        |                |        |        |        |
| DIMENSION: 8*9mm.               |        |                |        |        |        |
| FRECUENCIA: 4Mhz.               |        |                |        |        |        |
| FISURAS                         | DATOS  | LECTURAS (mm.) |        |        |        |
|                                 |        | 1              | 2      | 3      | 4      |
| =====                           |        |                |        |        |        |
| 1<br>(PROFUNDIDAD:<br>9.00mm.)  | L1     | 16.24          | 16.24  | 16.24  | 16.24  |
|                                 | L2     | 18.27          | 18.27  | 18.27  | 15.02  |
|                                 | P11    | -12.00         | -16.60 | -15.20 | -15.20 |
|                                 | P12    | 14.15          | 11.20  | 12.45  | 12.45  |
|                                 | P21    | -7.95          | -13.30 | -14.30 | -12.00 |
|                                 | P22    | 20.60          | 18.75  | 18.20  | 12.45  |
|                                 | X      | -5.05          | -2.57  | -0.91  | -3.61  |
|                                 | Z      | 8.91           | 8.40   | 8.51   | 8.43   |
|                                 | ZREAL  | 9.00           | 9.00   | 9.00   | 9.00   |
|                                 | %ERROR | 1.00           | 6.67   | 5.44   | 6.33   |
|                                 | =====  |                |        |        |        |
| 2<br>(PROFUNDIDAD:<br>15.60mm.) | L1     | 20.30          | 20.30  | 20.30  | 20.30  |
|                                 | L2     | 22.33          | 22.33  | 22.33  | 22.33  |
|                                 | P11    | -14.30         | -13.25 | -13.60 | -10.40 |
|                                 | P12    | 11.25          | 13.95  | 13.75  | 17.10  |
|                                 | P21    | -12.40         | -9.70  | -9.40  | -9.25  |
|                                 | P22    | 19.30          | 22.20  | 22.30  | 23.20  |
|                                 | X      | 1.10           | 0.34   | 0.26   | 1.48   |
|                                 | Z      | 15.64          | 15.07  | 15.00  | 14.87  |
|                                 | ZREAL  | 15.60          | 15.60  | 15.60  | 15.60  |
|                                 | %ERROR | 0.26           | 3.40   | 3.85   | 4.68   |
|                                 | =====  |                |        |        |        |
| 3<br>(PROFUNDIDAD<br>13.00mm.)  | L1     | 18.27          | 18.28  | 18.28  | 18.28  |
|                                 | L2     | 20.30          | 20.30  | 20.30  | 20.30  |
|                                 | P11    | -12.40         | -9.60  | -9.40  | -9.50  |
|                                 | P12    | 12.85          | 16.80  | 17.00  | 16.85  |
|                                 | P21    | -10.40         | -6.80  | -9.40  | 6.80   |
|                                 | P22    | 19.90          | 23.70  | 22.40  | 23.70  |
|                                 | X      | 0.45           | 1.24   | 5.20   | 1.36   |
|                                 | Z      | 13.20          | 12.52  | 12.53  | 12.55  |
|                                 | ZREAL  | 13.00          | 13.00  | 13.00  | 13.00  |
|                                 | %ERROR | 1.54           | 3.69   | 3.62   | 3.46   |
|                                 | =====  |                |        |        |        |
| 4<br>(PROFUNDIDAD:<br>10.70mm.) | L1     | 16.24          | 18.27  | 18.27  | 16.24  |
|                                 | L2     | 18.27          | 20.30  | 16.24  | 18.27  |
|                                 | P11    | -12.50         | -13.60 | -15.60 | -13.70 |
|                                 | P12    | 12.50          | 16.40  | 15.90  | 12.10  |
|                                 | P21    | -10.30         | -11.95 | -11.80 | -10.00 |
|                                 | P22    | 18.60          | 22.95  | 13.85  | 20.10  |
|                                 | X      | -3.70          | 3.83   | 0.72   | 1.53   |
|                                 | Z      | 10.16          | 10.33  | 9.90   | 10.16  |
|                                 | ZREAL  | 10.70          | 10.70  | 10.70  | 10.70  |
|                                 | %ERROR | 5.05           | 3.46   | 7.48   | 5.05   |
|                                 | =====  |                |        |        |        |

