

Rubén Caruá
6/3/03.

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA



D-6807

"APLICACIONES DE TECNICAS DE ULTRASONIDOS
EN UNIONES SOLDADAS DE ACEROS ESTRUCTURALES"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

presentada por

CARLOS ORDOÑEZ VALAREZO

Guayaquil-Ecuador

1983

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

A la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

A los Profesores del Departamento de Ingeniería
Mecánica.

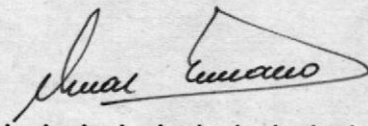
Al Ing. Omar Serrano V., DIRECTOR DE TESIS,
por su ayuda y colaboración para la
realización de este trabajo.

Al Sr. Luis del Real, Experto del CENIM-
España, por su colaboración en la
preparación de las uniones soldadas
empleadas en la presente Tesis.

DEDICATORIA

A mis Padres

A mis Hermanos

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Omar Serrano V.", written in a cursive style. The signature is positioned above a horizontal dotted line.

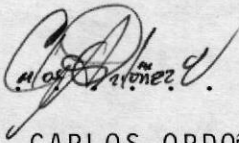
Ing. Omar Serrano V.

DIRECTOR DE TESIS

DECLARACION EXPRESA

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

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



CARLOS ORDOÑEZ VALAREZO

RESUMEN

En el presente trabajo se inspeccionan uniones soldadas de aceros estructurales por el método no destructivo de ultrasonidos. Las uniones soldadas consistieron en planchas de 17 y 25 mm de espesor con preparación de borde en V y X respectivamente, a las cuales se les fabricaron expresamente defectos del tipo: falta de penetración, falta de fusión, inclusiones de escoria, porosidades, falta y exceso de material y mordeduras.

Los parámetros y condiciones de soldadura fueron ajustados de tal forma que permitieron obtener los defectos anotados.

La inspección ultrasónica de dichas uniones se realizó empleando la técnica de eco-pulsátil y exploración en recorrido del haz. Se utilizaron transductores angulares de 45° y 60° con una frecuencia de 1 y 2,25 MHz. La calibración del instrumental se la efectuó con la ayuda de un bloque de calibración adaptado de lo estipulado en el Código ASME, Sección V. La evaluación de la amplitud de las señales en la pantalla TRC del instrumento fue realizada con

VII

la ayuda de una curva de calibración de amplitud-distancia (DAC), construida en una lámina plástica transparente. Los criterios de aceptación y rechazo de los defectos presentes en las soldaduras fueron establecidos de acuerdo al nivel de referencia del 20% de amplitud del Código ASME, Sección VIII.

INDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
RESUMEN.	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE FIGURAS.	X
INDICE DE TABLAS	XIV
SIMBOLOS Y ABREVIATURAS.	XV
INTRODUCCION	17
I. FUNDAMENTO TEORICO.	20
1.1 Generalidades.	20
1.2 Técnicas Ordinarias de Ensayo.	34
1.3 Ensayos en Uniones Soldadas.	42
1.3.1 Consideraciones de la unión.	46
1.3.2 Defectos en Soldaduras.	48
1.3.3 Evaluación de Defectos	54
a. Orientación.	54
b. Tamaño.	57
c. Profundidad	58
1.4 Normas de aceptación	62
1.5 Alcances y limitaciones del Ensayo	
II. TRABAJO EXPERIMENTAL.	69
2.1 Equipo utilizado	69

	<u>Pág.</u>
2.2 Diseño de Uniones Soldadas.	72
2.3 Calibración del equipo.	76
2.3.1 Evaluación de la Linealidad	78
2.3.2 Calibración de transductores.	84
a. Longitudinales.	90
b. Angulares.	96
2.4 Exploración de las Uniones Soldadas	105
2.4.1 Determinación de la distancia de paso.	105
2.4.2 Exploración en recorrido del haz y en proyección acortada.	109
2.4.3 Localización de defectos mediante cartas de calibración.	112
2.4.4 Identificación del tipo de defectos.	114
III. DISCUSION DE RESULTADOS.	123
CONCLUSIONES.	140
APENDICE.	142
BIBILIOGRAFIA	153

INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
1 Representación gráfica de las Ondas Ultrasónicas. . .	22
2 Onda Incidente Normal.	30
3 Refracción del Haz ultrasónico según Ley de Snell. . .	30
4 Refracción y conversión del haz ultrasónico.	33
5 Ensayo por reflexión o pulso-eco.	38
6 Ensayo de contacto utilizando la técnica de transmi- sión a través.	41
7 Examen de una chapa mediante la técnica de Resonan- cia.	43
8 Disposición típica de un ensayo de ultrasonidos en una unión soldada	45
9 Ubicación general de los defectos en una unión sol- dada.	50
10 Influencia de la orientación de los defectos cuando se usan ultrasonidos.	56
11 Evaluación del tamaño del defecto en profundidad utilizando la técnica de máxima amplitud.	60
12 Evaluación del tamaño de defecto en longitud.	60

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
13 Evaluación del tamaño del defecto en extensión transversal.	63
14 Controles del equipo de ultrasonidos Magnaflux PS-702A.	71
15 Dimensiones de las piezas soldadas y de la preparación diseñada.	75
16 Posición del transductor para la evaluación de la linealidad.	80
17 Representación del oscilograma obtenido durante la evaluación de la linealidad.	80
18 Representación de la linealidad horizontal	81
19 Representación de la linealidad vertical.	81
20 Bloques de referencia del Instituto Internacional de la Soldadura.	86
21 Bloque Básico de Calibración para Soldadoras . . .	88
22 Ubicación del Transductor sobre el bloque V1. . .	91
23 Oscilograma de la calibración de la escala de tiempo usando ondas longitudinales.	91
24 Regulación de la Sensibilidad.	94
25 Regulación de la Resolución.	95
26 Determinación del punto de salida del haz	98
27 Calibración de la base de tiempo.	98
28 Verificación del ángulo de refracción.	100

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
29	Bloque Básico de Calibración ASME para la construcción de la Curva DAC.	100
30	Curva Distancia Amplitud (DAC) para el equipo Magnaflux PS-702A.	103
31	Oscilogramas correspondientes a la determinación del paso y 1/2 paso	107
32	Movimientos característicos realizados durante la inspección de soldaduras por ultrasonidos	110
33	Localización y visualización de una falta de penetración.	110
34	Movimientos de un transductor angular para la identificación del tipo de defecto.	116
35	Curvas envolventes obtenidas durante la evaluación de un defecto lineal.	117
36	Curvas envolventes obtenidas durante la evaluación de un defecto circular o esférico	119
37	Oscilograma y carta de localización correspondientes a la visualización de una falta de penetración y fusión en la unión soldada Nº 1.	125
38	Oscilograma y carta de localización correspondientes a la visualización de una falta de fusión en la unión soldada Nº 3.	127

XIII

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
39	Oscilograma y carta de localización correspondientes a la visualización de una inclusión de escoria en la unión soldada Nº 4.	129
40	Oscilograma y carta de localización correspondientes a la visualización de inclusiones gaseosas en la unión soldada Nº 4.	131
41	Oscilograma y carta de localización correspondientes a la visualización de una falta de penetración en la unión soldada Nº 5.	133
42	Oscilograma y carta de localización correspondientes a la visualización de una mordedura en la unión soldada Nº 6.	134
43	Oscilograma y carta de localización correspondientes a la visualización de una porosidad, una falta de penetración y una inclusión de escoria en la unión soldada Nº 7.	136
44	Oscilograma obtenido en la inspección de la unión soldada Nº 8.	138

INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
I	Velocidad Acústica para Diferentes Materiales.	27
II	Longitud de Onda para diferentes materiales.	28
III	Rango de uso de transductores angulares.	47
IV	Niveles mínimos de aceptación.	67
V	Niveles de Inspección.	68
VI	Controles del equipo de Ultrasonidos Magnaflux PS 702A.	73
VII	Características de soldaduras usadas en la elabo- ración de las uniones soldadas	77
VIII	Datos para la evaluación de la Linealidad Hori- zontal	82
IX	Datos para la evaluación de la Linealidad Ver- tical.	85
X	Dimensiones recomendadas para la construcción del bloque básico de Calibración ASME.	89
XI	Posición del Transductor y amplitudes de las señales para la construcción de una curva DAC.	102

SIMBOLOGIA

	<u>Magnitud</u>
θ	Angulo de Incidencia
α	Angulo de Transmisión
μ	Coefficiente de Poisson
r	Coefficiente de Reflexión
t	Coefficiente de transmisión
ρ	Densidad de Masa
P	Distancia de Paso
D	Distancia de Proyección Acortada
S_c	Distancia recorrida por el ha ultrasónico
D	Distancia desde el centro de emisión al centro del cordón.
f	Frecuencia
API	Instituto Americano de Petróleo
IIW	Instituto Internacional de Soldadura
I	Intensidad Acústica
Z	Impedancia Acústica
ζ	Línea Central del Cordón de soldadura
λ	Longitud de onda
E	Módulo de Elasticidad
P	Presión Acústica

H	Profundidad a que se encuentra el defecto
AWS	Sociedad Americana de la Soldadura
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
TRC	Tubos de Rayos Catódicos
C	Velocidad Acústica
C_L	Velocidad acústica de las ondas longitudinales
C_T	Velocidad acústica de las ondas transversales

INTRODUCCION

El avance de la electrónica en la actualidad ha hecho posible la utilización de ondas sonoras de alta frecuencia, inaudibles para el oído humano, produciendo un gran desarrollo en la aplicación de los ensayos no destructivos (END) y particularmente del método de ultrasonidos.

El método de ultrasonidos utiliza ondas de frecuencias superiores a $0,5 \times 10^6$ ciclos/seg (0,5 MHz) para la inspección de los materiales. Las señales que se obtienen como producto de la inspección pueden ser visualizadas en la pantalla de un tubo de rayos catódicos y deben ser interpretados correctamente.

Los primeros ensayos mediante el empleo de ultrasonidos los realizó Sokolov en 1929. Los ultrasonidos se usaron primeramente en la detección de pequeñas fallas en piezas forjadas de gran espesor que eran examinadas mediante el empleo de radiografía industrial. Más adelante, la inspección por ultrasonidos se realizó en materiales de poco espesor. A partir de la Segunda Guerra Mundial con el desarrollo de los transductores angulares se hace posible la

inspección de uniones soldadas, campo que antes era exclusivo de la radiografía industrial.

En la actualidad los ultrasonidos se emplean en: medición de espesores, detección de la corrosión, inspección de piezas provenientes de distintos procesos metalúrgicos y principalmente inspección de soldaduras. Adicionalmente los ultrasonidos se emplean en el control de la producción de piezas en serie usando la técnica de inmersión y procesos automáticos.

X La importancia cada vez más notable en la tecnología del control de calidad, ha sido el motivo que ha impulsado la realización del presente trabajo, el cual se justifica principalmente por el desarrollo tecnológico del país en lo referente a:

- Desarrollo de la industria del Petróleo
- Proyectos Hidroeléctricos
- Fabricación de maquinaria para la industria
- Construcción de estructuras soldadas, etc. X

El control de la integridad de estas obras puede ser realizada eficientemente mediante el empleo de ultrasonidos. En nuestro país la utilización de los END ha tenido un re-

lativo desarrollo. El método de ultrasonidos en particular se ha limitado a la medición de espesores para el control de corrosión y en menor grado a la inspección de soldaduras. El presente trabajo pretende contribuir al desarrollo de algunas técnicas de ultrasonidos empleadas en la inspección de uniones soldadas de aceros estructurales. Se pretende además, desarrollar un método operacional para la ejecución correcta de este tipo de ensayos, y dar un documento objetivo que sirva de guía a las personas que trabajan en esta área de la Ingeniería Mecánica.

CAPITULO I

FUNDAMENTO TEORICO

1.1 GENERALIDADES

Los ultrasonidos son ondas acústicas de igual naturaleza que las ondas sonoras, con la diferencia de que su campo de frecuencia se encuentra por encima de la zona audible, es decir frecuencias superiores a los 20.000 ciclos/segundo (1/s). Para entender mejor la aplicación del ensayo de ultrasonidos en los materiales, es necesario ampliar el conocimiento de la física de las ondas ultrasónicas.

- Tipos de Ondas

La oscilación de las ondas sonoras puede ser imaginada como el movimiento de partículas dentro de un material, este movimiento se describe a través del desplazamiento de una partícula desde una posición cero o de reposo, que es función del tiempo y del espacio.

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 (Ref. 1):

- a.- Ondas Longitudinales
- b.- Ondas Transversales
- c.- Ondas Superficiales
- d.- Ondas de Lamb

a.- En las Ondas Longitudinales las oscilaciones tienen lugar en la dirección de propagación de la onda debido a las fuerzas de compresión y dilatación, por lo cual se los denomina también "ONDAS DE PRESION O COMPRESION". La densidad de las partículas es mayor en las ondas de compresión por lo que se las denomina "ONDAS DE DENSIDAD". La distancia entre dos puntos medios de dos zonas consecutivas de igual concentración de partículas corresponde a la longitud de onda del haz ultrasónico (Ref. 2) como se puede ver en la Fig. 1a.

