



T
672.52
P153

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

**“Inspección por Ultrasonidos de Uniones de
Acero Estructural Soldadas en Angulo”**

TESIS DE GRADO

**Previa a la Obtención del Título de
INGENIERO MECANICO**

Presentada por:

ENRIQUE A. PALACIOS JOHNSON



Guayaquil - Ecuador

1987

A G R A D E C I M I E N T O

A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL LITORAL.

Al Ing. OMAR SERRANO V., Director
de Tesis, por su ayuda y colaboraci
ción para la realización de este
trabajo.

A Luis Brito y Jaime Barrera por
su colaboración en la preparación
de muestras y apoyo brindado du-
rante el desarrollo de este estu-
dio.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS ABUELITAS

A MIS HERMANOS

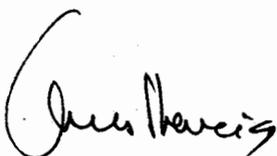
A TANIA



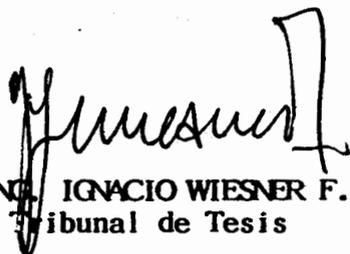
ING. EDUARDO ORCES PAREJA
Decano
Facultad de Ingeniería Mecánica



ING. OMAR SERRANO VALAREZO
Director de Tesis



ING. ALBERTO TORRES VALENCIA
Tribunal de Tesis



ING. IGNACIO WIESNER F.
Tribunal de Tesis

DECLARACION EXPRESA

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

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


ENRIQUE A. PALACIOS JOHNSON

R E S U M E N

En este estudio se emplea el método de ensayo no destructivo por ultrasonidos para la inspección de uniones de acero estructural soldadas en ángulo, y de esta manera es establecer un procedimiento que permita la localización, evaluación e identificación de las discontinuidades más comunes en este tipo de uniones. Para el efecto se utilizan soldaduras en ángulo con penetración completa usando el proceso manual al arco con electrodo revestido, cuyos parámetros se ajustan para producir deliberadamente discontinuidades tales como: porosidades, inclusiones de escoria, falta de fusión, falta de penetración, etc.

La inspección ultrasónica se efectúa por la técnica de impulso-eco empleando transductores angulares de 45° y 60° , de 2 MHz, los que al detectar una discontinuidad dan lugar a la indicación correspondiente en la pantalla TRC del equipo de ultrasonidos. Dichas señales se utilizan para evaluar la severidad de la defectología presente en la soldadura según el Código ASME Secc. VIII-Div. 2. Se identifican finalmente en este trabajo las discontinuidades existentes en las uniones soldadas con ayuda de la información obtenida durante la inspección y luego de analizar

el comportamiento de la señal ultrasónica al aplicar al transductor una serie de movimientos controlados.

INDICE GENERAL

RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE ABREVIATURAS	XI
INDICE DE FIGURAS	XII
INDICE DE TABLAS	XVII
INTRODUCCION	XX
I. CAPITULO	22
FUNDAMENTO TEORICO	22
1.1 Generalidades	22
1.1.1 Características y parámetros del ensayo ultrasónico.	22
1.1.2 Onda ultrasónica.- Velocidad de propagación y comportamien- to en superficies límites. ..	26
1.1.3 Formación y estructura del cam po ultrasónico.	40
1.1.4 Atenuación del haz ultrasónico	44
1.2 El sistema de ultrasonidos	47
1.2.1 Transductores	49
1.2.2 Equipos de ultrasonidos	56
1.3 Inspección ultrasónica de uniones sol dadas en ángulo.	64

IX .

	Pág.
1.3.1 Información básica para reali- zar el ensayo.	65
1.3.2 Evaluación de defectología en las soldaduras en ángulo.	69
1.3.3 Condiciones a ser establecidas antes de la inspección.	76
1.4 Normas de aceptación	84
II. CAPITULO	90
TRABAJO EXPERIMENTAL	90
2.1 Uniones soldadas a inspeccionar	90
2.2 Equipo de ensayo	95
2.3 Evaluación del sistema de ultrasonidos	102
2.3.1 Linealidad horizontal	104
2.3.2 Linealidad vertical	109
2.3.3 Resolución	110
2.3.4 Sensitividad y ruido de fondo.	111
2.4 Calibración del sistema para el ensayo	115
2.4.1 Ajuste de la Base de tiempo ..	117
2.4.2 Determinación del punto de sa- lida y ángulo del transductor.	122
2.4.3 Construcción de las curvas de calibración amplitud distancia (DAC).	123
2.4.4 Niveles de Ganancia de Explora- ción y Evaluación.	129

	Pág.
2.5 Desarrollo de la inspección	130
2.5.1 Determinación del desplazamiento del transductor.	134
2.5.2 Utilización de métodos de exploración para la localización de defectos.	137
2.5.3 Identificación de defectos ...	146
III. CAPITULO	153
DISCUSION DE RESULTADOS	153
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	168
BIBLIOGRAFIA	170

A B R E V I A T U R A S

- α_i : Angulo de incidencia
- α_r : Angulo de reflexión
- α_t : Angulo de refracción
- γ : Angulo de divergencia
- λ : Longitud de onda
- μ : Coeficiente de Poisson
- a_H : Proyección superficial de la distancia recorrida por el haz ultrasónico.
- A : Amplitud de oscilación
- ASME: Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
- ASTM: Sociedad Americana para Inspecciones y Materiales
- AIS : Sociedad Americana de la Soldadura
- C : Velocidad acústica
- C_L : Velocidad acústica de la onda longitudinal
- C_T : Velocidad acústica de la onda transversal
- d : Profundidad de la discontinuidad medida desde la superficie de inspección.
- DAC : Calibración de amplitud en distancia
- E : Módulo de elasticidad de Young
- E_e : Energía acústica específica
- f : Frecuencia
- G : Módulo de rigidez transversal

XII

- I : Intensidad acústica
- IIW : Instituto Internacional de la Soldadura
- INTA : Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
- k : Coeficiente de absorción
- K : Factor determinado por la diferencia de presiones entre el rayo marginal y el rayo principal del haz ultrasónico.
- N : Campo próximo
- P : Presión acústica
- R : Coeficiente de reflexión (intensidad acústica)
- R' : Coeficiente de reflexión (presión acústica)
- t : Espesor de chapa
- T : Coeficiente de transmisión (intensidad acústica)
- T' : Coeficiente de transmisión (presión acústica)
- TRC : Tubo de Rayos Catódicos
- v : Velocidad instantánea de vibración
- V : Velocidad máxima de vibración
- Z : Impedancia acústica

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Tipos de onda ultrasónica	28
Comportamiento de la onda ultrasónica en una superficie límite. Incidencia normal.	34
Comportamiento de la onda ultrasónica en una superficie límite. Incidencia angular.	37
Campo ultrasónico	42
Tipos de Transductor utilizados en la inspección ultrasónica.	51
Tipos de presentación en pantalla de la indicación de un defecto.	58
Circuito esquemático de un equipo impulso-eco con representación de la indicación en barrido A.	60
Procedimiento de inspección ultrasónica para soldaduras de uniones soldadas en ángulo. ...	66
Influencia de la orientación del defecto para su evaluación utilizando ultrasonidos.	74
Dimensiones y características de las chapas que forman la unión en ángulo a ser inspeccionada con ultrasonidos.	93
Equipo de ultrasonidos Krautkramer USK6	97
Transductores utilizados en la inspección ultrasónica.	97

	Pág.
3. Bloques de calibración	99
4. Bloque de calibración tipo ASME	100
5. Posición del transductor normal en el bloque V1 para la evaluación de linealidad.	105
6. Representación gráfica del oscilograma obtenido en pantalla para evaluar linealidad.	105
7. Evaluación gráfica de la linealidad horizontal del equipo de inspección Krautkramer USK-6	108
8. Evaluación gráfica de la linealidad vertical del equipo de inspección Krautkramer USK-6. .	108
9. Poder de resolución del sistema de ultrasonidos.	112
10. Verificación de la sensibilidad con alta ganancia.	114
11. Verificación de la sensibilidad con baja ganancia.	116
12. Posiciones de los transductores normal y angular en el bloque V1 para realizar el ajuste de la base de tiempo.	119
13. Oscilograma correspondiente a un ajuste de 125 mm. de la base de tiempo utilizando un transductor normal.	120
14. Oscilograma correspondiente a un ajuste de 250 mm. de la base de tiempo utilizando un transductor angular de 45°.	120
15. Oscilograma obtenido al determinar el punto de salida del haz en el transductor angular..	124

Nº		Pág.
26.	Posiciones del transductor en el bloque patrón V1 para determinar el ángulo de salida del haz.	125
27.	Posiciones del transductor para construir la curva DAC.	128
28.	Curvas DAC para la evaluación de defectos según el Código ASME - Sección VIII.	128
29.	Tipo de error que puede producir una laminación en el metal base.	133
30.	Representación de la unión soldada en ángulo para determinar el desplazamiento de los transductores a utilizar en la inspección.	135
31.	Mecanismo de barrido del transductor durante el ensayo.	138
32.	Método trigonométrico para la localización de un defecto.	139
33.	Localizador gráfico y cursor transparente ..	143
34.	Posicionamiento de un defecto utilizando un localizador gráfico.....	143
35.	Movimientos del transductor para determinar la morfología del defecto.	147
36.	Análisis de un defecto de morfología plana irregular utilizando un transductor angular..	149
37.	Análisis de un defecto de morfología plana espectral utilizando un transductor angular. .	150
38.	Análisis de un defecto de morfología cilíndrica utilizando un transductor angular.	151

Nº	Pág.
39. Análisis de un defecto de morfología esférica utilizando un transductor angular.	152
40. Oscilograma y localizador gráfico correspondientes a la determinación de una falta de penetración en la unión soldada en ángulo Nº 1.	154
41. Oscilograma y localizador gráfico correspondientes a la determinación de falta de fusión en la unión soldada en ángulo Nº 2.	156
42. Oscilograma y localizador gráfico correspondientes a la determinación de una falta de fusión en el bisel de la unión soldada en ángulo Nº 2.	158
43. Oscilograma y localizador gráfico correspondientes a la determinación de una falta de fusión en la chapa de la unión soldada en ángulo Nº 3.	159
44. Oscilograma y localizador gráfico correspondientes a la determinación de una inclusión de escoria en la unión soldada en ángulo Nº 4.	161
45. Oscilograma y localizador gráfico correspondientes a la determinación de una falta de fusión en la unión soldada en ángulo Nº 3. ...	162
46. Oscilograma y localizador gráfico correspondientes a la determinación de una mordedura en la unión soldada en ángulo Nº 3.	164

Nº	Pág.
47. Oscilograma y localizador gráfico correspondientes a la determinación de un sobre-espesor excesivo en la unión soldada en ángulo Nº 4.	165
48. Oscilograma correspondiente a una soldadura libre de defectos en la unión en ángulo Nº 3.	167

INDICE DE TABLAS

Nº	Pág.
I. Velocidad acústica, densidad e impedancia acústica para diversos materiales.	32
II. Valores del ángulo del transductor en función del espesor del material a ensayar.	68
III. Defectología en las soldaduras en ángulo ..	71
IV. Relación entre la rugosidad de la superficie y la viscosidad del acoplante.	81
V. Niveles mínimos de aceptación (decibeles) según AWS D1.1 para la construcción de edificios.	87
VI. Niveles de inspección según AWS D 1.1 para la construcción de edificios.	89
VII. Cualidades requeridas para las uniones soldadas.	92
VIII. Características de las uniones soldadas en ángulo construidas para realizar la inspección ultrasónica.	96
IX. Dimensiones recomendadas para la construcción del bloque básico de calibración ASME.	103
X. Valores obtenidos en la evaluación de la linealidad horizontal.	107
XI. Valores obtenidos en la evaluación de la linealidad vertical.	107

Nº	Pág.
XII. Inspección visual de la unión en ángulo soldada.	131

I N T R O D U C C I O N

La inspección por ultrasonidos se basa en la propagación del sonido a través de todo cuerpo con propiedades elásticas. Las ondas ultrasónicas son transmitidas por un transductor que a la vez puede actuar como receptor de los pulsos ultrasónicos reflejados por alguna discontinuidad.

La parte electrónica del sistema es la que produce las señales de salida y las amplifica al ser receptadas por un tubo de rayos catódicos que muestra tanto el tiempo de recorrido como la amplitud de estas señales. Dicha información combinada con un conocimiento suficiente del material bajo estudio, ayuda a la interpretación práctica de estas indicaciones a ser hecha en términos de la homogeneidad del material.

El desarrollo de los ultrasonidos en la actualidad ha hecho que su campo de aplicación se extienda en las diferentes áreas tecnológicas donde es necesaria su utilización, una de ellas es la soldadura donde el ensayo no destructivo por ultrasonidos es uno de los medios más idóneos por sus ventajas económicas y técnicas, sobre otros ensayos del mismo tipo que se emplean en la inspección de éstas para garantizar su calidad y confiabilidad.

Entre las uniones soldadas utilizadas comúnmente en es-

estructuras de acero se encuentra la unión en ángulo, por lo que resulta de mucha importancia, a más de conocer su resistencia y eficiencia, realizar un control que permita asegurar la calidad tecnológica de la unión, a fin de detectar defectos que van generalmente asociados al proceso de soldadura los cuales pueden provocar fallas en el producto soldado. Las uniones en ángulo presentan dificultad y hasta imposibilidad para ser inspeccionadas por otro método que no sea el de ultrasonidos, razón por la cual en el presente trabajo se ha desarrollado un procedimiento de ensayo adecuado aplicable a esta geometría, utilizando dicho método con el fin de facilitar al operador de ultrasonidos la inspección de estas uniones y lograr resultados inmediatos y confiables en base a una interpretación correcta de la información obtenida.

CAPITULO I

FUNDAMENTO TEORICO

1.1 GENERALIDADES.-

El ensayo de materiales por ultrasonidos utiliza la propagación del sonido, tanto en sólidos como en líquidos, para realizar un control no destructivo de cualquier material que sea susceptible de ser atravesado por estos. Salvo por el rango de frecuencias, los ultrasonidos no se diferencian en nada esencial del sonido audible e incluso sus características son perfectamente comparables con las de cualquier onda mecánica.

1.1.1 Características y parámetros del ensayo ultrasónico.-

La inspección ultrasónica se basa en las propiedades de la propagación, 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

estas en que su campo de frecuencia se encuentra por encima de la zona audible.

Conociendo la velocidad de propagación del sonido en el material ensayado es posible evaluar su espesor midiendo el tiempo de recorrido, así como también sus propiedades mecánicas. Pero la mayor aplicación de los ultrasonidos se encuentra en la detección y evaluación de defectos del material ensayado, esto último basado en la reflexión de los ultrasonidos en una discontinuidad.

Desde el punto de vista de la aplicación de los ultrasonidos al ensayo de materiales, los parámetros más importantes son los siguientes (Ref. 1):

Frecuencia, f ; Hertz (Hz): Es el número de oscilaciones por segundo de una partícula dada:

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ (c/s)}$$

Longitud de onda, λ (m): Es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento.

Velocidad acústica, C (m/s): Es la velocidad de propagación de la onda para una condición dada. Esta velocidad es una característica del material y, en general, es constante para un material dado, para cualquier frecuencia y cualquier longitud de onda.

$$C = f \cdot \lambda \quad (1)$$

Amplitud de la oscilación, A (m): Es el desplazamiento máximo de una partícula de su posición cero.

Velocidad instantánea de vibración, v (m/s): Es la propia de la partícula en su movimiento oscilatorio. Cuando se refiere a su amplitud o valor máximo se denomina velocidad máxima de vibración, V .

$$V = \omega \cdot A \quad (2)$$

expresión en la que ω es la frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$).

Impedancia acústica, Z (Kg/m²s): Es la resistencia que se opone a la vibración de la onda. La impedancia se opone a la vibración de

los elementos de masa, pero no a la propagación de la onda. La teoría de la propagación de las ondas acústicas proporciona una fórmula simple para determinar la impedancia acústica:

$$Z = \rho \cdot C \quad (3)$$

que indica que la impedancia acústica es una constante del material. ρ es la densidad del material.

Presión acústica, P (N/m^2): En los puntos de gran densidad de partículas la presión es mayor que la presión normal, mientras que en las zonas dilatadas es menor. Esta presión alterna es la presión acústica y tiene lugar no sólo en los gases, sino también en los sólidos y en los líquidos.

$$P = Z \cdot V = Z \omega A = \rho C \omega A \quad (4)$$

Energía acústica específica, E_e ($Watt.s/m^3$): La propagación de una onda se caracteriza por un transporte de energía y no de masa. La energía presente en la unidad de volumen del medio (que avanza con la velocidad acús-

tica) se denomina energía específica de la onda.

$$E_e = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho C^2} = \frac{1}{2} \frac{P^2}{ZC} \quad (5)$$

Intensidad acústica, I (Watt/m²): Es la cantidad de energía que pasa por unidad de área en la unidad de tiempo.

$$I = \frac{1}{2} \rho C v^2 = \frac{1}{2} Z v^2 = \frac{1}{2} Z \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \frac{P^2}{Z} \quad (6)$$

1.1.2 Onda ultrasónica.- Velocidad de propagación y comportamiento en superficies límites.-

Las ondas sónicas y ultrasónicas se pueden propagar en todo cuerpo o materia con propiedades elásticas ya que todas sus partículas se encuentran equilibradas por fuerzas elásticas. Estas partículas se moverán al actuar una fuerza exterior que rompa el equilibrio en que se encuentran. (Ref. 2).

Al aplicar una fuerza exterior, las partículas superficiales comunicarán la energía recibida a las partículas vecinas y éstas a su

vez a las siguientes, produciéndose una propagación de la energía exterior a través de todas las partículas del medio. Ahora, en los cuerpos que poseen una estructura cristalina (por ejemplo metales en estado sólido) las partículas que forman la red pueden ser desplazadas de sus posiciones de equilibrio, describiendo oscilaciones con trayectorias diversas en función de la energía mecánica aplicada, originando distintos tipos de ondas ultrasónicas entre las que se distinguen dos tipos principales:

ONDAS LONGITUDINALES:

Se producen cuando la dirección de oscilación de las partículas es paralela a la dirección de propagación de la onda, la Fig. 1a. ilustra esquemáticamente este fenómeno. La longitud de onda del haz ultrasónico será la distancia entre dos puntos medios de dos zonas consecutivas de igual concentración de partículas. Son también denominadas "ondas de compresión" u "ondas de densidad".

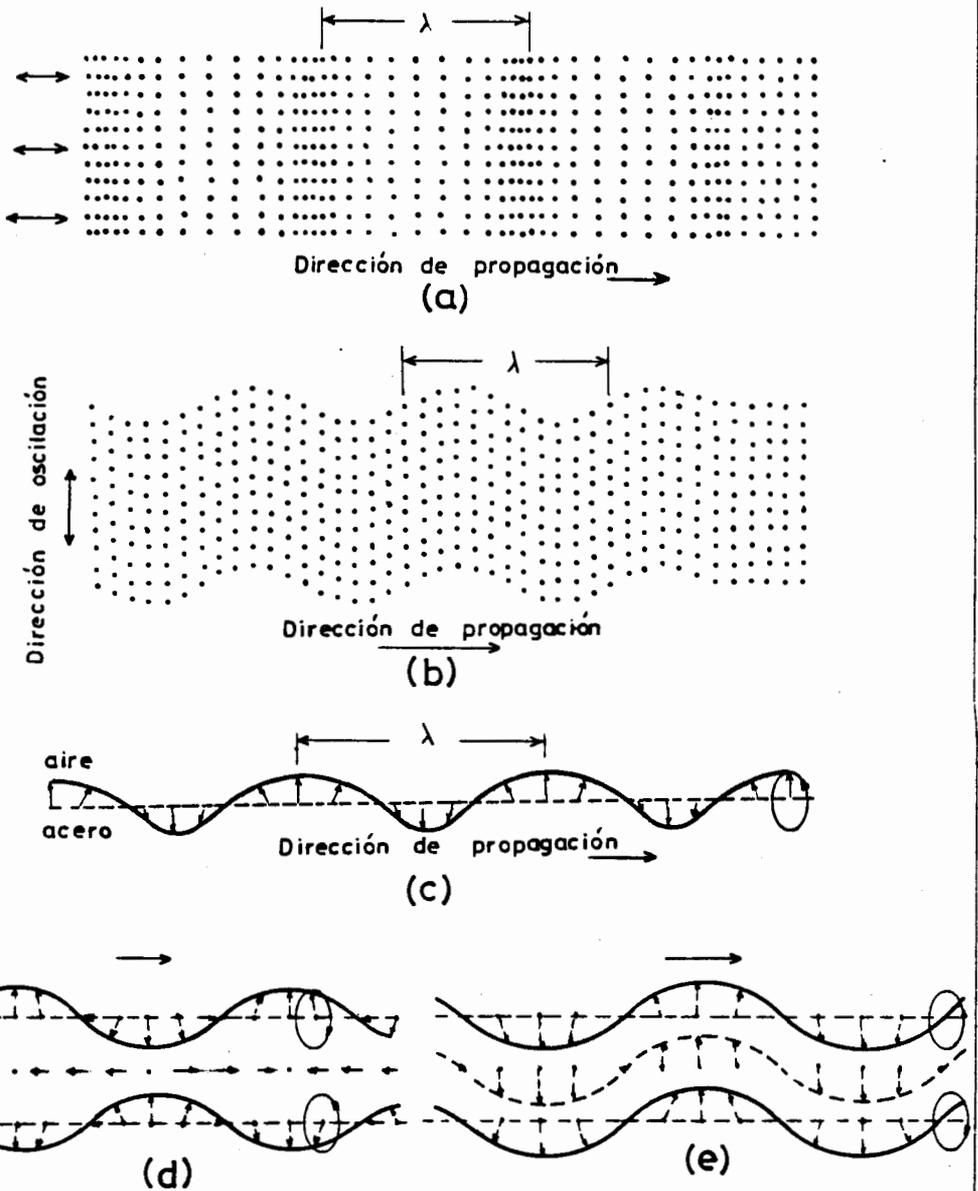


Fig.1 TIPOS DE ONDA ULTRASONICA. (Ref. 1)

- a) LONGITUDINALES
- b) TRANSVERSALES
- c) SUPERFICIALES O DE RAYLEIGH
- d) LAMB (SIMETRICA)
- e) LAMB (ASIMETRICA)

ONDAS TRANSVERSALES:

Se producen cuando la dirección de oscilación de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda ultrasónica como se representa en la Fig. 1b. A éstas también se las denomina "ondas de corte". La longitud de onda está dada por la distancia entre dos puntos consecutivos que han alcanzado su máximo alejamiento de la posición de equilibrio en un mismo sentido.

Existen otros tipos de ondas pero que a diferencia de las anteriores se propagan solamente en medios limitados, estas son las ondas superficiales o de Rayleigh y las ondas de Lamb o de chapa. Las ondas superficiales, que pueden ser consideradas como un tipo especial de ondas transversales, se propagan solamente en una delgada capa de partículas en la superficie libre de un sólido como se muestra en la Fig. 1c. Las ondas de Lamb se producen en láminas o hilos delgados cuando interviene en la propagación del haz ultrasónico la totalidad del material; la lámina o el hilo vibran en su conjunto. Estas ondas de chapa pueden ser de dos tipos: simétrica o de dilatación, Fig. 1d,

y asimétrica o de flexión, Fig. 1e.

La VELOCIDAD DE PROPAGACION de los diversos tipos de onda depende en cada caso de las características elásticas del material. Los valores de la velocidad acústica para los dos tipos principales de ondas pueden ser calculados a partir de las siguientes expresiones:

(Ref. 1):

Ondas longitudinales

$$C_L = \frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (7)$$

Ondas transversales

$$C_T = \frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)} = \frac{G}{\rho} \quad (8)$$

Donde:

C_L = velocidad de la onda longitudinal
(m/s).

C_T = velocidad de la onda transversal
(m/s).

E = módulo elástico de Young (N/m^2)

μ = relación o coeficiente de Poisson

ρ = densidad (Kg/m^3)

G = módulo de rigidez transversal (N/m^2)

La relación entre las velocidades de ondas longitudinales y transversales está dada por:

$$\frac{C_T}{C_L} = \frac{1 - 2\mu}{2(1-\mu)} \quad (9)$$

Esta relación depende únicamente de la relación de Poisson, μ , para el material considerado. Si para el acero μ vale 0.28 y para el aluminio μ vale 0.34, entonces la relación de velocidades para ambos materiales será:

$$\frac{C_T}{C_L} = 0.53 \text{ en acero y } \frac{C_T}{C_L} = 0.49 \text{ en aluminio}$$

En la Tabla I se presentan los valores de la velocidad acústica, densidad e impedancia acústica para diversos materiales.

En la propagación de la onda acústica se considera SUPERFICIE LIMITE aquella que sepa-

TABLA I

VELOCIDAD ACUSTICA, DENSIDAD E IMPEDANCIA ACUSTICA PARA DIVERSOS MATERIALES (REF. 1).

MATERIAL	VELOCIDAD 10^3 (m/s)		DENSIDAD 10^3 (Kg/m ³)	IMPEDANCIA 10^6 (kg/m ² .s)	
	C_L	C_T		$\rho \cdot C_L$	$\rho \cdot C_T$
Acero (no aleado)	5.92	3.25	7.7	46.2	25
Fundición gris	4.60	2.65	7.2	33.1	19
Aluminio	6.30	3.08	2.7	17	8.5
Niquel	5.48	2.99	8.8	50	26
Cobre	4.70	2.26	8.9	42	20
Bronce	4.45	2.12	8.2	36.5	17.4
Latón	4.40	2.05	8.1	35.6	16.6
Zinc	4.17	2.48	7.1	30	17
Plexiglass	2.74	1.43	1.18	3.2	1.7
Vidrio Crown	5.66	3.42	2.5	14	8.5
Agua a 20°C	1.48	-	1.0	1.5	-
Aceite mineral	1.25	-	9.28	11.6	-
Aire	0.33	-	0.001	0.0004	-

ra dos medios con propiedades elásticas diferentes. Para el estudio del comportamiento de las ondas ultrasónicas en superficies límites conviene distinguir dos casos: que la incidencia sea perpendicular o normal y que la incidencia sea oblicua o angular (Ref. 1).

INCIDENCIA NORMAL:

Cuando una onda ultrasónica que se propaga en un medio alcanza una superficie límite o interfase, con un ángulo de incidencia de 90° con respecto a dicha superficie, parte de la energía de la onda se refleja y vuelve al primer medio en la misma dirección que la incidente y otra parte se propagará al segundo medio manteniendo su dirección y sentido. La Fig. 2a, representa lo indicado anteriormente.

Desde el punto de vista de intensidad acústica, los coeficientes de reflexión R y transmisión T se calculan por las ecuaciones:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (10)$$

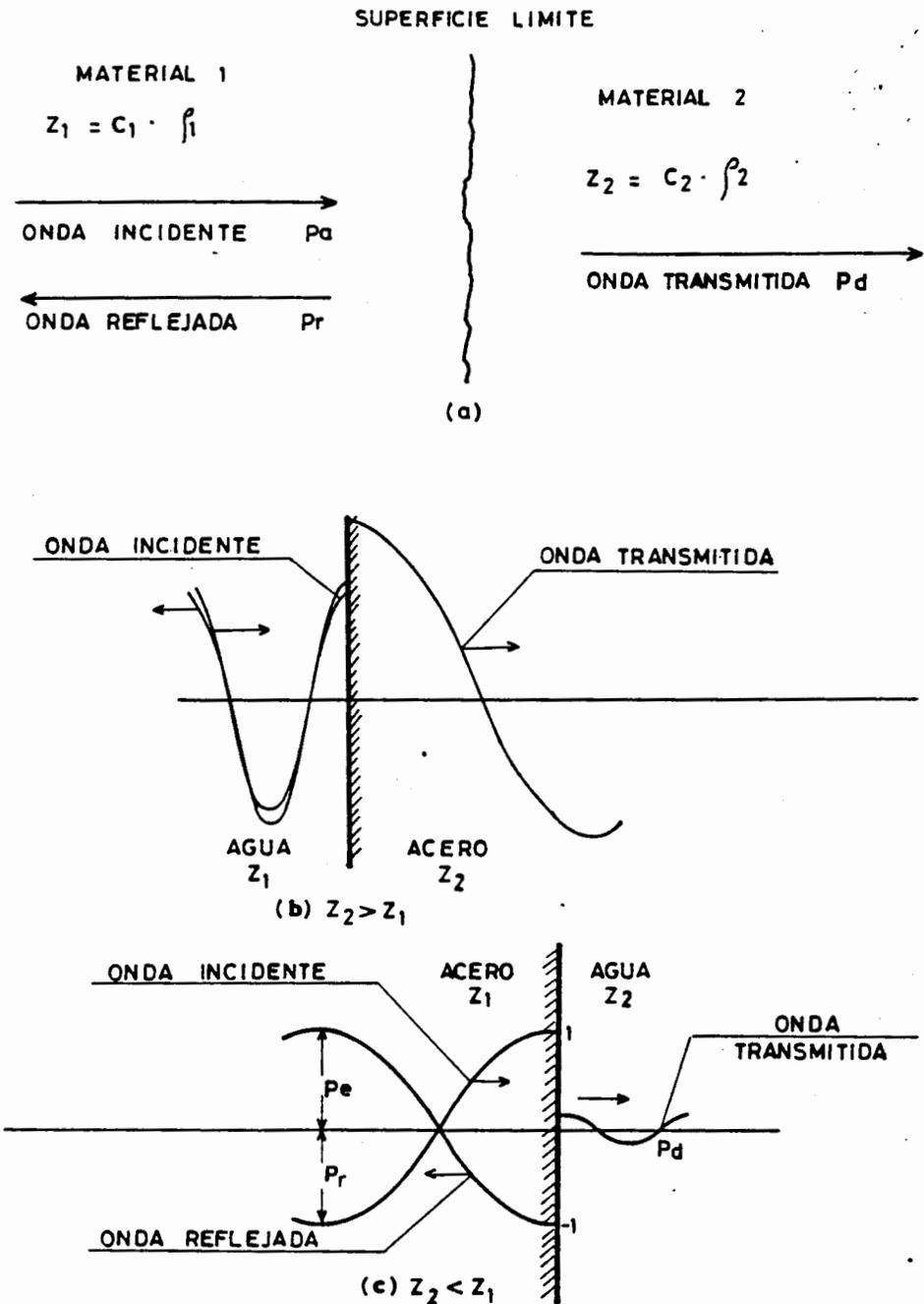


Fig. 2 COMPORTAMIENTO DE LA ONDA ULTRASONICA EN UNA SUPERFICIE LIMITE. INCIDENCIA NORMAL (Ref. 3)

a) REPRESENTACION ESQUEMATICA

b) PRESION ACUSTICA DE LA ONDA REFLEJADA Y TRANSMITIDA CUANDO $Z_2 > Z_1$

c) PRESION ACUSTICA DE LA ONDA REFLEJADA Y TRANSMITIDA CUANDO $Z_2 < Z_1$

$$T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (11)$$

en donde Z_1 y Z_2 son las impedancias acústicas correspondientes al primer medio y al segundo medio respectivamente.