TABLA #13

| METODO 3:                       |        | TRANSMISION-RECEPCION |        |        |
|---------------------------------|--------|-----------------------|--------|--------|
| MATERIAL:                       |        | ALUMINIO              |        |        |
| TRANSDUCTOR:                    |        |                       |        |        |
| DIMENSION:                      |        | 8*9mm.                |        |        |
| FRECUENCIA:                     |        | 4MHZ                  |        |        |
| FISURAS                         | DATOS  | LECTURAS (mm)         |        |        |
|                                 |        | 1                     | 2      | 3      |
| 1<br>(PROFUNDIDAD:<br>9.90mm.)  | L1     | 15.46                 | 15.46  | 15.65  |
|                                 | L2     | 17.39                 | 17.39  | 17.39  |
|                                 | P11    | -12.70                | -11.50 | -10.20 |
|                                 | P12    | 12.50                 | 12.55  | 13.80  |
|                                 | P21    | -11.00                | -8.15  | -9.95  |
|                                 | P22    | 18.00                 | 19.60  | 19.40  |
|                                 | X      | -1.20                 | -0.99  | 8.33   |
|                                 | Z      | 9.24                  | 9.66   | 9.12   |
|                                 | ZREAL  | 9.90                  | 9.90   | 9.90   |
|                                 | %ERROR | 6.67                  | 2.42   | 7.88   |
| 2<br>(PROFUNDIDAD:<br>14.20mm.) | L1     | 19.32                 | 19.32  | 19.32  |
|                                 | L2     | 21.25                 | 21.25  | 18.93  |
|                                 | P11    | -14.70                | -14.55 | -14.80 |
|                                 | P12    | 10.30                 | 11.60  | 10.20  |
|                                 | P21    | -14.70                | -14.55 | -9.85  |
|                                 | P22    | 15.30                 | 16.80  | 14.85  |
|                                 | X      | -5.01                 | -1.67  | 2.10   |
|                                 | Z      | 14.57                 | 14.22  | 14.34  |
|                                 | ZREAL  | 14.20                 | 14.20  | 14.20  |
|                                 | %ERROR | 2.61                  | 0.14   | 0.99   |
| 3<br>(PROFUNDIDAD:<br>19.00mm.) | L1     | 23.18                 | 23.18  | 23.18  |
|                                 | L2     | 25.12                 | 25.12  | 25.12  |
|                                 | P11    | -12.54                | -13.70 | -13.10 |
|                                 | P12    | 15.00                 | 14.30  | 13.70  |
|                                 | P21    | -11.60                | -12.50 | -12.40 |
|                                 | P22    | 20.80                 | 20.50  | 20.60  |
|                                 | X      | -2.62                 | -2.09  | 1.90   |
|                                 | Z      | 18.38                 | 18.37  | 18.86  |
|                                 | ZREAL  | 19.00                 | 19.00  | 19.00  |
|                                 | %ERROR | 3.26                  | 3.32   | 0.74   |