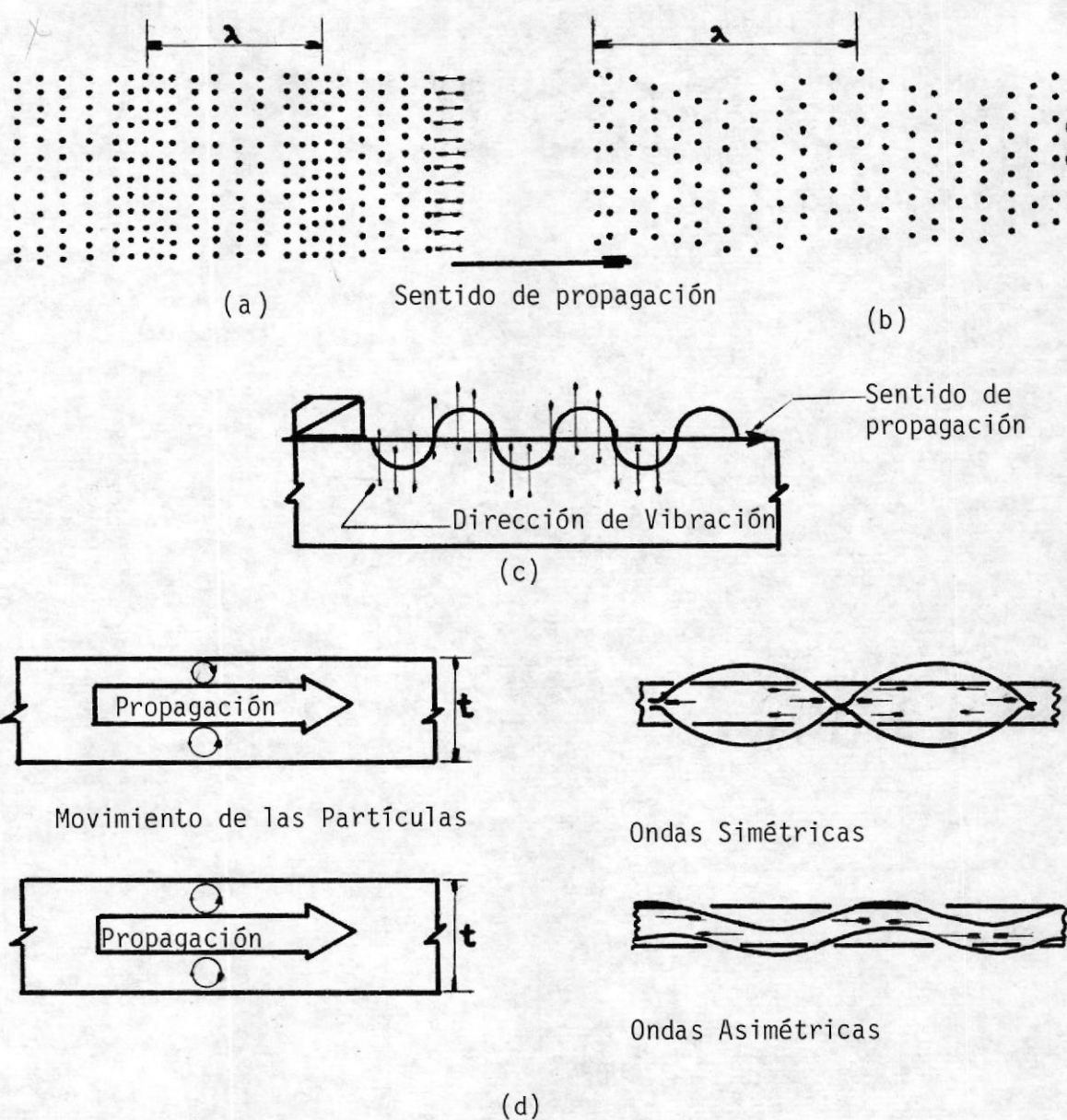


Fig. 1.- Representación gráfica de las Ondas Ultrasónicas (Ref.1,2,3)

- a) Ondas Longitudinales
- b) Ondas Transversales
- c) Ondas de Superficie o Rayleigh
- d) Ondas de Lamb

b.- Si un medio es capaz de transmitir esfuerzos de cizalladura (cosa que ocurre con la mayoría de los sólidos) es posible obtener partículas cuya dirección de oscilación es perpendicular al sentido de propagación de la onda ultrasónica, siendo de esta forma como se obtienen las "ONDAS TRANSVERSALES". 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 (Ref. 2) Figura 1b.

c.- Las Ondas de Superficie o de "RALEIGH" se producen solamente cuando el haz ultrasónico se propaga en la periferia plana o curva de un sólido semi-infinito, siguiendo las irregularidades de la superficie o contorno del mismo, siempre que las variaciones no sean bruscas. En este tipo de ondas la oscilación de las partículas es normal a la dirección de propagación. En la Fig. 1c se muestra una representación de la forma como se propagan las ondas de superficie. (Ref.2.3).

d.- Cuando se reduce el espesor de un sólido semi-infinito hasta obtener una lámina y hacer propagar un haz ultrasónico las ondas que se obtienen son las llamadas "ONDAS DE LAMB", las cuales existen en dos

formas fundamentales y son:

- Ondas Simétricas o de Compresión
- Ondas Asimétricas o de Flexión

En las primeras, las partículas de fibra neutra se comportan según oscilaciones puramente longitudinales, en las segundas, según oscilaciones puramente transversales (ondulantes). La obtención de estas ondas, para un determinado espesor del material y una frecuencia dada de ultrasonidos, se logra variando el ángulo de refracción del haz generado. En la Fig. 1d se muestra la propagación de las Ondas de Lamb.

Los parámetros más importantes usados en la emisión de ondas ultrasónicas, son (según Ref. 2):

Frecuencia	f (Hz)
Velocidad Acústica	C (m/s)
Longitud de Onda,	λ (m); $\lambda = C/f$ (1)
Amplitud de Oscilación	A (m)
Veloc. Máx. de Vibración	V (m)
Densidad del medio	ρ (Kg/m ³)
Presión acústica	P (N/m ²) = $Z \cdot V = Z\omega A$ (2)
donde $\omega = 2\pi F$	(3)

$$\text{Impedancia Acústica} \quad Z(\text{Kg/m}^2 \cdot \text{s}) = P/V = C \quad (4)$$

$$\text{Intensidad Acústica} \quad I(\text{Wb/m}^2)$$

$$I = \frac{Z \cdot V^2}{2} = \frac{P^2}{2Z} \quad (5)$$

Las velocidades acústicas para los diferentes tipos de ondas se calculan a partir de las siguientes constantes elásticas del material que atraviesan estas ondas:

- Módulo de elasticidad (E) dado en N/m^2 o en Kp/mm^2

$$(1\text{Kp/mm}^2 = 0,98 \times 10^7 \text{ N/m}^2)$$

- Relación o Coeficiente de Poisson (μ)(adimensional)

Los estudios teóricos realizados consideran válida la expresión siguiente de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales (Ref. 1, 2).

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (6)$$

La velocidad de propagación para ondas transversales está dada por la expresión

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad (7)$$

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

$$\frac{C_T}{C_L} = \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}} \quad (8)$$

Como se puede observar la relación depende del coeficiente de Poisson. Así tenemos que para el acero $\mu = 0,28$ y para el aluminio $\mu = 0,34$, se demuestra que $C_T/C_L = 0,53$ para el acero y $C_T/C_L = 0,49$ para el aluminio.

En la Tabla I se dan las velocidades longitudinales y transversales de propagación acústica para algunos materiales metálicos y no metálicos. La Tabla II por su parte expresa las longitudes de onda para diferentes materiales, en función de distintas frecuencias.

Para continuar con el estudio de las ondas ultrasónicas, es necesario conocer el comportamiento de las mismas cuando éstas inciden en superficies límites. Se distinguen dos casos: a) Incidencia Normal o Perpendicular, b) Incidencia Oblicua o Angular.

a.- Cuando el frente plano de una onda sonora alcanza la superficie límite entre dos medios, con un án -

TABLA I

DENSIDAD, VELOCIDAD E IMPEDANCIA ACUSTICA
DE DISTINTOS MATERIALES (REF.2)

MATERIAL	DENSIDAD 10^3 Kg/m^3 ρ	VELOCIDADES ACUSTICAS 10^3 m/s		IMPEDANCIA ACUSTICA EN $10^6 \text{ Kg/m}^3 \text{ s}$ $Z = \rho C$
		C	C_t	
Acero (baja aleación)	7,85	5,82	3,19	45,7
Acero Inox. Austen. (18,8)	8,03	5,66	3,12	45,5
Acero Inox. Marten- sítico 13 Cr	7,67	7,39	2,99	56,7
Aluminio	2,71	6,32	3,08	17,1
Fundición (Fe-C)	7,2	3,5 - 5,6	2,2-3,2	25-40
Hierro	7,7	5,85	3,23	45
Latón (Cu-Zn)	8,25	7,82	3,02	64,5
Níquel	8,9	5,63	2,96	50
Plomo 6% Antimonio	10,9	2,16	0,81	23,6
Aceite (SAE 20-30)	0,89-0,96	1,74	--	1,5-1,7
Glicerina (20°)	1,26	1,92	--	2,4
Alcohol etílico (20°)	0,79	1,17	--	0,92

TABLA II

LONGITUD DE ONDA PARA DIFERENTES MATERIALES (REF.1)

MATERIAL	LONGITUD DE ONDA (mm) $\lambda = V/f$			
	1 MHz	2MHz	3MHz	5MHz
Acero	5,85	2,925	1,195	1,17
Aluminio	6,25	3,125	2,08	1,25
Fundición	3,5 - 3,6	1,7 - 2,8	1,17- 1,87	0,7 - 1,12
Bronce	4,45	2,225	1,49	0,89
Cobre	4,66	2,33	1,55	0,93
Plexiglas	2,7	1,35	0,9	0,54

gulo de incidencia de 90° , parte de la energía se refleja y vuelve al primer medio en la misma dirección, otra parte se propaga al segundo medio manteniendo también la misma dirección y sentido, tal como se observa en la Fig. 2. Este caso se conoce como "Onda Incidente Normal".

Si llamamos I a la energía ultrasónica incidente

r = coeficiente de reflexión

t = coeficiente de transmisión

Z_1 y Z_2 = Impedancias Acústicas correspondientes al primero y segundo medios.

La energía reflejada es igual al coeficiente de reflexión por la energía incidente y la energía transmitida será igual al coeficiente de transmisión por la energía incidente. Los valores de los coeficientes de reflexión y transmisión se calculan por (Ref. 1) las siguientes ecuaciones:

$$r = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (9)$$

$$t = \frac{4Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (10)$$

Resulta evidente que:

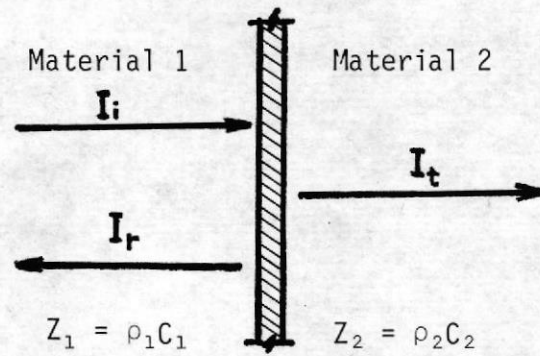


Fig. 2.- Onda Incidente Normal
 I = Onda Incidente
 I_r = Onda Reflejada
 I_t = Onda Transmitida

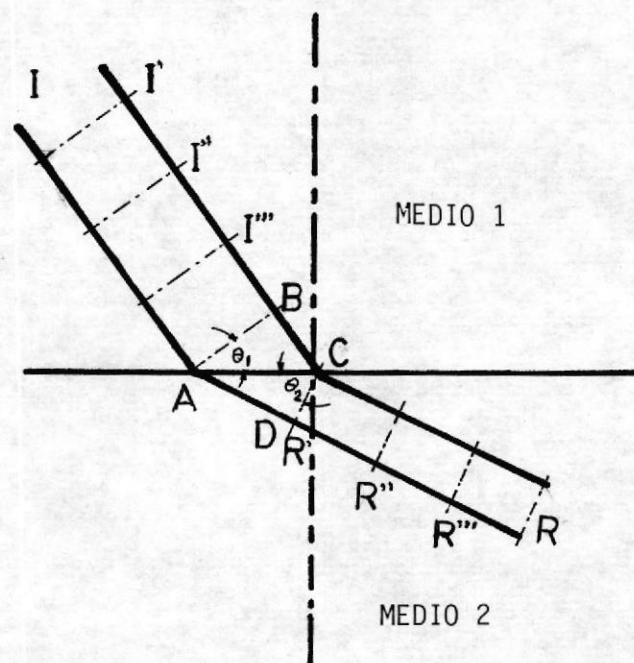


Fig. 3.- Refracción del Haz Ultra-sónico según Ley de Snell

$$I = I \times r + I \times t \quad (11)$$

$$r + t = 1 \quad (12)$$

Para el acero y el aluminio el coeficiente de reflexión es igual a 1 cuando el otro medio es aire.

b.- El caso de "Onda Incidente Angular" se alcanza cuando el haz ultrasónico incide oblicuamente sobre la interfase que separa dos medios 1 y 2 con un ángulo de incidencia θ_1 (Fig. 3). En cada caso se produce refracción de una parte de dicho haz que se transmite al segundo medio.

La dirección del haz en el segundo medio puede determinarse por la "Ley de Snell" que tiene validez en óptica. La posición sucesiva del frente de onda de una haz ultrasónico, al cabo de intervalos de tiempo constante Δt , se representan por I', I'', I'''.

Considerando los triángulos ABC y ACD de la Fig. 3, se tiene:

$$BC = \Delta t V_1 = AC \text{ Sen } \theta_1$$

$$AD = \Delta t V_2 = AC \text{ Sen } \theta_2$$

$$\text{por lo que } \frac{\text{Sen}\theta_1}{V_1} = \frac{\text{Sen}\theta_2}{V_2} \quad (13)$$

"Que es la expresión de la LEY DE SNELL".

Cuando la onda sonora incide oblicuamente en la superficie, la presión ejercida por ésta puede ser descompuesta en dos componentes: una normal que produce ondas longitudinales y una tangencial que produce la propagación de ondas transversales. En la Fig. 4 se observan los cambios de modo al incidir una onda con ángulo θ_1 . Por esta razón se pueden tener ondas longitudinales y transversales reflejadas en el medio 1, y ondas del mismo tipo refractadas en el medio 2. Aplicando la Ley de Snell tenemos (Ref. 4.5):

$$\frac{\text{Sen}\theta_1}{V_1} = \frac{\text{Sen}\theta_{1R}}{V_{1R}} = \frac{\text{Sen}\theta_{2L}}{V_{2L}} = \frac{\text{Sen}\theta_{2T}}{V_{2T}} \quad (14)$$

Si se hace rotar el haz ultrasónico a partir del ángulo de incidencia de 90° , se llega a un punto definido 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° . Ángulos de incidencia iguales o mayores al Primer Angulo Crítico producen en el medio 2 la refracción únicamente de ondas transversales. Si el ángulo de incidencia

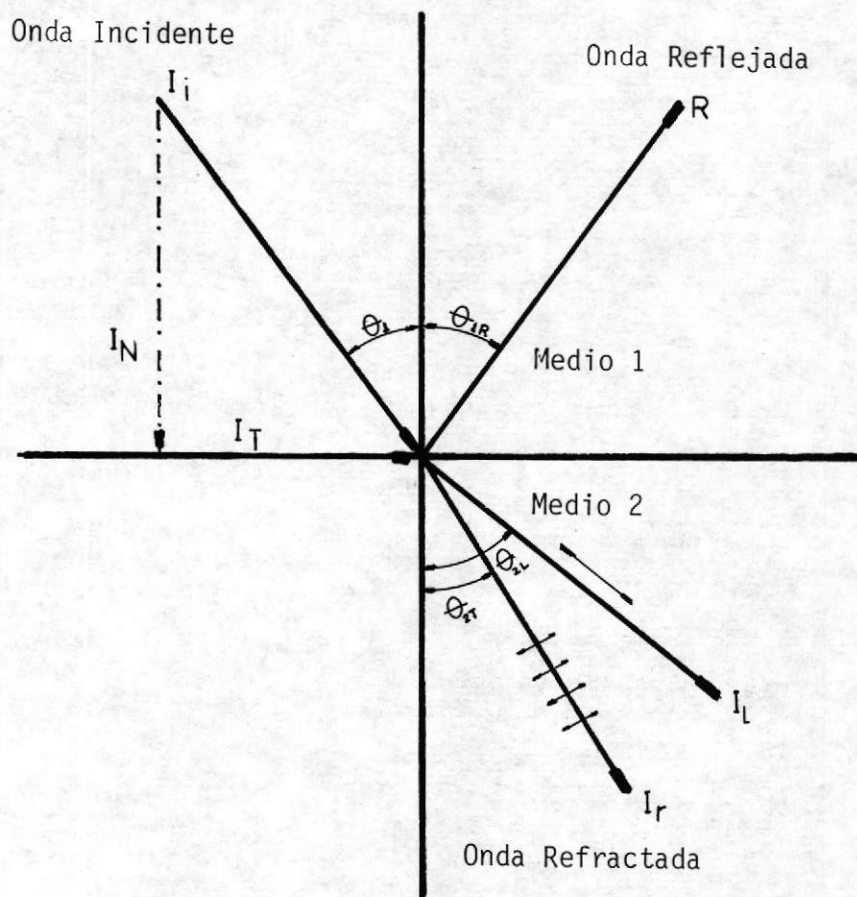


Fig. 4.- Refracción y Conversión del Haz Ultrasónico (Ref. 4).