Desde el punto de vista de la presión acústica, los coeficientes de reflexión R' y transmisión T' , se calculan por las ecuaciones siguientes:

$$R' = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (12)$$

$$T' = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (13)$$

de lo cual se deduce, en primer lugar, que la presión acústica reflejada será de la misma amplitud, independiente del lado de la superficie límite sobre el cual incide la onda.

Ahora bien, si $Z_2 > Z_1$, R' será positivo, lo cual quiere decir que la onda incidente y la reflejada están en la misma fase, mientras que

si $Z_2 < Z_1$, R' será negativo, lo que implica que la onda incidente está en contrafase con la onda reflejada. Con respecto al coeficiente de transmisión T' , la presión acústica si bien está en fase con la onda incidente, no es independiente de la secuencia de los dos materiales, por lo que si $Z_2 > Z_1$ entonces $T' > 1$ lo que quiere decir que su amplitud será mayor que la de la onda incidente, ocurriendo lo contrario cuando $T < 1$ si $Z_2 < Z_1$. Las Figs. 2b y 2c ilustran los casos cuando $Z_2 > Z_1$ y $Z_2 < Z_1$.

INCIDENCIA OBLICUA O ANGULAR:

Cuando una onda acústica incide bajo un determinado ángulo respecto a la normal, en una superficie que limita a dos medios 1 y 2, parte del haz es reflejado y parte es transmitido al segundo medio, esto produce un fenómeno de refracción que consiste en que el haz transmitido experimenta un cambio en su dirección de propagación respecto a la dirección de incidencia. En la Fig. 3a se indica el fenómeno descrito anteriormente mediante la representación de una onda longitudinal incidente que es reflejada y refractada en la interfase.

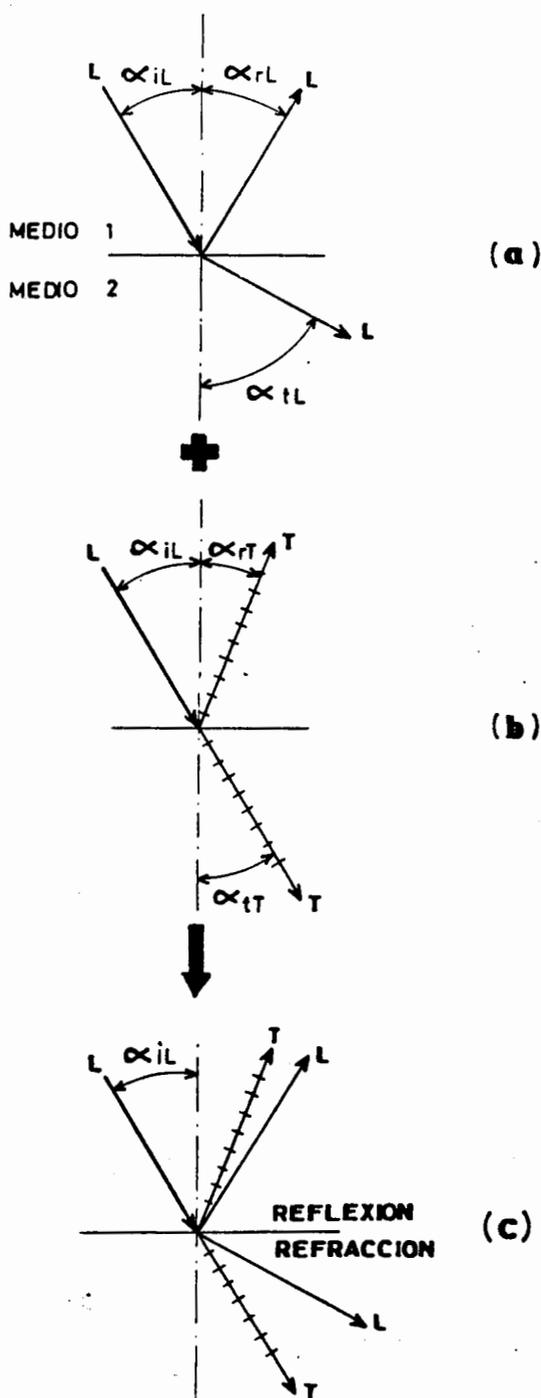


Fig. 3 COMPORTAMIENTO DE LA ONDA ULTRASONICA EN UNA SUPERFICIE LIMITE. INCIDENCIA ANGULAR.

- a) REFLEXION y REFRACCION DE UNA ONDA LONGITUDINAL (ondas no transformadas)
 b) CAMBIO DE MODO DE UNA ONDA LONGITUDINAL (ondas transformadas)
 c) COMBINACION DE (a) y (b) SEGUN LA LEY GENERAL DE LA REFLEXION Y REFRACCION DE UNA ONDA CON INCIDENCIA ANGULAR

Si se conocen las velocidades de propagación del sonido C_1 y C_2 en los medios 1 y 2 respectivamente, se pueden expresar los ángulos de incidencia α_{iL} , de reflexión α_{rL} y de refracción α_{tL} , en función de aquellas mediante la ley de Snell (Ref. 4):

$$\frac{\text{sen } \alpha_{iL}}{C_1} = \frac{\text{sen } \alpha_{rL}}{C_1} = \frac{\text{sen } \alpha_{tL}}{C_2} \quad (14)$$

expresión de la que se deduce que $\alpha_{iL} = \alpha_{rL}$.

Pero en contraste con la óptica, además ocurre un fenómeno denominado "cambio de modo" y que consiste en que un tipo de onda puede convertirse en otra tanto al reflejarse como al refractarse. La Fig. 3b ilustra el cambio de modo que sufre la onda longitudinal.

En la Fig. 3c se muestra la adición de los fenómenos anteriormente descritos, situación que ocurre al incidir una onda oblicuamente sobre la superficie límite entre dos medios. La relación entre los ángulos incidente, reflejados y refractados expresada por la ley general de reflexión y refracción será (Ref. 4):

$$\frac{\text{sen } \alpha_{iL}}{C_{L1}} = \frac{\text{sen } \alpha_{rL}}{C_{L1}} = \frac{\text{sen } \alpha_{rT}}{C_{T1}} = \frac{\text{sen } \alpha_{tL}}{C_{L2}} = \frac{\text{sen } \alpha_{tT}}{C_{T2}} \quad (15)$$

donde C_{L1} , C_{T1} , C_{L2} , C_{T2} , son las velocidades de propagación de las ondas longitudinal y transversal en los medios 1 y 2 respectivamente.

En el ensayo de soldaduras se trata de que en el medio a examinar se propague solamente un tipo de onda. Esto se logra variando el ángulo de la onda incidente hasta un punto denominado como "Primer Angulo Crítico", que es el valor del ángulo de incidencia para el cual el ángulo de refracción de las ondas longitudinales es igual a 90° . Angulos de incidencia iguales o mayores al primer ángulo crítico producen en el medio 2 la refracción únicamente de ondas transversales. Si continúa aumentando el ángulo del haz de incidencia hasta un punto denominado "Segundo Angulo Crítico", la onda transversal refractada es llevada a la superficie, esto es su ángulo de refracción se hace igual a 90° y se estaría produciendo una onda superficial en el segundo medio. Para la interfase plexiglas-acero el

primer ángulo crítico vale 27.6° y el segundo ángulo crítico 57.8° . En plexiglas-aluminio los valores son 25.6° y 61° respectivamente.

1.1.3 Formación y estructura del campo ultrasónico.-

En el ensayo por ultrasonidos la generación de energía ultrasónica se basa generalmente en el efecto piezoeléctrico que tienen ciertos materiales. Un material piezoeléctrico tiene la propiedad de deformarse al recibir una presión mecánica externa, produciendo un voltaje eléctrico en sus caras. Este fenómeno es reversible ya que al aplicar un potencial eléctrico a sus caras, este material cambia de tamaño produciendo una onda de presión con la consiguiente transformación de energía eléctrica en energía mecánica. Desde el punto de vista de su aplicación a los ensayos no destructivos, los materiales piezoeléctricos más frecuentemente utilizados son los cristales de cuarzo, sulfato de litio, titanato de bario y metaniobato de plomo (Ref. 1, 2, 3).

En la formación del haz ultrasónico el cristal piezoeléctrico puede ser considerado como constituido por un conjunto de numerosos cris

tales elementales que excitados simultáneamente brindan cada uno su propio aporte. La intensidad de la presión del haz ultrasónico en un punto dado es la resultante en amplitud y fase de las contribuciones de los múltiples cristales elementales (Ref. 2).

Para analizar la estructura del campo ultrasónico, considérese la Fig. 4a que representa un oscilador en forma de disco cuya superficie vibra con la misma amplitud y fase. Debido a la superposición del fenómeno de difracción y del efecto de bordes se produce en la onda plana, en su proximidad al oscilador, un campo con máximos y mínimos de presión acústica. A esta zona de interferencia se la denomina campo próximo (Ref. 1).

La relación entre el diámetro del oscilador D y la longitud de onda λ , determina la extensión del campo próximo y el número de máximos y mínimos de presión acústica. En la dirección de propagación de la onda existe un último máximo localizado en el eje que es el máximo principal, que determina el fin del campo próximo de longitud N , como lo muestra la Fig. 4b. La siguiente expresión determina la longi

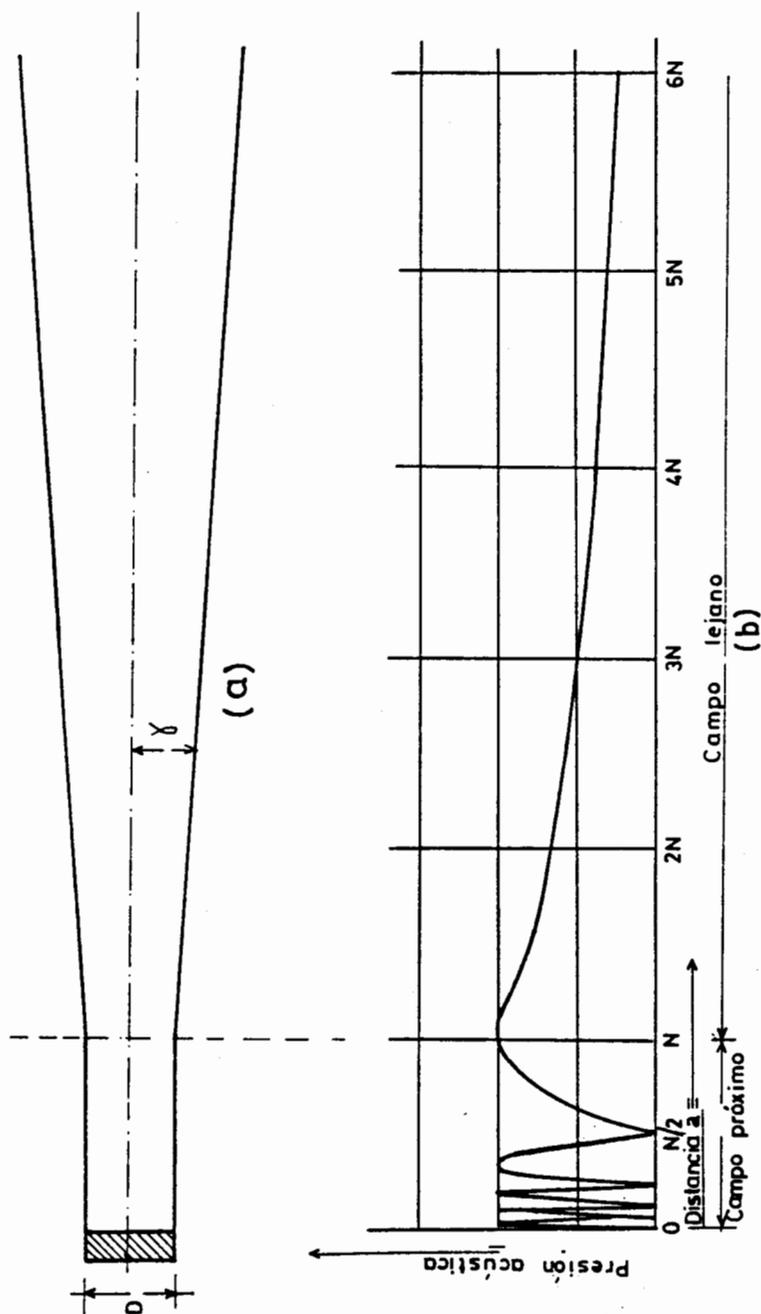


Fig. 4 **CAMPO ULTRASONICO.** (Ref. 1, 6)

- a) REPRESENTACION SIMPLIFICADA DEL CAMPO ULTRASONICO.
 b) DISTRIBUCION DE LA PRESION ACUSTICA A LO LARGO DEL EJE DEL HAZ ULTRASONICO.

tud N del campo próximo también llamado campo cercano (Ref. 1):

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (16)$$

En la práctica para longitudes de onda muy cortas comparadas con el diámetro del oscilador, se puede aproximar (Ref.1):

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (17)$$

Al campo próximo le sigue el campo lejano que en contraste con el primero, es un campo continuo libre de interferencias, en donde la presión sonora decrece pero en forma progresiva. Mientras al campo próximo se lo puede considerar como un cilindro de altura N (Fig. 4a) y diámetro igual al del oscilador D , el campo lejano tiene la forma de un tronco de cono formado por rayos de una determinada presión con respecto al rayo principal del oscilador. El vértice de cono se halla en el centro del oscilador y la presión acústica decrece desde el rayo principal al rayo marginal donde la presión del sonido no queda reducida a cero, pues aún fuera de este límite podrá medirse una presión sonora. (Ref. 1, 4, 5)

La divergencia del haz se describe por el ángulo de divergencia γ , formado por el rayo marginal y el rayo principal y viene dada por la expresión (Ref. 3):

$$\text{sen } \gamma = K \frac{\lambda}{D} \quad (18)$$

donde K es un factor determinado por la diferencia de presiones entre el rayo marginal y el rayo principal del haz ultrasónico. Comúnmente se toman rayos marginales con 10% ó 50% de presión del rayo principal por lo que la divergencia del haz para estos valores será (Ref. 5):

$$\text{sen } \gamma_{(10\%)} = 1.08 \frac{\lambda}{D} \quad (19)$$

$$\text{sen } \gamma_{(50\%)} = 0.56 \frac{\lambda}{D} \quad (20)$$

1.1.4 Atenuación del haz ultrasónico.-

En el campo lejano, al diverger el haz, la presión ultrasónica disminuye en forma inversa al cuadrado de la distancia medida desde el punto de entrada del haz ultrasónico en el material ensayado. Este caso se podría consi

derar como una atenuación producto de la divergencia del haz o propagación cónica del mismo. La atenuación es el resultado de un debilitamiento del haz ultrasónico debido además de la expansión cónica del haz, a la naturaleza, condición y estado del material a ensayar. (Ref. 2) Durante la propagación del haz la energía inicial es gradualmente absorbida por la resistencia mecánica del material que produce un efecto de frenado de la oscilación de las partículas, debido a una conversión directa de la energía acústica en calor. La presión acústica de una onda plana que disminuye por efecto de la atenuación, puede ser calculada con la siguiente relación exponencial (Ref. 3):

$$P_x = P_0 e^{-kx} \quad (21)$$

en donde:

P_0 = presión acústica inicial

P_x = presión acústica al cabo de una distancia x .

k = coeficiente de absorción

El coeficiente de absorción es directamente

proporcional al cuadrado de la frecuencia, inversamente proporcional a la densidad del medio y al cubo de la velocidad de propagación (Ref. 2). Para contrarrestar la absorción se puede hacer uso de frecuencias más bajas, pero traería como consecuencia la disminución de la sensibilidad de detección. Así pues, se prefiere incrementar la tensión de emisión y la ganancia de ensayo para tratar de evitar este efecto.

Otro de los fenómenos que influyen en la atenuación de las ondas ultrasónicas es el efecto de la dispersión. Debido a que los materiales no son estrictamente homogéneos, algunos de ellos presentan una estructura cristalina gruesa, segregación o presencia de fases separadas (fundición gris, latones y otras aleaciones), por lo que se presenta el fenómeno de la dispersión del haz ultrasónico que produce una pérdida notable de energía ultrasónica, ya que gran parte de la misma es reflejada por los cristales o interfases del material en las más diversas direcciones que corresponden a las distintas orientaciones de los infinitos planos de reflexión que se pre-

sentan en el interior del material. Este fenómeno puede considerarse análogo a la dispersión del haz luminoso en la niebla. (Ref. 1,2). La dispersión no sólo reduce la amplitud del eco de un defecto y la del eco de fondo sino que, además, produce numerosos ecos parásitos con diferentes recorridos (hierba o cesped) en los que los verdaderos ecos pueden quedar enmascarados. El único medio de contrarrestar la dispersión es utilizando frecuencias bajas, que como se sabe limita la sensibilidad de detección de defectos pequeños.

Teniendo en cuenta que la atenuación es función de la naturaleza, condición y estado del material, la medida de la atenuación puede aportar datos suficientes para permitir la caracterización de algunos materiales, como por ejemplo las fundiciones. Pero desde el punto de aplicación de los ultrasonidos al ensayo de las uniones soldadas, este fenómeno puede ser considerado como un efecto perturbador.

1.2 EL SISTEMA DE ULTRASONIDOS.-

Un sistema de ensayo ultrasónico está compuesto por

un número de componentes cuyo funcionamiento en conjunto, de acuerdo a condiciones establecidas, permite obtener información acerca de los diferentes estudios que se pueden realizar utilizando los ultrasonidos. Estos componentes son:

- Transductor, que emite y recibe las ondas ultrasónicas.
- Equipo de ultrasonidos, que genera, recibe y representa las señales eléctricas correspondientes a las ondas ultrasónicas del ensayo.
- Elementos tales como: cables de interconexión, medio de acoplamiento, etc.

Ante la diversidad de aplicaciones de los ultrasonidos en el campo de los ensayos no destructivos, es difícil encontrar un sistema que esté diseñado para satisfacer las exigencias propias de cada una de ellas. Cada caso que se presente requerirá un tratamiento adecuado y en consecuencia una utilización adecuada de una serie de características básicas de diseño.

Para el caso de la aplicación de los ultrasonidos en el examen de uniones soldadas por fusión, la ins

pección se la realiza utilizando sistemas que funcionan por el método de impulso-eco en que la energía de excitación ultrasónica es aplicada al cristal del transductor en forma de pulsos cortos, repetidos con una frecuencia que permite al equipo detectar entre pulso y pulso la energía ultrasónica reflejada (eco) en cualquier interfase existente en el interior del material o en las superficies límites del mismo.

1.2.1 Transductores.-

Para realizar el ensayo de materiales metálicos por el método ultrasónico, el efecto piezoeléctrico es utilizado para la generación y recepción de este tipo de ondas de alta frecuencia.

Los transductores son considerados como un constituyente básico del sistema de ultrasonidos, ya que además de ser los portadores del material piezoeléctrico, también influyen en las características y cualidades del haz de ultrasonidos. Basándose en el comportamiento de la onda longitudinal al incidir en una superficie límite, los transductores se clasifican en dos tipos:

- De incidencia normal
- De incidencia angular

TRANSDUCTORES DE INCIDENCIA NORMAL:

La mayor parte de estos transductores llevan incorporados osciladores diseñados para emitir ondas longitudinales. Según el número de cristales u osciladores que lleven incorporados, se pueden considerar los siguientes tipos (Ref. 1):

- Transductores de cristal único, emisor y receptor, tipo E + R (Fig. 5a).
- Transductores de doble cristal, uno emisor y otro receptor, tipo E - R (Fig. 5b).
- Transductores de cristal múltiples, limitados para aplicaciones especiales.

a) Transductor de cristal único. Tipo E + R:

La Fig. 5a muestra el esquema de uno de estos transductores. El amortiguador (c) del cristal es un elemento indispensable en los sistemas que funcionan por el método de impulso-eco. Sus finalidades concretas son: re

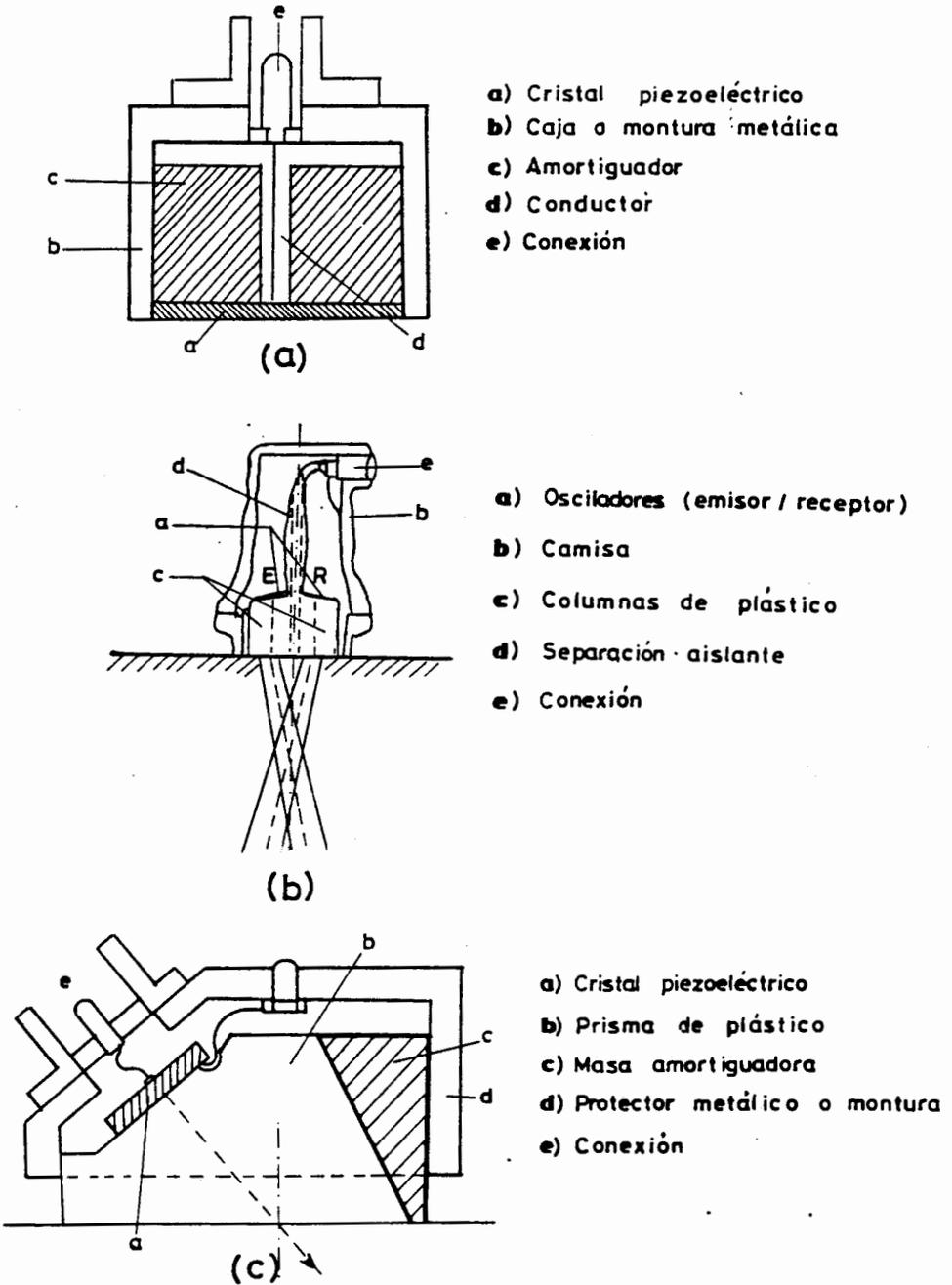


Fig. 5 TIPOS DE TRANSDUCTOR UTILIZADOS EN LA INSPECCION ULTRASONICA. (Ref. 1)

- a) NORMAL - CRISTAL UNICO
b) NORMAL - DOBLE CRISTAL
c) ANGULAR

ducir el tiempo de oscilación del cristal, absorber las ondas que pudieran interferir el oscilograma y soportar mecánicamente el cristal piezoeléctrico. Posiblemente de estas tres finalidades sea la primera la más importante, ya que la duración del impulso acústico define la llamada "zona muerta" del transductor, que es la distancia de la base de tiempo ocupada por el eco de emisión en el tubo de rayos catódicos (TRC). En esta zona muerta no será posible detectar la presencia de heterogeneidades, puesto que las indicaciones de los posibles ecos quedarían en mascaradas (Ref. 1).

Los transductores de contacto suelen utilizar una "suela" protectora para evitar el desgaste del cristal. Los transductores sin suela protectora son usados cuando se trate de examinar piezas con superficies razonablemente planas y eléctricamente conductoras. Para el ensayo de muestras no metálicas (no conductoras) o en superficies rugosas u oxidadas, es preciso utilizar una cubierta de desgaste, generalmente láminas muy finas de cuarzo, zafiro, caucho o plástico blando, cuya influencia es despreciable sobre la sensibilidad del

transductor (Ref. 2).

El transductor ideal sería aquel que poseyendo una buena sensibilidad para distancias grandes, también tenga una buena resolución. Esto no se consigue en la práctica, por lo que normalmente se conjugan ambos parámetros buscando una solución de compromiso de acuerdo al tipo de ensayo a realizar.

b) Transductor de doble cristal. Tipo E-R:

Los transductores de un solo cristal al presentar el problema de la "zona muerta", impiden o dificultan la detección de heterogeneidades próximas a la superficie de exploración. El transductor de doble cristal tipo E-R, cuyo esquema se presenta en la Fig. 5b, resuelve este problema. Estos constan de dos cristales perfectamente aislados eléctrica y acústicamente por una lámina de corcho o cloruro de polivinilo, donde un cristal actúa solo como emisor y el otro como receptor. Ambos van montados con una cierta inclinación sobre una columna generalmente de plástico, con esto se consigue una incidencia algo inclinada y así un cierto efecto focalizador

(Fig. 5b), de modo que concentra el haz ultrasónico para conseguir la máxima sensibilidad de detección en las proximidades de la superficie. La columna de plástico debe tener bajo coeficiente de atenuación y una impedancia acústica que produzca una buena transmisión en la muestra a través del medio de acoplamiento correspondiente (Ref. 1).

El transductor tipo E-R, con equipos adecuados, pueden medir espesores y detectar heterogeneidades o defectos a partir de una profundidad equivalente a una longitud de onda (λ).

TRANSDUCTORES ANGULARES:

Una de las condiciones principales para detectar defectos con ultrasonidos, es que estos sean alcanzados por el haz principal en forma normal, es decir, con un ángulo de incidencia de alrededor 0°. Si los defectos se encuentran inclinados respecto a la superficie de ensayo, como por ejemplo las fisuras, será necesario utilizar transductores angulares para su detección. Un transductor angular (Fig. 5c) consta en esencia de un oscilador de ondas

longitudinales, generalmente de sección rectangular, montado sobre un prisma de plástico, a fin de obtener sobre la superficie de ensayo una incidencia oblicua. En este caso según las leyes de la refracción, se originan dos ondas reflejadas en el prisma y dos ondas refractadas en el material de ensayo. Para evitar que en el objeto de ensayo se propaguen dos ondas diferentes, se construye el prisma de plástico (generalmente perspex) de tal manera, que la onda longitudinal sea totalmente reflejada, esto es, como se indicó en el punto 1.1.2, una prisma diseñado para que el ángulo de incidencia del haz ultrasónico esté comprendido entre el primer y segundo ángulo crítico. De esta forma existirán solo ondas transversales refractadas en el medio a inspeccionar. En el diseño del transductor angular, el prisma cumple la función de amortiguador del oscilador, mientras que la masa amortiguadora (c) (Fig. 5c) en la parte delantera del transductor se utiliza para absorber y dispersar las ondas reflejadas (Ref. 1, 5).

Es de destacar que los transductores de contacto comerciales están diseñados generalmen-

te para acero; luego, para el examen de otros materiales, será necesario hacer las correspondientes correcciones en función de las diferentes velocidades de propagación de las ondas transversales.

1.2.2 Equipos de ultrasonidos.-

Para la inspección ultrasónica de uniones soldadas como se indicó en el punto 1.2, el equipo o aparato que se ha de utilizar es aquel que actúa por el método de impulso-eco y en el que además las magnitudes a medir simultáneamente son la intensidad acústica y el tiempo de recorrido empleado por el haz ultrasónico. Estos equipos emiten impulsos acústicos cortos a intervalos constantes, de tal forma que se obtiene una respuesta periódica en función del tiempo de recorrido del impulso acústico desde su emisión hasta su recepción por el cristal piezoeléctrico. La duración del impulso de emisión es mucho menor al período de reposo o "intervalo de silencio" lapso en que el cristal emisor actúa como receptor (Ref. 1).

Al reflejarse la onda ultrasónica en una heterogeneidad o en una superficie del objeto examinado, el "eco" o impulso acústico producido se transforma en una señal o impulso eléctrico que se visualiza según una indicación en la pantalla TRC. De acuerdo a la forma de presentar estas indicaciones en la pantalla, existen variantes tales como (Ref. 2):

- Equipos de barrido A (A-Scanning), los que ante la presencia de un defecto en el material ensayo, presentan en la pantalla TRC una indicación de posición del defecto y amplitud de señal de defecto, cuya altura es proporcional a la presión acústica del eco. La Fig. 6a muestra la presentación de la indicación en barrido A.
- Equipo de barrido B (B-Scanning), que presentan en la pantalla TRC la indicación de profundidad del defecto y distribución de los defectos en el plano transversal del objeto inspeccionado. Este tipo de presentación (Fig. 6b) permite visualizar la posición y longitud de los defectos en cada sección transversal inspeccionada.