TABLA #14

| METODO 3:                       |        | TRANSMISION-RECEPCION |        |        |
|---------------------------------|--------|-----------------------|--------|--------|
| MATERIAL:                       |        | ACERO                 |        |        |
| TRANSDUCTOR:                    |        |                       |        |        |
| DIMENSION:                      |        | MINIATURA             |        |        |
| FRECUENCIA:                     |        | 5MHZ                  |        |        |
| FISURAS                         | DATOS  | LECTURAS (mm)         |        |        |
|                                 |        | 1                     | 2      | 3      |
| 1<br>(PROFUNDIDAD:<br>9.00mm.)  | L1     | 18.29                 | 18.29  | 15.24  |
|                                 | L2     | 13.21                 | 13.21  | 18.29  |
|                                 | P11    | -11.70                | -12.90 | -13.80 |
|                                 | P12    | 10.30                 | 8.70   | 9.50   |
|                                 | P21    | -6.00                 | -9.10  | -9.90  |
|                                 | P22    | 13.14                 | 10.00  | 11.20  |
|                                 | X      | 0.95                  | 0.30   | 1.60   |
|                                 | Z      | 8.89                  | -9.10  | 9.51   |
|                                 | ZREAL  | 9.00                  | 9.00   | 9.00   |
|                                 | %ERROR | 1.22                  | 1.11   | 5.67   |
| 2<br>(PROFUNDIDAD:<br>15.50mm.) | L1     | 22.35                 | 23.37  | 23.37  |
|                                 | L2     | 20.32                 | 22.35  | 22.35  |
|                                 | P11    | -15.90                | -15.55 | -17.15 |
|                                 | P12    | 16.95                 | 19.32  | 17.35  |
|                                 | P21    | -12.40                | -13.60 | -15.50 |
|                                 | P22    | 14.50                 | 18.45  | 15.55  |
|                                 | X      | -1.16                 | 6.10   | 0.32   |
|                                 | Z      | 15.11                 | 15.31  | 15.76  |
|                                 | ZREAL  | 15.50                 | 15.50  | 15.50  |
|                                 | %ERROR | 2.52                  | 1.23   | 1.68   |
| 3<br>(PROFUNDIDAD:<br>13.00mm.) | L1     | 20.32                 | 20.32  | 18.29  |
|                                 | L2     | 18.29                 | 18.29  | 16.26  |
|                                 | P11    | -15.20                | -14.25 | -10.10 |
|                                 | P12    | 15.50                 | 17.80  | 16.45  |
|                                 | P21    | -11.30                | -14.25 | -10.10 |
|                                 | P22    | 14.40                 | 12.80  | 10.80  |
|                                 | X      | -3.95                 | -1.95  | 0.57   |
|                                 | Z      | 12.51                 | 12.30  | 12.43  |
|                                 | ZREAL  | 13.00                 | 13.00  | 13.00  |
|                                 | %ERROR | 3.75                  | 5.38   | 4.38   |
| 4<br>(PROFUNDIDAD:<br>10.70mm.) | L1     | 18.29                 | 16.26  | 16.26  |
|                                 | L2     | 16.26                 | 14.22  | 15.24  |
|                                 | P11    | -16.60                | -12.60 | -13.60 |
|                                 | P12    | 13.90                 | 12.20  | 11.60  |
|                                 | P21    | -13.60                | -9.10  | -9.55  |
|                                 | P22    | 11.90                 | 13.70  | 9.30   |
|                                 | X      | 0.40                  | 1.99   | -5.44  |
|                                 | Z      | 10.80                 | -10.40 | -9.90  |
|                                 | ZREAL  | 10.70                 | 10.70  | 10.70  |
|                                 | %ERROR | 0.93                  | 2.80   | 7.48   |