θ_1 = Angulo de Reflexión
 θ_2 = Angulo de Refracción
 I_2 = Onda Longitudinal
 I_T = Onda Transversal

$$\theta_1 = \theta_{1R} \neq \theta_2$$

continúa aumentando se alcanza un segundo punto denominado Segundo Angulo Crítico, para el cual el ángulo de refracción de las ondas transversales se hace igual a 90° . En esta situación se produce la reflexión total del haz y no existe refracción al medio 2. Además si el medio 1 es aire o un líquido no se produce propagación de ondas transversales. Para un ángulo de incidencia mayor al segundo ángulo crítico se produce sólo la propagación de ondas de superficie al segundo medio.

1.2 TECNICAS ORDINARIAS DE ENSAYO

En los ensayos por ultrasonidos la producción de energía ultrasónica se basa generalmente en el denominado "Efecto Piezoeléctrico". Este efecto fue descubierto por J. y P. Curie, los cuales observaron que en algunos cristales como: Cuarzo, Sulfato de Litio, Titanio, de Bario, etc., la tracción o la compresión en ciertas direcciones respecto a los ejes metalográficos provoca la aparición de ciertas cargas eléctricas sobre las caras comprimidas o traccionadas. La energía mecánica aplicada al cristal mediante la acción de deformación se transforma en parte en energía eléctrica que determina la aparición de cargas eléctricas y una di-

ferencia de potencial entre las dos caras involucradas. Vale decir que este fenómeno es reversible, es decir, que si se aplica un potencial eléctrico en el cristal, se inducirán deformaciones de tipo mecánico. Los ensayos por ultrasonidos se realizan empleando equipos que transmiten señales eléctricas a un cristal o transductor, el cual utiliza el efecto piezoeléctrico y convierte estas señales en ondas mecánicas de alta frecuencia u ondas ultrasónicas. Estas ondas viajan al interior del material a examinarse y eventualmente serán nuevamente reflejadas hacia el transductor, para ser convertidas otra vez en señales eléctricas. Estas señales serán convenientemente visualizadas en el equipo de ultrasonidos, para de esta forma obtener la información que se desea del material a examinarse.

Las técnicas de ensayo en ultrasonidos son establecidas fundamentalmente por la naturaleza del problema y la forma del objeto a examinar. Respecto al modo de acople del transductor con la pieza a examinar, se distinguen dos técnicas de ultrasonidos: Contacto e Inmersión. La técnica de contacto consiste en aplicar el transductor directamente sobre la pieza a ensayar; sin embargo, hay que considerar un medio de acoplamiento del transductor a la pieza, ya que si se

coloca un cristal sobre la superficie de la pieza seca, a causa de la gran impedancia acústica específica en la superficie de separación, se transmitirá muy poca energía a través de esta interfase hacia el material. Por lo tanto se hace necesario el uso de algún medio de contacto y en la práctica se prefiere hacer uso de fluidos cuya impedancia acústica específica esté comprendida entre el cristal y el material a ensayar. (Ref. 6). Los fluidos más usados son: aceite de transformador, glicerina, aceite de automóvil (SAE-20), agua, Benceno, disoluciones jabonosas, etc. Desde el punto de vista económico y simplicidad se recomienda el uso de una capa fina de aceite extendida sobre la superficie a ensayar. El acoplante deberá tener buenas propiedades de humidificación, que permita la buena transmisión de las vibraciones mecánicas entre el transductor y el material a ensayar no deberá ejercer también acción alguna que pueda afectar el estado superficial de la pieza sometida a examen. (Ref. 7).

En la técnica de inmersión el transductor está separado o acoplado de la pieza a ensayar por un volumen de fluido, generalmente agua, que minimiza los problemas de diferencia de impedancia acústica. La técnica de inmersión se usa preferentemente en ensayos de ultrasoni-

dos automatizados. Respecto a la forma de emisión y recepción de ondas, el ensayo por ultrasonido con ondas normales distingue dos técnicas: "Pulso Eco" y "Transmisión a través".

En la técnica por eco-pulsátil o por reflexión, la energía de excitación ultrasónica es emitida por el transductor en forma de pulsos cortos, repetidos, con una frecuencia que permiten al sistema detectar entre pulso y pulso la energía reflejada desde discontinuidades o interfases existentes en el interior del material o desde los límites de la superficie del mismo. En aplicación de la técnica por reflexión se usan transductores angulares y normales que actúan como emisores y receptores de la energía ultrasónica, esto es en el caso de los transductores simples. Cuando se utilizan los que poseen doble cristal, uno actúa como emisor y el otro como receptor. También se pueden usar dos transductores, el uno para transmitir y el otro para recibir; en este caso, se emite un rayo continuo en vez de pulsaciones, el transductor receptor deberá ser situado en varios lugares de la espécimen para intersectar dicho rayo reflejado. En la Fig. 5a se presenta una disposición típica cuando se utiliza la técnica por contacto y reflexión. La Fig. 5b pre-

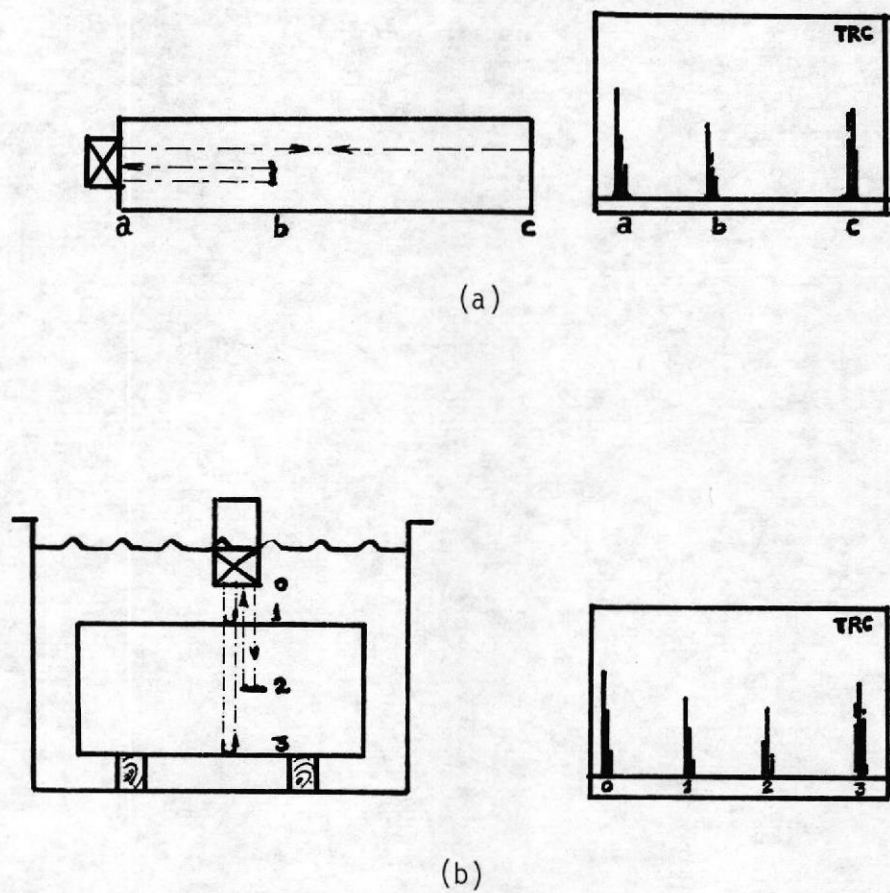


Fig. 5.- Ensayo por Reflexión o Pulso-Eco.

- a) Método de Contacto
- b) Método de Inmersión

Se observa la posición del transductor y la pieza, y las señales en la pantalla TRC.

senta la disposición del correspondiente a la misma técnica en el caso de inmersión.

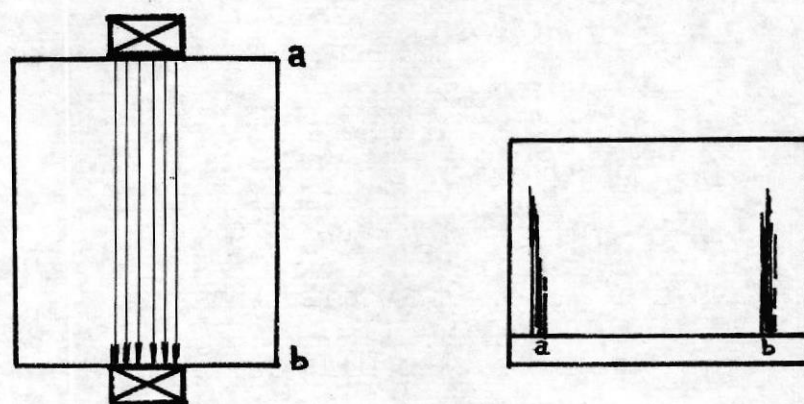
Cuando se aplica la técnica de ensayo por transmisión a través, se utiliza dos transductores, éstos son colocados en lados opuestos en el espécimen de ensayo y deben estar vinculados mecánicamente para asegurar que ambos se mantengan enfocados durante el desplazamiento de la pieza, el uno deberá actuar como receptor y el otro como emisor de la onda ultrasónica. La presencia de una discontinuidad será detectada por el transductor receptor con la correspondiente disminución de energía ultrasónica, observándose en la pantalla TRC (Tubo de Rayo Catódico) una disminución en la amplitud de la onda. Cabe destacar que mientras mayor es el área de la discontinuidad en la trayectoria del haz, mayor es la disminución de la intensidad de la señal recibida; por consiguiente, si la discontinuidad es suficientemente amplia reflejará la totalidad del haz ultrasónico, siendo la señal detectada casi nula (Ref. 3). Nótese que ésto es justamente lo opuesto a lo que sucede en la técnica de eco-pulsátil, donde mientras más grande es la discontinuidad, mayor será la señal detectada (Ref. 1). La técnica de transmisión a través no proporciona información en relación a la distancia

a la que se encuentra el defecto que provoca la disminución de la señal. Pero, en cambio puede ser utilizada en el examen de materiales de elevados coeficientes de absorción de energía ultrasónica como son: cerámicas, plásticos, refractarios, etc.

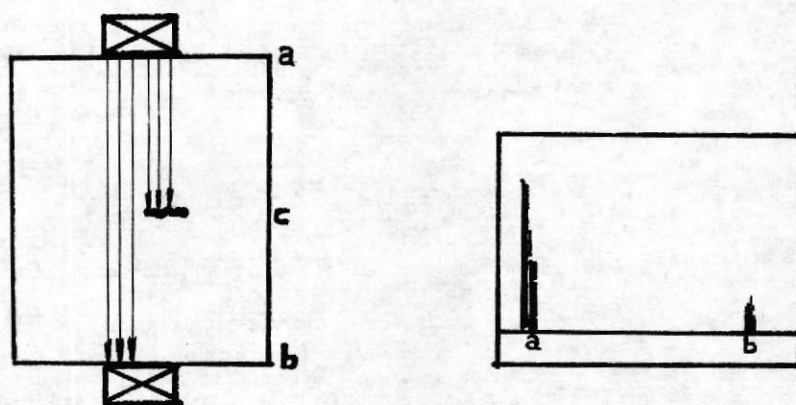
La Fig. 6 presenta una disposición típica del ensayo por transmisión a través.

Adicionalmente a las técnicas descritas anteriormente existe la llamada técnica de resonancia. Esta técnica utiliza un haz continuo de ondas longitudinales transmitido a un material de caras planas, variando la frecuencia en forma manual o automática, creándose así ondas ascendentes dentro del material ensayado hasta que estas ondas entran en fases con otras que están ingresando. Se forman así ondas estacionarias produciéndose por lo tanto un incremento de amplitud de vibración. Si el espesor del material a ensayar es de media longitud de onda ($1/2$), éste entrará en resonancia.

Las aplicaciones de estos ensayos pueden ser agrupadas en tres categorías generales que son (Ref. 3):



(a)



(b)

Fig. 6.- Ensayo por contacto utilizando la técnica de transmisión.

- a) Sin Defecto
- b) Con defecto

- 1.- Medición de Espesores
- 2.- Inspección de Corrosión
- 3.- Detección de discontinuidades laminares
(laminaciones, fallas de colaminación, etc.)

El ensayo de ultrasonido por resonancia está limitado cuando existe excesiva rugosidad de la superficie de la pieza a ensayar, cuando ésta se encuentra muy corroída, cuando existe falta de paralelismo en sus superficies y cuando hay problemas de tamaño de grano (grande), porosidades e inclusiones. En la Fig. 7 se presenta el examen de una chapa metálica utilizando esta técnica.

1.3 ENSAYOS EN UNIONES SOLDADAS

El examen de soldadura por fusión utilizando ultrasonidos, se realiza aplicando la técnica de reflexión por pulso-eco con ondas longitudinales o con ondas transversales, empleando para ésto transductores normales y angulares respectivamente.