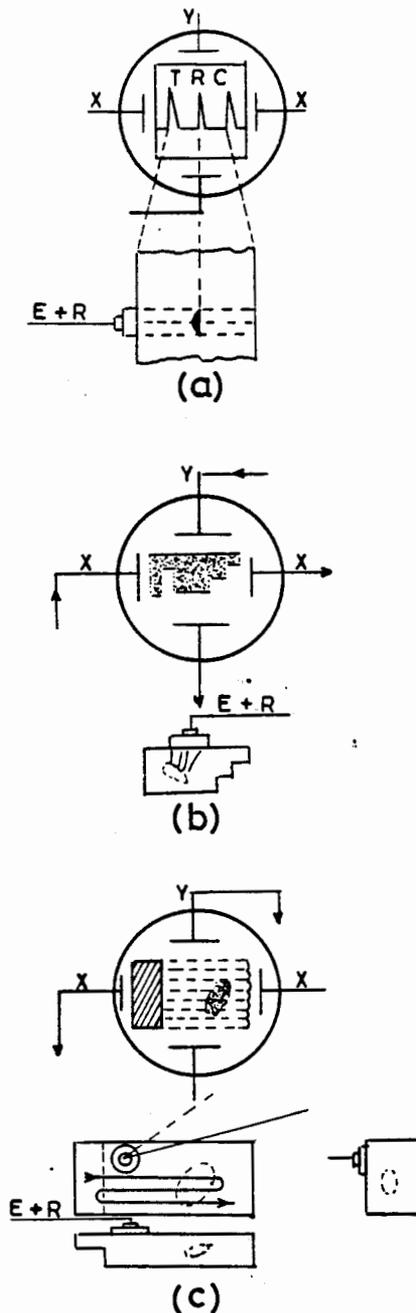


Fig. 6 TIPOS DE PRESENTACION. EN PANTALLA DE LA INDICACION DE UN DEFECTO. (Ref. 1,2)

- a). BARRIDO A
- b). BARRIDO B
- c). BARRIDO C

- Equipo de barrido C (C-Scanning), que presentan en la pantalla TRC la indicación de la forma y distribución de los defectos en el plano de la inspección, como lo muestra la Fig. 6c.

Tanto los equipos de barrido B como de barrido C, son de gran volumen por lo que se limitan a ser utilizados generalmente en sistemas automáticos de inspección de piezas en serie para el control de su proceso de fabricación. En el ensayo de materiales y uniones soldadas el equipo que se utiliza es generalmente el de impulso-eco con representación de la indicación en barrido A (Ref. 2). El circuito esquemático de este tipo se muestra en la Fig. 7.

El principio de funcionamiento del equipo con barrido A es el siguiente:

El oscilador (a) activa al generador de barrido (b) y al generador de impulsos (c). El oscilador además genera la señal de sincronización para la frecuencia de repetición de impulsos. En los equipos modernos la frecuen-

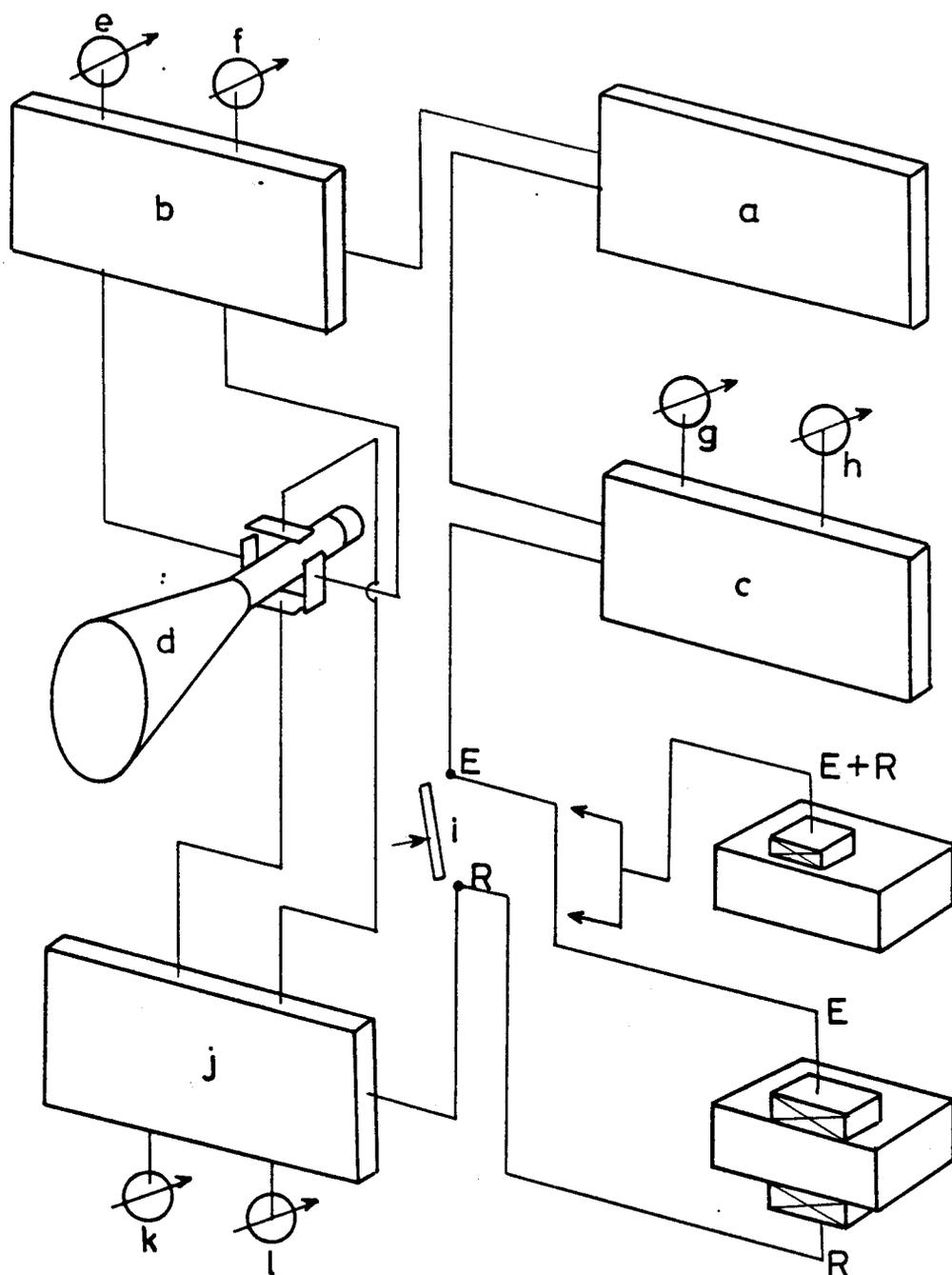


Fig. 7: CIRCUITO ESQUEMATICO DE UN EQUIPO IMPULSO-ECO CON REPRESENTACION DE LA INDICACION EN BARRIDO A. (Ref. 2).

cia de repetición de impulsos varía automáti-
camente en función del intervalo del espesor
seleccionado. El generador de barrido de la
base de tiempo, produce una tensión que se
aplica a las placas de deflexión horizontal
del TRC (d), que obliga al pincel electróni-
co a recorrer la pantalla con una velocidad
predeterminada. Esta velocidad denominada
"velocidad de barrido" puede ser variada den-
tro de una cierta gama de espesores mediante
un control denominado Rango (e), que efectúa
la regulación gruesa. Esta gama de espesores
corresponde generalmente para aceros compren-
didos entre 10mm y 10m (Ref. 1). Además del
control grueso, existe uno fino que modifica
la velocidad de barrido de acuerdo con las
variaciones de la velocidad de los ultrasoni-
dos en distintos materiales, por esta razón
a este control que es continuo, se lo denomi-
na de Material (f).

El generador de impulsos de alta frecuencia
al recibir la señal de disparo procedente del
oscilador, genera los impulsos eléctricos de
muy corta duración y de una tensión de pico
de algunos kilovoltios que se aplican al cris-
tal piezoeléctrico. En el instante en que el

cristal recibe el impulso eléctrico, una fracción muy pequeña de la energía de este impulso también es transmitida a las placas de deflexión vertical del TRC, produciéndose en la pantalla un impulso vertical llamado "señal de emisión", de forma que el punto de arranque de esta señal es el origen de tiempo en la pantalla. Al ser excitado el cristal vibra mecánicamente con su propia frecuencia, originando el haz de ondas ultrasónicas en forma de impulsos de corta duración que se transmiten a través del material ensayado a velocidad constante (Ref. 1, 2).

Al encontrar el haz ultrasónico una superficie límite, este se refleja y puede ser recibido por otro cristal que actúe como "receptor" (R), o volver al mismo cristal que la originó y ahora la detecta actuando en forma pasiva (E + R).

En el generador de impulsos existen dos controles: uno de energía (g) y otro discriminador (h), que se hallan en la parte interna del equipo. La función de ambos es variar la envolvente del impulso.

El control de energía actúa variando la tensión del impulso eléctrico que se aplica al cristal, mientras que el control discriminador varía la duración del impulso. La llave (i) del circuito esquematizado se lo podría denominar "selector de servicio", ya que se la utiliza cuando el equipo trabaja con un solo cristal o con dos. Los impulsos acústicos que llegan al cristal receptor generan impulsos eléctricos con tensiones de magnitudes extremadamente bajas como para poder ser aplicadas directamente a las placas de deflexión vertical del TRC, por lo que se hace uso de un amplificador (j) que eleva la tensión recibida a valores requeridos para el funcionamiento del TRC y para poder deflectar la base de tiempo. En el amplificador existen dos controles: el de sensibilidad (k) y el de supresión (l). El primero permite variar la altura de los ecos en la pantalla, es decir variar la sensibilidad de detección de señales. Este control tiene un ajuste grueso por etapas, y otro fino continuo para pequeñas variaciones. El control de supresión tiene por objeto eliminar indicaciones no deseables, en este caso si bien el oscilograma es más limpio, puede ocurrir que se anu

len indicaciones de ecos que pueden ser de interés.

El control de sensibilidad no modifica la relación de alturas entre los ecos sucesivos que se obtienen por múltiples reflexiones, mientras que el supresor sí lo hace por cuanto está diseñado para evitar el paso de las señales más débiles. Las variaciones de amplificación son medidas en decibeles (dB), unidad que se expresa por la relación

$$dB = 20 \log \frac{I_0}{I_1} \quad (22)$$

donde I_0 e I_1 representan la amplitud de señal antes y después de la amplificación.

Cuando en el control de sensibilidad la variación de amplificación es en más, se usa el término "ganancia" expresado en dB. Si la variación es en menos, se aplica el término "atenuación" expresado también en dB. (Ref. 1).

1.3 INSPECCION ULTRASONICA DE UNIONES SOLDADAS EN ANGULO

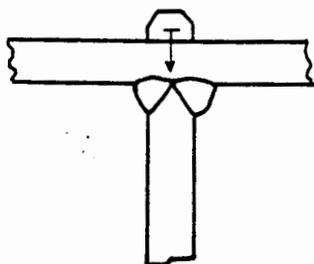
Una de las ventajas de la inspección por ultrasoni-

dos, es su versatilidad con respecto a la geometría de la unión soldada a ser examinada, seleccionando apropiadamente los transductores y métodos operacionales para ejecutar el ensayo.

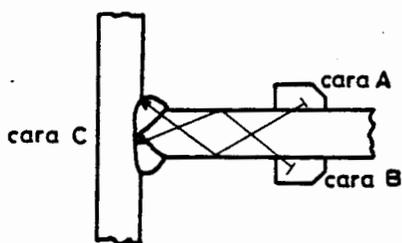
El examen de uniones soldadas en ángulo generalmente se basa en los criterios de exploración descritos para soldaduras a tope, pero con modificaciones sus tanciales debido a su geometría diferente. Además, la soldadura en ángulo proporciona una gran selección de zonas de exploración, que permiten acercarse a la soldadura desde diferentes caras como se aprecia en la Fig. 8. La inspección ultrasónica se realiza aplicando la técnica de impulso-eco o refle xi ón, utilizando transductores de ondas longitudina les y transversales cuyas frecuencias van generalmen te de 2 MHz a 5 MHz (Ref. 7), según las condiciones del material y la sensibilidad requerida. Frecuencias bajas permiten un mejor acoplamiento en superficies rugosas y disminuye la atenuación producida por estructuras metalográficas de grano grueso. Frecuencias elevadas son utilizadas para tener mayor sensibilidad de detección y mayor exactitud en la de terminación de la extensión de los defectos.

1.3.1 Información básica para realizar el ensayo.-

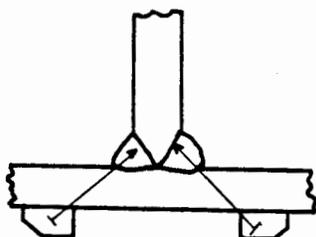
Antes de realizar la inspección de un cordón



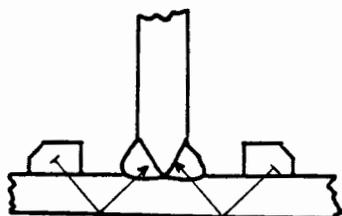
a) INSPECCION DE LA ZONA DE FUSION UTILIZANDO TRANSDUCTOR NORMAL.



b) INSPECCION DE LA SOLDADURA DESDE LAS CARAS A y B.



c) INSPECCION DE LA SOLDADURA DESDE LA CARA C.



d) POSICION ALTERNATIVA PARA INSPECCIONAR LA SOLDADURA.

Fig. 8 PROCEDIMIENTO DE INSPECCION ULTRASONICA PARA SOLDADURAS DE UNIONES SOLDADAS EN ANGULO. (Ref. 8)

de soldadura conviene tener información sobre algunos factores tales como (Ref. 3, 4):

- Clase de material a ensayar
- Espesor
- Preparación de bordes
- Procedimiento de soldadura utilizado
- Tratamiento térmico que ha sufrido la soldadura.

Esta información es útil con respecto a las siguientes consideraciones:

Según el tipo de material se elegirá la frecuencia a emplear en función del tamaño de grano sea este grueso o fino.

El espesor de la chapa es necesario saber para determinar el camino que recorrerá el haz, así como el ángulo del transductor a emplear. La Tabla II recomienda ángulos de entrada en función del espesor.

Conocer la preparación de bordes ayuda al momento de identificar los defectos. Así por ejemplo, en una unión en ángulo con preparación de bordes para soldadura de penetración

TABLA II

VALORES DEL ANGULO DEL TRANSDUCTOR EN
FUNCION DEL. ESPESOR DEL MATERIAL A
ENSAYAR. (Ref. 2).

ESPESOR	ANGULO
< 5 mm	80°
5 ÷ 15 mm	70°
15 ÷ 30 mm	60°
30 ÷ 60 mm	45°
> 60 mm	35°

total, es probable que exista en la extensión de raíz falta de penetración y falta de fusión en las paredes.

Saber el procedimiento de soldadura empleado, es de gran importancia para determinar cuales son los defectos que con mayor seguridad se pueden encontrar. Así, en cordones soldados con electrodos protegidos por CO_2 no existirán inclusiones de escoria, sin embargo, se debe tener en cuenta que en este tipo de soldadura los defectos más frecuentes son inclusiones gaseosas y falta de fusión entre otros defectos.

En ciertos casos es necesario realizar tratamientos térmicos posteriores al proceso de soldadura. Estos tratamientos pueden originar cambios en la estructura de grano del cordón, lo cual puede influir sobre la elección de la frecuencia del transductor.

1.3.2 Evaluación de defectología en las soldaduras en ángulo.-

En la soldadura en ángulo cualesquiera que sea el procedimiento que se haya empleado pa-

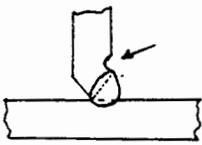
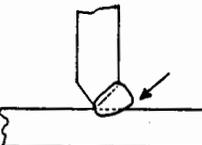
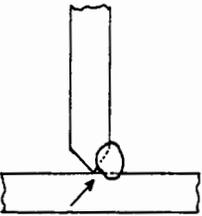
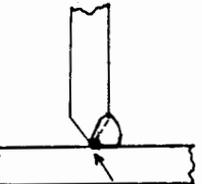
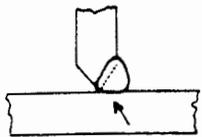
ra realizarla, se pueden producir defectos o heterogeneidades cuya posible presencia en la unión soldada aconseja que esta unión sea inspeccionada. En la Tabla III se presentan los defectos más frecuentes en estas soldaduras, así como las causas que las provocan y medidas preventivas para evitarlos. Estos defectos son posibles de detectarse mediante ultrasonidos, pero su evaluación depende de diversos factores tales como: la orientación, tamaño y profundidad a la que se encuentra el defecto en el espécimen a ensayar.

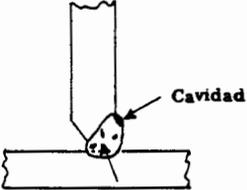
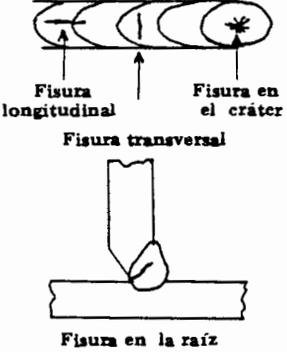
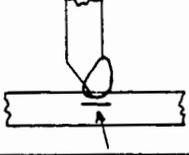
ORIENTACION:

En la técnica de impulso-eco es importante que el transductor reciba la energía ultrasónica reflejada en el defecto. Es decir, el haz reflejado debe tener la misma dirección de propagación del haz ultrasónico primario transmitido en el material. Por lo tanto, la orientación ideal de la superficie reflectante de la discontinuidad será aquella normal a la dirección de propagación del haz incidente. En caso contrario si el haz incide sobre el defecto con un ángulo distinto a la normal, la energía reflejada detectada por el

TABLA .III

DEFECTOLOGIA EN LAS SOLDADURAS EN ANGULO (REF. 9)

TIPO DE DEFECTO	CAUSAS	MEDIDAS PREVENTIVAS
<p>(1) Mordeduras</p> 	<p>(a) Corriente excesiva (b) Arco demasiado largo.</p> <p>(c) Angulo inadecuado del electrodo o manejo inadecuado del electrodo.</p>	<p>(a) Reducir la corriente. (b) Ajustar la longitud del arco para que sea aproximadamente igual al diámetro del alma del electrodo. (c) Trabajar con un ángulo correcto o bajar la velocidad.</p>
<p>(2) Sobremonta</p> 	<p>(a) Corriente demasiado baja (b) Angulo inadecuado del electrodo o manejo inadecuado del electrodo.</p>	<p>(a) Elevar la corriente hasta el valor adecuado. (b) Trabajar con un ángulo correcto o bajar la velocidad.</p>
<p>(3) Falta de penetración.</p> 	<p>(a) Diámetro del alma del electrodo demasiado grande. (b) Corriente demasiado baja. (c) Velocidad de avance demasiado alta. (d) Angulo pequeño del bisel. (e) Altura excesiva de la garganta (f) Esmerilado insuficiente.</p>	<p>(a) Seleccionar un diámetro adecuado (b) Elevar la corriente hasta el valor adecuado. (c) Reducir la velocidad para permitir una penetración adecuada en la raíz de la unión. (d) Aumentar el ángulo del bisel; utilizar electrodo de menor diámetro (e) Ajustar de acuerdo con la penetración. (f) Esmerilar hasta la remoción del defecto.</p>
<p>(4) Inclusión de escoria</p> 	<p>(a) Velocidad inadecuada de soldadura. (b) Angulo inadecuado del electrodo. (c) Angulo inadecuado del bisel. (d) Corriente insuficiente. (e) Longitud excesiva de arco. (f) Remoción incompleta de la escoria en los cordones anteriores.</p>	<p>(a) Aumentar la velocidad, de manera que impida la deposición de escoria en la región de raíz. (b) Mantener la inclinación correcta en la dirección de soldadura. (c) Corregir el ángulo del bisel; utilizar menor diámetro de electrodo. (d) Aumentar la corriente. (e) Disminuir la longitud de arco, para permitir la fusión adecuada de manera que la escoria flote. (f) Remover completamente la escoria.</p>
<p>(5) Falta de fusión</p> 	<p>(a) Corriente insuficiente (b) Manejo inadecuado del electrodo.</p>	<p>(a) Aumentar la corriente hasta el valor correcto. (b) Utilizar arcos cortos para permitir la fusión adecuada del metal base en los pases anteriores.</p>

TIPO DE DEFECTOS	CAUSAS	MEDIDAS PREVENTIVAS
<p>(6) Porosidades y cavidades</p> 	<ul style="list-style-type: none"> (a) Exceso de hidrógeno u oxígeno en el arco. (b) Aceite, grasa, corrosión, tinta, etc, en la zona de suelda. (c) Absorción de humedad por parte del electrodo o la unión. (d) Corriente excesiva. (e) Manipulación inadecuada del electrodo. (f) Velocidad de enfriamiento en la zona de suelda. (g) Contenido alto de azufre en el metal base. 	<ul style="list-style-type: none"> (a) Utilizar electrodo adecuado. (b) Remover todas las impurezas antes de soldar. (c) Secar el electrodo; remover la humedad de ambos lados de la unión (d) Disminuir la corriente. (e) Disminuir la velocidad en el manejo del electrodo. (f) Pre-calentar. (g) Utilizar electrodos de bajo hidrógeno.
<p>(7) Fisuras en el metal depositado.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> (a) Uniones excesivamente rígidas. (b) Electrodo húmedo. (c) Contenido alto de elementos de aleación en el metal base. (d) Velocidad alta de enfriamiento del metal depositado. (e) Contenido excesivo de azufre en el metal-base. (f) Exceso de hidrógeno u oxígeno en el arco. (g) Presencia de arena o polvo en la zona de suelda. 	<ul style="list-style-type: none"> (a) Alterar la secuencia de soldadura. (b) Secar el electrodo. (c) Pre-calentar; utilizar electrodos de bajo hidrógeno. (d) No aumentar el tamaño de cráter; pre-calentar; aumentar la sección transversal del cordón; utilizar electrodos de bajo hidrógeno. (e) Utilizar electrodos de bajo hidrógeno. (f) Utilizar electrodos de bajo hidrógeno. (g) Limpiar la zona de suelda cuidadosamente.
<p>(8) Fisuras en el metal-base.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> (a) Exceso de hidrógeno en el arco. (b) Material-base muy susceptible a la temperatura. (c) Contenido alto de C, Mn, o Cr. 	<ul style="list-style-type: none"> (a) Utilizar electrodo de bajo hidrógeno; pre-calentar. (b) Pre-calentar y Pos-calentar. (c) Cambiar las especificaciones del material-base.

transductor se reduce notablemente o puede resultar completamente nula (Ref. 2).

La Fig. 9a presenta el caso de una superficie reflectante lisa con una orientación tal que hace imposible su detección por la técnica de impulso-eco. El haz ultrasónico se refleja con dirección distinta de la de incidencia y no vuelve al transductor emisor-receptor. En la Fig. 9b aparece un defecto con igual orientación que el anterior pero su superficie es irregular y rugosa. Estas irregularidades favorecerán la reflexión de una fracción de energía que pueden llegar al transductor emisor-receptor, permitiendo la detección del defecto. Esto se explica debido a que las irregularidades implican la presencia de zonas elementales que son normales a la dirección de propagación del haz ultrasónico. Se dice que una superficie es rugosa cuando la altura de las irregularidades de la superficie son mayores que $1/3$ de la longitud de onda (λ) del ensayo (Ref. 10).

TAMAÑO:

Se puede detectar un defecto cuando sus dimen

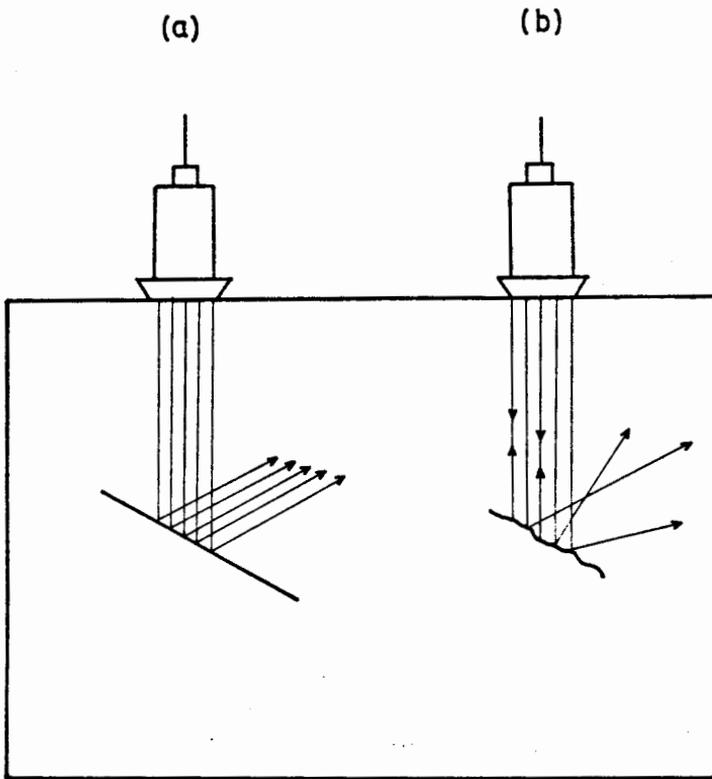


Fig. 9 INFLUENCIA DE LA ORIENTACION DEL DEFECTO PARA SU EVALUACION UTILIZANDO ULTRASONIDOS. (REF. 2)

siones son tales que permiten reflejar el haz ultrasónico que se emplea en el ensayo. Teóricamente existe la posibilidad de detectar un defecto cuando sus dimensiones transversales con relación al haz sonoro son mayores a $1/4$ de longitud de onda (λ) del haz ultrasónico empleado en el ensayo (Ref. 2).

Por lo tanto aquellas discontinuidades con dimensiones superiores a dicho límite reflejan el haz de ultrasonidos según las leyes básicas de la acústica, mientras que aquellos defectos cuyas dimensiones sean menores no son detectados por no producir reflexión.

Existe un estrecho vínculo entre la detección de defectos pequeños y la frecuencia de ensayo; mientras más elevada es la frecuencia del haz ultrasónico, menor es la longitud de onda y mayor es la sensibilidad de detección (Ref. 2). El defecto para ser detectado debe constituir un obstáculo para la propagación del haz ultrasónico de manera que lo refleje total o parcialmente.

PROFUNDIDAD:

Solo mediante la técnica de impulso-eco se

puede evaluar la profundidad a que se encuentra una discontinuidad dentro del material ensayado. El eco aparece en la pantalla luego de haberse reflejado una parte del haz en la discontinuidad. La amplitud del eco depende de la orientación, dimensión, naturaleza, posición, etc. La posición del eco en pantalla está relacionada con la distancia a la que se encuentra del transductor, es decir a su profundidad. De esta forma la profundidad es evaluada con suficiente precisión si se ha calibrado correctamente el aparato. La zona muerta del haz emitido por el transductor emisor-receptor es un limitante para determinar la profundidad de un defecto subsuperficial que se encuentra en dicha zona. De la misma forma cuando un defecto se halla a gran profundidad se hace difícil la detección por la reducción de la sensibilidad, debida a la absorción de energía ultrasónica de parte del material o por causa de la divergencia del haz emitido por el transductor.

1.3.3 Condiciones a ser establecidas antes de la inspección.-

La efectividad y confiabilidad de un ensayo

ultrasónico depende de la forma como se lo lleve a efecto y de las bondades del sistema de ultrasonidos. Las características básicas que deben tener tanto el equipo de ultrasonidos como los transductores son las siguientes (Ref. 1, 7):

El equipo a utilizar debe:

- Trabajar de acuerdo al sistema de impulso-eco.
- Ser apropiado para representar en pantalla impulsos acústicos cuyas frecuencias están comprendidas entre 1 y 5 MHz.
- Tener una presentación en la pantalla TRC con indicaciones de posición del defecto y amplitud de la señal del defecto.
- Disponer de un amplificador con control de ganancia que es calibrado en pasos de 1 o 2 decibeles en una banda de 60 dB como mínimo.
- Ser apropiado tanto para la técnica de un solo transductor como para dos transductores.

- Tener una base de tiempo que es lineal dentro del $\pm 1\%$ sobre su rango total.
- Representar las señales en el TRC con un trazo claro y nítido.
- Tener graduaciones a lo largo de la escala horizontal.
- Ser alimentado por conexión directa a la red o por medio de baterías. En el primer caso debe conseguirse una estabilización de $\pm 2V$ a lo largo de la gama de tensiones de entrada. En el segundo caso, la estabilización interna debe asegurar que la variación no producirá oscilaciones superiores a ± 1 dB durante la vida útil de la batería.

En cuanto a los transductores:

- Su frecuencia estará comprendida en el campo de frecuencias del equipo.
- Serán compatibles con el equipo que se utilice para la inspección, de tal manera que cualquier ruido interno no interfiera con

la interpretación de la indicación de pantalla obtenida a la sensibilidad requerida.

- Tendrán marcadas ciertas indicaciones tales como: ángulo del transductor (ángulo de refracción en el acero), frecuencia, clase de cristal, dimensiones del cristal y divisiones que marcan la salida del haz desde el transductor.
- Estos podrán ser: normales que emiten ondas longitudinales incidentes sobre la superficie a inspeccionar con un ángulo de 90° , y angulares que emiten ondas transversales en el material que se ensaya. El ángulo de refracción o entrada estará comprenido entre los 40° y 75° (Ref. 1).

El aire y en general los gases atenúan fuertemente la energía ultrasónica, es por esto que al realizar el ensayo utilizando la técnica por contacto es necesario que entre el transductor y el objeto a inspeccionar exista un medio acústicamente conductor que permita la transmisión de la energía acústica, a este medio se lo denomina "acoplante". Entre los acoplantes más utilizados están: agua, aceite,

grasa y glicerina acondicionada con humectante. La viscosidad del medio acoplante a ser usado puede variar con el acabado de la superficie. Por otra parte, una preparación de las superficies del metal base a ensayar también se hace necesaria ya que influye en la consecución de un buen acoplamiento acústico entre transductor y espécimen. Como puede apreciarse, tanto la preparación de las superficies como el empleo de acoplantes tiene como única finalidad el asegurar la buena transmisión de la onda ultrasónica entre el transductor y el medio a inspeccionar. La Tabla IV presenta una relación entre la rugosidad de la superficie a ensayar y el acoplante que puede ser utilizado.

Las características básicas que debe tener un acoplante son:

- Formar una película entre el transductor y la superficie, sin ejercer acción alguna que pueda afectar al estado de superficie del objeto sometido a ensayo.

- No producir ninguna perturbación sensible en la transmisión del haz ultrasónico en-

TABLA IV

RELACION ENTRE LA RUGOSIDAD DE LA SUPER-
FICIE Y LA VISCOSIDAD DEL ACOPLANTE (Ref. 7).

RUGOSIDAD DE SUPER- FICIE APROXIMADA (μ).	ACOPLANTE CON VISCO- SIDAD EQUIVALENTE.
0.1 - 2.5	SAE 10 motor oil.
1 - 5	SAE 20 motor oil.
2 - 15	Glicerina
2.5 - 20	SAE 30 motor oil.
6 - 17	SAE 40 motor oil.
> 17	Grasa.

* 1 μ = 1 MICRA = 0.001 mm

tre el transductor y el medio a ensayar.

- Ser de fácil remoción luego de haber realizado el ensayo.