TABLA #15

| METODO 3:                       |        | TRANSMISION-RECEPCION |        |        |
|---------------------------------|--------|-----------------------|--------|--------|
| MATERIAL:                       |        | ALUMINIO              |        |        |
| TRANSDUCTOR:                    |        |                       |        |        |
| DIMENSION:                      |        | MINIATURA             |        |        |
| FRECUENCIA:                     |        | 5MHZ                  |        |        |
| FISURAS                         | DATOS  | LECTURAS (mm.)        |        |        |
|                                 |        | 1                     | 2      | 3      |
| 1<br>(PROFUNDIDAD:<br>9.90mm.)  | L1     | 15.46                 | 15.16  | 13.52  |
|                                 | L2     | 13.52                 | 15.46  | 15.46  |
|                                 | P11    | -14.30                | -14.00 | -12.00 |
|                                 | P12    | 7.40                  | 7.70   | 7.00   |
|                                 | P21    | 9.50                  | 9.50   | -11.45 |
|                                 | P22    | 9.00                  | 9.00   | 12.70  |
|                                 | X      | 5.76                  | -1.64  | -1.28  |
|                                 | Z      | 8.83                  | 10.53  | 9.58   |
|                                 | ZREAL  | 9.90                  | 9.90   | 9.90   |
|                                 | %ERROR | 10.81                 | 6.36   | 3.23   |
| 2<br>(PROFUNDIDAD:<br>14.00mm.) | L1     | 24.15                 | 24.15  | 19.32  |
|                                 | L2     | 23.18                 | 23.18  | 21.25  |
|                                 | P11    | -17.80                | -17.60 | -14.40 |
|                                 | P12    | 15.40                 | 15.60  | 11.70  |
|                                 | P21    | -16.60                | -16.30 | -14.55 |
|                                 | P22    | 13.40                 | 13.70  | 16.80  |
|                                 | X      | -15.84                | -14.05 | -1.40  |
|                                 | Z      | 13.49                 | 14.75  | 14.24  |
|                                 | ZREAL  | 14.00                 | 14.00  | 14.00  |
|                                 | %ERROR | 3.64                  | 5.36   | 1.71   |
| 3<br>(PROFUNDIDAD:<br>19.00mm.) | L1     | 25.12                 | 25.12  | 25.12  |
|                                 | L2     | 27.05                 | 26.85  | 25.12  |
|                                 | P11    | -20.00                | -2.16  | -18.40 |
|                                 | P12    | 11.30                 | 15.00  | 19.20  |
|                                 | P21    | -18.30                | -20.00 | -13.65 |
|                                 | P22    | 16.70                 | 15.00  | 16.60  |
|                                 | X      | -12.63                | -12.20 | -8.89  |
|                                 | Z      | 18.54                 | 18.80  | 18.26  |
|                                 | ZREAL  | 19.00                 | 19.00  | 19.00  |
|                                 | %ERROR | 2.42                  | 1.05   | 3.89   |

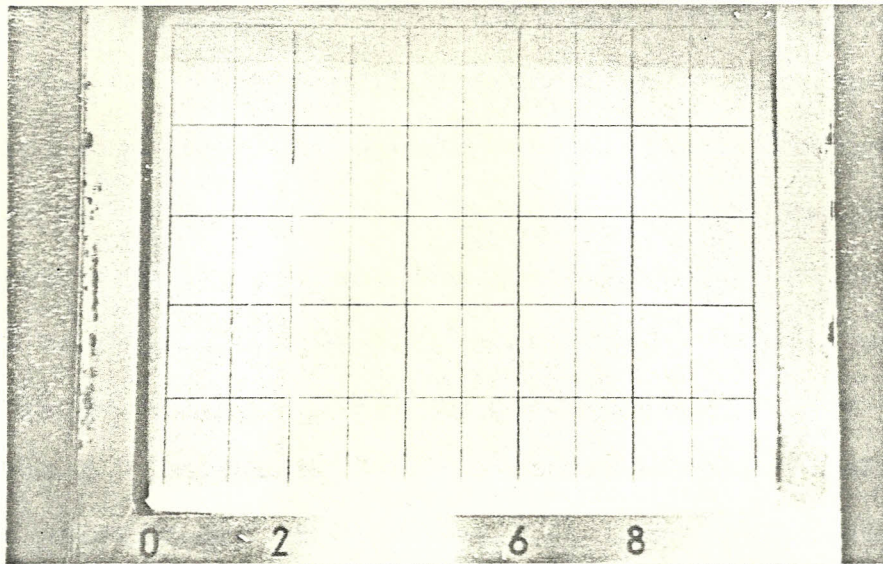
de mediciones y de que es necesario mover el transductor y buscar otra localización la cual está limitada a una posición muy cerca de la anterior para permanecer dentro del haz de sonido, lo cual produce error en la obtención del valor de  $x$ .