La frecuencia utilizada en la inspección es de: 1; 2,5 y 5 MHz (Ref. 5), según las condiciones del material y la sensibilidad requerida, ya que una baja fre-

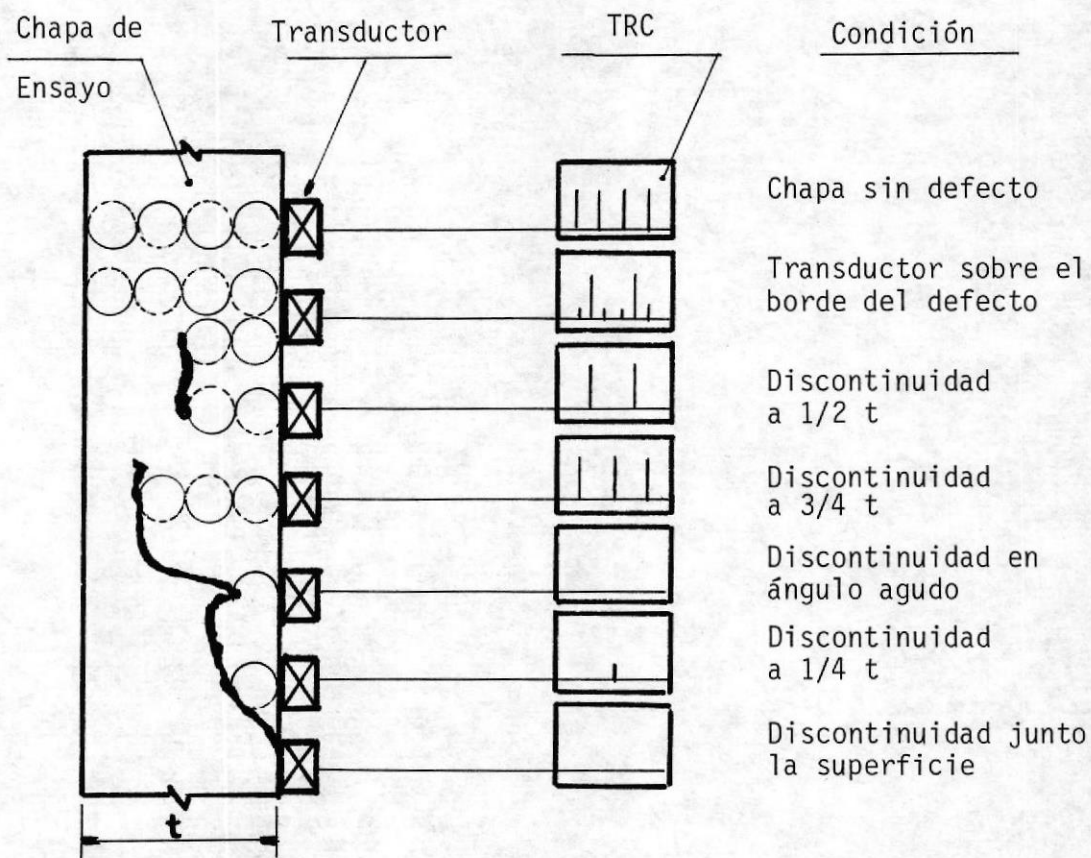


Fig. 7.- Examen de una chapa mediante la técnica de Resonancia.

En la gráfica se observa el desplazamiento de la señal en la pantalla TRC (Ref. 3).

cuencia facilita el acoplamiento en superficies rugosas y disminuye el efecto de atenuación que producen las estructuras metalográficas de grano grueso, frecuencias más elevadas permiten una mayor sensibilidad de detección y mayor exactitud en la determinación de la extensión de los defectos (Ref. 1). La utilización de ondas transversales se ha hecho muy popular, debido a que la superficie del material que se ensaya no tiene que ser lisa como lo requiere la técnica de rayo recto (ondas longitudinales).

La Fig. 8 muestra un ensayo típico de ultrasonido en una unión soldada en V, en donde se observa la posición del transductor angular respecto al cordón soldado, y donde se observa el recorrido del haz en zigzag y lo que se conoce comúnmente como "distancia de paso" (P).

El análisis trigonométrico para determinar las distancias de paso y medio paso se lo realiza en función del ángulo de entrada α y el espesor de la chapa "t" en la forma que se muestra en el Apéndice A, donde se obtiene que:

$$P = 2t \operatorname{Tang} \alpha \quad (15)$$

$$P/2 = t \operatorname{Tang} \alpha \quad (16)$$

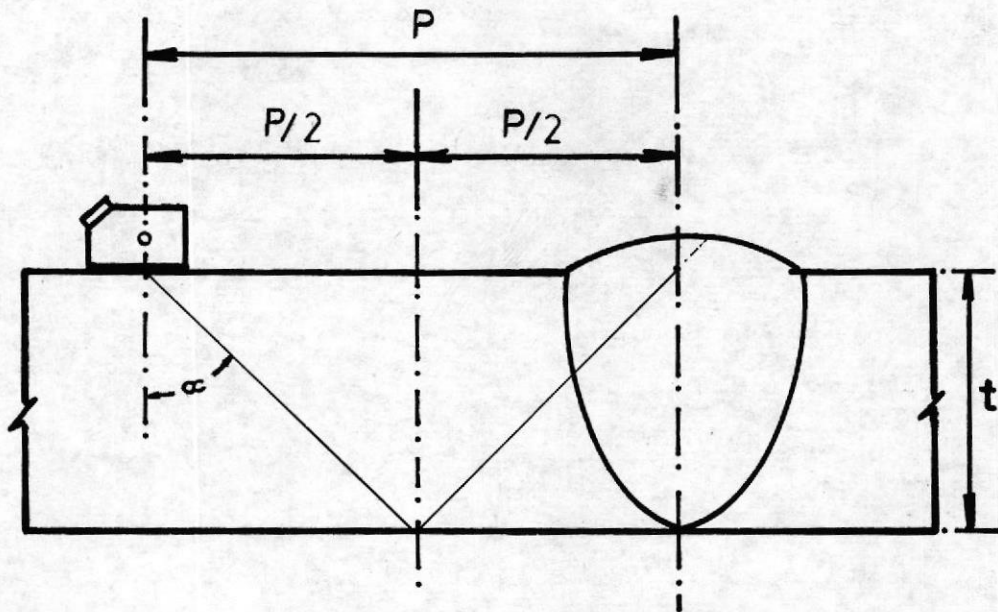


Fig. 8.- Disposición típica de un ensayo de ultrasonidos en una unión soldada. Se observan las distancias de paso (P) y medio paso ($P/2$).

La Tabla III muestra los valores de paso y medio paso del haz para transductores comunmente usados en base al espesor de la pieza ensayada y al rango de espesores recomendado para su uso.

1.3.1 Consideraciones de la Unión

Antes de iniciar el ensayo es necesario hacer una observación visual de la soldadura a fin de poder determinar las condiciones geométricas de la misma, especialmente el grado de penetración, tipo de raíz y sobremonta, socavaduras en los bordes del cordón, diferencias de espesores en la unión, presencia de irregularidades en la superficie de la chapa tales como gotas de metal, incrustaciones, rugosidades, rajaduras, etc.

Tanto en el caso de las uniones soldadas, como en cualquier otra aplicación se deberá asegurar un buen acoplamiento durante el ensayo, por lo que es conveniente hacer la preparación o limpieza de las superficies en las que debe desplazarse el transductor, esta preparación no alterará al material base ni debe afectar el acabado final (Ref. 1).

TABLA III

VALORES DE PASO, MEDIO PASO Y RANGO DE USO
DE TRANSDUCTORES ANGULARES

Angulo del Transductor (α) Grados	Paso	Medio Paso	Rango de uso para t (mm)
80	11 t	5,5 t	5
70	5,5 t	2,75 t	5 - 15
60	3,5 t	1,75 t	15 - 30
45	2 t	t	30 - 60
35	1,4 t	0,7 t	60

Cuando se trata de la inspección de chapas hay que tener en cuenta que la superficie esté suficientemente lisa y limpia, tal que permita mantener la señal correspondiente a la cara opuesta de un 50% del total de la escala de la pantalla TRC durante la exploración, ya que cualquier residuo de grasa u óxido dificulta mantener el contacto necesario, además una superficie rugosa puede causar dispersión del rayo ultrasónico.

Dentro de estas consideraciones es de vital importancia que todo el volumen del material base sobre el que ha de deslizarse el transductor angular, con el que se va a efectuar el examen de la unión soldada, tendrá que ser inspeccionado en un 100% con el transductor normal, para así comprobar que el material base se encuentra libre de defectos. Esta inspección no tiene el objeto de aceptación o rechazo (Ref. 3).

1.3.2 Defectos en Soldaduras

Los defectos más comunes que se encuentran en las soldaduras y que son susceptibles de determinarse mediante ultrasonido, son según (Ref.8, 9 ,10, 11):

- Fisuras
- Falta de fusión
- Falta de penetración
- Porosidades y sopladuras
- Inclusiones de escoria
- Falta de espesor
- Mordeduras de borde
- Sobremona

En la Fig. 9 se puede observar la ubicación general de estos defectos. Las definiciones tratadas a continuación son estudio de las referencias

1.- Fisuras.- Se producen en el interior del metal fundido bajo el efecto de tensiones residuales, estas fisuras pueden aumentar de tamaño hasta convertirse en grietas, se deben principalmente a la elección inadecuada de electrodos, material base difícil de soldar, juntas demasiado rígidas y al enfriamiento demasiado rápido.

En la Fig. ver 1

2.- Falta de fusión.- Es la falta de unión entre el metal depositado y el metal base o entre

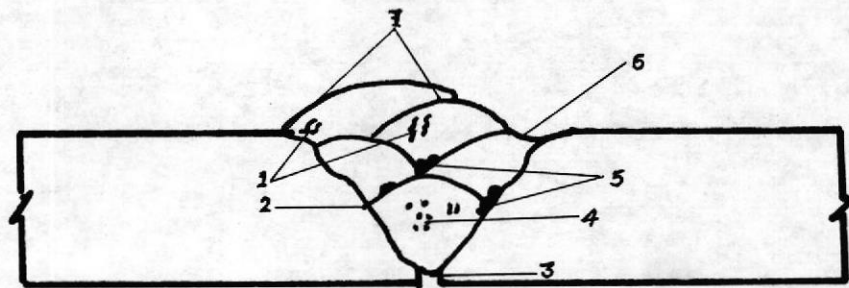


Fig. 9.- Ubicación General de los Defectos en una Unión Soldada.

- 1.- Fisuras
- 2.- Falta de Fusión
- 3.- Falta de Penetración
- 4.- Porosidades
- 5.- Inclusiones de Escoria
- 6.- Mordeduras
- 7.- Sobremonta

dos capas contínuas de metal depositado, ver 2 - en la figura. Este defecto se suele presentar principalmente en posición angular debido a un menor calentamiento de los bordes, además, de la tendencia a dirigir el arco hacia uno de los bordes del chaflán. Con una acertada selección de electrodos y una buena técnica operaria se obtienen uniones exentas de este defecto.

3.- Falta de penetración.- Como su nombre lo indica es una penetración incompleta donde la fusión no alcanza todo el espesor de la chapa, quedando en el reverso de la unión una entalla que constituye una iniciación de rotura. Generalmente afecta a la primera pasada o bien a soldadura hechas desde una o ambos lados de la unión. En las uniones en V o a tope la falta de penetración bajo la soldadura de raíz convirtiéndose en un defecto superficial el cual es muy crítico y actúa como una entalla. En una soldadura en X la fusión insuficiente se debe a la mala penetración a cada lado del chaflán y se produce en el vértice de la unión.

4.- Porosidades y Sopladuras.- Son cavidades for-

mas por inclusiones gaseosas causadas por gases que no tuvieron suficiente tiempo de salir durante la solidificación del baño de soldadura. El defecto suele presentarse mayormente cuando la posición de soldeo es angular, debido al empleo de electrodos de menor diámetro y a la mayor velocidad de avance que requieren los cordones estrechos en esta posición. Porosidades también se presentan cuando existe humedad en los electrodos y también cuando existe impurezas en el metal base. Con una acertada elección de electrodos y una buena técnica operatoria se consiguen soldaduras exentas de porosidades y sopladuras.

5.- Inclusiones de Escoria.- La escoria representa materiales sólidos no metálicos atrapados en el cordón de soldadura o entre el metal base y el metal de aportación. Las escorias pueden aparecer como partículas aisladas o como líneas continuas o interrumpidas. Este defecto se debe a una mala eliminación de la escoria entre sucesivas pasadas por parte del soldador, también puede deberse a una mala disposición de las pasadas estrechas en la unión de

chapas gruesas. Si la escoria es bastante fusible entrará en solución con el metal fundido en las pasadas siguientes favoreciendo nuevamente la formación de este problema.

6.- Falta de Espesor.- Este defecto se debe a una insuficiencia de metal de aportación. Aparece en la superficie y no constituye realmente un defecto grave. Es fácil de remediar procediendo a la aportación de metal suplementaria.

7.- Mordeduras de Bordes.- Es una falta de metal en forma de surcos de longitud variable en los bordes de la soldadura debido principalmente a una intensidad de corriente elevada. Tal como se observa en la Fig.

8.- Sobremonta.- Es el desborde del metal soldado por la superficie de la plancha y las ondulaciones del cordón. Se produce principalmente por una longitud de arco larga y una velocidad de avance baja.

1.3.3 Evaluación de Defectos

Una vez determinado el tipo de defecto hay que proceder a la evaluación del mismo, su identificación y extensión. Para ésto se toma como referencia la magnitud (amplitud) de la señal obtenida en el instrumento de ultrasonido proveniente de defectos patrones.

Dentro de la evaluación de los defectos mediante el examen por ultrasonido, hay que considerar diversos parámetros que influyen directamente sobre la estimación de los mismos. Los parámetros que serán puestos a consideración son: la orientación, el tamaño y la profundidad a que se encuentran los defectos en el espécimen de ensayo.

a.- Orientación

En la técnica de ensayo que se empleará en este estudio (la técnica de pulso-eco), es muy importante la recepción por parte del transductor de la energía ultrasónica reflejada en el defecto. Su importancia radica en que cuando

el haz no incide sobre el defecto perpendicularmente, la energía reflejada y detectada por el transductor, se reduce notablemente o puede ser nula. La figura 10 (a) presenta el caso de una superficie reflectante lisa con una orientación tal que hace imposible su detección, por lo que no aparece señal alguna en la pantalla TRC. El haz ultrasónico en este caso se refleja en dirección distinta en la incidencia. En la Fig. 10 (b) se presenta el caso de un defecto que tiene igual orientación pero con una superficie irregular y rugosa. Estas irregularidades presentan zonas que son normales a la dirección de propagación del haz ultrasónico, por consiguiente, parte de la energía se reflejará y llegará al transductor lo que permite la detección del defecto (Ref. 12). En la Fig. 10 (c) se muestra el caso en el que el defecto es normal a la dirección de propagación del haz, por lo que la energía captada por el transductor será similar a la energía emitida. En este caso, la señal que aparece en la pantalla TRC tendrá una amplitud casi igual a la señal de entrada.