Con respecto a la preparación de la superficie se puede anotar que:

- Todas las superficies del metal base donde se aplique el transductor deben estar libres de salpicaduras de soldadura, suciedad, grasa, aceite (si no es el usado como acoplante) y cascarilla.
- La superficie soldada estará terminada de tal forma que no enmascare o produzca reflexiones que puedan ser confundidas con ecos producidos por discontinuidades.
- El cordón presentará una transición suave con el material base.

EXTENSION DE LA INSPECCION:

Generalmente la extensión de la inspección estará determinada por el grado de seguridad que se tenga en cuanto a la ausencia de defectos.

tos inaceptables. Es decir, la extensión puede referirse a la longitud total de la soldadura o la necesidad de examinar solamente algunas zonas particulares. Es difícil dar condiciones específicas para la extensión de la inspección que tengan una validez general.

La extensión puede depender del tipo de soldadura, clase de servicio al que puede ser sometido el espécimen y sobre todo el costo de la inspección. Luego, es conveniente adoptar diferentes clases de inspección en tales situaciones, por lo cual las soldaduras serán inspeccionadas de acuerdo a la importancia que tengan en la estructura (Ref. 7).

SENSIBILIDAD REQUERIDA:

La sensibilidad es generalmente determinada por el defecto más pequeño permisible y su posición en la soldadura. Sin embargo no sólo el tamaño y distancia de los defectos son importantes, sino también su naturaleza y orientación. No sólo el ajuste de sensibilidad es el que determina la habilidad para detectar ciertos defectos, sino también la técnica aplicada, la frecuencia utilizada, el ángulo del transductor, la técnica de inspección

(con uno o dos transductores), etc. La mejor forma de determinar la sensibilidad requerida sería usando soldaduras de referencia conteniendo defectos reales del tamaño mínimo aceptable, pero esto es a menudo impracticable, por lo que se utilizan bloques con agujeros taladrados con los que se puede calibrar la sensibilidad necesaria de acuerdo al tamaño mínimo permisible del defecto (Ref. 7).

1.4 NORMAS DE ACEPTACION.-

Los Códigos y Normas establecen sus requerimientos o recomendaciones luego de analizar y discutir la experiencia recogida en programas de investigación, en el trabajo de empresas industriales especializadas y del estudio sistemático de la experiencia obtenida en servicio. Existen normas encaminadas a definir las condiciones técnicas del ensayo, normas que definen qué soldaduras deben ser objeto de ensayo y normas que definen los criterios de aceptación. En el presente trabajo se tratarán solamente las normas que fijan los criterios de aceptación de soldaduras ensayadas por ultrasonidos. Las más importantes son:

- ASME (American Society Mechanical Engineers), dirigido especialmente a recipientes a presión (ASME-Sec. VIII, Div 2-80) en la parte referente a "Inspección ultrasónica de soldaduras".
- AWS (American Welding Society), dirigido a estructuras soldadas de edificios, estructuras soldadas de puentes y estructuras soldadas tubulares (AWS D1.1-81).

Las normas de aceptación-rechazo expuestas en el Código ASME-Sec. VIII, Div 2-80 (Ref.11) correspondiente a recipientes a presión recomienda los siguientes criterios:

- Toda indicación que produzca una respuesta mayor al 20 por ciento del nivel de referencia será investigada, de modo que el operador pueda determinar la forma, identidad y localización de tales reflectores y evaluarlos en términos de las normas de aceptación dadas abajo en (a) y (b):

a) Las discontinuidades serán inaceptables si la amplitud excede del nivel de referencia y éstas tienen longitudes que exceden:

1. 1/4 pulgada (6mm) para t hasta 3/4 pulgada (19mm), inclusive;

2. $1/3 t$ para t desde $3/4$ pulgada (19mm) a $2 1/4$ pulgada (57mm), inclusive;
3. $3/4$ pulgada (19mm) para t sobre $2 1/4$ pulgada (57mm), donde t es el espesor de la soldadura examinada, si en una unión soldada los dos miembros tienen diferentes espesores en la soldadura t es el menor de estos dos espesores.

b) Son inaceptables las discontinuidades identificadas como fisuras, falta de fusión, o penetración incompleta, cualquiera sea la amplitud de la discontinuidad o la señal.

El Código AWS D1.1- 81 (Ref. 12), establece por su parte que como primer paso las soldaduras serán objeto de una inspección visual para posteriormente ser ensayadas por ultrasonidos, siguiendo para este caso las recomendaciones establecidas sobre los niveles de inspección y aceptación.

La Tabla V (AWS D1.1-81 Tabla 8.15.3) para construcción de edificios, corresponde a los niveles mínimos de aceptación (en dB) seleccionados en función del espesor de la soldadura y del ángulo del transductor utilizado. De acuerdo al grado de severidad los de-

TABLA V

NIVELES MINIMOS DE ACEPTACION (DECIBELES) SEGUN AWS D1.1 PARA LA CONSTRUCCION DE EDIFICIOS (REF. 12)

SEVERIDAD DEL REFLECTOR	ESPESOR DE SOLDADURA (mm) Y ANGULO DEL PALPADOR					
	7,9 a 19	> 19 a 38,1	> 38,1 a 63,5	> 63,5 a 101,6	> 101,6 a 152,4	> 152,4 a 203,2
	70°	70°	70° 60° 45°	70° 60° 45°	70° 60° 45°	70° 60° 45°
Reflect. Grandes	+8	+3	-1 +2 +4	-4 -1 +1	-7 -4 -2	-9 -6 -4
Reflect. Pequeños	+9	+4	+1 +4 +6	-2 +1 +3	-5 -2 0	-7 -4 -2
Reflect. Menores	+10	+5	+3 +6 +8	0 +3 +5	-3 0 +2	-5 -2 0

REFLECTORES GRANDES: Cualquier discontinuidad, SIN CONSIDERACION DE SU LONGITUD, que tenga una apreciación más severa (menor número en dB) que este nivel, debe ser rechazada.

REFLECTORES PEQUEÑOS: Cualquier discontinuidad más larga que 19 mm que tenga una apreciación más severa (menor número en dB) que este nivel, debe ser rechazada.

REFLECTORES MENORES: Sólo aquellas discontinuidades que excedan 51 mm en longitud y que tengan una apreciación más severa (menor número en dB) que este nivel deben ser rechazadas.

fectos se hallan clasificados en grandes, pequeños y menores. Los niveles de amplificación utilizados para la inspección ultrasónica de edificios se presentan en la Tabla VI, estos valores están en función de la distancia que recorrerá el haz ultrasónico en el medio a ensayar.

En la evaluación de los resultados, los límites de aceptación expuestos por Códigos y Normas no están exentos de adiciones o variaciones de criterios, añadidos por los responsables de un proyecto, que por razones obvias deben ser preparados y aceptados por todas las partes interesadas.

TABLA VI

NIVELES DE INSPECCION SEGUN AWS D 1.1 PARA LA CONSTRUCCION DE EDIFICIOS (REF. 12)

DISTANCIA, CAMINO SONICO (mm).	POR SOBRE EL NIVEL DE REFERENCIA, dB.
hasta 63,5	+ 14
> 63,5 a 127	+ 19
> 127 a 254	+ 29
> 254 a 381	+ 39

NOTAS REFERENTES A LAS TABLAS V Y VI

1. Las discontinuidades que tengan una apreciación más severa que aquellas de reflectores menores deben estar separadas por al menos $2L$, siendo L la longitud de la discontinuidad mayor. Las discontinuidades que no están separadas por al menos $2L$ se consideraran como una sola cuya longitud está determinada por la suma de las longitudes de las discontinuidades, más la longitud de la separación.
2. Las discontinuidades que tengan una apreciación más severa que la de reflectores menores no deben comenzar a distancias menores que $2L$ de los extremos de soldaduras que soportan tensiones de tracción primarias, siendo L el largo de la discontinuidad.
3. Las discontinuidades en la zona del talón de raíz de las soldaduras de penetración total con preparación en X, doble J, doble U o doble bisel, detectadas con el nivel de barrido, deben ser evaluadas con un nivel 4 dB* más sensible que el prescrito por esta tabla cuando tales soldaduras están designadas como "soldaduras de tracción" en los planos de diseño.
4. Soldaduras por electrogas y electroescoria - Las discontinuidades que exceden de 51 mm y que aparezcan en la mitad central de tales soldaduras deben ser evaluados a un nivel de aceptación 6 dB más sensible que los de la tabla.

* Agregar +4 dB al número de la tabla

CAPITULO II

TRABAJO EXPERIMENTAL

Siguiendo las normas recomendadas para la evaluación y calibración del sistema de ultrasonidos, se ha desarrollado la inspección de las uniones de acero estructural soldadas en ángulo, de tal forma que, este trabajo permite establecer un procedimiento de ensayo para la localización, evaluación e identificación de los defectos más comunes que se presentan en este tipo de uniones.

2.1 UNIONES SOLDADAS A INSPECCIONAR.-

Al ser el objetivo del presente trabajo la inspección por ultrasonidos de uniones soldadas en ángulo, se construyeron dichas uniones con preparación de bordes para soldadura con penetración completa.

La forma de los bordes tiene mucha importancia en el comportamiento, eficiencia y confiabilidad de la unión, de modo que la selección de la geometría debe ser efectuada de acuerdo con el tipo de función a cumplir, es decir, tipo de servicio a efectuar y cla

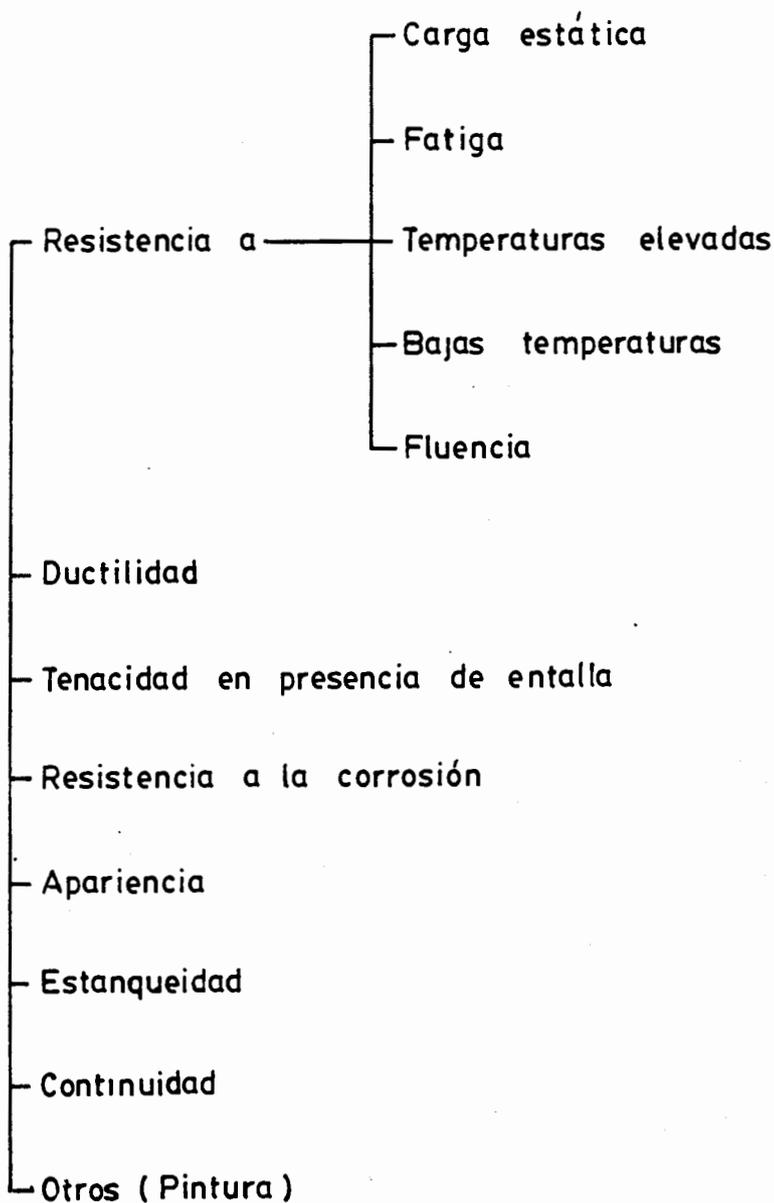
se de carga que a va a resistir. Además el diseño no debe ser de difícil ejecución y el costo de preparación debe ser bajo.

Todos estos factores fueron considerados para la construcción de las uniones a inspeccionar, ya que su aplicación es común en la actualidad en la construcción de estructuras soldadas en el campo de la industria petrolera, proyectos hidroeléctricos, etc., donde la unión en ángulo diseñada resiste cargas de corte tanto longitudinal como transversal, gracias a una mejor distribución de esfuerzos debido a la preparación de bordes. La Tabla VII presenta las cualidades normalmente requeridas para las uniones soldadas en general y por lo tanto aplicables al presente estudio.

Las piezas a inspeccionar fueron construidas de acero dulce ASTM A 283 Grado D cuya composición química muestra un contenido de carbono de aproximadamente 0.18%. Sus dimensiones fueron elegidas con el fin de proporcionar a los transductores angulares, que van a ser utilizados en la inspección, el espacio necesario para poder ensayar la soldadura en su totalidad. La Fig. 10 muestra estas dimensiones y características de las chapas que formarán la unión.

TABLA VII

CUALIDADES REQUERIDAS PARA LAS UNIONES SOLDADAS (Ref. 9).



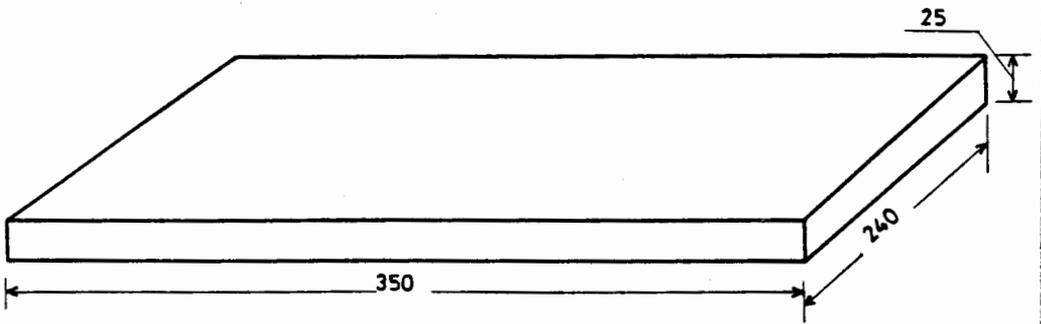
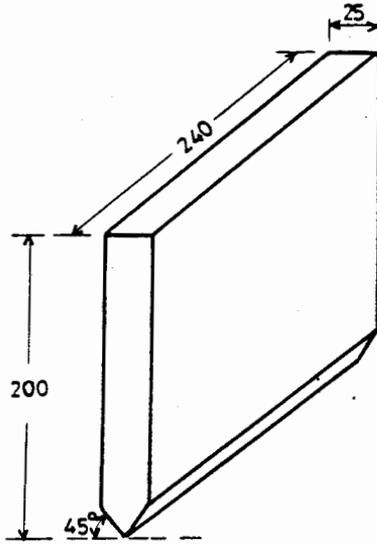


Fig. 10 DIMENSIONES Y CARACTERISTICAS DE LAS CHAPAS QUE FORMAN LA UNION EN ANGULO A SER INSPECCIONADA CON ULTRASONIDOS.

MEDIDAS EN MILIMETROS.

Para la preparación de los bordes se utilizó el método de oxi-corte en el trazado de las chapas y luego se realizó el maquinado utilizando cepilladora cuya mesa estaba inclinada 45° para dar dicho ángulo a los bordes de las uniones a soldar. El proceso utilizado para la formación de las uniones en ángulo fue el de soldadura manual por arco eléctrico, en que se emplearon electrodos de revestimiento básico AWS E-7018 y celulósico AWS E-6011. En la elaboración de dichas muestras, los parámetros y condiciones de soldadura fueron ajustados de tal forma que permitieron controladamente introducir discontinuidades para ser posteriormente detectadas por ultrasonidos. Para realizar el proceso de soldadura de las uniones se contó con la ayuda de un soldador calificado de los Astilleros Navales Ecuatorianos (ASTINAVE).

Utilizando el equipo de rayos X marca Seifert del Laboratorio de Ensayos No Destructivos, con una capacidad de 300 KV y 5mA, se procedió a tomar radiografías de las soldaduras con el fin de realizar una comprobación de la presencia de las discontinuidades intencionalmente introducidas, pero más bien éstas mostraron las limitaciones que tiene el método no destructivo de Radiografía Industrial para examinar este tipo de geometrías al presentar la imagen radio

gráfica una definición pobre que dificultó casi en forma total la localización de dichas discontinuidades.

La Tabla VIII presenta un listado de las uniones soldadas en ángulo y sus características de construcción.

2.2 EQUIPO DE ENSAYO.-

Para realizar la inspección de las uniones soldadas en ángulo se utilizó el siguiente conjunto:

EQUIPO (Fig. 11):

Marca	:	Kraütkramer, modelo USK6
Gama de frecuencias	:	0.5 - 15 MHz
Amplificación	:	Ajuste basto en etapas de 0/20/40 dB. Ajuste fino en etapas de 2dB, entre 0 y 40 dB.
Supresión	:	Regulable entre un 0 y un 30% de la pantalla.
Campos de control	:	25 a 250 mm en acero 250 a 2500 mm en acero
Alimentación	:	Por batería de plomo, pilas de NiCd o pilas secas.

TABLA VIII
 CARACTERISTICAS DE LAS UNIONES SOLDADAS EN ANGULO CONSTRUIDAS PARA REALIZAR LA INSPECCION
 ULTRASONICA

PIEZA Nº	ELECTRODO TIPO AWS	CONDICIONES DE SOLDADURA	DEFECTOLOGIA PROBABLE
1	E-7018	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro del electrodo demasiado grande. - Corriente demasiado baja 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de penetración
2	E-7018	<ul style="list-style-type: none"> - Corriente demasiado baja 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de fusión
3	E-6011 E-7018	<ul style="list-style-type: none"> - Corriente excesiva - Corriente demasiado baja 	<ul style="list-style-type: none"> - Mordeduras - Falta de fusión
4	E-6011 E-7018	<ul style="list-style-type: none"> - Remoción incompleta de la escoria en los cordones anteriores. - Absorción de humedad por parte del electrodo. - Velocidad insuficiente de soldadura. 	<ul style="list-style-type: none"> - Inclusiones de escoria - Porosidades - Sobre-espesor excesivo

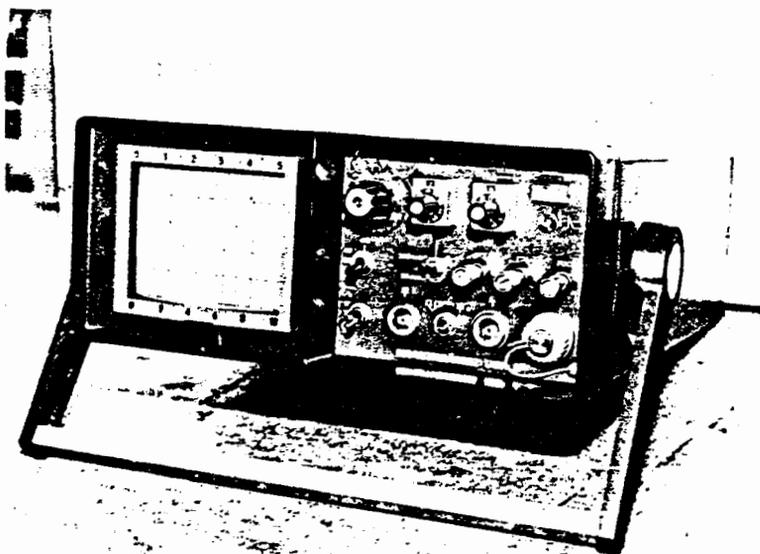


Fig.11 EQUIPO DE ULTRASONIDOS KRAÜTKRAMER USK-6

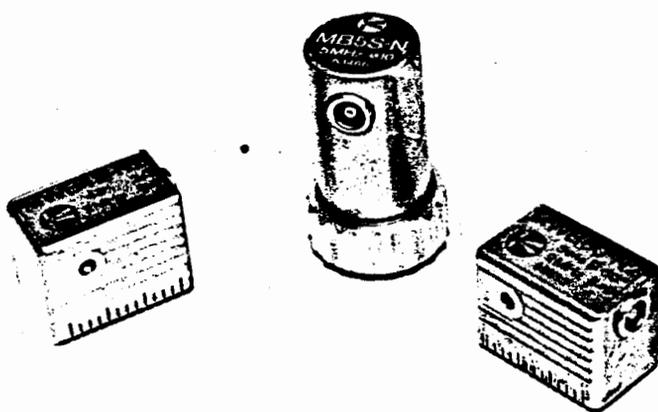


Fig.12 TRANSDUCTORES UTILIZADOS EN LA INSPECCION ULTRASONICA.

Temperatura ambiente

admisible : - 15°C a 40°C

Escala de la pantalla: 70 x 55 mm

TRANSDUCTORES (Fig. 12):

Marca : Kraütkramer

Modelo	Angulo (Grados)	Frecuencia (MHz)	Dimensión (mm)
MB5S-N	Normal	5	10 dia.
MWB45-N2	45	2	27 x 17
MWB60-N2	60	2	27 x 17

ACOPLANTE :

Aceite SAE 20

BLOQUES DE CALIBRACION :

Instituto Internacional de Soldadura (IIS/IIW) ó

V1 (Fig. 13a).

V2 (Fig. 13b).

ASME (Fig. 14).

- El Kraütkramer USK6 es un equipo ultrasónico portátil compuesto por un tubo de rayos catódicos (T-RC) y un cuadro de mandos donde se alojan botones

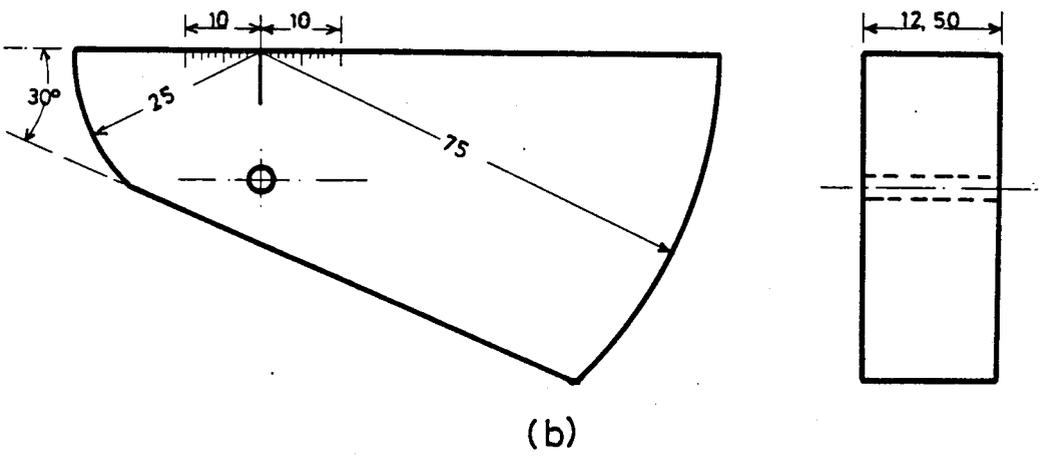
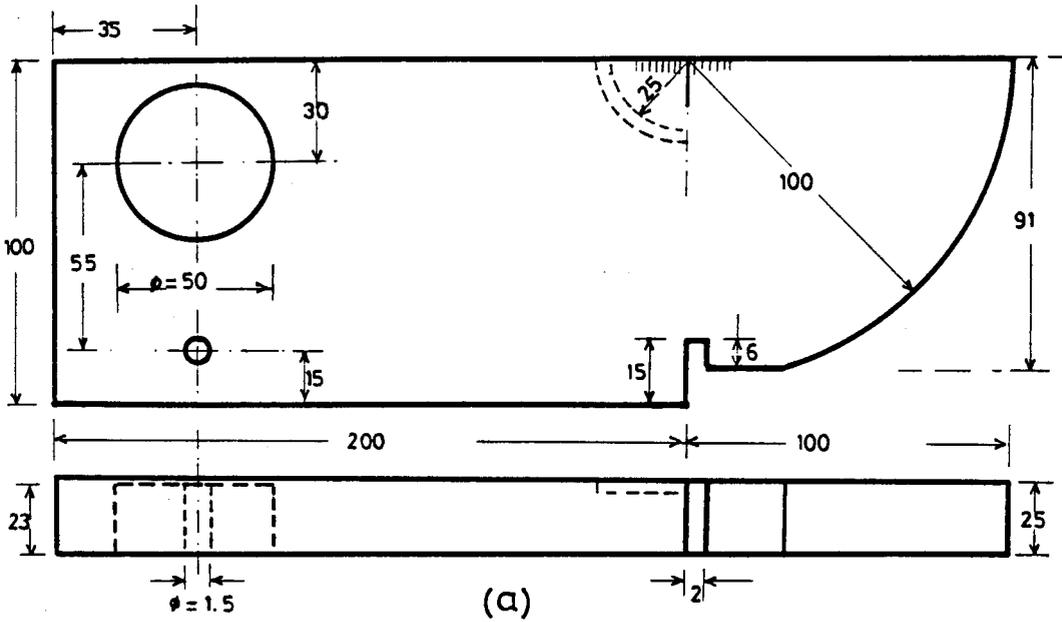


Fig. 13 **BLOQUES DE CALIBRACION.**

a) IIW o V1

b) V2

MEDIDAS EN MILIMETROS

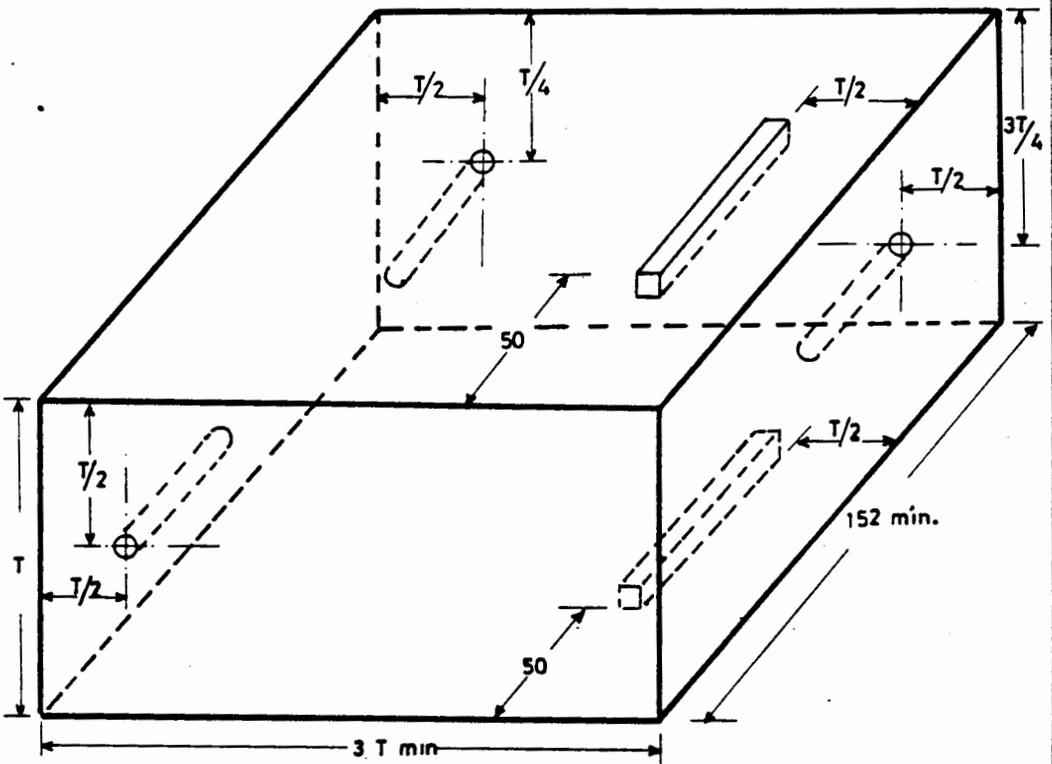


Fig. 14 BLOQUE DE CALIBRACION TIPO ASME.

(Ref. 11)

MEDIDAS EN MILIMETROS.

giratorios y comutadores basculantes así como otros elementos necesarios para su manejo, de tal modo que en él se puedan realizar estudios de defectología, medición de espesores y demás ensayos basados en la propagación, reflexión y refracción de las ondas ultrasónicas. La presentación de las señales en la pantalla TRC es en barrido A.

- Los transductores utilizados en el ensayo, en adición a las características anotadas anteriormente, son del tipo miniatura cuyo cristal piezoeléctrico es de titanato de bario protegido por una suela para evitar el desgaste. El diámetro de cristal del transductor normal es de 10 mm, mientras que el cristal de los transductores angulares es de geometría rectangular de 8 x 9 mm. En general, el transductor miniatura facilita la inspección al necesitar una superficie menor para acoplarse en el material a ensayar y ser liviano en su manejo.

- Tanto el bloque normalizado por el Instituto Internacional de la Soldadura V1 como el bloque V2 son patrones utilizados para la calibración y control de los sistemas de ultrasonidos que trabajan por el método de impulso-eco. El bloque V2 se utiliza en el ajuste del equipo en unión de los transductores angulares miniatura para el calibrado en camu

pos menores de 225 mm, que es el campo mínimo para el que se puede utilizar el bloque V1.

- El bloque tipo ASME tiene como función principal la de servir para la obtención de la curva de calibración de amplitud en distancia (DAC) y el establecimiento del nivel de ganancia. Este será construido y mecanizado de acuerdo con las indicaciones que se dan en la Fig. 14 y Tabla IX.

2.3 EVALUACION DEL SISTEMA DE ULTRASONIDOS.-

Todo sistema de ultrasonidos debe cumplir condiciones de funcionamiento y sensibilidad a fin de que la información obtenida sea comparable y repetitiva. Es decir, al estar formado el sistema de ensayos ultrasonicos por un instrumento electrónico, transductores y cables de interconexión, estos deben ser evaluados en su funcionamiento en conjunto, para tener la seguridad de que están operando en condiciones de sensibilidad determinada y reproducibilidad, de tal manera que las informaciones obtenidas (altura y posición de ecos) pueden ser directamente comparables.

Por lo tanto es importante hacer verificaciones periódicas del mantenimiento de la linealidad de la

TABLA IX

DIMENSIONES RECOMENDADAS PARA LA CONSTRUCCION DEL BLOQUE BASICO DE CALIBRACION ASME (REF.11)

ESPESOR DE LA SOLDADURA (t) mm	ESPESOR DEL BLOQUE DE CALIBRACION (T) mm	DIAMETRO DEL AGUJERO (mm)	TAMAÑO DE LA ENTALLA (mm)
hasta 25	19 ó t	2.4	Ancho = 3.1 a 6.3 Profundidad = 2% T Longitud = 50 mínimos
25 a 50	38 ó t	3.1	
50 a 100	75 ó t	4.7	
100 a 150	125 ó t	6.3	
150 a 200	175 ó t	7.9	
200 a 250	225 ó t	9.5	
mayor a 250	t	*	

* Por cada incremento del espesor de 50 mm o fracción, el diámetro del agujero se incrementará en 1.6 mm.

base de tiempo del equipo electrónico, así como también controlar el ángulo y posición de salida del haz ultrasónico con transductores angulares como se verá posteriormente.