Cuando una fisura presenta una superficie dentada se producirán ondas refractadas desde los puntos agudos proyectados. Con la utilización de este método las ondas refractadas desde la superficie rugosa no aparecerían debido a la desviación de las ondas no siendo estas receptadas por el transductor.

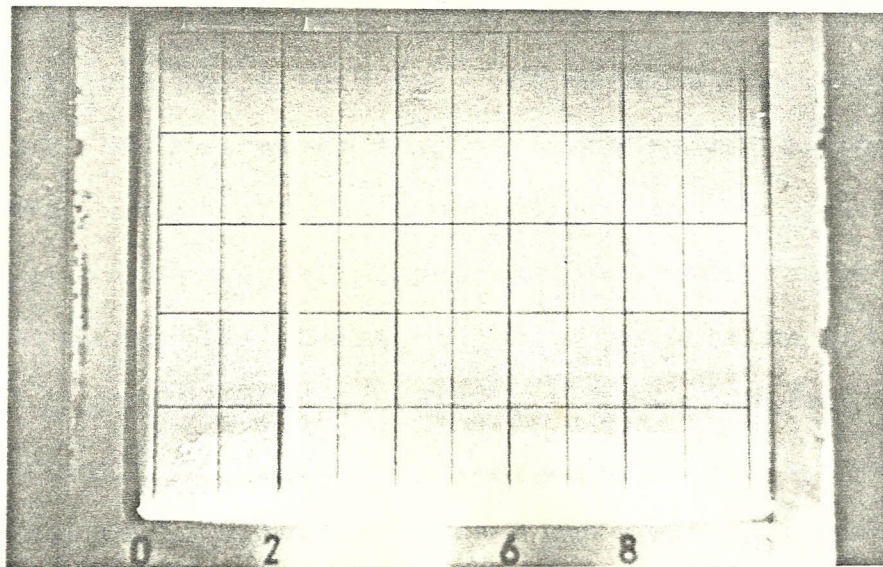
Este método tiene la ventaja que cuando se han tomado datos errados no es posible obtener valores de  $z$  reales debido a que se obtienen raíces negativas por lo que tiene una forma de autocorrección.

Las fisuras de menor profundidad son las que presentan mayor error de lecturas en la determinación del valor de  $z$ . En la fisura número 1 se obtiene un 4.8% de error promedio, mientras que en la fisura número 2 que es de mayor profundidad, se obtiene 3% de error.

En la fig. N<sup>o</sup>39 se muestran las señales obtenidas en la medición de la profundidad de la fisura N<sup>o</sup>2 lectura 1 en la determinación de los valores de  $I_1$  y  $I_2$  realizado por el método 3, en el cual se obtiene un valor de  $z$  igual a 15.64mm, el cual comparado con el valor real (15.2mm.) da un porcentaje de error del 0.26% realizado con transductores de 4 Mhz.



1 división = 2.032mm.  
 $l_1 = 20.30\text{mm}$



1 división = 2.032mm.  
 $l_2 = 22.4\text{mm}$

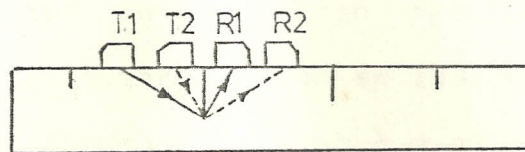


Fig.Nº39 Señales obtenidas en la medición de la profundidad de una fisura en acero utilizando el método 3. Determinación de los valores  $l_1$  y  $l_2$ .