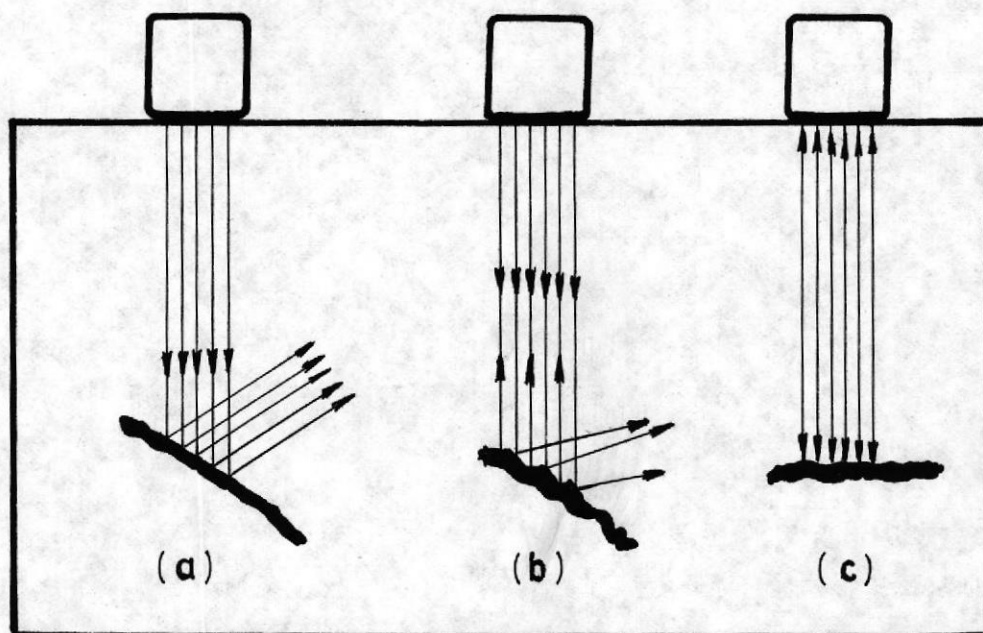


Fig. 10.- Influencia de la Orientación de los defectos cuando se usan ultrasonidos.

b.- Tamaño

Otro de los factores de importancia en la evaluación del defecto es su tamaño. Para que un defecto pueda ser detectado, sus dimensiones deben ser tales que permitan reflejar el haz ultrasónico que se emplea en el ensayo. En teoría, se puede detectar un defecto cuando sus dimensiones transversales con relación al haz sonoro, son mayores a $1/4$ de longitud de onda del haz ultrasónico empleado en el ensayo (Ref. 1). Cuando las dimensiones de las discontinuidades son superiores a dicho límite éstas podrán ser detectadas ya que reflejarán el haz ultrasónico según las leyes de acústica mientras que aquellas que no sobrepasan dicho valor, no producirán reflejo alguno y no serán detectadas. En la Tabla II presentada en el Párrafo 1.1, se puede observar claramente que la detección de los defectos pequeños están en relación estrecha con la frecuencia de la onda ultrasónica. Mientras más elevada es la frecuencia del haz ultrasónico mayor será la sensibilidad de detección, Así por ejemplo, para el acero con frecuencia de 1 MHz se producen longitudes de onda de 5,85 mm.

pudiendo detectar defecto de 1,45 mm. Con frecuencia de 3 MHz, la longitud de onda es de 1,95 mm., permite detectar defectos del orden de 0,48 mm.

c.- Profundidad

La evaluación de la profundidad a la que se encuentra una discontinuidad dentro de un material en ultrasonido, sólo es posible mediante el uso de la técnica de reflexión (pulso-eco). Una vez localizada la discontinuidad, aparece un eco cuya amplitud va a depender de la orientación, dimensión, naturaleza, posición, etc. de la discontinuidad. La posición del eco en la pantalla está relacionada con la distancia a la que se encuentra el transductor (punto de emisión) del defecto, en otras palabras a su profundidad. Por lo tanto, la profundidad puede ser evaluada con suficiente precisión si se ha calibrado correctamente el equipo.

La evaluación del tamaño de un defecto se realiza tomando en cuenta su tamaño en profundidad y en extensión longitudinal y transversal con res-

pecto a la pieza. Para esta evaluación se utiliza la técnica denominada de "Máxima Amplitud" que consiste en la utilización del factor de mayor energía del haz ultrasónico o de cero decibelios (db) de atenuación, que se encuentra concentrado cerca del centro del haz, en una banda estrecha (Ref. 12.13). Para determinar el tamaño en profundidad del defecto de una unión soldada, se desplaza el transductor hacia la región de la soldadura hasta obtener un eco de máxima altura o amplitud, lo que indica el centro del haz sonoro incide sobre la falla (punto A en la Fig. 11). Observando esta amplitud se aleja el transductor de la soldadura hasta ver en la pantalla TRC que la señal decae $1/2$ de la altura máxima (en el caso que se use como referencia la isóbara de 6 db) o que decae a $1/10$ de la altura máxima (cuando se usa como referencia la isóbara de 20 db) (Según referencia 8, 12). Esto indica que el haz incide en el extremo del defecto, lo cual ocurre a una distancia D_1 , punto B (Fig.11), desde el centro del cordón al transductor. Se mueve después el transductor en sentido contrario pasando por la máxima amplitud hasta obtener el efecto anterior a una distancia D_2 , punto C.

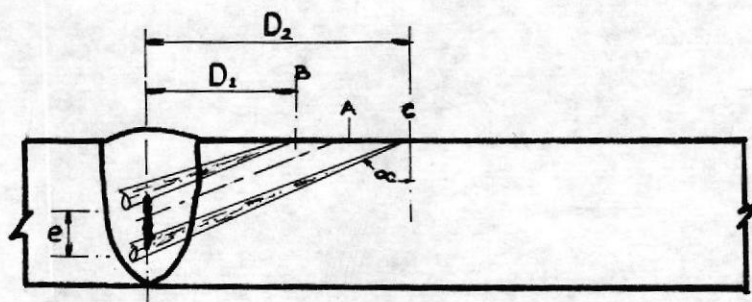


Fig. 11.- Evaluación del tamaño del defecto en profundidad utilizando la técnica de Máxima Amplitud.

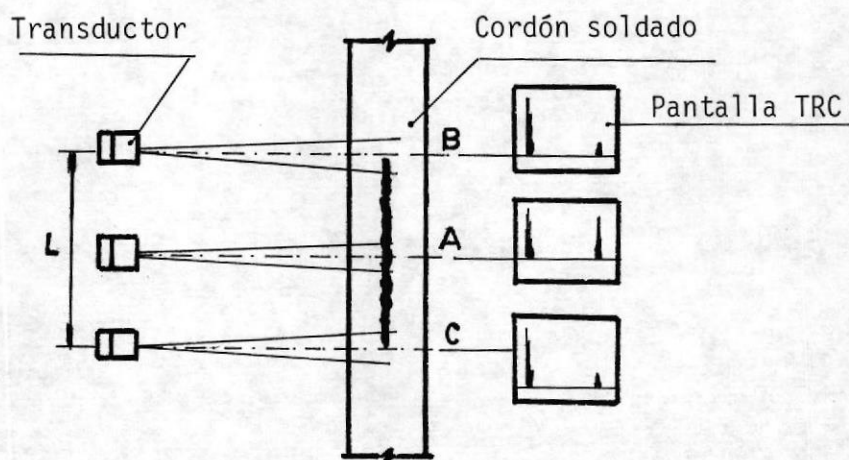


Fig. 12.- Evaluación del Tamaño del Defecto en Longitud (L).

(Fig. 11). El desplazamiento de la señal entre los ecos de 1/2 ó 1/10 de altura máxima (dependiendo del criterio) en la pantalla TRC limitan el tamaño en profundidad del defecto.

Teóricamente el tamaño en profundidad se determina mediante la expresión:

$$e = \frac{D2 - D1}{\text{Tang.}\alpha} \quad (17)$$

e = tamaño del defecto de profundidad.

La evaluación del tamaño en longitud de un defecto se determina aplicando la misma técnica, para lo cual se moverá el transductor paralelo al cordón hasta el sitio donde el eco alcance 1/2 ó 1/10 de la amplitud máxima, tanto a la izquierda como a la derecha. La distancia entre los sitios donde se obtuvieron estas señales indican la longitud del defecto. En la Fig. 12, se muestra como obtener la evaluación aproximada de la discontinuidad en longitud (L).

En el caso que se quiera evaluar el tamaño en extensión transversal del defecto, la inspección

se realiza desde ambos lados del cordón buscando en cada caso el eco de amplitud máxima. La extensión transversal (a) del defecto se obtiene a través de la distancia de los puntos localizados mediante el uso de la expresión:

$$a = X - (Y1 + Y2) \quad (18)$$

La Fig. 13 muestra la localización de la distancia de localización Y1 y Y2. Los puntos de localización son observados directamente en la pantalla TRC.

1.4 NORMAS DE ACEPTACION

Las principales normas en donde se presentan criterios de aceptación y rechazo de piezas ensayadas con ultrasonidos son (Ref. 12, 14, 15, 16 y 17):

- ASME (American Society of Mechanical Engineers), que es el Código de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos para calderas soldadas y recipientes a presión en sus secciones I y VIII respectivamente.
- AWS (American Welding Society), que es el Código de

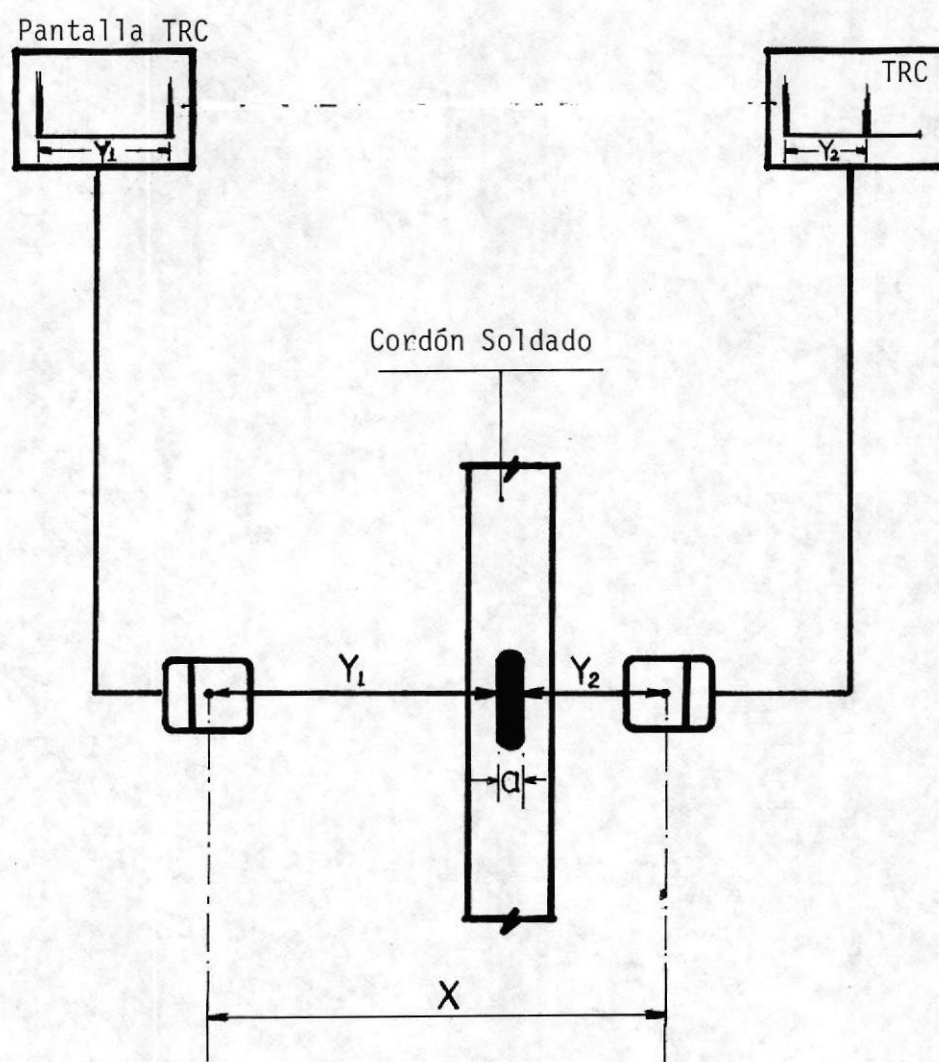


Fig. 13.- Evaluación del Tamaño del Defecto en Extensión Transversal.

la Sociedad Americana de la Soldadura) para estructuras soldadas de edificios, estructuras soldadas de puentes y estructuras soldadas tubulares en su sección D1.1.

- ASTM (American Society for Testing Materials), Código de la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales) el mismo que en su parte 11 presenta los procedimientos para la ejecución del ensayo.

Los criterios son más o menos los mismos y se pueden generalizar en los siguientes:

Se consideran inaceptables los siguientes defectos:

- Todas las discontinuidades de tipo lineal, si la amplitud de la indicación correspondiente, excede de la del nivel de referencia y su longitud es:
 - mayor de $1/4$ (6 mm) para espesores hasta $3/4$ (19 mm)
 - mayor a $1/3 t$ para espesores comprendidos entre $1/4$ (19 mm) hasta $2 1/4$ (57 mm).
 - mayor de $3/4$ (19 mm) para espesores mayores a $2 1/4$ (57 mm)

Cuando se unen elementos de distinto espesor, se aplica el criterio de aceptación o rechazo en base al miembro de menor espesor.

- Cuando las discontinuidades son identificadas como fisuras, la falta de fusión o penetración no son aceptables cualquiera que sea la amplitud de la señal.

El Código ASME establece que las discontinuidades cuya respuesta sea superior al 20% del nivel de referencia serán investigados con el fin de identificar, localizar y evaluarlas de acuerdo a las normas de aceptación dadas anteriormente.

La norma AWS considera que las soldaduras deben estar sujetas previamente a una inspección visual y la inspección con ultrasonidos debe ser realizada de acuerdo a las exigencias dictaminadas sobre los niveles de inspección y aceptación.

Es importante mencionar en esta parte las recomendaciones efectuadas por la norma AWS D1.1, para la inspección de soldaduras mediante ultrasonidos. La Tabla IV representa los niveles mínimos de aceptación, en db, los que se seleccionan en función del espesor de la

unión soldada y la magnitud del defecto que sería aceptable. En esta Tabla se consideran tres tamaños de defectos los que se clasifican de acuerdo al grado de severidad en grande, pequeño y mediano.

La Tabla V presenta los niveles de amplificación utilizados en la inspección de las uniones soldadas los mismos que se seleccionan de acuerdo a la distancia que va a recorrer el haz sonoro en el material de ensayo; en la Tabla el nivel de referencia es de cero decibelios. En nuestro caso y debido a las características del equipo de ultrasonidos Magnaflux PS-702A. El nivel de inspección seleccionado es de -8 db (atenuación) y la evaluación se la realizó con una amplificación de -14 db

TABLA IV

NIVELES MINIMOS DE ACEPTACION SEGUN AWS 01 .1

NIVELES MINIMOS		(DECIBELIOS)													
SEVERIDAD DEL REFLECTOR	ESPESOR DE LA SOLDADURA (mm) y ANGULO DEL PALPADOR														
	8 a 19	>19 a 38	>38 a 63			>63 a 100			>100 a 150			>150 a 200			
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	
GRANDE	+8	+3	-1	+2	+4	-4	-1	+1	-7	-4	-2	-9	-6	-4	
PEQUEÑO	+9	+4	+1	+4	+6	-2	+1	+3	-5	-2	0	-7	-4	-2	
MENOR	+10	+5	+3	+6	+8	0	+3	+5	-3	0	+2	-5	-2	0	

REFLECTORES GRANDES: Cualquier discontinuidad "sin tener en cuenta su longitud" con un grado de severidad mayor (número menor en db) que el de este nivel será rechazado.

REFLECTORES PEQUEÑOS: Cualquier discontinuidad de longitud mayor de 19 mm. con un grado de severidad superior (número menor en db) que el de este nivel será rechazado.

REFLECTORES MENORES: Sólo las discontinuidades cuya longitud exceda de 51 mm. y con un grado de severidad mayor (número menor en db), que el de este nivel será rechazado.