2.3.1 Linealidad horizontal.-

Se dice que el equipo tiene linealidad horizontal cuando la relación que existe entre los desplazamientos en sentido horizontal de los ecos en la pantalla es la misma que la correspondiente a los respectivos caminos que debe recorrer el haz ultrasónico en un medio transmisor uniforme.

El procedimiento a seguir para evaluar la linealidad horizontal del equipo, es el descrito por la norma INTA (Ref. 13), que se enuncia a continuación.

Se fija el rango de la escala horizontal en 100 mm y se utiliza un transductor normal. El transductor se apoya sobre el bloque patrón V1 en la posición de espesor correspondiente a 25 mm (Fig. 15). La Fig. 16 muestra la representación del oscilograma obtenido durante la evaluación donde se observa la suce

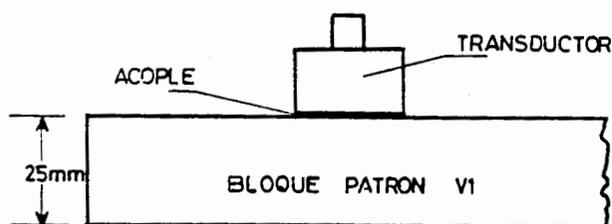


Fig. 15 POSICION DEL TRANSDUCTOR NORMAL EN EL BLOQUE V1 PARA LA EVALUACION DE LINEALIDAD.

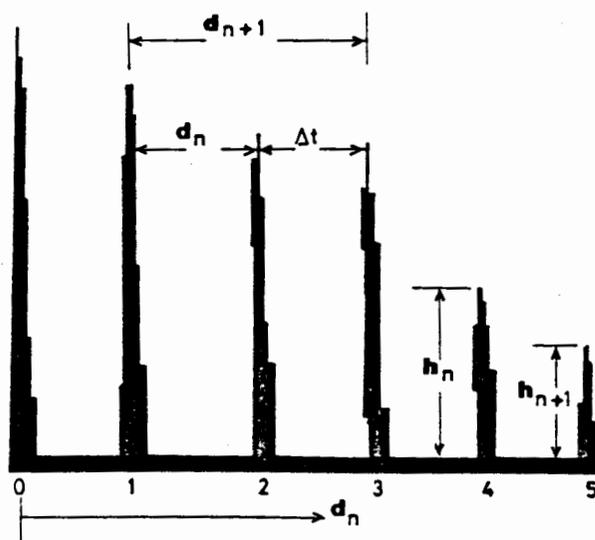


Fig. 16 REPRESENTACION GRAFICA DEL OSCILOGRAMA OBTENIDO EN PANTALLA PARA EVALUAR LINEALIDAD.

sión de ecos de fondo. Se procede luego a tomar las lecturas correspondientes a la distancia entre cada par de ecos sucesivos medidos desde el punto de arranque (Δt), y la distancia d_n obtenida entre el primer eco y los restantes. Para la toma de las lecturas es necesario que los ecos sucesivos estén aproximadamente a la misma altura, haciendo que el primer eco alcance $4/5$ de la altura total de pantalla. En la Tabla X se presentan los datos obtenidos en la evaluación.

La escala se considera lineal cuando no existe diferencias entre las distancias de los distintos ecos; aun cuando exista alguna diferencia cualquiera entre el pulso de entrada y el primer eco. La gráfica de la Fig. 17 muestra la evaluación de la linealidad horizontal del equipo de ensayo en donde se observa que la base de tiempo es totalmente lineal, lo que significa que la velocidad de barrido del pincel electrónico se mantiene constante a lo largo de su recorrido en la pantalla del TRC. La linealidad horizontal es condición necesaria para facilitar la ubicación de las discontinuidades.

TABLA X

VALORES OBTENIDOS EN LA EVALUACION DE LA LINEALIDAD HORIZONTAL

d_n (mm)	0	25	50	75	100
d_{n+1} (mm)	25	50	75	100	125
Δt (mm)	25	25	25	25	25

TABLA XI

VALORES OBTENIDOS EN LA EVALUACION DE LA LINEALIDAD VERTICAL

Ganancia (dB)	h_n (mm)	h_{n+1} (mm)	$\frac{h_n}{h_{n+1}}$
2	6	3	2
4	7	5	1.40
6	11	7.5	1.47
8	13	9	1.44
10	17	12	1.42
12	21	15	1.40
14	27	19	1.42
16	33	23.5	1.40
18	42	29.5	1.42
20	54	38	1.42

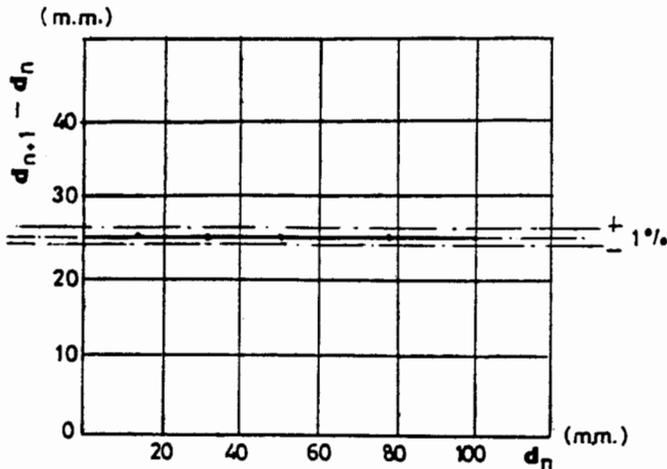


Fig. 17 **EVALUACION GRAFICA DE LA LINEALIDAD HORIZONTAL DEL EQUIPO DE INSPECCION KRAÜTKRAMER USK-6.**

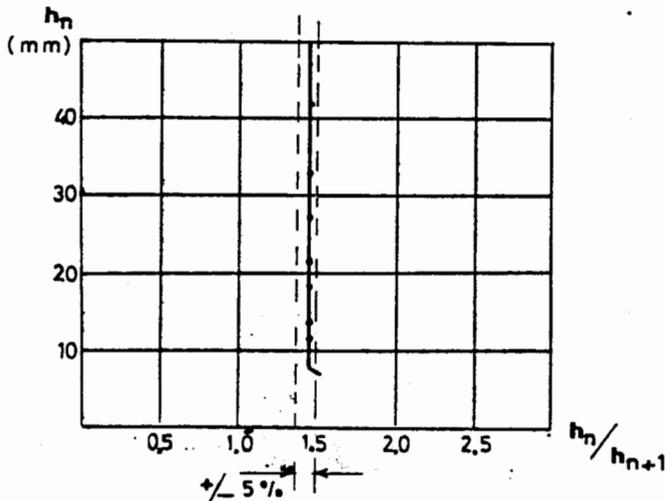


Fig. 18 **EVALUACION GRAFICA DE LA LINEALIDAD VERTICAL DEL EQUIPO DE INSPECCION KRAÜTKRAMER USK-6.**

2.3.2 Linealidad vertical.-

Se dice que el equipo tiene linealidad vertical cuando dado un eco representado en la pantalla TRC, al variar la ganancia mediante el control calibrado, la relación de amplitudes es la misma que la relación de ganancias correspondientes.

Manteniendo el transductor normal en la posición correspondiente al ensayo anterior y utilizando el mismo oscilograma se realiza la evaluación de la linealidad vertical, según el procedimiento descrito por la norma INTA (Ref. 13).

Se lleva por pasos utilizando el mando de amplificación la altura del penúltimo eco, llamado h_n , a un valor aproximado del 10% de altura total de pantalla. Luego se lee la altura del último eco h_{n+1} , y se encuentra la relación de la altura (razón de respuesta h_n/h_{n+1}). Aumentando un paso la ganancia (2dB en el Krautkramer USK6), se leen nuevamente las alturas de los ecos h_n y h_{n+1} , y se encuentra la razón de respuesta. Se repite este procedimiento hasta que la altura del

eco h_n llegue al 100% de altura total de pantalla. Observar Fig. 16.

El equipo tiene linealidad vertical si el cociente entre las alturas en cada paso de amplificación añadida es un valor constante e igual. En la Tabla XI se presentan los datos obtenidos en la evaluación, con cuyos valores se construyó la gráfica deflexión vertical (h_n) vs. razón de respuesta (h_n/h_{n+1}), la misma que se muestra en la Fig. 18. Entre el 10 y 90% de altura total de pantalla, el sistema de ultrasonidos muestra que los valores de h_n/h_{n+1} están dentro de la tolerancia establecida para una buena linealidad vertical del sistema. La linealidad vertical es condición necesaria para poder establecer las magnitudes de distintas discontinuidades en función de la amplitud de los ecos y de los valores de ganancia correspondientes.

2.3.3 Resolución.-

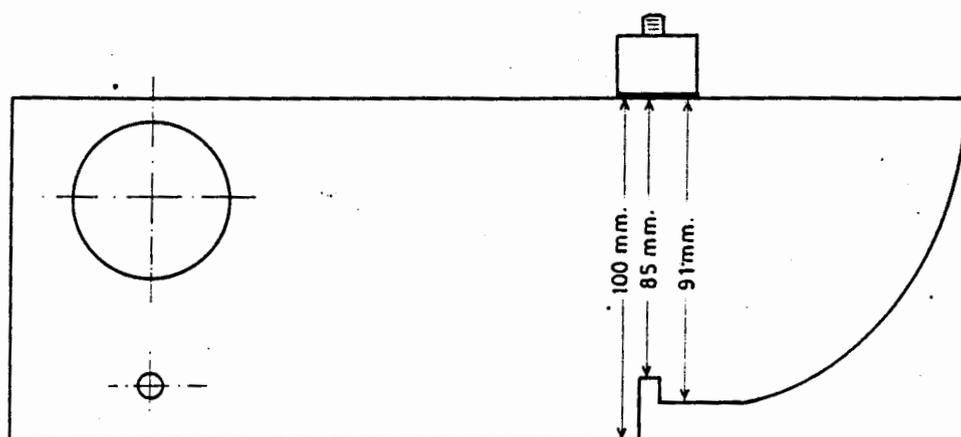
El poder de resolución está influenciado por el tipo de cristal piezoeléctrico y por ciertas características constructivas del transductor, entre ellas la amortiguación de la

vibración del cristal una vez concluido el impulso eléctrico. Ante una insuficiente amortiguación del cristal, el poder de resolución disminuye.

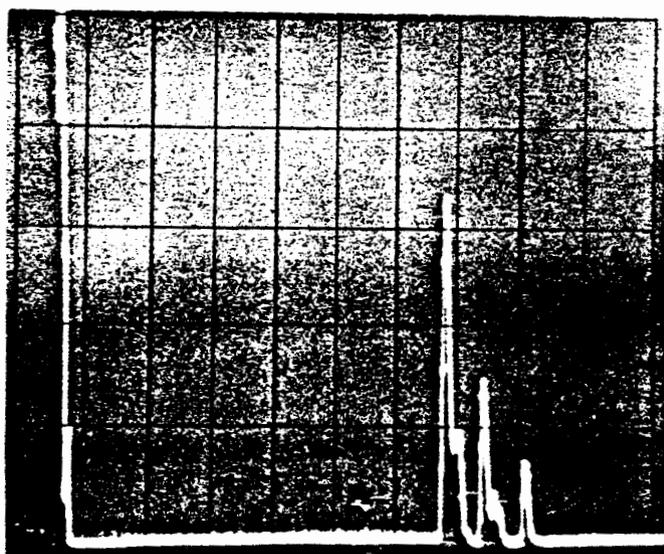
Para realizar la verificación del poder de resolución primeramente se fija el rango de la escala horizontal en 125 mm, luego se coloca el transductor normal en la posición indicada en la Fig. 19 a . En la pantalla del equipo se obtienen los ecos correspondientes a los espesores de 85 mm, 91 mm y 100 mm que representan a la ranura, rebaje y parte ancha del bloque respectivamente. Se ajusta la altura del mayor de los ecos de manera que alcance los $2/3$ de la altura total de pantalla. Luego, se comparan estas señales con esquemas patrones que califican la resolución del sistema como: buena, aceptable o pobre. Para el caso del sistema utilizado en el presente estudio, la Fig. 19 b muestra el oscilograma de la resolución obtenida, calificándola como buena.

2.3.4 Sensitividad y ruido de fondo.-

La evaluación de la sensibilidad de trabajo



(a)



(b)

Fig. 19 PODER DE RESOLUCION DEL SISTEMA DE ULTRASONIDOS.

a) POSICION DEL TRANSDUCTOR EN EL BLOQUE VI.

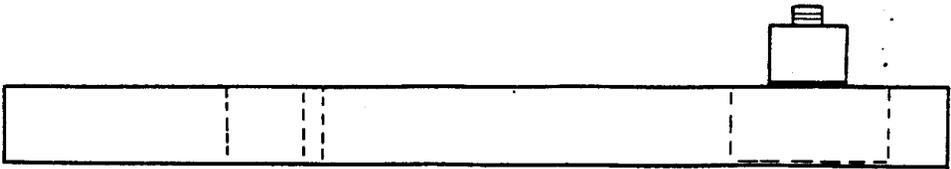
b) OSCILOGRAMA RESULTANTE.

se aplica para verificar el mantenimiento o variación de sensibilidad de un mismo sistema en el transcurso de un ensayo. El procedimiento de ajuste depende de que se deba trabajar con alta o con baja ganancia.

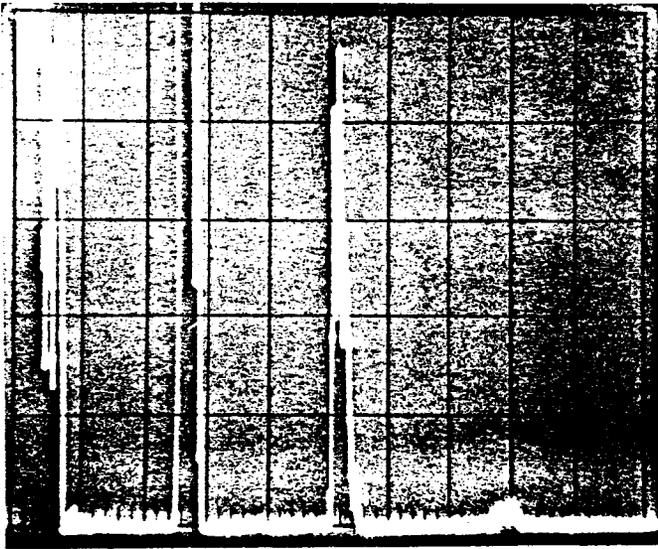
- Para la verificación con alta ganancia se fija el transductor normal en la posición indicada en la Fig. 20 a . Calibramos la escala en el rango de 200 mm, luego se hace coincidir el primer eco con la lectura del espesor a 50 mm correspondiente al plástico (polimetacrilato de metilo) en el bloque V1. Se registra el número de ecos, la altura del último de ellos y la ganancia de trabajo.

En la verificación de la sensibilidad con alta ganancia del equipo de ensayo, el oscilograma de la Fig. 20 b presenta dos ecos, el último de ellos alcanza una altura de 52 mm para una ganancia de 58 dB, estos valores fueron registrados para compararlos con evaluaciones futuras.

- Para la verificación con baja ganancia se fija el transductor normal en la posición



(a)



(b)

Fig. 20 VERIFICACION DE LA SENSIBILIDAD CON ALTA GANANCIA.

a) POSICION DEL TRANSDUCTOR EN EL BLOQUE VI.

b) OSCILOGRAMA RESULTANTE.

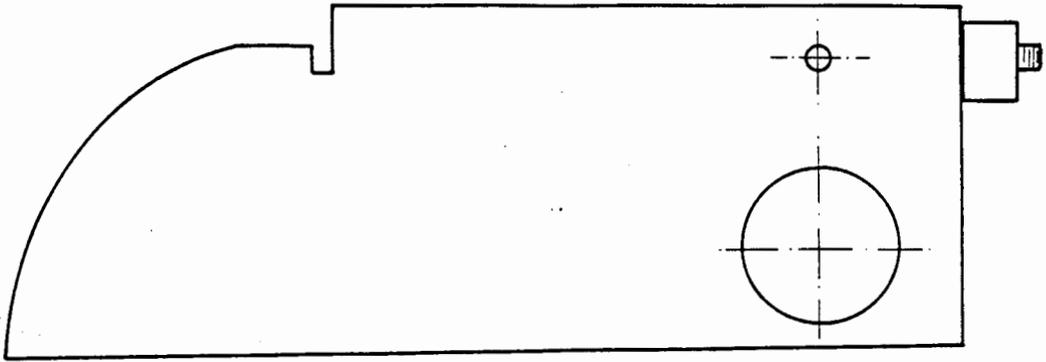
indicada en la Fig. 21 a . Se desplaza el transductor hacia arriba y hacia abajo buscando la máxima altura del eco proveniente del agujero de 1.5 mm de diámetro.

El oscilograma de la Fig. 21 b corresponde a la verificación de la sensibilidad con alta ganancia del equipo de ensayo, en él se observa un eco de 41 mm de altura para una ganancia de 26 dB, estos valores fueron registrados para posteriores verificaciones de la sensibilidad del equipo.

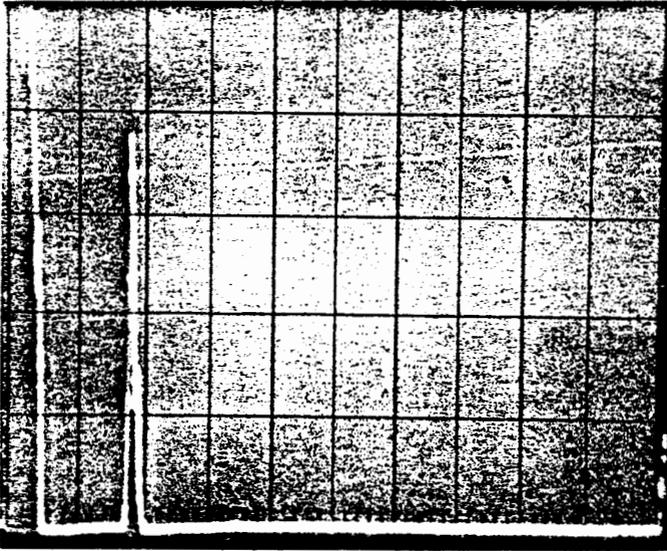
Así como se ha realizado el chequeo de sensibilidad de trabajo para alta y baja ganancia, también se puede proceder a verificar la altura del ruido de fondo o "cesped" para los dos casos anteriormente expuestos. Debe cuidarse de medir realmente el ruido de fondo eléctrico sin la distorsión causada por el alto nivel de la indicación de entrada.

2.4 CALIBRACION DEL SISTEMA PARA EL ENSAYO.-

Luego de realizar una comprobación satisfactoria del estado de funcionamiento del equipo, es necesario



(a)



(b)

Fig. 21 VERIFICACION DE LA SENSIBILIDAD CON BAJA GANANCIA.

a) POSICION DEL TRANSDUCTOR EN EL BLOQUE V1.

b) OSCILOGRAMA RESULTANTE.

realizar la calibración conjunta del equipo, transductor y cable de conexión a ser utilizados en el trabajo de inspección. Esta calibración deberá repetirse siempre que se produzca cualquier variación o sustitución de los elementos considerados, así como también cada cierto período de utilización del sistema.

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

- Ajuste de la base de tiempo o campo de barrido.
- Determinación del punto de salida y ángulo del transductor.
- Construcción de las curvas de calibración amplitud distancia (DAC).
- Niveles de ganancia de exploración y evaluación.

2.4.1 Ajuste de la base de tiempo.-

La calibración del campo de barrido se realiza tanto para los transductores normales como para los angulares y se puede realizar sobre los bloques normalizados V1, V2 o similares.

AJUSTE DE LA BASE DE TIEMPO PARA TRANSDUCTORES NORMALES:

Se apoya el transductor normal sobre el bloque patrón V1 con el medio de acople a utilizar en la inspección sin ejercer excesiva presión. Si el rango de escala es menor a 250 mm, se sitúa el transductor en el espesor de 25 mm del bloque patrón como lo muestra la Fig. 22, posición A. Para rangos de 250 mm y mayores se coloca el transductor en la posición B, que corresponde a la distancia de 100 mm en el bloque V1.

Para una escala de 125 mm la Fig. 23 ilustra el oscilograma correspondiente a cinco ecos de fondo, obtenidos al colocar el transductor en la posición A y mover los controles de barrido en el equipo hasta ajustar la distancia de dichos ecos haciéndolos coincidir con el espesor que recorre el haz en el bloque patrón. Para estas calibraciones siempre se toma el inicio de la señal del eco como punto de calibración.

Se observa en el oscilograma un ligero desplazamiento de la señal de emisión hacia la izquierda del cero, debido a que desde el momento en el cual el cristal emisor recibe el impulso eléctrico (aparece la señal de emisión)

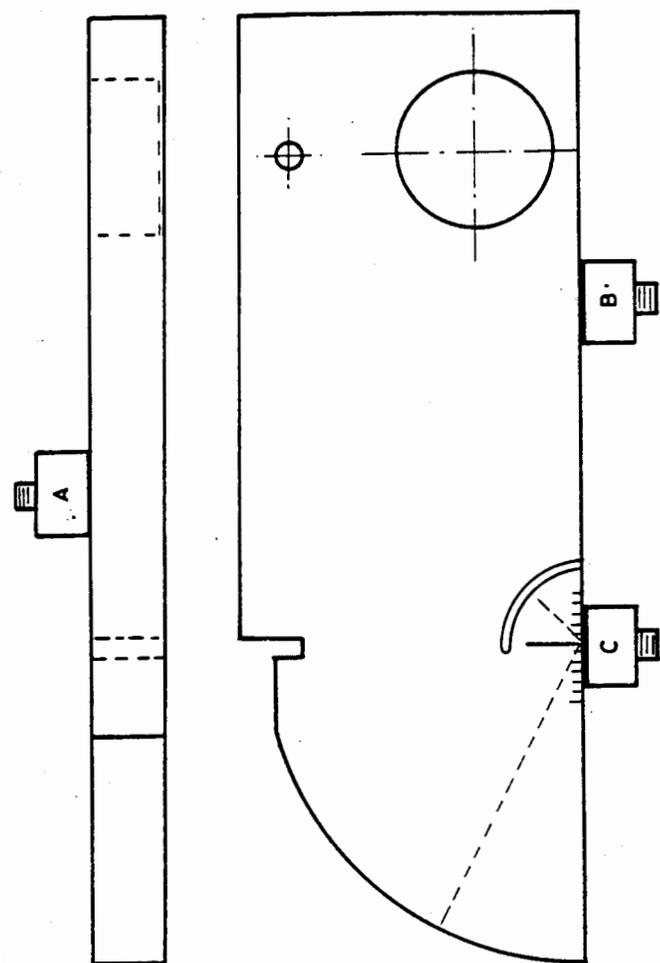
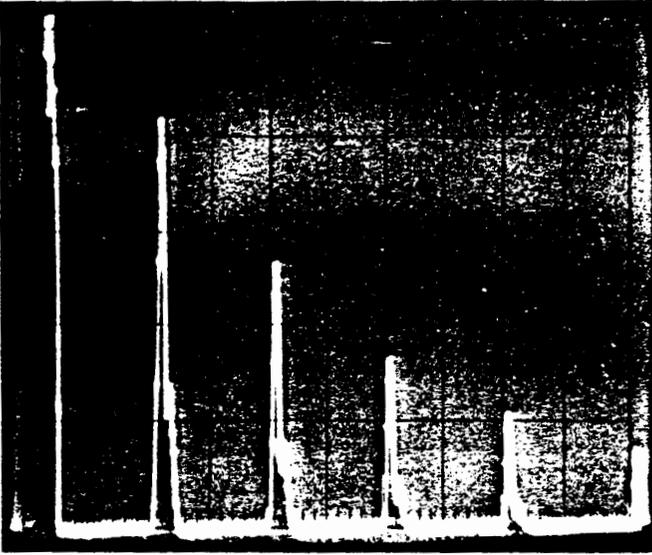
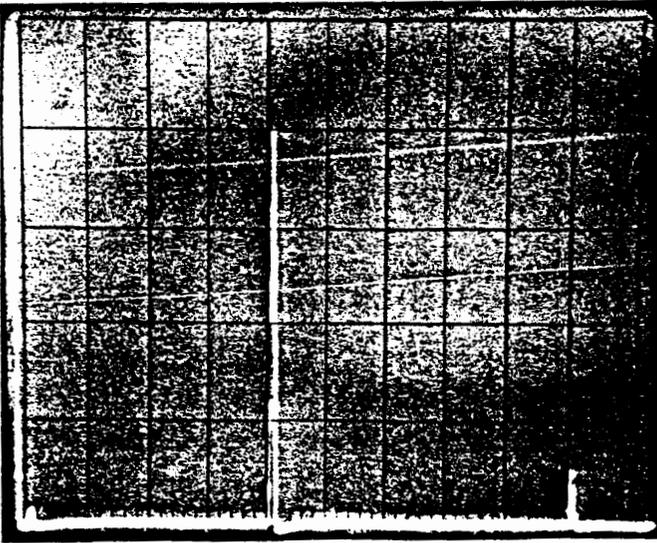


Fig. 22 POSICIONES DE LOS TRANSDUCTORES NORMAL Y ANGULAR EN EL BLOQUE V1 PARA REALIZAR EL AJUSTE DE LA BASE DE TIEMPO.



j. 23 OSCILOGRAMA CORRESPONDIENTE A UN AJUSTE DE 125 mm. DE LA BASE DE TIEMPO UTILIZANDO UN TRANSDUCTOR NORMAL.



j. 24 OSCILOGRAMA CORRESPONDIENTE A UN AJUSTE DE 250 mm DE LA BASE DE TIEMPO UTILIZANDO UN TRANSDUCTOR ANGULAR DE 45°.

hasta que el impulso ultrasónico comienza a penetrar en el metal transcurre un cierto tiempo, cuya magnitud depende fundamentalmente del espesor de la capa o suela protectora que lleva el transductor. En consecuencia el tiempo eléctrico no coincide con el tiempo acústico, dándose así lugar al error de cero.

AJUSTE DE LA BASE DE TIEMPO PARA TRANSDUCTORES ANGULARES:

Para la calibración de la 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 (Fig. 13). Con el patrón V1 se calibra la escala de la base de tiempo para valores de 225 mm o más, mientras que con el V2 se realiza el calibrado para valores menores de 225 mm.

Calibrando con el bloque V1, la Fig. 24 muestra el oscilograma correspondiente a un ajuste de 250 mm de la escala de pantalla. El procedimiento es el siguiente: Se coloca el transductor de haz angular en la posición C

(Fig. 22). Se mueve el transductor hasta ob tener la señal de eco máximo desde el radio de 100 mm. Adicionalmente se obtiene un eco que procede de la ranura del bloque y que coincide con la marca de escala correspondiente a 225 mm.

Para que coincidan en distancia el primero y segundo eco, procedentes de las reflexiones ocurridas en el patrón V1, se ajusta el equipo utilizando los controles de barrido.

2.4.2 Determinación del punto de salida y ángulo del transductor.-

Para esta comprobación se utilizará el bloque normalizado V1.

PUNTO DE SALIDA DEL HAZ:

Se coloca el transductor en la posición C co mo se indica en la Fig. 22. Se desplaza el transductor para obtener un eco de máxima al tura a partir del radio de 100 mm del bloque de referencia. Alcanzando este eco de máxima altura, el punto de incidencia del trans-

ductor corresponderá con el cero marcado sobre el bloque. La Fig. 25 muestra el oscilograma obtenido utilizando un transductor de 45° y 2 MHz.

ANGULO DEL TRANSDUCTOR:

La verificación del ángulo se puede realizar colocando el transductor sobre las marcas correspondientes al valor del ángulo. En estas condiciones el eco tendrá su amplitud máxima. De no ser así, se desplazará el transductor hasta que aparezca la señal de amplitud máxima y entonces habrá que determinar el valor del ángulo en función del punto de incidencia o de salida del haz, determinado anteriormente. La Fig. 26 ilustra a los transductores sobre las marcas correspondientes al valor del ángulo de cada uno de ellos en el bloque patrón V1.

2.4.3 Construcción de las curvas de calibración amplitud distancia (DAC).-

Una de las condiciones esenciales que debe cumplir el ajuste de la sensibilidad del sistema para el ensayo ultrasónico, es su capa-

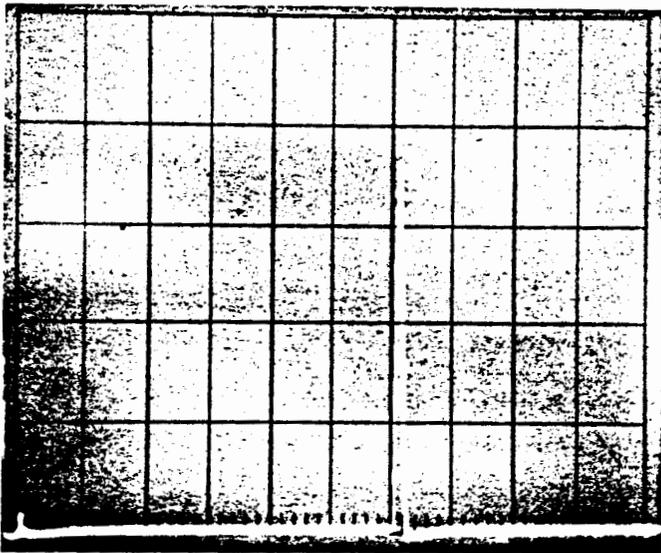


Fig. 25 OSCILOGRAMA OBTENIDO AL DETERMINAR EL PUNTO DE SALIDA DEL HAZ EN EL TRANSDUCTOR ANGULAR.