En la tabla N213 se presenta los resultados obtenidos de las mediciones de las fisuras en un bloque de aluminio, utilizando el equipo Kraütkramer y dos transductores de 45° y 4 Mhz. Se observa que las fisuras de mayor profundidad son las que presentan un menor error en su medición. La fisura número 3 presenta un porcentaje promedio de 2.44% de error, mientras que la fisura número 1 tiene 5.7% de error con respecto al valor de su profundidad real (19mm.). Los resultados de esta tabla en general tiene un porcentaje de error mayor que los de la tabla N212, esto se debe a que el material utilizado es diferente. El material presentado en la tabla N212 es acero el cual tiene menor atenuación por tener un tamaño de grano menor que el del bloque de aluminio, éste último presenta una estructura de grano más grueso los cuales reflejan los ecos de las fisuras, lo que causa que se observen con mayor dificultad y por lo tanto se produce un mayor error en la toma de lecturas de  $I_1$  y  $I_2$ , tanto para este método como para los métodos anteriores.

En la tabla N214 se encuentran tabulados los datos y resultados en la determinación de las mediciones de la profundidad de fisuras en el bloque de acero utilizando un equipo marca Sonic y dos transductores de 45° y 5 Mhz. De los valores obtenidos se observan mejores resultados que los obtenidos en las tablas 12 y 13, debido a que es posible eliminar el ruido, esto indica



que la utilización de este equipo nos brinda mejores resultados si el material a ensayarse fuera de un grano fino sin presencia de incrustaciones, ni poros. Para un aluminio trabajado la utilización de uno u otro equipo sería indiferente.

Se vuelve a obtener mejores resultados cuando la profundidad de las fisuras es mayor, en la fisura número 2 (tabla N°14), se obtiene un porcentaje de error promedio de 1.88%, mientras que en la fisura número 4 de menor profundidad se obtiene 3.74% de error. Para mejores resultados consistentes y próximos al real es recomendable realizar por lo menos 3 mediciones. El error de lectura del inicio del eco de la fisura depende de la visión de la persona que lo realiza, sería recomendable la utilización de una lupa para evitar en lo posible errores de observación.

En la tabla N°15 se encuentran los datos y resultados obtenidos de las mediciones de las fisuras empleando el bloque de aluminio, utilizando el equipo Sonic y dos transductores miniatura de 45° y 5 Mhz. En la fisura número 1 se obtiene en la primera medición un error de consideración, del 10%. Este error pudo ser producido por una mala lectura en el inicio del eco, o por una posición equivocada del transductor pues una pequeña variación provoca error en la lectura del mismo el cual se incrementa por la escala de calibración utilizada; en este caso el error se duplicaría. Si se desea una

buena determinación del valor real de la fisura se debe realizar 3 mediciones y de esta forma obtener un porcentaje de error menor. En esta fisura se obtuvo un 2.5% de error al realizar las tres mediciones, el mismo que es un valor que se aproxima más al valor real de  $z$ . Las fisuras de menor profundidad son las que presentan mayor error de lecturas y por lo tanto en la determinación del valor de  $z$ .

En el estudio de estos tres métodos se utilizaron transductores con un ángulo de  $60^\circ$  no obteniéndose buenos resultados porque la onda se refractaba y aparecían varias señales de ecos que no provenían de las fisuras, por lo que todas las mediciones se realizaron con transductores de  $45^\circ$  con frecuencias de 4Mhz y 5Mhz. Los transductores de 4Mhz. presentan señales más estables que los de 5 Mhz.

Al realizar las pruebas en el bloque de ILZRO hubo una mala selección del material que iba en el interior del bloque por lo que no se pudo localizar las placas de cobre incrustadas en su interior. En piezas verdaderamente fisuradas esta situación no se presenta porque una fisura es detectable si el tamaño de grano es menor que la longitud de onda, si se utiliza el transductor adecuado para que sea posible la detección de la fisura escogiendo la frecuencia, ángulo, cristal tamaño adecuado y si se sitúan los transductores en la posi-

ción correcta. Los problemas que pueden ocurrir son: que el eco de la señal de la fisura sea refractada, en este caso lo conveniente sería probar con otro método.