TABLA V

NIVELES DE INSPECCION SEGUN AWS D1.1

DISTANCIA RECORRIDA POR EL SONIDO (mm).	REFERENCIA SOBRE CERO (db).
hasta 63	+ 14
63 a 127	+ 19
127 a 254	+ 29
254 a 381	+ 39

NOTAS REFERENTES A LAS TABLAS IV y V:

- 1.- Discontinuidades con un grado de severidad superior al correspondiente a un reflector "menor", deberán estar separadas entre si al menos $2L$, siendo L la longitud de la discontinuidad mayor. Las agrupaciones que no cumplen estas exigencias se considerarán como una discontinuidad única siendo determinado su tamaño por la suma de las longitudes correspondientes a cada una de las discontinuidades más la distancia entre ellas.
- 2.- Las discontinuidades con un grado de severidad "mayor" al correspondiente a un reflector "menor", no podrán estar a una distancia inferior a $2L$ de los extremos de una soldadura sometida a esfuerzos principales de tracción, siendo L la longitud de la discontinuidad.
- 3.- Las discontinuidades próximas al plano de la raíz en soldaduras de penetración total con chaflanes en doble V, doble J, doble U de cualquier otro tipo de chaflán doble detectados con los niveles de inspección, serán evaluadas a un nivel de aceptación 4db más sensible del prescrito por esta Tabla (4 db al valor indicado).
- 4.- En la soldaduras efectuadas por los métodos de electro-escoria o electro-gas, las discontinuidades cuya longitud excede de 51 mm., y se encuentran en el centro de las mismas, serán evaluadas con un nivel de aceptación 0 db superior a los indicados.

CAPITULO II

TRABAJO EXPERIMENTAL

En este Capítulo se explica en detalle los métodos de calibración utilizados para la inspección con ultrasonidos de las uniones soldadas, así como cada una de las diferentes técnicas empleadas en la exploración de las mismas para la localización y caracterización de los diferentes defectos detectados. Se detalla además el uso de las cartas de localización para la ubicación exacta de cada una de las discontinuidades presentes.

2.1 Equipo utilizado

Para el presente trabajo se utilizó el siguiente instrumental:

- Equipo:

Marca: Magnaflux, serie: PS-702A

Vol: 110 Ac/5,5 Dc.; Frecuencia: 60 Hz

- Transductores:

Angulo	Frecuencia	Dimensión (Pulg)
Normal	2,25 MHz	3/4
45°	1 MHz	3/4
60°	2,25 MHz	0,750 Dia

- Acoplante:

ACEITE SAE 20

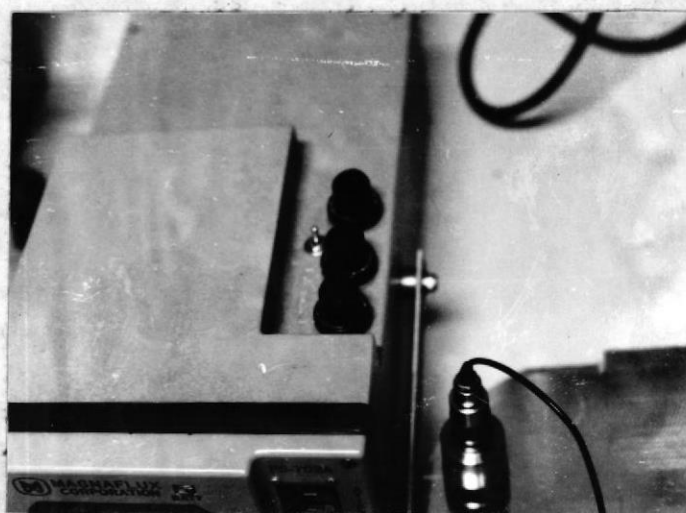
- Bloque de Calibración del International Institute of Welding (IIW) designado como V1. Se construyó además un bloque para calibración de la sensibilidad y linealidad del equipo.

El modelo PS-702A es un instrumento ultrasónico portátil transistorizado operado a batería, diseñado para mostrar un determinado número de pulsos en un tubo de rayos catódicos (TRC), en el cual se puede indicar la presencia o ausencia de defectos. El equipo puede ser usado también en la medición de espesores.

Los controles de la unidad son fácilmente accesibles para que el operador pueda realizar los ajustes requeridos. La Fig. 14 a y b muestra los con -



(a)



(b)

Fig. 14.- Controles del Equipo de Ultrasonidos Magnaflux PS-702A.

- a) Vista Frontal
- b) Vista Superior

troles del equipo localizados en la parte frontal y superior respectivamente.

La Tabla VI presenta los diferentes controles que posee el modelo PS 702A, indicando su función, localización y posición básica para iniciar un ensayo por ultrasonido.

2.2 DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS

El correcto diseño de uniones soldadas es de importancia para la obtención de uniones sólidas y libres de defectos que puedan satisfacer los requerimientos de servicios a que están sujetos. En el diseño de uniones soldadas hay que tener en cuenta que éstas no sean de difícil ejecución, que no sean inaccesibles o que produzcan condiciones defectuosas.

En el presente trabajo las uniones soldadas fueron diseñadas de acuerdo a las siguientes especificaciones:

- Se consideró que el tipo de unión, sea de lo más - - usado en nuestro medio, fácil y económico. Se seleccionó una soldadura a tope con penetración de chaflanes en V simple o en V doble. Este tipo de chafla -

TABLA VI

CONTROLES DEL EQUIPO DE ULTRASONIDO MAGNAFLUX PS 702A

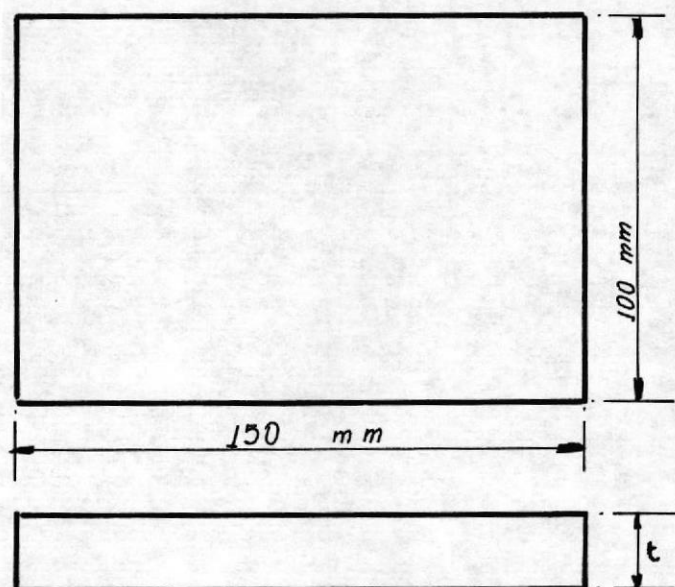
CONTROL	UBICACION	FUNCION	POSICION BASICA
Power on -off	Frontal	Encendido del Equipo	on
Dual-Single	Frontal	Permite uso de 1 ó 2 transduc- tores	Single
Power High-Low	Frontal	Control de la energía al transductor	Low
Conectores T.R.	Frontal	Conección al transductor	T o R
Atten DB	Frontal	Atenuación de las video-seña- les en el receptor	Cero, Cero
Sens	Frontal	Ajuste de la amplitud en el receptor	Comp.C.M.R.
Trans. Damp	Frontal	Control de la energía del transductor	Comp.C.M.R.
Refect	Superior	Control de ruido de la línea de base	Comp.C.M.R.
Sweep Rate S.M.L.	Superior	Control del rango de barrido	M
Rate (Sweep)	Superior	Control de la extensión del barrido	1/2 vuelta M.R.
Delay (Sweep)	Superior	Control del atraso de barrido	Comp.C.M.R.

C.M.R. Contra las manecillas del reloj

M.R.- A favor de las manecillas del reloj

nes puede dar lugar a la producción de defectos si las condiciones de soldadura no son las correctas. En la Fig. 15 se muestran las dimensiones de las piezas a fabricarse y las características de los chaflanes usados.

- Para la construcción de la pieza se utilizó un acero de bajo contenido de carbono.
- La preparación de los biceles se realizó mediante el método de oxicorte, luego se procedió a maquinar los chaflanes utilizando una fresadora de tipo universal.
- El proceso empleado en la preparación de la unión fue el de soldadura manual por arco eléctrico, utilizando dos tipos diferentes de electrodos como lo son el electrodo de Rutilo E-6013 y el electrodo básico E-7018, según norma AWS (American Welding Society).
- Para la ejecución de la soldadura en las uniones diseñadas, se tuvo la ventaja de contar con un técnico-operador calificado en soldadura, lo que permitió fabricar soldaduras controlando los parámetros y condiciones de soldeo de tal manera que permitieron deliberadamente obtener defectos patrones, para que sean posteriormente detectados por ultrasonido. Los defectos



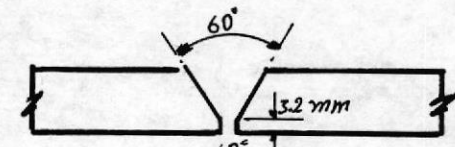

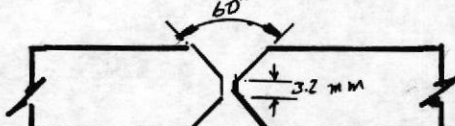
Espe­sor t (mm)	Chaf­lán	Características
17	V	
17	X	
25	X	

Fig. 15.- Dimensiones de las piezas soldadas y de la preparación diseñada.

introducidos se comprobaron radiográficamente como se detallará más adelante.

- En la Tabla VII se muestran las características de las uniones soldadas fabricadas en el presente trabajo.

2.3 CALIBRACION DEL EQUIPO

Con el fin de que la información que se obtiene mediante el ensayo ultrasónico sea comparable y repetitiva, se hace necesario calibrar y fijar las condiciones de funcionamiento y sensibilidad del equipo de ensayo que se emplea.

Como se sabe, el equipo de ensayo ultrasónico está compuesto por un número de componentes, cuyo comportamiento debe ser evaluado en su funcionamiento en conjunto. Al efectuar el ensayo se debe tener la seguridad de que el equipo utilizado (instrumento electrónico, transductores y cables de interconexión) estén operando en condiciones de sensibilidad determinadas y reproducibles de manera tal de que las informaciones obtenidas (altura y posición de los ecos) pueden ser directamente comparables. Es importante verificar periódicamente el mantenimiento de la linealidad de la

TABLA VII

CARACTERISTICAS DE SOLDADURAS USADAS EN LA ELABORACION DE LAS UNIONES SOLDADAS

PIEZA N°	BISEL TIPO	ELECTRODO TIPO AWS	DEFECTO TIPO	CONDICIONES
1	V	Rutilo E-6013	- Falta de penetración	- Corriente demasiado baja - Diámetro del electrodo pequeño.
2*	-	-	--	--
3	V	Rutilo E-6013	- Falta de fusión - Inclusiones de escoria	- Corriente demasiado baja - Desplazamiento deficiente del electrodo.
4	X	Básico E-7018	- Porosidades - Inclusiones de escoria	- Arco alargado - Electrodo húmedo - Desplazamiento deficiente del electrodo.
5	X	Rutilo E-6013	- Falta de penetración	- Corriente demasiado baja - Diámetro del electrodo pequeño
6	X	Rutilo E-6013	- Falta de espesor - Exceso de material	- Poco material depositado - Material depositado en exceso.
7	X	Básico E-7018	- Mordedura	- Corriente elevada - Desplazam. rápido del elect.
8	V	Rutilo E-6013	- Soldadura buena	- Buena limpieza - condiciones normales
9	X	Básico E-7018	- Soldadura mala	- Mala ejecución - Agujeros taladrados

2* Esta pieza no fue soldada porque tenía fallas en la preparación del bisel

base de tiempo del equipo electrónico. Es también necesario controlar el ángulo y la posición de salida del haz ultrasónico cuando se emplean transductores angulares.

Se debe tener presente que estas calibraciones se hacen para obtener referencias en la operación del equipo y permitir así comparaciones de sensibilidades relativas pero nunca deben ser utilizadas como elementos de juicio para la evaluación de defectos en forma absoluta.

2.3.1 Evaluación de la Linealidad

La evaluación de la linealidad que debe poseer el equipo de ultrasonido se realiza tomando en cuenta las consideraciones y procedimientos descritos en detalle en la Norma INTA (Ref. 19). Para la realización se utilizó el siguiente instrumental:

- Transductor normal; 2,25 MHz; tamaño 3/4 pulg.
- Bloque de calibración IIW (V1)
- Acoplante aceite SAE 20

EVALUACION DE LA LINEALIDAD HORIZONTAL

Se fija el rango de la escala horizontal en 100mm. y se apoya el transductor sobre el bloque patrón en la posición de espesor correspondiente a 25mm. (Fig. 16). La Fig. 17 muestra la representación del oscilograma obtenido durante la evaluación donde se observa la sucesión 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, es decir a 4/5 de la altura de la pantalla. En la Tabla VIII se presenta la información obtenida.

La escala se considera lineal cuando no existe diferencias entre las distancias de los distintos ecos; aún cuando existe alguna diferencia cualquiera entre el pulso de entrada y el primer eco. La Fig. 18 muestra la evaluación de la linealidad horizontal del equipo de ensayo en donde se observa que la base de tiempo es

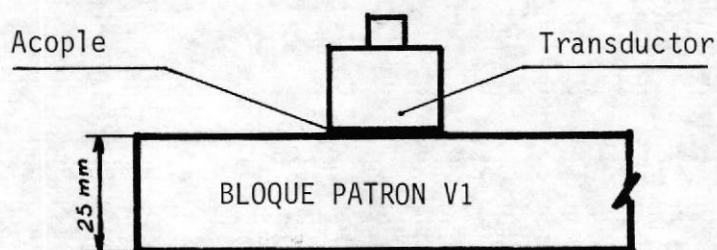


Fig. 16.- Posición del Transductor para la Evaluación de la Linealidad.

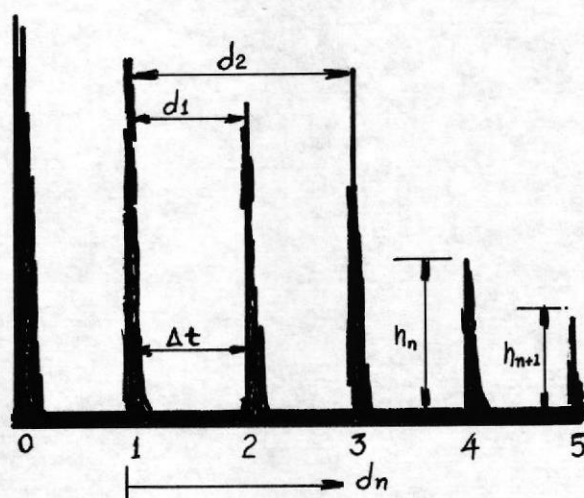


Fig. 17.- Representación del oscilograma obtenido durante la evaluación de la linealidad. Se identifican las señales usadas para la evaluación.