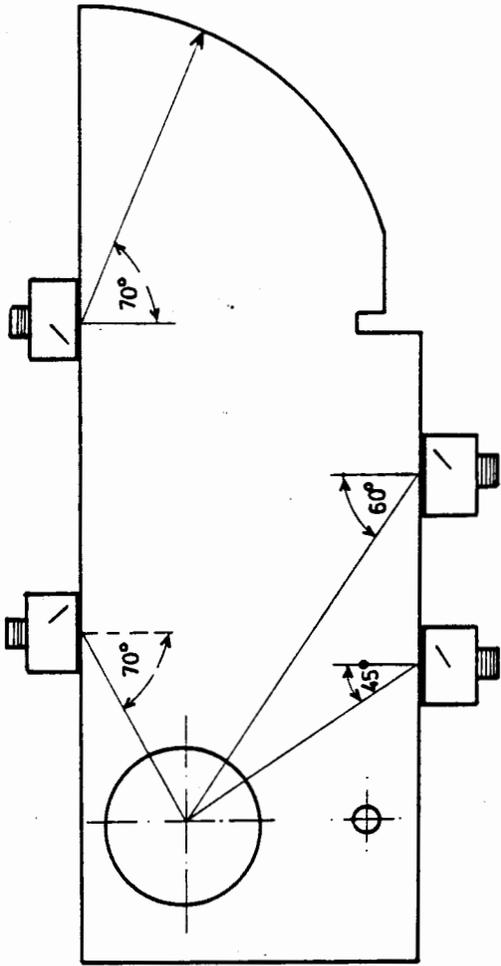


Fig. 26: POSICIONES DEL TRANSDUCTOR EN EL BLOQUE PATRON V1 PARA DETERMINAR EL ANGULO DE SALIDA DEL HAZ.

cidad para detectar un tamaño mínimo de defecto.

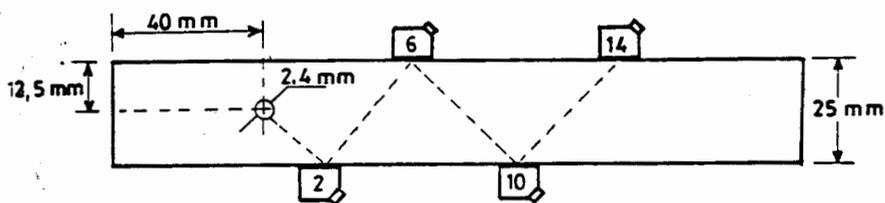
El método establecido por el Código ASME (Sección V, Artículo 5) "Examen por Ultrasonidos", al referirse en su párrafo T-540 al examen de las uniones soldadas, utiliza un bloque básico de calibración que se indica en la Fig. 14 construido de un material, espesor y curvatura similares al elemento ensayado, y por medio de agujeros de un cierto diámetro se determina la sensibilidad necesaria para llevar la señal de uno de estos agujeros a una cierta altura de pantalla. Esto permite establecer la altura de pantalla que corresponde al eco del mismo agujero o de otros de igual diámetro, con diferentes recorridos. Esto significa realizar una calibración de la amplitud del eco de un agujero de referencia a medida que aumenta la distancia que recorre el haz ultrasónico en el campo de barrido para detectar dicho agujero.

Con las respuestas obtenidas a partir del agujero de referencia se procede a la construcción de la curva de calibración amplitud distancia (DAC), cuya longitud cubrirá la distan

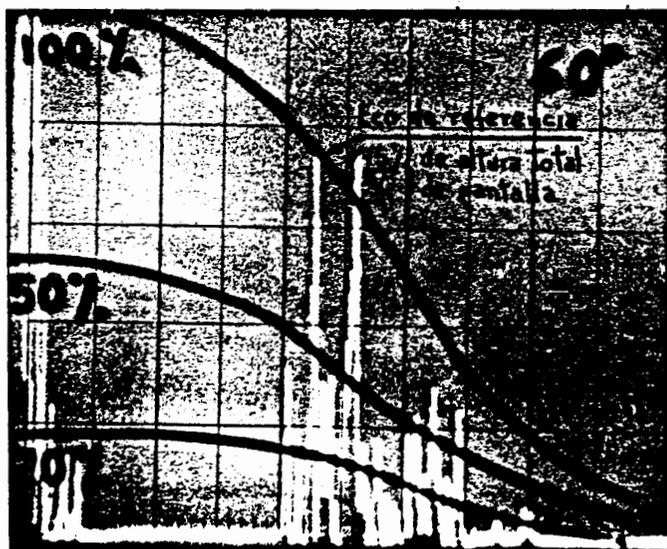
cia de barrido prevista para el examen.

A continuación se describe el procedimiento de construcción de la curva DAC para realizar el ensayo de las uniones en ángulo, utilizando un transductor de 60° . Se conoce que el espesor de las chapas que forman el ángulo es de 25 mm; por lo que revisando la Tabla IX, es necesario realizar la calibración de sensibilidad utilizando un bloque de igual espesor, cuyo agujero tiene un diámetro de 2.4 mm. Para obtener el primer punto de la curva, se coloca el transductor angular tan cerca como sea posible del agujero de referencia, pero no a menos de $3/8$ de paso (Ver punto 2.5.2) o de 40 mm, tomando en consideración el menor de estos dos valores y situando el transductor para conseguir una respuesta máxima. En estas condiciones se regula el mando de amplificación, de manera que la altura del eco sea el 75% de la altura total de pantalla (Ref. 1).

Sin modificar la ganancia se coloca el transductor de manera análoga en las demás posiciones de reflexión indicada en la Fig. 27,



ig. 27 POSICIONES DEL TRANSDUCTOR PARA CONSTRUIR LA CURVA D A C. (Ref 2)



ig. 28 CURVAS D A C. PARA LA EVALUACION DE DEFECTOS SEGUN EL CODIGO ASME - SECC. VIII.

cubriendo la distancia total a examinar. Los puntos hallados se unen tal como se indica en la Fig. 28 formando la curva de calibración amplitud distancia. La curva se traza utilizando una lámina transparente para ser superpuesta en la pantalla TRC, y de esta manera facilitar la lectura y evaluación de las amplitudes obtenidas en la inspección posterior de las soldaduras. Adicionalmente se han construido curvas por extrapolación para niveles de ganancia del 20% y 50%, según lo indicado por el Código ASME, aplicadas para aceptación y rechazo de una discontinuidad y para registrar en documentos toda reflexión que haya excedido el 50% del nivel de referencia.

2.4.4 Niveles de ganancia de exploración y evaluación.-

Generalmente el nivel de ganancia de referencia para el registro y evaluación de los defectos es el establecido al fijar el primer punto de la curva DAC, con el agujero de máxima respuesta. Se puede dar el caso sin embargo, que el objeto de ensayo tenga una superficie de peores condiciones que el bloque

de calibración, o que se diferencie en la estructura. Para compensar estos efectos se realiza una corrección de Pérdidas por Transferencias, no mayor a 2 dB, que se adicionará al nivel de ganancia establecido por la curva DAC y este será el nuevo nivel de evaluación.

El nivel de ganancia de exploración será por lo menos 6 dB mayor que el de referencia, correspondiente a la ganancia de evaluación.

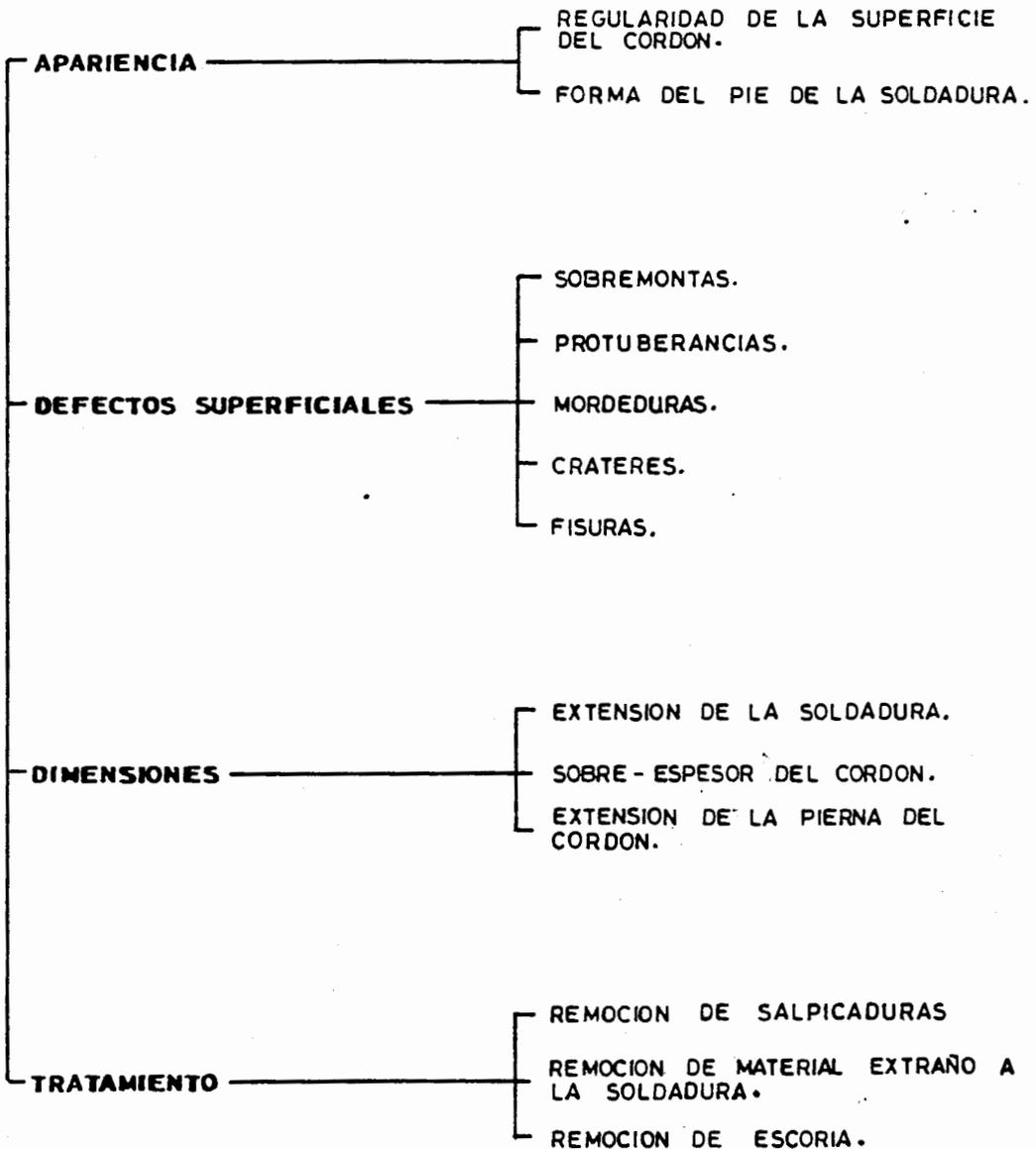
2.5 DESARROLLO DE LA INSPECCION.-

Antes de proceder a la inspección por ultrasonidos de las uniones soldadas en ángulo, conviene tener presente todo cuanto se ha indicado anteriormente en los puntos 1.3.1 y 1.3.3 referentes a la información básica y a las condiciones a ser establecidas antes del ensayo. Además, es de mucha importancia la inspección visual de las uniones soldadas en lo que respecta a la apariencia del cordón, las condiciones de la superficie, los aspectos dimensionales y el tratamiento dado a la misma, conforme lo expuesto en la Tabla XII.

En cuanto a la apariencia del cordón, la presencia

TABLA XII

INSPECCION VISUAL DE LA UNION EN ANGULO SOLDADA. (Ref. 7).



de irregularidades en el tamaño y en la forma de éste, no afecta solamente al aspecto estético de la unión soldada, sino también puede esconder defectos más graves de soldadura que inciden en la buena calidad de la unión. Entre los defectos superficiales que se presentan, se encuentran las sobremontas y mordeduras, cuya orientación e irregularidad pueden producir más de una reflexión al ser incididas por el haz de ultrasonidos. Para el ensayo también es necesario verificar las dimensiones del cordón, así como el tratamiento dado a éste después del proceso de soldadura, donde una remoción de las salpicaduras y escorias de su superficie es recomendable, para así evitar que aparezcan señales provenientes de una mala limpieza del cordón que afecten al momento de la inspección.

El área del metal base a través del cual el sonido viajará en el ensayo con ondas transversales, será completamente inspeccionada con un transductor normal para detectar reflectores tales como laminaciones y otros defectos, los cuales pueden afectar la interpretación de los resultados por obstrucción del camino sónico. La Fig. 29 muestra el tipo de error que puede producir una laminación. Se pueden considerar estos reflectores durante la interpretación

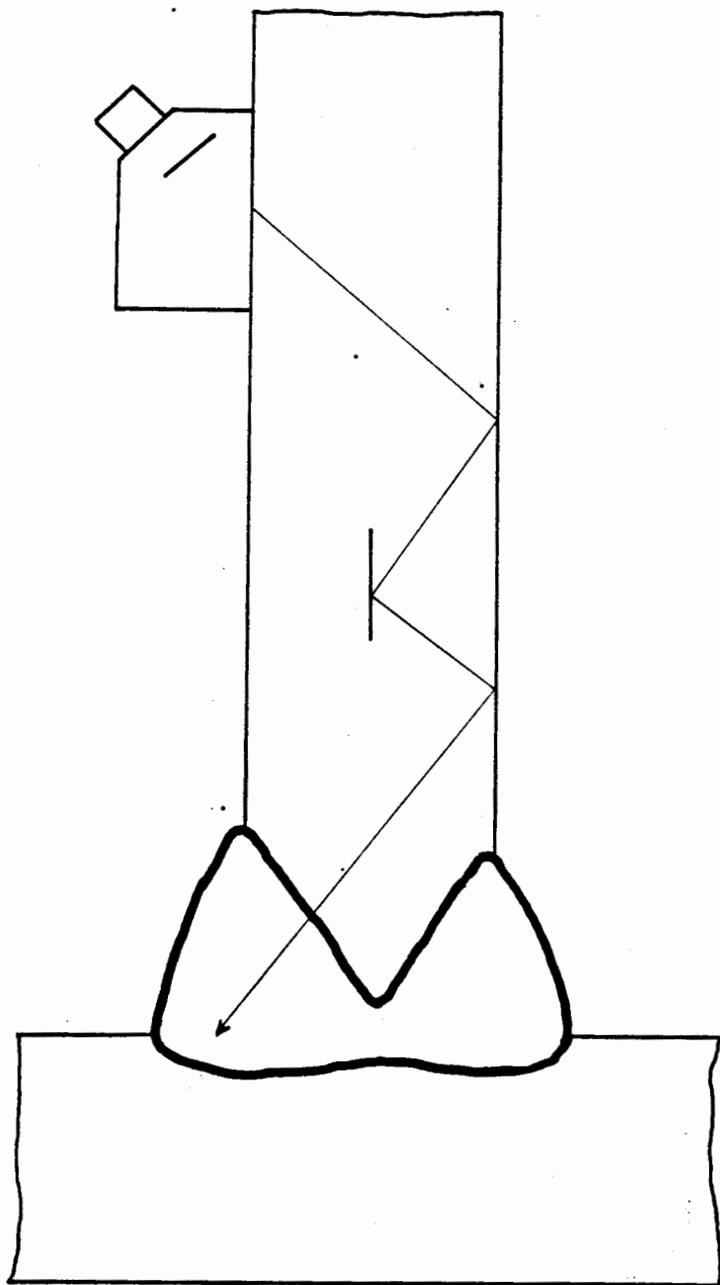


Fig. 29 TIPO DE ERROR QUE PUEDE PRODUCIR UNA LAMINACION EN EL METAL BASE.

de los resultados del ensayo de soldadura, pero su detección no es necesariamente una base para el rechazo del material. Durante este trabajo preliminar es chequeado el espesor del metal base, así como las características de atenuación y la acción del acoplante. En el presente trabajo el chequeo del metal base de las uniones soldadas en ángulo se realizó por contacto, método impulso-eco utilizando un transductor normal de frecuencia 5 MHz y 10 mm de diámetro, de alta sensibilidad para la detección y evaluación de posibles defectos.

2.5.1 Determinación del desplazamiento del transductor.-

Para la inspección de las uniones soldadas en ángulo, como norma general, es necesario proveerse de un dibujo realizado a escala de los elementos soldados, tomando especial atención en la forma del bisel para penetración completa y del perfil de los cordones. Este dibujo ayuda a visualizar la geometría de las uniones soldadas como lo muestra la Fig. 30, que servirá para seleccionar los transductores angulares adecuados para realizar el ensayo, y, de acuerdo con los defectos sospechados se llegará a una solución de compromi

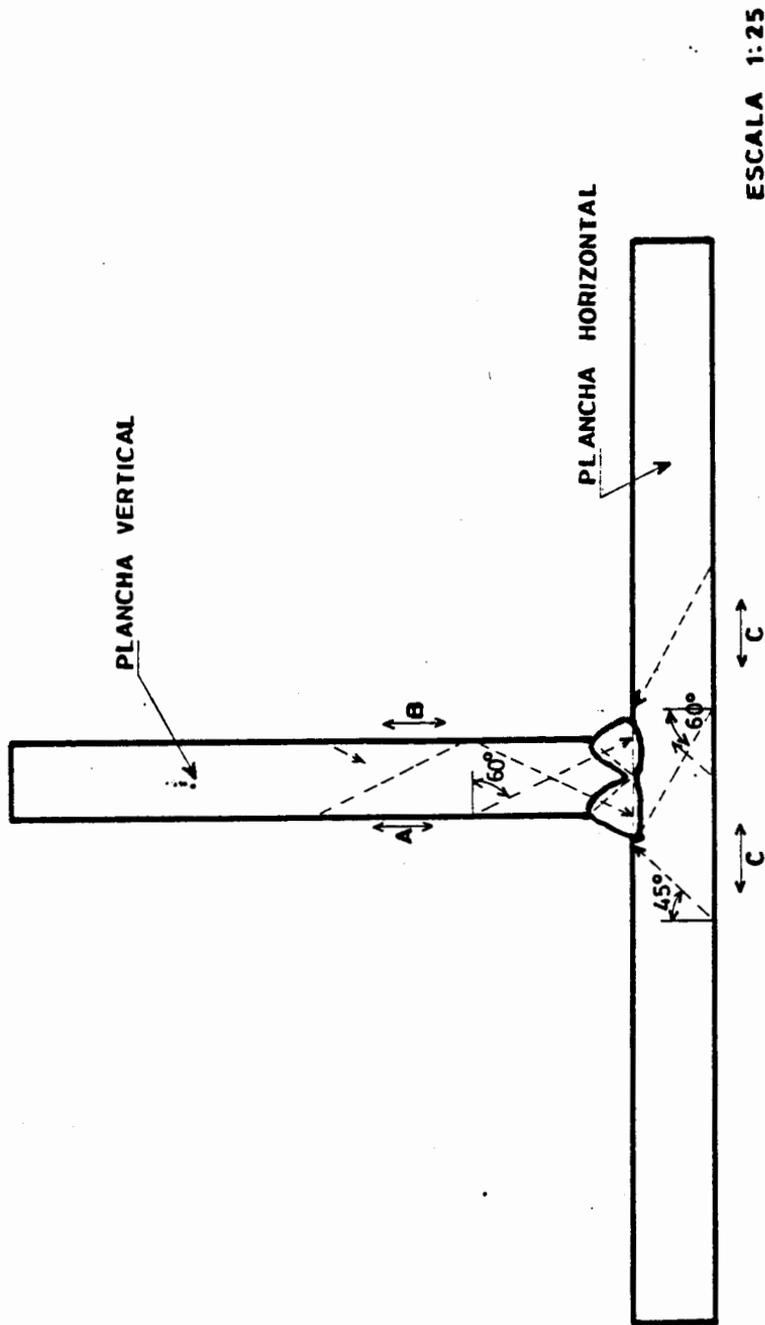


Fig. 30 REPRESENTACION DE LA UNION SOLDADA EN ANGULO PARA DETERMINAR EL DESPLAZAMIENTO DE LOS TRANSDUCTORES A UTILIZAR EN LA INSPECCION.

so conveniente para obtener el máximo de información en el desarrollo del examen. Esto significa que debe existir una solución de compromiso para cumplir con dos condiciones importantes: que la inspección del total de la sección de soldadura debe hacerse con el menor recorrido del haz y que el haz debe encontrar al plano del defecto con un ángulo lo más próximo a la normal.

Luego de haber elegido él o los transductores angulares para la inspección, se procede a dibujar el camino que recorre el haz ultrasónico, desde las diferentes caras donde se colocará el transductor, para de esta forma poder barrer la soldadura en su totalidad (Fig. 30). En esta etapa es donde se determinan los límites entre los que se desplazará el transductor y que serán marcados en el metal base de la unión para el desarrollo de la inspección.

En el presente estudio la inspección ultrasónica de las uniones soldadas se la efectuó desde las caras A y B (plancha vertical) con un transductor de 60° y desde C (plancha hori

en esta cara el de 60° como complemento, ambos de 2 MHz. La ganancia de evaluación establecida para el ensayo con el transductor de 60° fue de 32 dB, mientras que para el de 45° de 22 dB. La base de tiempo fue calibrada en recorrido del haz, o calibración polar, en 175 mm y 125 mm para los transductores de 60° y 45° respectivamente.

El desplazamiento del transductor angular con respecto a la soldadura es hacia adelante y hacia atrás, imprimiendo un ligero cabeceo de modo que realice un movimiento en zigzag. De no hacerlo así se obtendrían reflexiones solamente de aquellos defectos longitudinales paralelos al cordón. El movimiento del transductor en zigzag permite detectar defectos inclinados. La Fig. 31 muestra el mecanismo de barrido del transductor durante el ensayo.

2.5.2 Utilización de métodos de exploración para la localización de defectos.

Si sobre una de las chapas de la unión soldada en ángulo, Fig. 32 a, se coloca el transductor angular, el haz ultrasónico penetrará

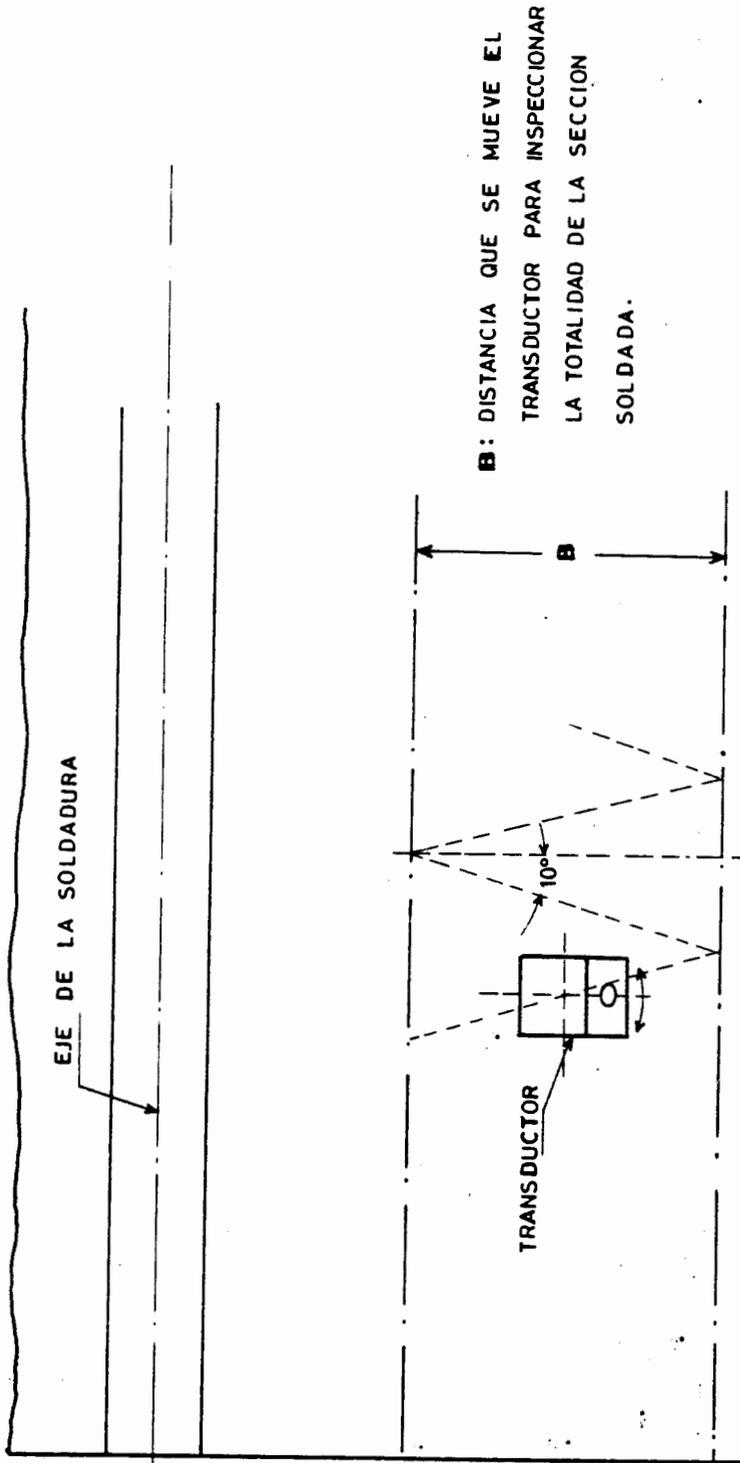


Fig. 31 MECANISMO DE BARRIDO DEL TRANSDUCTOR DURANTE EL ENSAYO. (Ref. 11).

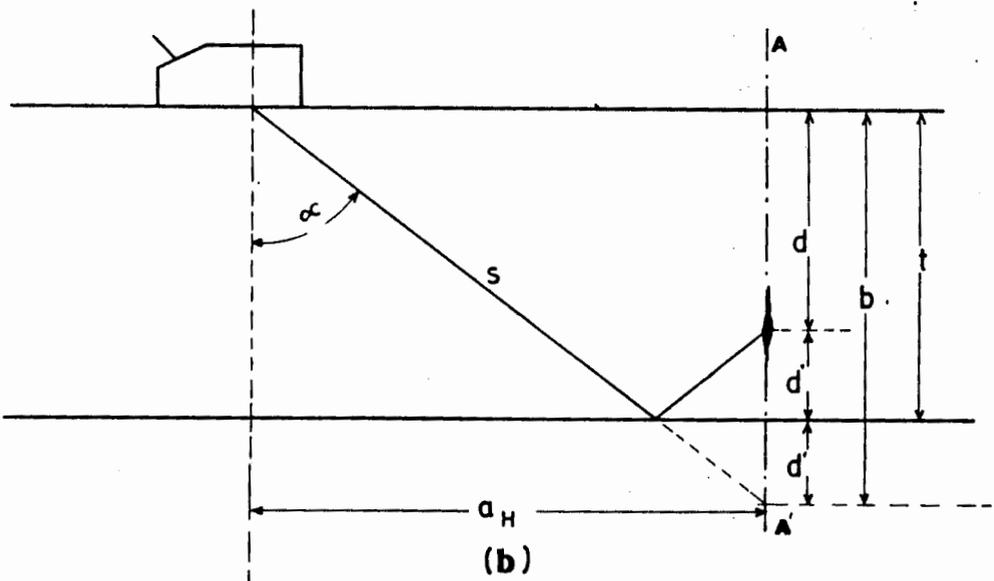
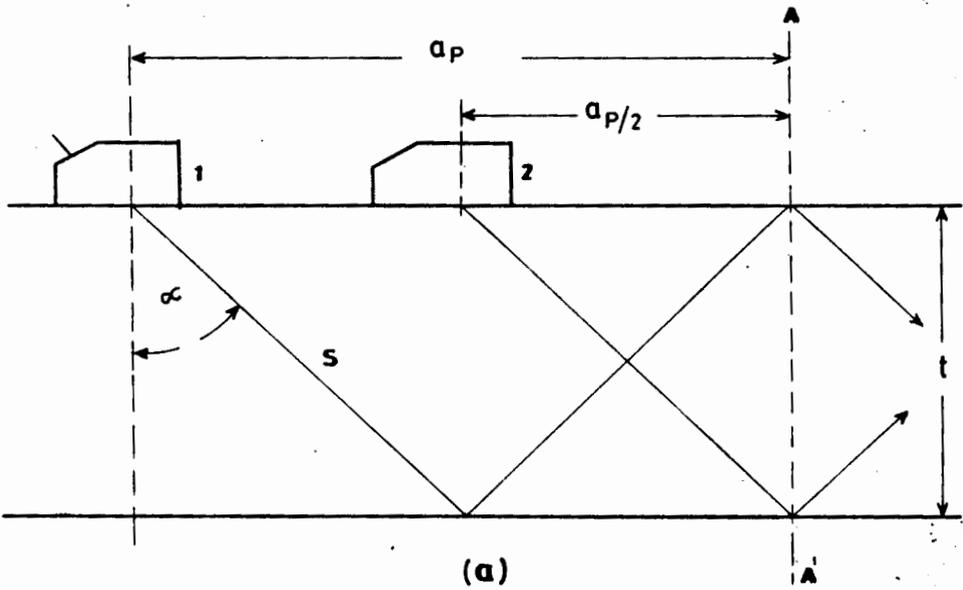


Fig. 32 **METODO TRIGONOMETRICO PARA LA LOCALIZACION DE UN DEFECTO.**

(a) DETERMINACION DE LA DISTANCIA DE PASO.

(b) DETERMINACION DE LA POSICION DE UN DEFECTO.

en la chapa con el ángulo de entrada correspondiente al transductor y llegará a la pared posterior de la chapa, donde se produce una reflexión según la cual el haz llega a la otra superficie de la chapa, donde se vuelve a repetir el fenómeno. De esta forma se produce la trayectoria en zigzag del haz angular en las superficies paralelas de la chapa. El recorrido del haz desde su entrada a la superficie de ensayo hasta su primera reflexión en la misma superficie, se denomina distancia de paso (s_p), cuyo valor en función del espesor (t) de la chapa, viene dado por:

$$s_p = \frac{2t}{\cos\alpha} \quad (23)$$

en donde:

$$\alpha = \text{Ángulo de entrada.}$$

La proyección (a_p) de la distancia de paso sobre la superficie de ensayo será:

$$a_p = 2t \cdot \tan\alpha \quad (24)$$

La determinación correcta de la posición de una discontinuidad es determinada por su distancia (proyección del camino recorrido por el haz desde el transductor hasta la discontinuidad) y su profundidas desde la superfi-

cie. Básicamente, la localización de discontinuidades se realiza por medio de cálculos trigonométricos y utilizando el método gráfico.

En el método por cálculos trigonométricos, la distancia y profundidad pueden ser fácilmente obtenidas a partir del camino recorrido por el haz, ángulo del transductor y espesor de chapa. Cuando un eco es recibido desde una discontinuidad, el transductor es movido hacia adelante y hacia atrás con respecto a la línea de centro de la soldadura hasta conseguir la máxima amplitud. El camino recorrido (s) puede ser obtenido directamente de la pantalla TRC, y por trigonometría (Fig. 32 b) se obtiene la distancia en proyección a la que se halla la discontinuidad:

$$a_H = s \cdot \text{sen} \alpha \quad (25)$$

La profundidad (d) puede ser calculada por la ecuación (Fig. 32 b):

$$d = 2t - s \cdot \text{cos} \alpha \quad (26)$$

La exactitud de la distancia y profundidad

calculadas, depende de la calibración correcta de la base de tiempo, el punto de salida del haz desde el transductor y el ángulo del transductor en ese momento.