Otro problema que se puede presentar es la mala calibración cuando se trata de un material diferente al acero aunque si se siguen cuidadosamente los pasos que se realizaron en esta tesis estos problemas se minimizan.

Comparando las figuras 37 38 y 39 de los oscilogramas podemos darnos cuenta que con el método 3 transmisión-recepción se obtienen las mejores ecos al eliminarse la conocida "hierba".

Otro factor que influye en como se observan los ecos es el tamaño de grano del bloque, en el de acero la atenuación es menor que en el de aluminio. Esta desventaja puede ser eliminada si se utiliza un equipo que pueda eliminar el ruido de fondo.

De los tres métodos descritos el método 1 es el de más fácil utilización puesto que sólo utiliza un transductor. En los otros dos métodos son necesarios dos transductores. En cuanto al análisis matemático el método 3 tiene formulas más largas pero al realizar un pequeño programa de computación es posible una fácil obtención de los valores de localización de la fisura. En esta tesis las tablas de resultados presentados fueron realizadas de esta forma.

### CONCLUSIONES

El empleo de los métodos descritos para la medición de profundidad de fisuras por ultrasonidos proporcionan resultados satisfactorios. Su empleo elimina la necesidad de simetría de los transductores y el acceso a las dos caras de la pieza ensayada. Con estos métodos no es necesario conocer el inicio de una fisura, pues es posible determinar la ubicación y el tamaño de la misma.

El método 1, transmisión-recepción simultáneos, es el de más fácil aplicación pues sólo utiliza un transductor obteniéndose valores de la localización y profundidad de las fisuras, cercanos al valor real. Sin embargo este método tiene la desventaja que la observación de las señales ultrasónicas generalmente va acompañado de ruido.

El método 2, transmisión, transmisión-recepción simultáneos, presenta mayor dificultad en su aplicación pues es necesario que la ubicación de los transductores en el transcurso de la medición de las fisuras, no se encuentre fuera del haz ultrasónico que las detecta.

El método 3, transmisión-recepción, tiene la ventaja de la eliminación de ruido por el hecho de utilizar dos transductores con emisión-recepción por separado, que evitan interferencias en las señales recibidas. Este método es el más apropiado para la medición de fisuras poco profundas. La única desventaja es que la posición de los transductores debe ser muy próxima entre sí.

Las fisuras de mayor profundidad son las que muestran mejores resultados siendo el valor obtenido más próximo a su valor real.

El tamaño de grano influye en la recepción de las señales que llegan al transductor, si el grano es basto existe mayor ruido lo que dificulta el ensayo, como sucedió en el presente estudio con el bloque de aluminio.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) Baez, Juan. Ensayo Ultrasonico de los Materiales.  
(Comisión Nacional de Energía Atómica 1976.)
- 2) M.F. Kannien. "An Introduction to Fracture Mechanics for Engineers and NDE Specialists Part 1", Ultrasonic Materials Evaluation (A.S.N.T), Vol.42, Nº4 (abril 1984), pp. 370-371.
- 3) M.F. Kannien. "An Introduction to Fracture Mechanics for Engineers and NDE Specialists Part 2", Ultrasonic Materials Evaluation (A.S.N.T), Vol.42, Nº6 (mayo 1984), pp 658-662.
- 4) Ing. Dipl. H. W. Kraüt Kramer Verificación por Ultrasonidos de piezas forjadas. pp 14-38.
- 5) D.K Mark. "Ultrasonic Measurement at Crack Depth." Canadian Society for Nondestructive Testing Journal. Vol 6 Nº6 (mayo 1985), pp36-46.
- 6) Francisco Ramires Gomez, Introducción a los Métodos de Ensayos no Destructivos de Control de Calidad de materiales (I.N.T.A) (Tercera Edición Madrid. 1978) pp. 348-355.
- 7) Carlin. Introducción a la Metalurgia Física Urmo.
- 8) J Kraüt Kramer, Ultrasonic Testing of Materials (Tercera edición New York, 1983).