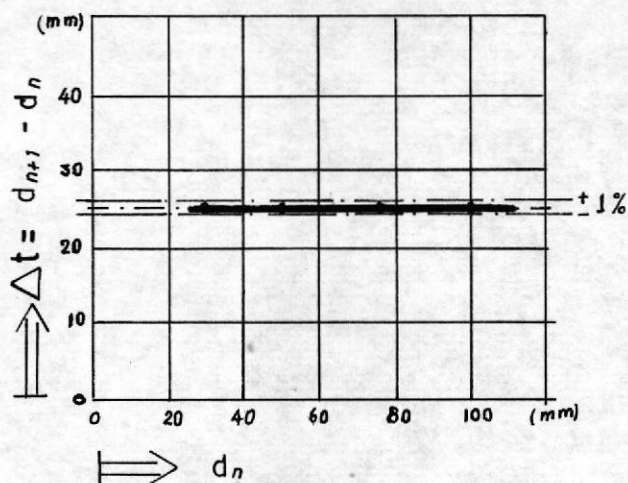


Fig. 18.- Representación de la Linealidad Horizontal
Curva Δt vs d_n para el Equipo Magnaflux
PS-702A.

d_n = distancia entre ecos respecto al eco inicial
 Δt = distancia entre cada par de ecos sucesivos

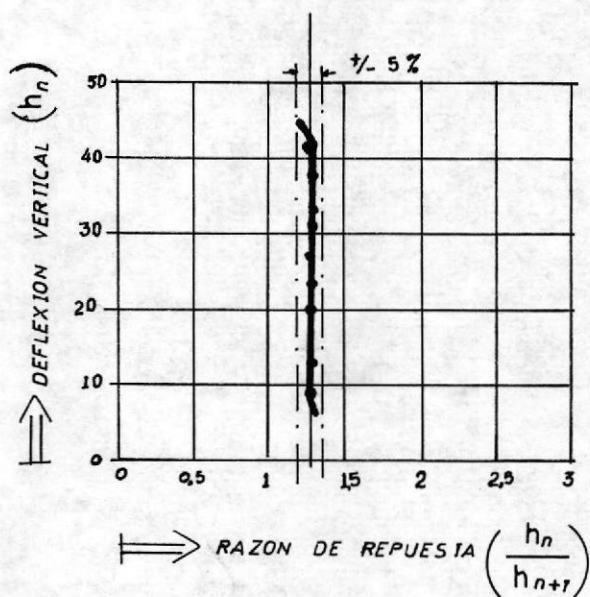


Fig. 19.- Representación de la Linealidad Vertical.
Curva deflexión vertical Vs razón de res-
puesta, para el equipo de ultrasonidos
Magnaflux PS-702A.

TABLA VIIIDATOS PARA LA EVALUACION DE LA
LINEALIDAD HORIZONTAL

TRAMO	ΔT (mm.)	d_n (mm.)
1 - 2	25	25
2 - 3	25	50
3 - 4	25	75
4 - 5	25	100

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 TRC.

EVALUACION DE LA LINEALIDAD VERTICAL

La evaluación se realiza manteniendo el transductor en la posición correspondiente al ensayo anterior y utilizando el mismo oscilograma.

El procedimiento descrito en la Norma INTA (Ref. 19) es para equipos que poseen ganancias positivas en db; el equipo utilizado para este estudio posee ganancias negativas (atenuación en db.), por lo que con el mando de amplificación se lleva la altura del penúltimo eco h_n hasta que llegue al 100% de la pantalla, luego se realiza la lectura de 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 la atenuación en 1 db. se leen nuevamente h_n y h_{n+1} y se encuentra la razón de respuesta. El proceso se repite hasta que el eco h_n llega a un valor del 10% de la altura de la pantalla. Ver Fig. 17.

Con los datos obtenidos se elaboró la Tabla IX, haciendo uso de los mismos se construyó la gráfica de flexión vertical (h_n) vs razón de respuesta (h_n/h_{n+1}), la misma que se muestra en la Fig. 19.

Como se ve, la razón de respuesta de dos ecos sucesivos se mantiene constante conforme disminuye la amplificación de las señales. Esto indica que el equipo de ensayo posee una buena linealidad vertical. El último valor de h_n debe ser el 10% del primero, sin embargo no se pudo llegar a este valor por dificultades presentadas que podrían introducir errores de paralaje.

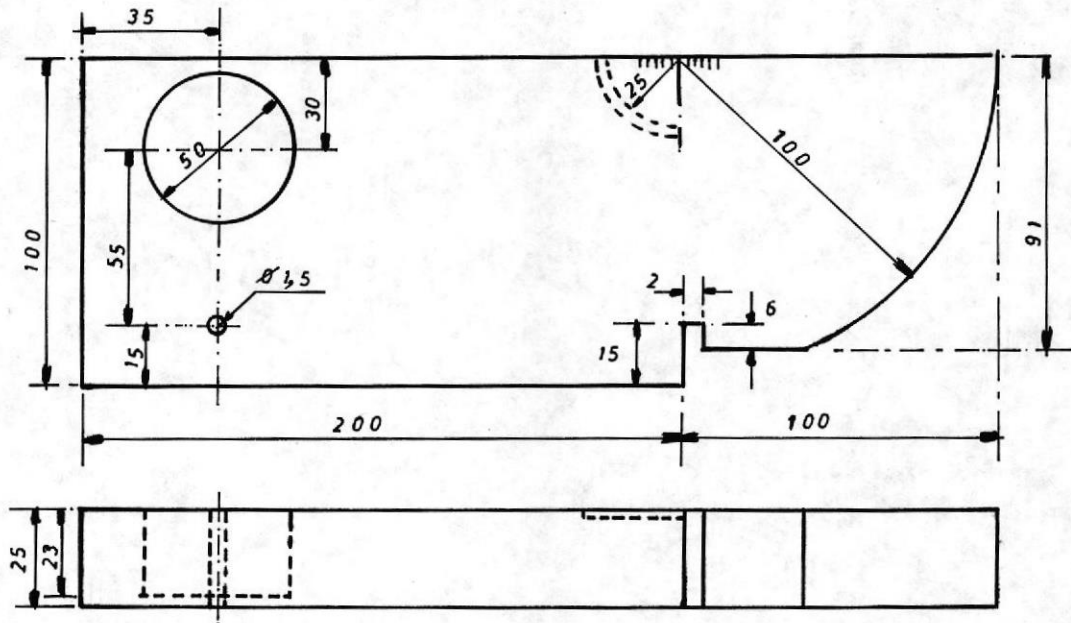
2.3.2 Calibración de Transductores

Para la calibración de los transductores así como para la comprobación del equipo, existen varios tipos de bloques de calibración normalizados, entre los que se destacan por su utilidad y amplia difusión los del Instituto Internacional de la Soldadura (IIW) en sus versiones V1 y V2. En la Fig. 20 se muestran estos dos bloques.

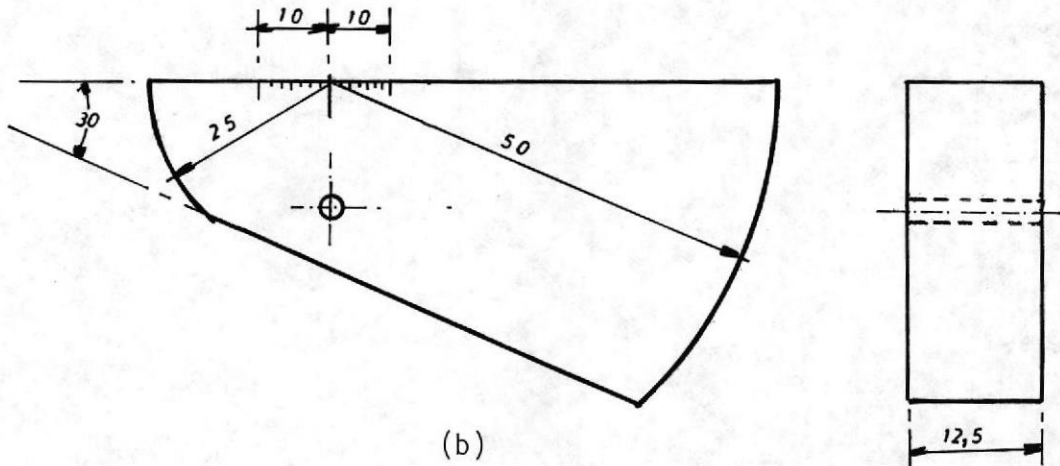
TABLA IX

DATOS PARA LA EVALUACION DE
LA LINEALIDAD VERTICAL

ATENUACION GANANCIA (-) en db	h_n mm	h_{n+1} mm	h_n/h_{n+1}
00	47	43	1,1
1	44	38	1,15
2	42	35	1,2
3	39	31	1,25
4	35	28	1,25
5	33	26,5	1,25
6	28	22,4	1,25
7	24	19,2	1,25
8	20	16	1,25
9	13	10	1,3
10	9	7	1,28



(a)



(b)

Fig. 20.- Bloques de Referencia del Instituto Internacional de la Soldadura (IIW).

- a) Bloque V1 para calibración con transductores tamaño normal
- b) Bloque V2 para calibración con transductores miniaturas

El bloque V1 permite además ajustar la sensibilidad y la distancia en el equipo, determinar la resolución, el ángulo y sensibilidad del palpador utilizado. El bloque V2 permite el ajuste del equipo para palpadora o transductores angulares miniatura, así como para el calibrado de distancias (campos) menores de 200 mm.

Para el examen de piezas o soldaduras específicas por ultrasonidos el Código ASME en su sección V, artículo 5 recomienda el uso de un bloque básico de calibración, el mismo que se muestra en la Fig. 21. El bloque se construye con un material igual o ultrasónicamente equivalente al que se va a examinar y de acuerdo a las dimensiones que se indican en la Tabla X. Por medio de este bloque se realizan las calibraciones adecuadas para un examen fiable y reproducible. En el presente trabajo, el bloque se construyó tomando en cuenta que el espesor del material a ensayarse era menor a 25 mm. En el Apéndice B se muestran los dos bloques mencionados.

Las operaciones de calibración de transductores descrita a continuación deberán realizarse antes

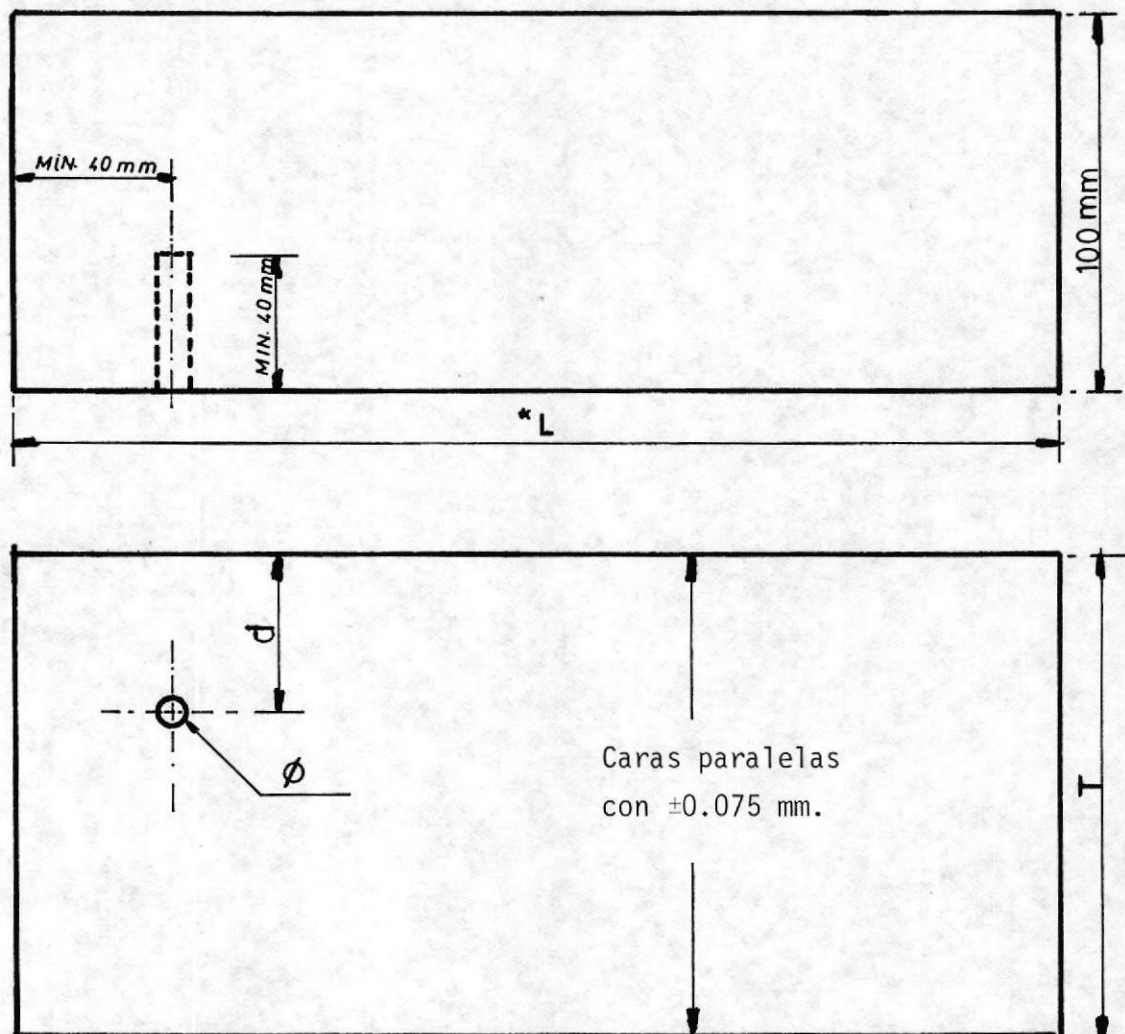


Fig. 21.- Bloque Básico de Calibración para Soldaduras
(Ref. 16).

TABLA X

DIMENSIONES RECOMENDADAS PARA LA CONSTRUCCION
DEL BLOQUE BASICO DE CALIBRACION ASME

ESPEJOR DEL MATERIAL A ENSAYAR (t)(mm.)	ESPEJOR DEL BLOQUE (t)(mm.)	DISTANCIA DEL AGUJERO A UNA CARA (d) (mm.)	DIAMETRO DEL AGUJERO (φ) (mm.)
hasta 25	25 ó t	T/2	2,4
25 a 50	38 ó t	T/4	3,2
50 a 100	75 ó t	T/4	4,8
100 a 150	125 ó t	T/4	6,3
150 a 200	175 ó t	T/4	8
200 a 250	225 ó t	T/4	9,5
mayor a 250	t	T/4	**

* La longitud L depende de la magnitud del recorrido del haz y de los pasos que se emplea.