Para la localización de discontinuidades mediante el método gráfico, se utilizan cartas de calibración también denominadas localizadores gráficos. Al detectar una discontinuidad, el transductor es movido hacia adelante y hacia atrás con respecto a la línea de centro de la soldadura, hasta obtener en la pantalla la máxima amplitud de la señal del eco. La posición del reflector puede luego ser determinada a partir del camino recorrido leído directamente en la pantalla TRC y la medición de la distancia entre la salida del haz del transductor y una línea de referencia, que en algunos casos suele ser el centro de la soldadura, de tal forma que estas distancias sean representadas gráficamente en la carta de calibración.

Generalmente estos localizadores gráficos, Fig. 33, son regletas cuadrículadas divididas tanto horizontal como verticalmente en pulgadas, en donde se traza el espesor de

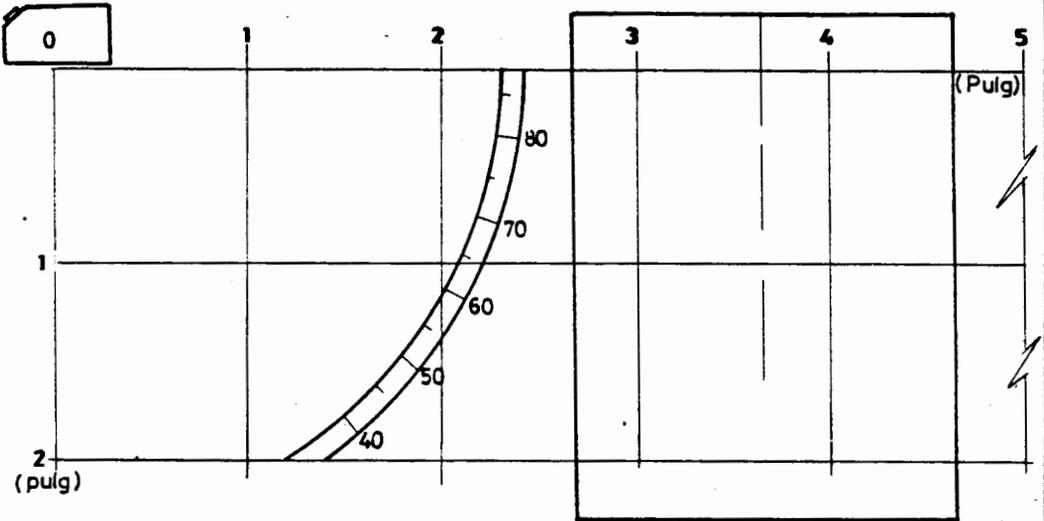


Fig. 33 LOCALIZADOR GRAFICO Y CURSOR TRANSPARENTE.

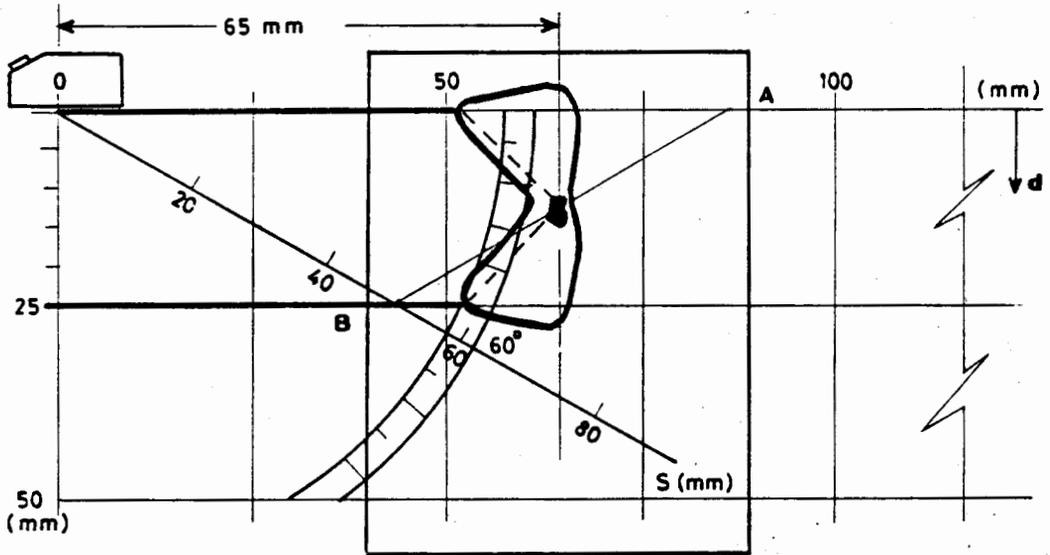


Fig. 34 POSICIONAMIENTO DE UN DEFECTO UTILIZANDO UN LOCALIZADOR GRAFICO.

chapa por donde se desplazará el haz angular. En el extremo superior izquierdo de la regleta está dibujado un transductor que indica con el cero (0) el punto de salida del haz. Sobre la regleta se coloca un cursor transparente, en el cual se dibuja la sección transversal de la soldadura inspeccionada. La función del cursor es que, con su desplazamiento sobre la carta, simula el movimiento del transductor con respecto a la soldadura. La localización de defectos en las soldaduras en el presente estudio, fue realizada utilizando las cartas anteriormente descritas.

Para explicar el procedimiento de ubicación de defectos en un localizador gráfico, imaginemos el caso de la inspección ultrasónica de la unión en ángulo desde la cara A, plancha vertical (Fig. 30), cuyo espesor es de 25 mm. La base de tiempo del equipo de ultrasonidos está calibrada en recorrido del haz, también denominada calibración polar; el transductor angular utilizado es de 60° y 2 MHz de frecuencia. Se procede a marcar el espesor de la chapa (Fig. 34) desde donde se realiza la exploración de la soldadura, mediante una línea trazada sobre la carta.

Luego, desde la marca 0, se dibuja el recorrido del haz angular que intersecta la línea horizontal que representa el espesor de la chapa (B) y se refleja con el mismo ángulo hasta el punto (A) donde termina el recorrido del haz.

En el cursor transparente se dibuja la sección transversal de la soldadura, cuyos datos referentes a su dimensión y forma se toman directamente de la unión soldada. Se asume que esta soldadura contiene una falta de penetración, tal como se observa en la Fig. 34.

Al realizar la inspección se obtendría la siguiente información: En la pantalla TRC aparecería una señal en el punto correspondiente a una distancia recorrida por el haz ultrasónico de 75 mm. Mientras que, la distancia medida desde el punto de emisión del haz hasta la superficie de la plancha horizontal sería de 65 mm. Esta superficie se toma como línea de referencia en las uniones soldadas en ángulo. Llevando estos valores al localizador gráfico se observa que el haz angular intersecta la raíz de la soldadura, lo cual

confirma la falta de penetración a una profundidad de aproximadamente 12 mm.

2.5.3 Identificación de defectos.-

La detección de un defecto que da lugar a la indicación de su eco en la pantalla TRC, no es información suficiente para la identificación del mismo. Es preciso un cuidadoso análisis de la señal ultrasónica para tratar de interpretarla y llegar a la identificación del defecto.

Además de la orientación (respecto al haz ultrasónico), tamaño y posición del defecto, su morfología es otra característica que ayuda al momento de la interpretación. Al utilizar transductores angulares es posible incidir el defecto desde diversos puntos o ángulos, lo que permite mayor precisión en la determinación de su morfología. Esto significa aplicar al transductor una serie de movimientos controlados, como se ilustra en la Fig. 35, de tal manera que la forma de la curva envolvente de los picos de las indicaciones móviles obtenidas al mover el transductor, puede

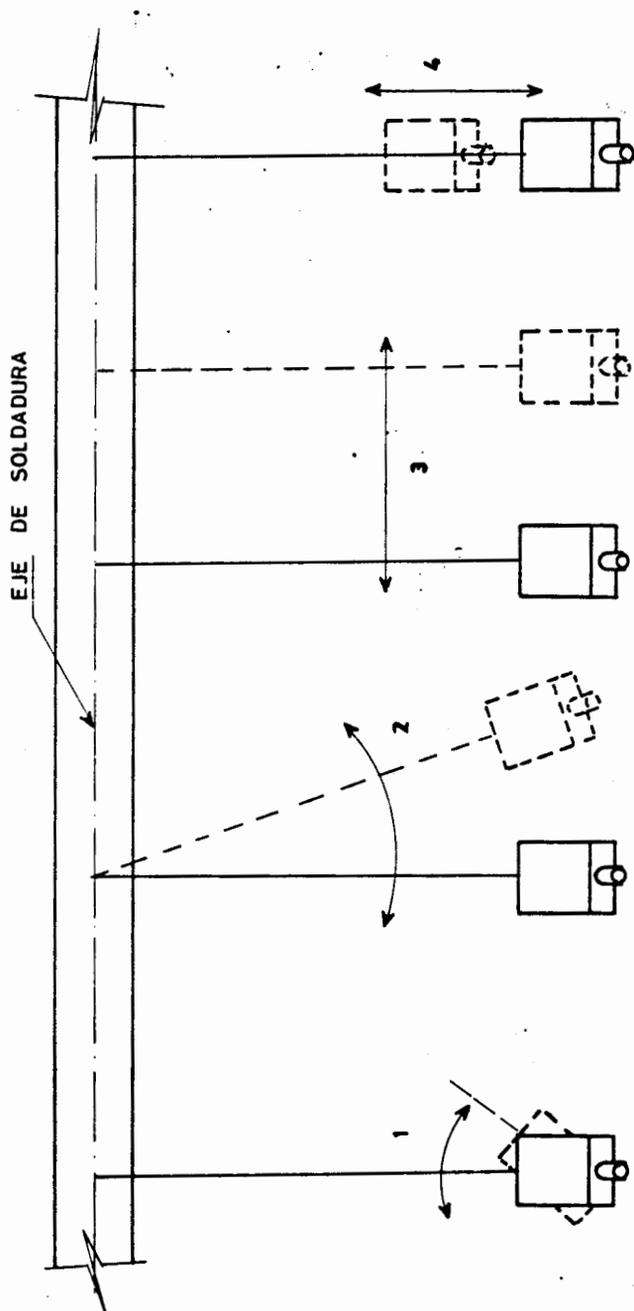


Fig. 35 MOVIMIENTOS DEL TRANSDUCTOR PARA DETERMINAR LA MORFOLOGIA DEL DEFECTO. (REF. 2)

1. ROTACIONAL
2. ORBITAL
3. LATERAL
4. TRANSVERSAL

proporcionar una idea acerca de la morfología del reflector. En las Figs. 36, 37, 38, 39 se muestran situaciones generales (Ref. 7, 10) aplicables a los ensayos con transductores angulares, que pueden ayudar a clasificar el defecto dentro de alguna de las tres formas simples: plana (irregular, especular), cilíndrica y esférica. El análisis de la defectología presentado por estas Figuras se sintetiza en una columna de observaciones que explica brevemente el comportamiento de las indicaciones del eco ante los movimientos del transductor, que facilita aún más este análisis para la determinación de la identidad de un defecto.

El comportamiento de la señal ultrasónica al realizar cada uno de los movimientos descritos, fue comprobado en el presente trabajo al realizar la inspección ultrasónica de las uniones soldadas en ángulo. La distinción entre defectos que presentaron igual morfología se la realizó utilizando datos obtenidos previamente en el ensayo relativos a la orientación y posición del defecto, además de disponer de la información completa respecto a la elaboración de las muestras inspeccionadas.

DEFECTO DE FORMA PLANA IRREGULAR

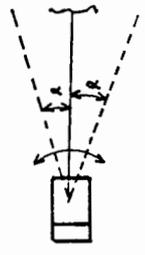
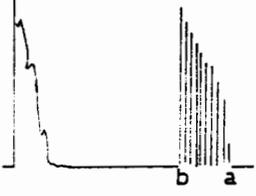
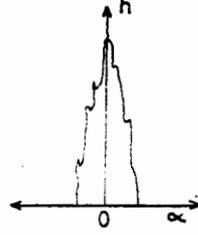
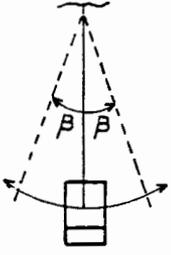
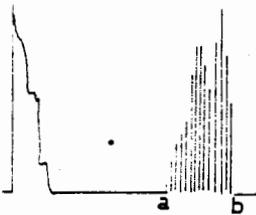
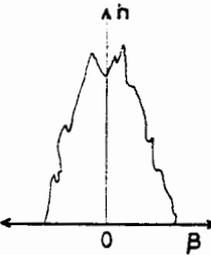
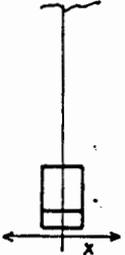
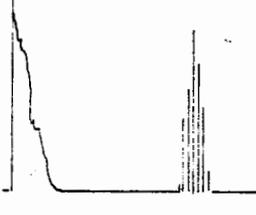
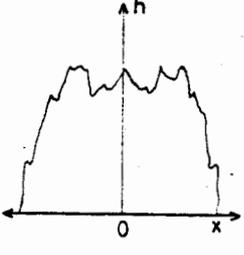
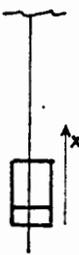
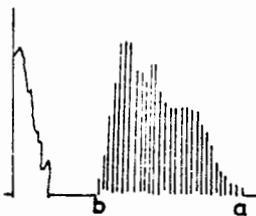
Movimiento del transductor	Variación de la indicación del eco.	Envolvente de la indicación (h - altura del eco)	OBSERVACIONES
 <p style="text-align: center;">Rotación</p>	 <p style="text-align: center;">transductor: $\alpha \rightarrow 0 \rightarrow \alpha$ eco: $a \rightarrow b \rightarrow a$</p>		<p>Para defectos en forma de grietas, la envolvente tiene una cierta anchura debido a que el reflector no es exactamente plano.</p>
 <p style="text-align: center;">Orbital</p>	 <p style="text-align: center;">transductor: $\beta \rightarrow 0 \rightarrow \beta$ eco: $a \rightarrow b \rightarrow a$</p>		<p>Envolvente de forma sensiblemente triangular escarpada. Puede presentar una depresión en la parte superior.</p>
 <p style="text-align: center;">Lateral</p>	 <p style="text-align: center;">muy pequeño desplazamiento de la indicación del eco.</p>		<p>Las indicaciones de los ecos sucesivos crecen rápidamente hasta un máximo. La distancia X depende de la longitud del defecto.</p> <p>X aumenta (en general) con la distancia transductor-defecto y con el nivel de sensibilidad.</p>
 <p style="text-align: center;">Transversal</p>	 <p style="text-align: center;">Transductor hacia el defecto eco: $a \rightarrow b$</p>		<p>Cuando el transductor avanza hacia el defecto la indicación del eco crece rápidamente al principio.</p> <p>A continuación la caída es rápida.</p> <p>X depende de la profundidad del defecto y del ángulo del transductor.</p>

FIG. 36 Análisis de un defecto de morfología plana irregular utilizando un transductor angular (Ref. 10)

DEFECTO DE FORMA PLANA ESPECULAR

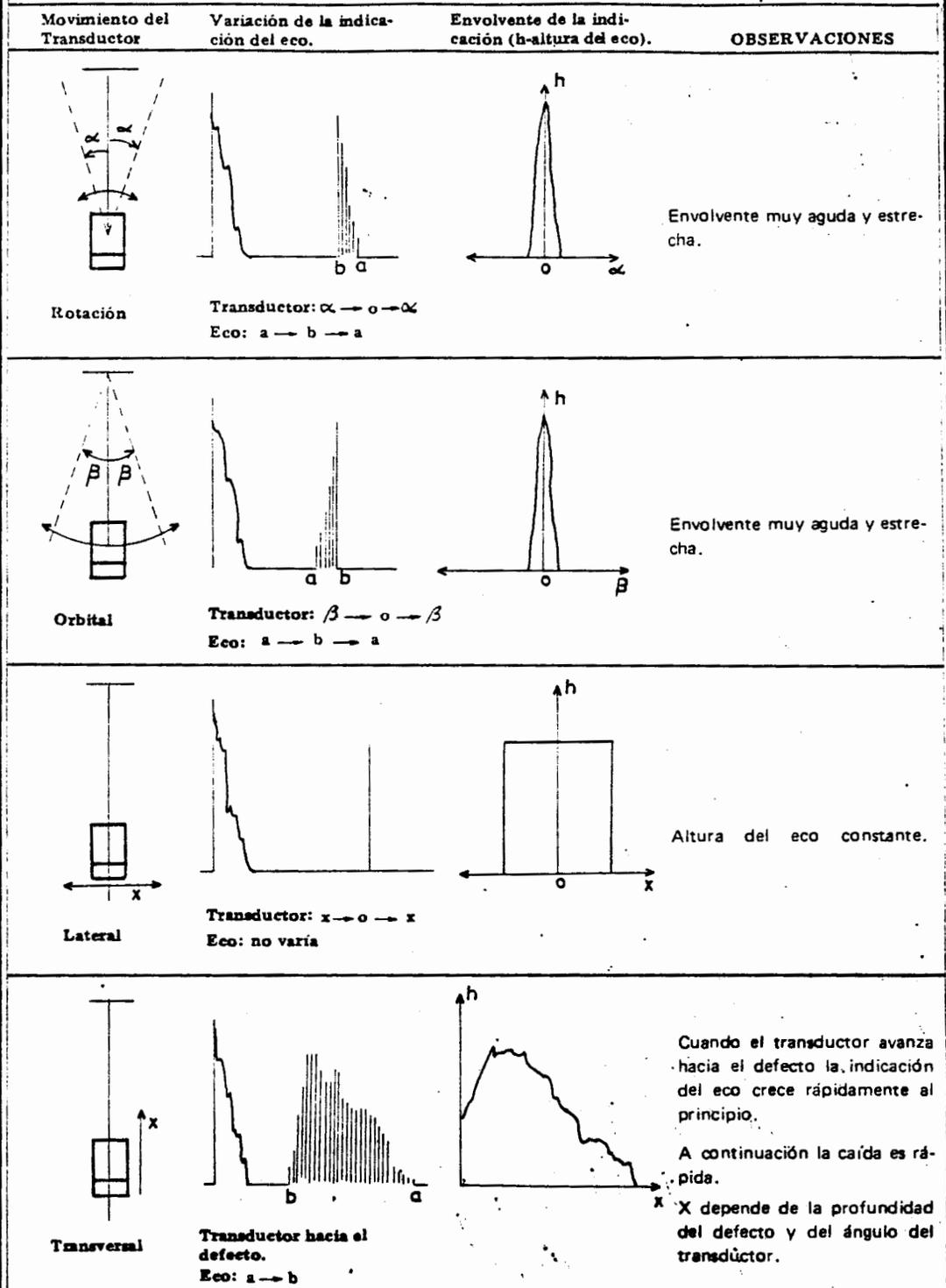


FIG. 37 Análisis de un defecto de morfología plana especular utilizando un transductor angular (Ref. 10)

DEFECTO DE FORMA CILINDRICA

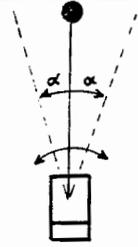
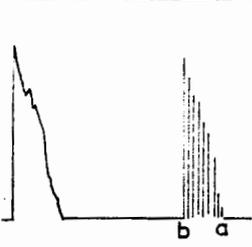
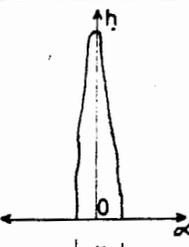
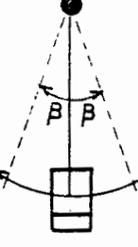
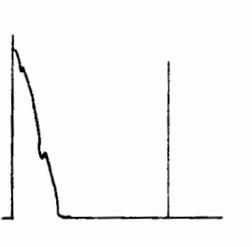
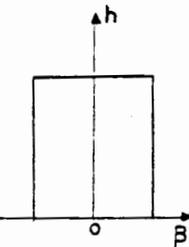
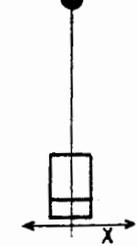
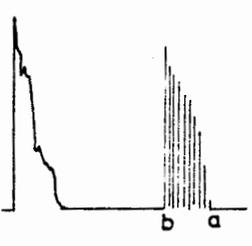
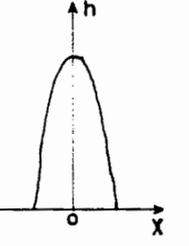
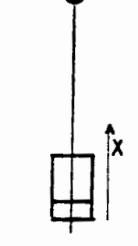
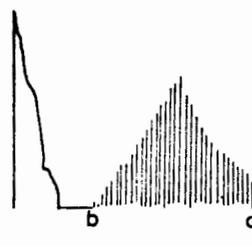
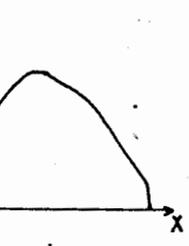
Movimiento del transductor	Variación de la indicación del eco.	Envolvente de la indicación (h- altura del eco)	OBSERVACIONES
 <p data-bbox="131 652 219 671">Rotación</p>	 <p data-bbox="307 638 551 691">Transductor: $\alpha \rightarrow 0 \rightarrow \alpha$ eco: $a \rightarrow b \rightarrow a$</p>	 <p data-bbox="849 512 1149 632">Envolvente muy aguda y estrecha. X es función del diámetro del defecto.</p>	
 <p data-bbox="131 990 194 1009">Orbital</p>	 <p data-bbox="307 976 559 1029">Transductor: $\beta \rightarrow 0 \rightarrow \beta$ eco: no varía</p>	 <p data-bbox="849 930 1149 1009">Altura del eco constante si el defecto tiene una forma regular.</p>	
 <p data-bbox="131 1353 206 1373">Lateral</p>	 <p data-bbox="307 1339 589 1393">Transductor: $x \rightarrow 0 \rightarrow x$ eco: $a \rightarrow b \rightarrow a$</p>	 <p data-bbox="849 1268 1149 1347">Envolvente similar a 1 pero más ancha y redondeada en la parte superior.</p>	
 <p data-bbox="131 1705 231 1725">Transversal</p>	 <p data-bbox="307 1705 584 1759">Transductor hacia el defecto eco: $a \rightarrow b$</p>	 <p data-bbox="849 1512 1149 1691">Cuando el transductor avanza hacia el defecto, la indicación del eco crece rápidamente al principio. A continuación la caída es rápida.</p>	

FIG. 38 Análisis de un defecto de morfología cilíndrica utilizando un transductor angular (Ref. 10)

DEFECTO DE FORMA ESFERICA

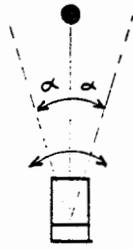
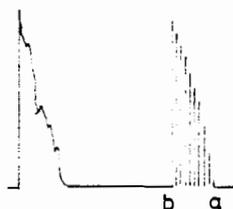
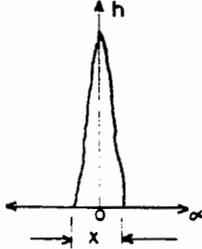
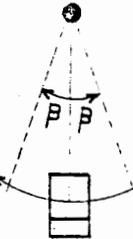
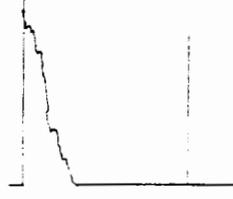
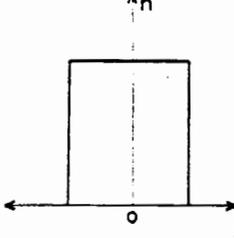
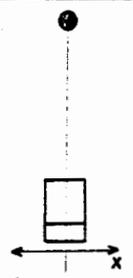
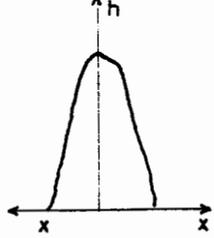
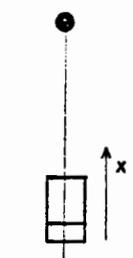
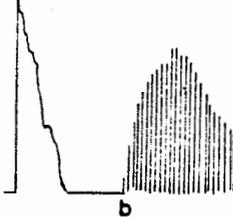
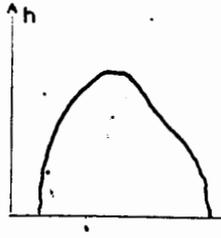
Movimiento del transductor	Variación de la indicación del eco.	Envolvente de la indicación (h- altura del eco).	OBSERVACIONES
 <p>Rotación</p>	 <p>Transductor: $\alpha \rightarrow 0 \rightarrow \alpha$ eco: $a \rightarrow b \rightarrow a$</p>		Las mismas observaciones que para el defecto de morfología cilíndrica.
 <p>Orbital</p>	 <p>Transductor: $\beta \rightarrow 0 \rightarrow \beta$ eco: no varía</p>		Idem.
 <p>Lateral</p>	 <p>Transductor: $x \rightarrow 0 \rightarrow x$ eco: $a \rightarrow b \rightarrow a$</p>		Idem.
 <p>Transversal</p>	 <p>Transductor hacia el defecto. Eco: $a \rightarrow b$</p>		Idem. Envolvente de menor anchura (en general).

FIG. 39 Análisis de un defecto de morfología esférica utilizando un transductor angular (Ref. 10)

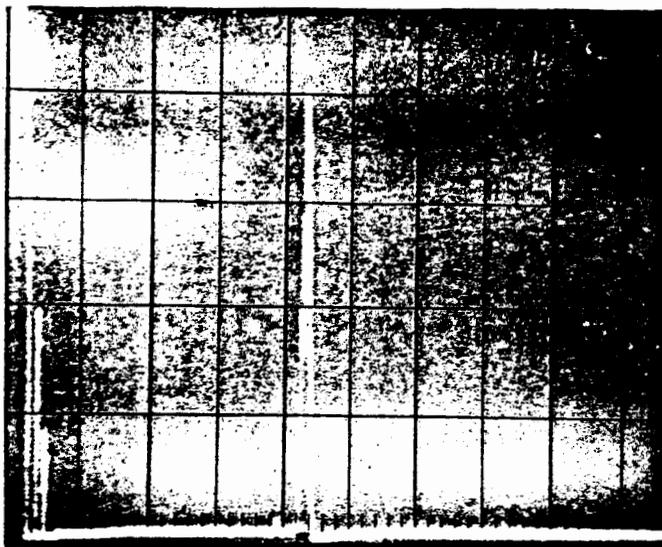
CAPITULO III

DISCUSION DE RESULTADOS

El análisis de la información obtenida, se hará en base a la defectología hallada en las uniones, para cuyo caso se presentan fotografías correspondientes a los oscilogramas de pantalla en combinación con dibujos de localizadores gráficos, donde muestran la posición del defecto detectado con respecto al transductor.

Los primeros oscilogramas que se presentan corresponden a la inspección de las uniones soldadas en ángulo desde las caras A y B (plancha vertical) con el transductor de 60° . Para este caso la pantalla está calibrada para un recorrido del haz (s) de 175 mm. Usando el localizador gráfico, (D) es la distancia medida desde el punto de emisión del haz en el transductor hasta la cara frontal de la chapa horizontal que forma la unión.

El oscilograma de la Fig. 40 corresponde a la inspección de la unión N° 1 y muestra una señal a una distancia (s) igual a 74 mm, cuando el transductor se encuentra a una distancia (D) igual a 64 mm. Al aplicar al transductor angular la serie de movimientos básicos ilustrados en la



(1 div = 3,5 mm)

S = 74 mm

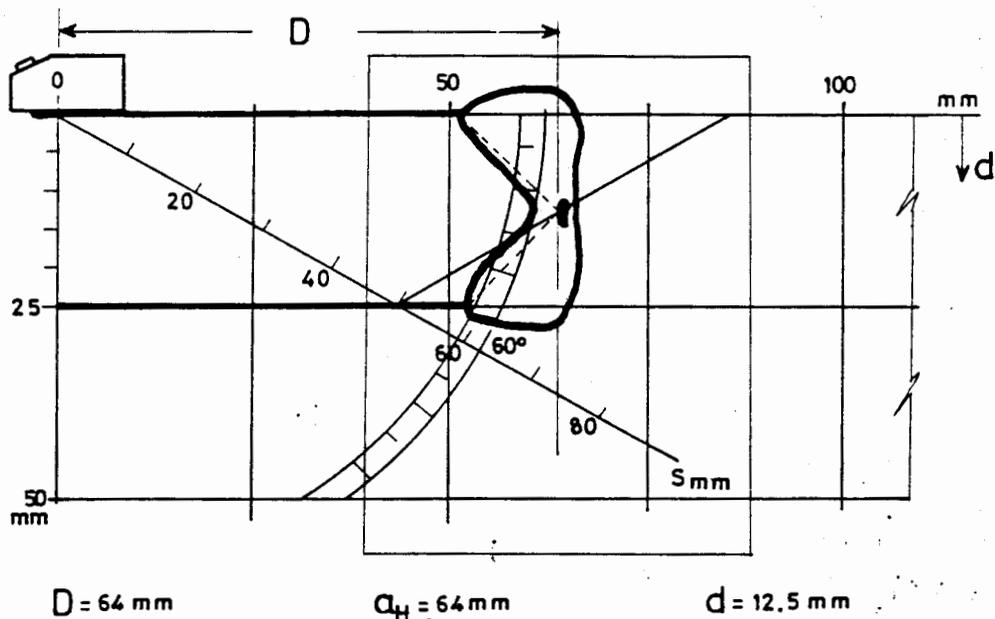
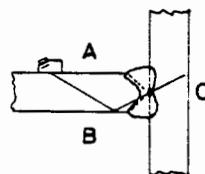
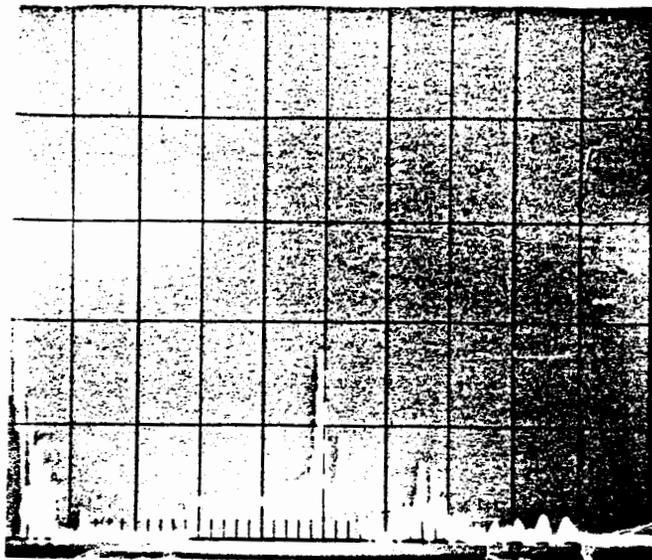


Fig. = 40 **OSCILOGRAMA Y LOCALIZADOR GRAFICO CORRESPONDIENTES A LA DETERMINACION DE UNA FALTA DE PENETRACION EN LA UNION SOLDADA EN ANGULO. Nº 1.**

Fig. 35 se llega a la conclusión de que se trata de un defecto de morfología plana. Utilizando los parámetros (s) y (D) en la carta de localización, se obtiene la posición de la discontinuidad. La adición de toda esta información, permite identificar el defecto como una falta de penetración, cuya profundidad (d) con respecto a la superficie de ensayo es aproximadamente igual a 12.5 mm. La falta de penetración es un defecto inaceptable, cualquiera sea su longitud y amplitud de señal, según las normas de aceptación y rechazo del Código ASME-Secc. VIII, Div. 2-ed. 80.

El oscilograma de la Fig. 41 de la unión N° 2, presenta dos señales que se levantan sobre la compuerta. (El uso de la compuerta en la pantalla TRC es para fijar la zona de inspección de la soldadura, que es lo que interesa). La primera señal aparece a una distancia de recorrido (s_1) igual a 84 mm y la segunda a (s_2) igual a 91 mm, cuando el transductor se encuentra a una distancia (D) igual a 79 mm. Los defectos detectados se hallan a una distancia en proyección (a_{H1}) igual a 73 mm y (a_{H2}) igual a 79 mm. Las dos señales presentan un comportamiento similar; al imprimir al transductor los movimientos básicos en especial el de rotación desaparecen, dejando una envolvente propia de un defecto lineal. Al construir la carta de localización se tiene que el primer defecto es una fal



(1 div = 3.5 mm)

$S_1 = 84 \text{ mm}$

$S_2 = 91 \text{ mm}$

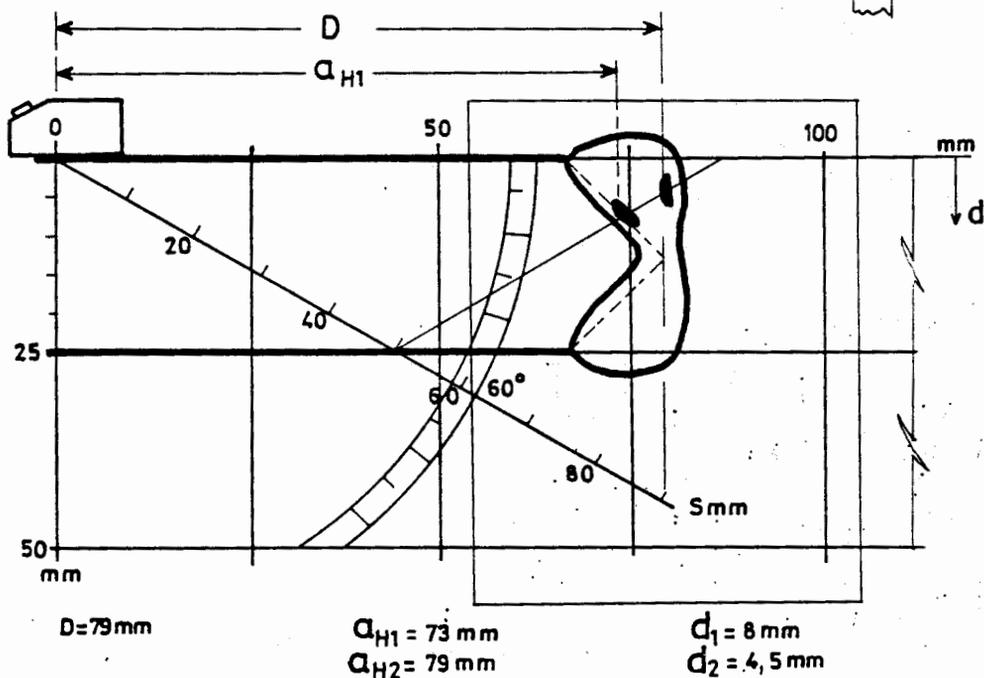
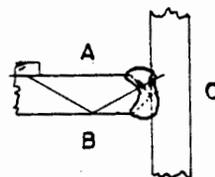
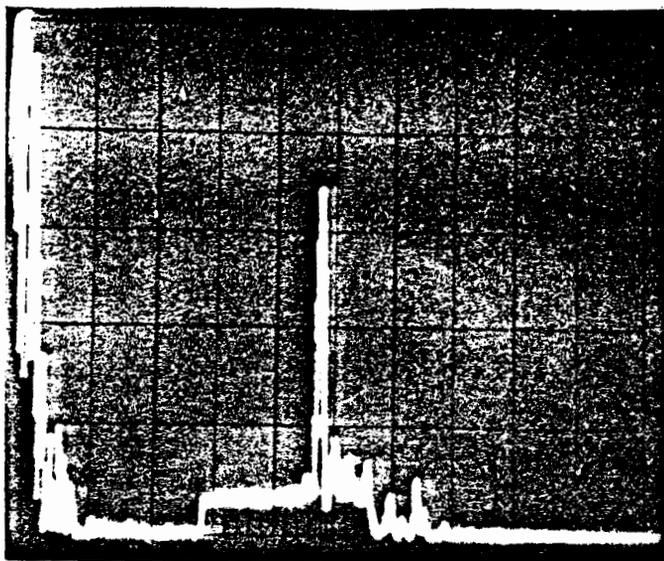


Fig. 41 OSCILOGRAMA Y LOCALIZADOR GRAFICO CORRESPONDIENTES A LA DETERMINACION DE FALTA DE FUSION EN LA UNION SOLDADA EN ANGULO. N° 2

ta de fusión en el bisel a una profundidad (d_1) igual a 8 mm, mientras que el segundo es una falta de fusión en la plancha horizontal de la unión con (d_2) igual a 4.5 mm. Para el Código ASME-Secc. VIII, Div. 2-ed. 80, la falta de fusión tal como la falta de penetración, es una discontinuidad inaceptable cualquiera sea su longitud y amplitud de señal.

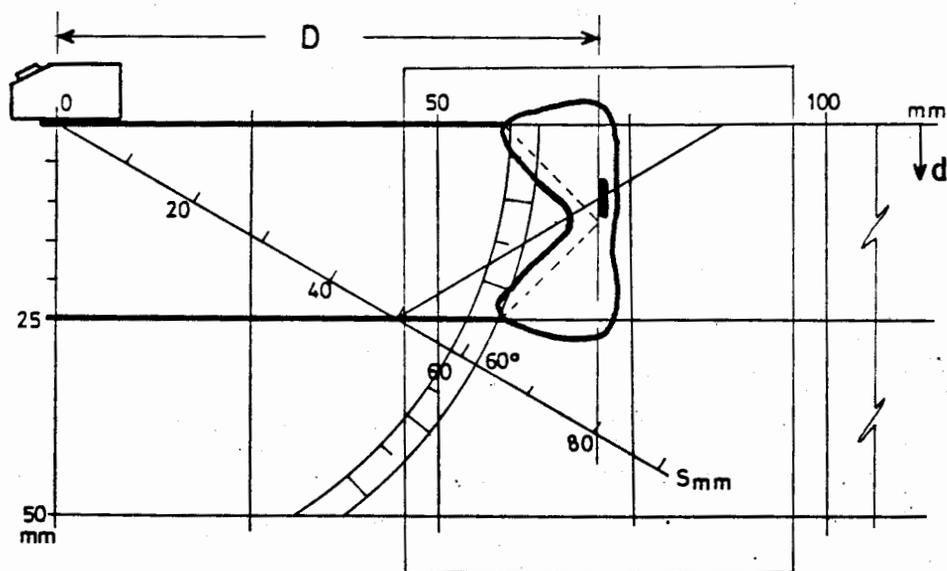
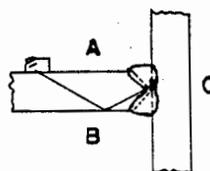
En la Fig. 42 el oscilograma resultante de la inspección de la unión N° 2, presenta una señal producto de la reflexión del haz a una distancia (s) igual a 87.5 mm cuando (D) es igual 81 mm. En el localizador gráfico se obtiene la posición del defecto a una distancia (a_H) igual a 75.8 mm y profundidad (d) igual a 6.3 mm. El comportamiento de la señal ante los movimientos controlados del transductor, es propio de un defecto de morfología plana, información que combinada con su posición se presenta como una falta de fusión en el bisel.

La señal observada en el oscilograma de la Fig. 43 (unión N° 3) se presenta a una distancia (s) igual a 81 mm, cuando (D) es igual a 70 mm. El comportamiento de la señal ante los movimientos aplicados al transductor muestra que la discontinuidad es de forma plana. Al localizar el defecto en la carta, se lo encuentra a una distancia (a_H) igual a 70.2 mm y a una profundidad (d) igual a 9.5 mm. El defecto corresponde a una falta de fusión cercana a la raíz.



(1 div = 3.5 mm)

S = 81 mm



D = 70 mm

$\alpha_H = 70.2$ mm

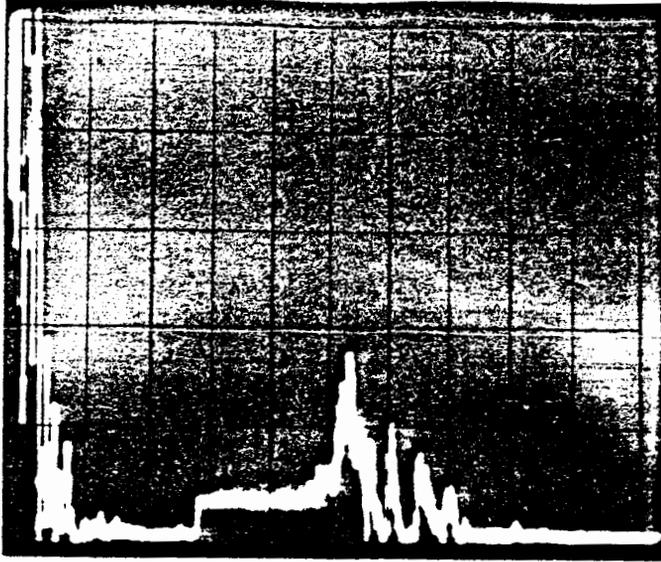
d = 9.5 mm

Fig 43 OSCILOGRAMA Y LOCALIZADOR GRAFICO CORRES-PONDIENTES A LA DETERMINACION DE UNA FALTA DE FUSION EN LA CHAPA DE LA UNION SOLDADA EN ANGULO Nº 3

El oscilograma de la Fig. 44 correspondiente a la unión Nº 4 muestra una señal de forma irregular o ramificada producida a una distancia (s) igual a 91 mm, cuando el transductor se encuentra a una distancia (D) igual a 83 mm. En el localizador gráfico se observa que el defecto se halla a una distancia (a_H) aproximadamente igual a 79 mm y profundidad (d) igual a 4.5 mm. Al orbitar el transductor en torno al defecto, la altura de la señal apenas varía y lo único que cambia es la forma y posición de las ramificaciones, comportamiento propio de las inclusiones de escoria. El Código ASME-Secc. VIII, Div. 2-ed. 80, fija la dimensión de aceptabilidad de este defecto cuando la señal sobrepasa el 20% del nivel de referencia en la curva DAC.

Los oscilogramas que se presentan a continuación corresponden a la inspección de las soldaduras desde la cara C, plancha horizontal, utilizando un transductor de 45°. En este caso la pantalla está calibrada para un recorrido del haz (s) de 125 mm. Para encontrar la posición del defecto en la carta de localización, la distancia (D) es medida desde el punto de emisión del haz en el transductor hasta la proyección de la arista del bisel en C.

En la Fig. 45 correspondiente a la inspección de la unión Nº 3, el oscilograma muestra una señal producida en (s)



(1 div = 3.5 mm)
 S = 91 mm

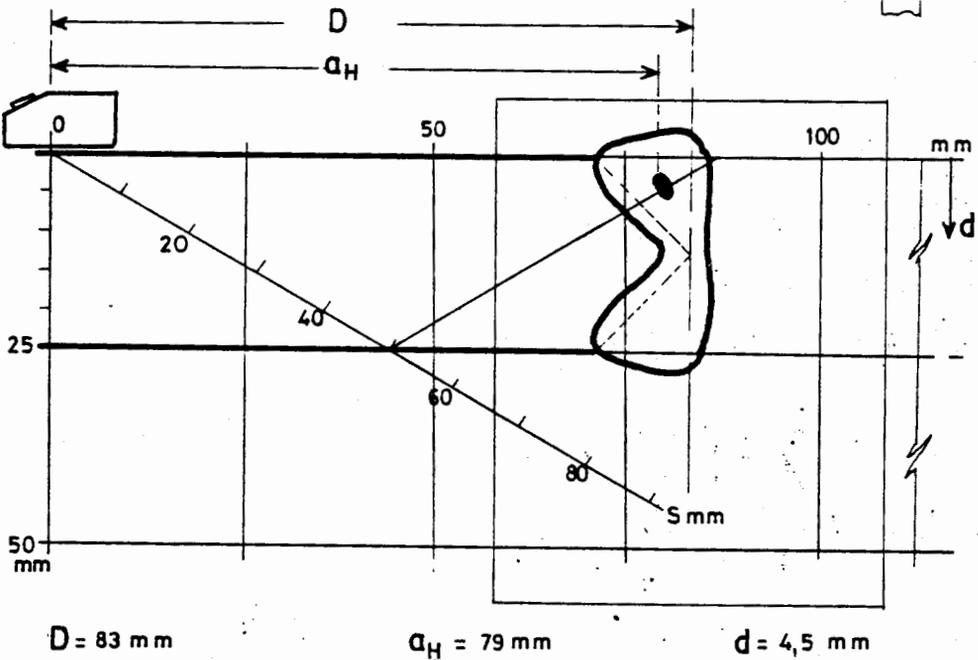
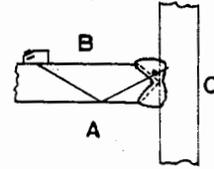
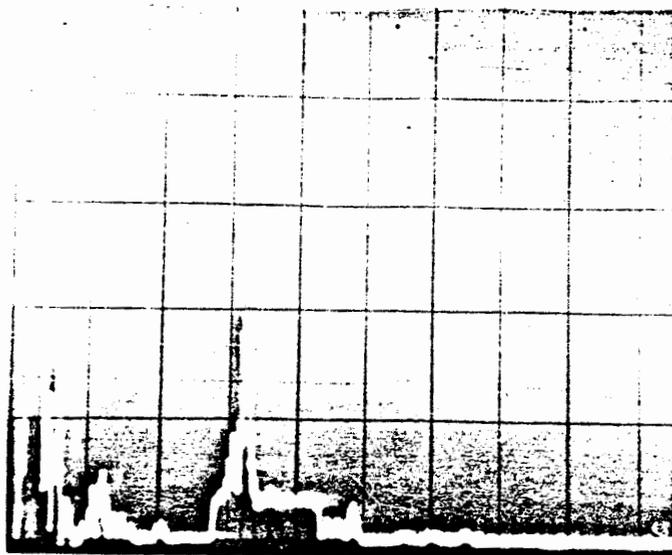
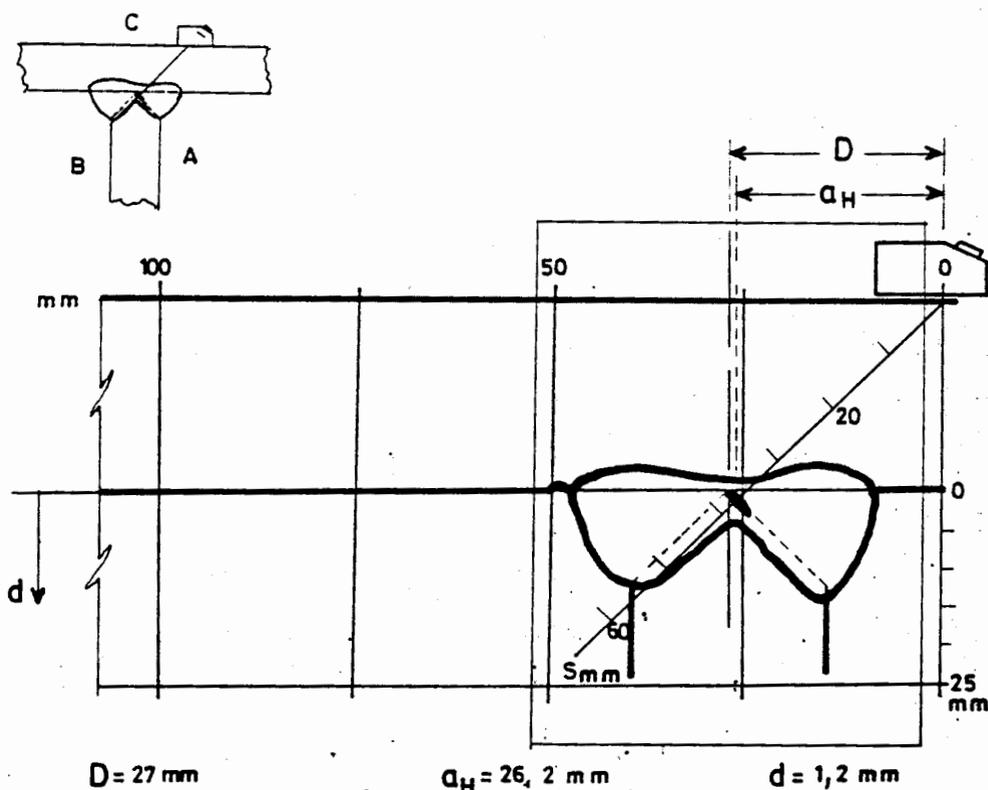


Fig. 44 OSCÍLOGRAMA Y LOCALIZADOR GRAFICO CORRESPONDIENTES A LA DETERMINACION DE UNA INCLUSION DE ESCORIA EN LA UNION SOLDADA EN ANGULO. Nº 4.



(1 div = 2,5 mm)

S = 37 mm



D = 27 mm

$a_H = 26,2$ mm

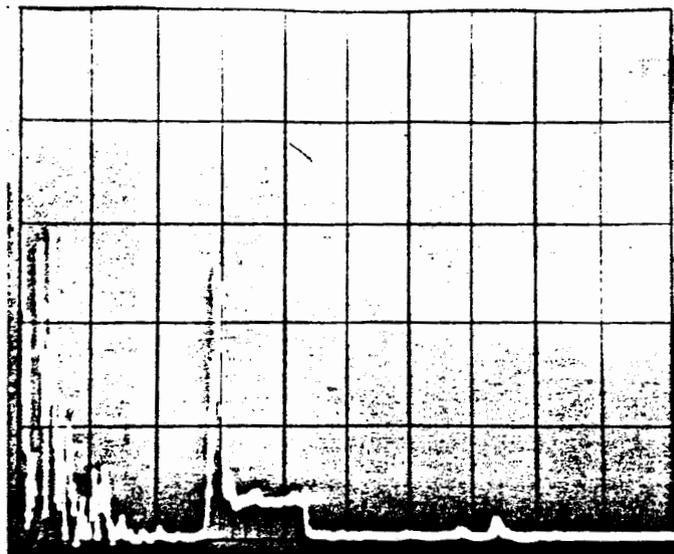
d = 1,2 mm

Fig. 45 OSCILOGRAMA Y LOCALIZADOR GRAFICO CORRESPONDIENTES A LA DETERMINACION DE UNA FALTA DE FUSION EN LA UNION SOLDADA EN ANGULO. N° 3.

aproximadamente igual a 37 mm cuando (D) es igual a 27 mm. Trabajando con la carta de localización, el defecto se presenta a una distancia (a_H) igual a 26.2 mm y a una profundidad (d) igual a 1.2 mm. El comportamiento de la señal ante los movimientos aplicados al transductor es el de un defecto de morfología plana, información final que permite afirmar que se trata de una falta de fusión cercana a la raíz.

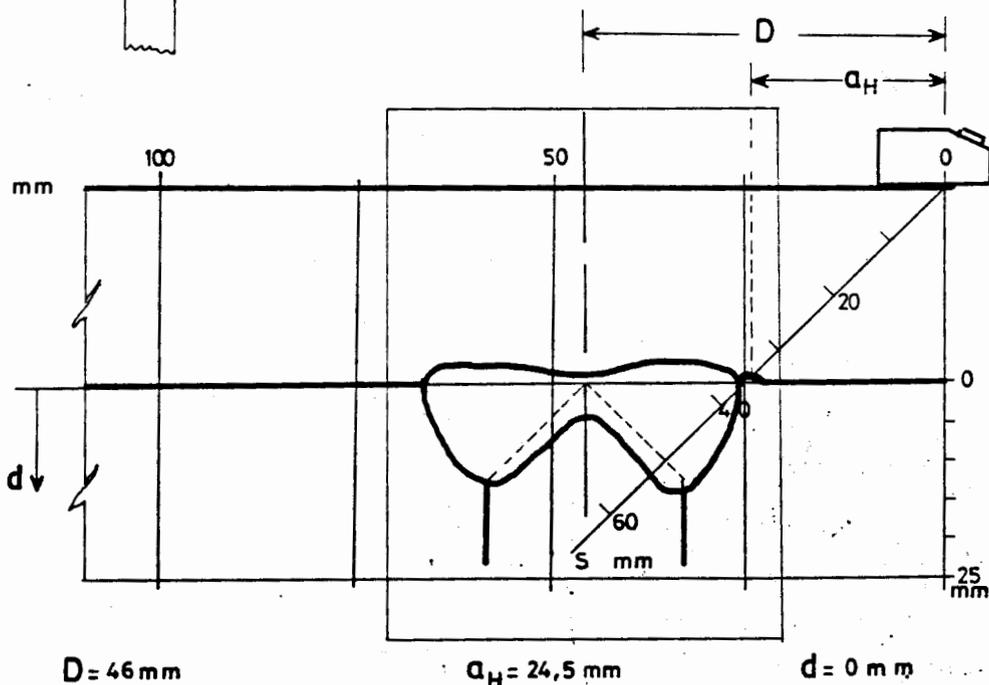
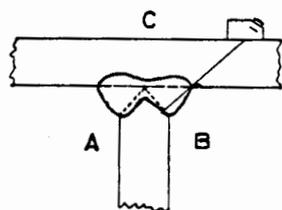
El oscilograma mostrado en la Fig. 46 (unión N° 3) presenta una señal en la pantalla a una distancia de recorrido del haz (s) igual a 35 mm cuando el transductor se encuentra a una distancia (D) igual a 46 mm. El localizador gráfico posiciona el defecto al pie de la soldadura a una distancia a_H igual a 24.5 mm. Al ser inspeccionada visualmente dicha zona muestra una falta de fusión en los flancos, por lo que se podría considerar al defecto también como una mordedura al hallárselo superficialmente.

En la Fig. 47 (unión N° 4) el oscilograma presenta tres señales a distancias (s) igual a 35, 45 y 50 mm, cuando el transductor se encuentra a una distancia (D) igual a 18 mm. En esta imagen se trata de visualizar una señal producto de la reflexión del haz en el excesivo sobre-espesor de la soldadura, por lo que se ha desplazado el transductor de tal forma que la altura de la señal llegue a un máximo valor para proceder a su interpretación. Al



(1 div = 2,5 mm)

S = 35 mm



D = 46 mm

$a_H = 24,5$ mm

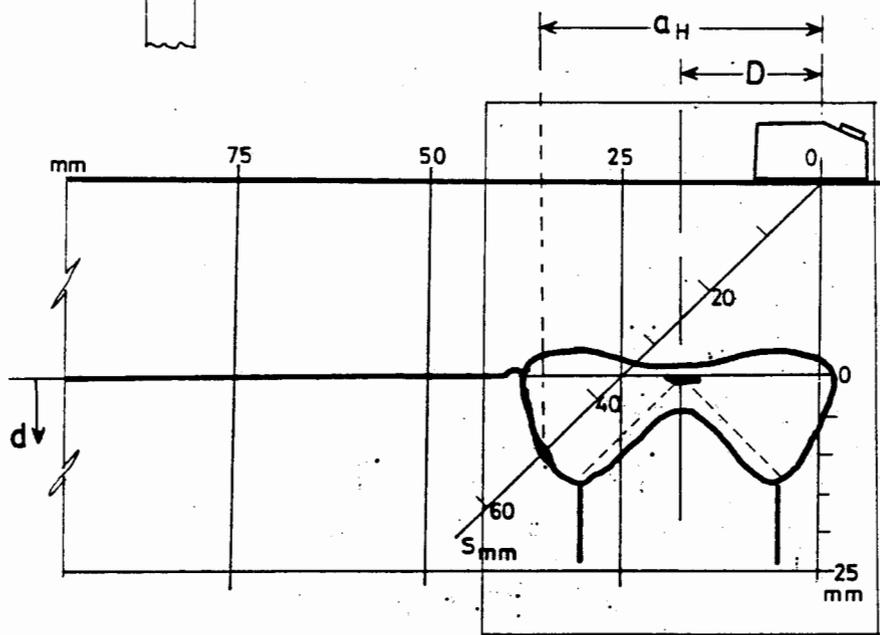
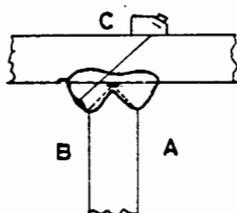
d = 0 mm

Fig. 46 OSCILOGRAMA Y LOCALIZADOR GRAFICO CORRES-
PONDIENTES A LA DETERMINACION DE UNA
MORDEDURA EN LA UNION SOLDADA EN ANGULO: N° 3.



(1 div = 2.5 mm)

S = 50 mm



D = 18 mm

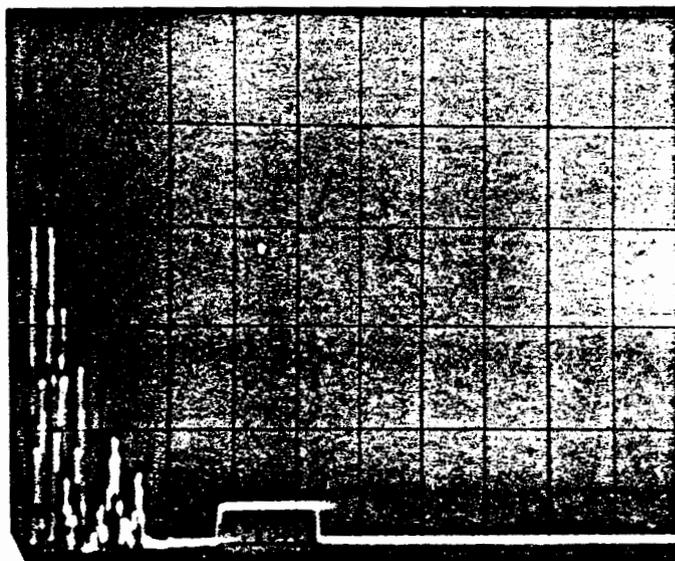
$a_H = 35,3$ mm

d = 0 mm

Fig. 47. OSCILOGRAMA Y LOCALIZADOR GRAFICO CORRESPONDIENTES A LA DETERMINACION DE UN SOBRE-ESPESOR EXCESIVO EN LA UNION SOLDADA EN ANGULO. N° 4.

hacer esto las otras dos señales no llegan a su máxima amplitud. Para trabajar en la carta de localización solamente se tomará el valor de recorrido del haz (s) igual a 50 mm. y la distancia D igual a 18 mm, ya que mientras la altura de las señales no llegue a su máximo, los defectos correspondientes no podrán ser posicionados en localizador gráfico. El excesivo sobre-espesor del cordón ofrece una buena superficie de reflexión al haz por lo que se produce la señal. Continuando con la inspección las señales que se estaban formando a (s) igual a 35 mm y 45 mm pertenecían a una falta de penetración y una mordedura respectivamente.

La ausencia de defectos es propia de una soldadura sana y es representada por un oscilograma libre de señales en la zona de inspección marcada por la compuerta, como lo muestra la Fig. 48 que corresponde a la unión N° 3.



**Fig. 48 OSCILOGRAMA CORRESPONDIENTE A UNA
SOLDADURA LIBRE DE DEFECTOS EN LA
UNION EN ANGULO Nº 3.**

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos demuestran que el procedimiento empleado en la inspección ultrasónica de uniones soldadas en ángulo permite de una manera eficiente y confiable el control de la defectología que se presenta en este tipo de uniones.

El uso de localizadores gráficos para la inspección ultrasónica de las uniones de acero soldadas en ángulo permite ubicar con precisión la posición de una discontinuidad, una vez determinada su distancia en recorrido del haz con respecto al transductor y su profundidad respecto a la su superficie ensayada.

Las discontinuidades tales como falta de fusión y falta de penetración detectadas en las uniones inspeccionadas fueron las de mayor severidad, ya que evaluadas según el Código ASME Secc. VIII se consideran como defectos lineales inaceptables cualquiera sea su longitud y amplitud de señal. La discontinuidad del tipo inclusión de escoria detectada en este trabajo cuya señal sobrepasó el 20% del nivel de referencia de la curva DAC no fue causa de rechazo ya que su longitud no excedió de los límites de aceptabilidad.

Dado que los ultrasonidos es un método muy conveniente para verificar la confiabilidad de estructuras soldadas, se recomienda tanto el estudio como la difusión de sus aplicaciones en nuestro medio con el fin de desarrollar técnicas de control en el campo de construcciones navales, puentes, tanques de presión, tendido de tuberías, etc., en donde la funcionabilidad de estas obras dependen de su calidad tecnológica.

B I B L I O G R A F I A

1. RUIZ RUBIO, Alfonso. "Aplicaciones de los Métodos de Ensayos no Destructivos al Examen de las Uniones Soldadas", Revista de Soldadura (CENIM), Vol. X, Núm. 2 (Abril - Junio, 1980) y Vol. X, Núm. 2 (Abril - Junio 1981).
2. BAEZ, Juan. Ensayo Ultrasónico de los Materiales. (Comisión Nacional de Energía Atómica, 1976).
3. Cursos Krautkramer Cabimas-Venezuela, Abril 20-23, 1982 (Ferrum de Maracaibo).
4. Krautkramer Española, Introducción al Ensayo de Soldadura por Ultrasonidos, S.L.Madrid.
5. Introducción a la Técnica Alemana de Ensayos no Destructivos.
6. Krautkramer Italiana, PND GLI ULTRASUONI.
7. Handbook on the Ultrasonic Examination of Welds, Commission V. "Testing, measurement and control of welds" of the IIW.

8. 1979 Annual book of ASTM Standard, Part 11, "Metallography; Nondestructive Testing".
9. Toshie Okumura, Celio Taniguchi, Engenharia de Soldagem e Aplicacoes (LTC libros técnicos e científicos, Editora S.A.).
10. Introducción a los Métodos de Ensayos No Destructivos, INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Estebán Terradas), Madrid, España.
11. ASME, "Boiley and Pressure Vessel Code", Section VIII Div 2, 1980.
12. AWS, "Construction of building", Section D1.1, 1981
13. Norma INTA 11 04 22 - 12 -4 22 - 13 04 22, "Recomendaciones para el Ensayo por Ultrasonidos de Materiales Metálicos por el Método de Contacto", (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Estebán Terradas) Madrid, Enero 1981.