** Por cada incremento del espesor de 50 mm. o fracción, el diámetro del agujero se incrementará en 1,5 mm.

del examen de las soldaduras por el método de ultrasonidos.

a.- Transductores Longitudinales

Para la realización de esta prueba se utiliza un transductor normal cuyas ondas se propaguen en forma longitudinal a través del material ensayado. La calibración consiste en:

1.- Calibración de la base de tiempo.- Para su realización se procede de acuerdo a las siguientes indicaciones:

- Se apoya el transductor sobre el bloque patrón V1 con el medio de acople adecuado y sin ejercer excesiva presión. Si el rango de escala es menor a 250 mm. se sitúa en la posición de 25 mm, tal como se observa en la Fig. 22, posición 1. Si el rango de escala es mayor a 250 mm. se lo situará en la posición 2, que corresponde a los 100 mm. de espesor en el bloque V1.
- En la pantalla TRC se observa la sucesión de

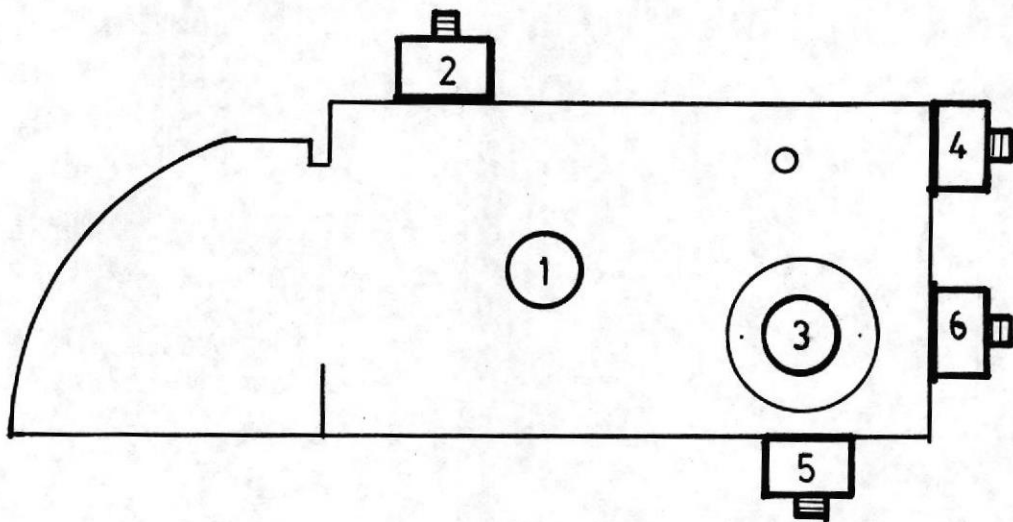


Fig.22.- Ubicación del Transductor sobre el Bloque VI usando Ondas longitudinales.

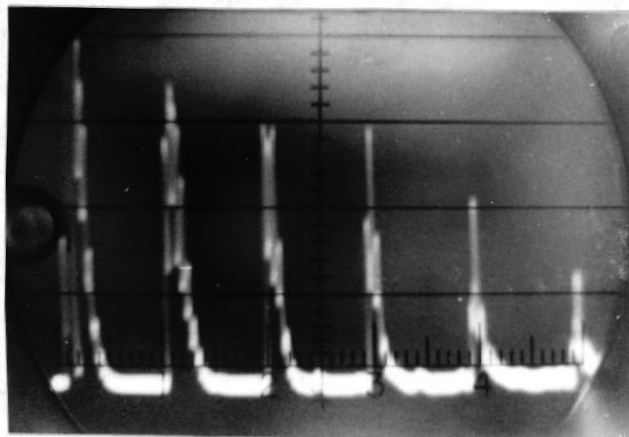


Fig. 23.- Oscilograma de la Calibración de la Escala de Tiempo en la Posición 1 (25 mm.)

ecos de fondo obtenidos tal como se muestra en la Fig. 23. Con los controles del equipo se ajusta la distancia en dos ecos de fondo sucesivos haciéndolos coincidir con el espesor que recorre el haz en el bloque de calibración. Lograda esta calibración se observa que el pulso de entrada se desplaza a la izquierda del cero. Esto se debe al retraso de tiempo que existe entre la aparición del eco en la pantalla y el momento en que el haz ultrasónico emerge del cristal, lo que es conocido como retardo de vibración del cristal.

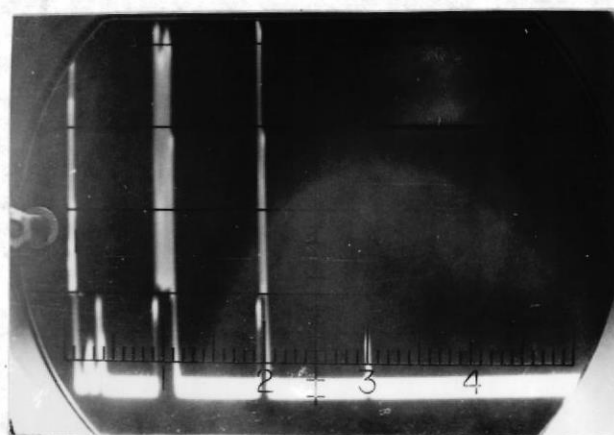
2.- Regulación de la Sensibilidad.- En este caso el proceso de ajuste depende de si se va a trabajar con alta o baja ganancia. La regulación se realiza con el fin de obtener datos de referencia que permitan comprobar posteriormente si se mantiene o no la sensibilidad de trabajo.

- Para la regulación con alta ganancia se debe fijar el transductor en la posición 3 que se indica en la Fig. 22. Se hace coincidir el primer eco con la lectura del espesor equivalente a 50 mm. de la pieza de plástico (polimetacrilato de Metilo). Se registra la regu-

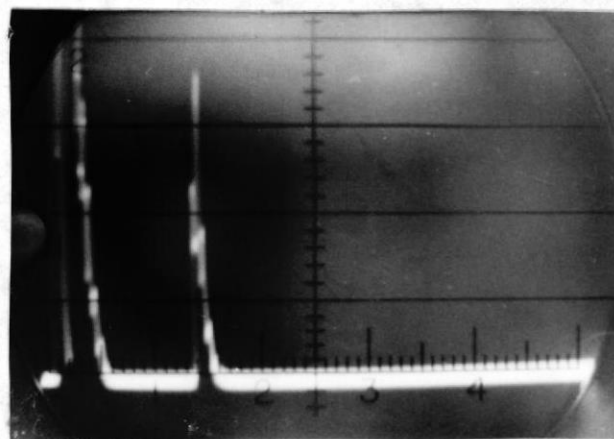
lación tomando nota del número de ecos y la altura del último de ellos. El oscilograma correspondiente se muestra en la Fig. 24a.

- Para la regulación con baja ganancia se fija el transductor en la posición 4 indicada en la Fig. 22. Se desplaza el transductor sobre el bloque buscando la máxima altura del eco proveniente del agujero de 1,5 mm. de diámetro. En la Fig. 24 b se muestra el oscilograma correspondiente a una medida de buena sensibilidad.

3.- Verificación del Poder de Resolución. Primeramente se coloca el transductor en la posición que se indica en la Fig. 25 a. En la pantalla se obtienen los ecos correspondientes a los espesores de 100 mm, 91 mm y 85 mm. que corresponden a la parte ancha, rebaje y ranura del bloque, en su orden. Se ajusta la altura del mayor de los ecos de manera que alcance los $\frac{2}{3}$ de la altura de la pantalla. Las señales obtenidas se comparan con esquemas patrones que permitan calificar la resolución de un equipo de ultrasonidos.



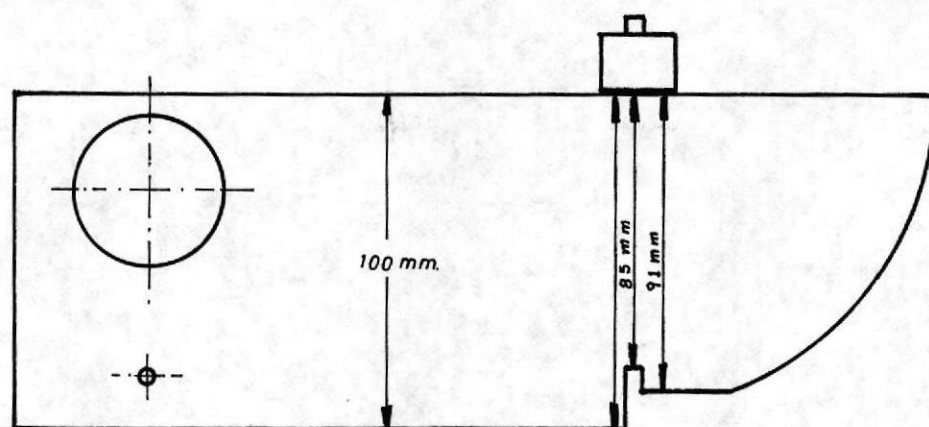
(a)



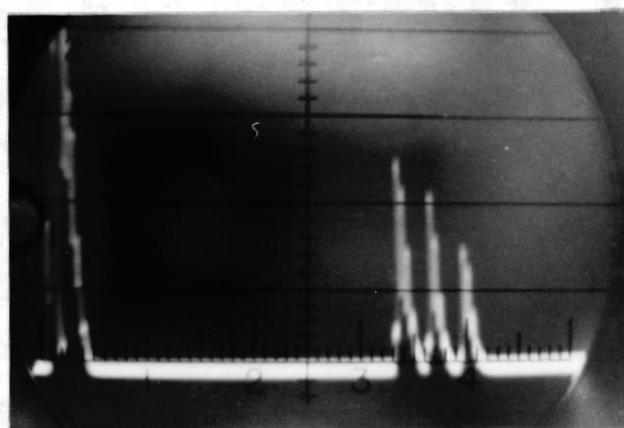
(b)

Fig. 24.- Regulación de la Sensibilidad

- a) Con alta ganancia
- b) Con baja ganancia



(a)



(b)

Fig. 25.- Regulación de la Resolución

- a) Posición del transductor en el Bloque V1
- b) Oscilograma correspondiente a una buena Resolución

En la figura 25 b se muestra el oscilograma de la resolución obtenida en este caso, la cual se califica como buena.

4.- Verificación de la zona muerta o zona de silencio, por lo cual su verificación se considera sólo una aproximación y no una medida efectiva.

- Primeramente se coloca el transductor en la posición 5 indicada en la Fig. 22. Si se obtiene algún eco se debe colocar el transductor en la posición 6 indicada en la misma figura. Si en esta posición se obtiene respuesta la zona de silencio tiene un valor entre 5 y 10 mm. Si no se obtiene eco alguno de respuesta, la zona de silencio será mayor a 10 mm., tal como aconteció en el presente caso.

b.- Transductores Angulares

La inspección de uniones soldadas se efectúa en la mayoría de los casos mediante el empleo de transductores angulares. Las principales calibraciones o verificaciones ejecutadas son:

1.- Verificación del Punto de Salida del Haz.-

Se sitúa el transductor sobre la ranura del bloque patrón VI con el haz orientado hacia la cara curva, tal como se muestra en la Fig. 26 a, se desplaza el transductor sobre ambos lados de la posición indicada hasta conseguir el eco de máxima altura en la pantalla proveniente del radio de 100 mm. Esto debe ocurrir justamente cuando el punto de salida del haz coincide con la marca cero del bloque, como ocurrió en este trabajo. En la Fig. 26 b se presenta el oscilograma obtenido utilizando un transductor de 60° y 2,25 MHz.

2.- Calibración de la Base de Tiempo.-

Se coloca el transductor en la posición indicada en la Fig. 26 a, obteniéndose un primer eco de la marca correspondiente al radio de 100 m. en la escala de la pantalla TRC. Se obtiene además un eco que procede de la ranura del bloque y que coincide con la marca de 225 mm. en la misma escala. En la Fig. 27 se muestra el oscilograma correspondiente a este tipo de calibración.

3.- Verificación del Angulo de Refracción.-

La

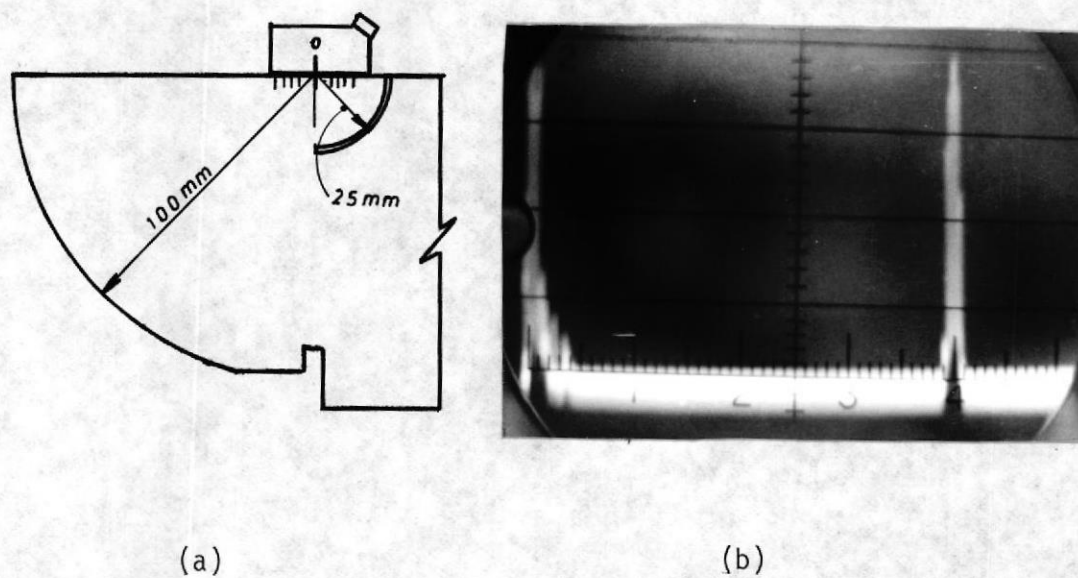


Fig. 26.- Determinación del Punto de Salida del Haz
 a) Posición del transductor
 b) Oscilograma correspondiente

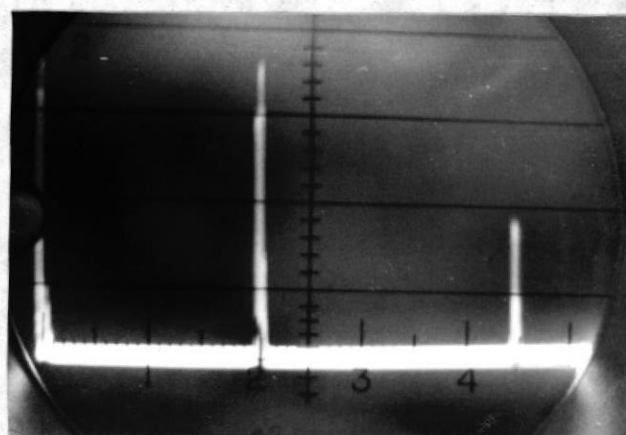


Fig. 27.- Calibración de la base de tiempo. Se observan las señales provenientes del radio y de la ranura del bloque a 100 m. y 225 mm. respectivamente.

verificación o determinación del verdadero ángulo de refracción se debe llevar a cabo porque muchas veces no coincide con el señalado por el constructor, debido a que se producen desgastes irregulares en la suela del transductor.

La determinación del ángulo de refracción se realizó para los transductores de 45° y 60° utilizando el bloque V1. En este bloque se posicionaron dichos transductores en las marcas nominales de 45° y 60° , tal como muestra la Fig. 28. La detección de ecos máximos justamente en estas posiciones, permitió determinar o verificar que los ángulos mencionados en cada transductor eran los correctos.

4.- Obtención de la Curva de Calibración Distancia Amplitud (DAC).- Para la realización de esta prueba se hace referencia al Código ASME (Sección V, artículo 5). "EXAMEN POR ULTRASONIDOS", el que recomienda el uso del bloque básico de calibración que se indica en la Fig. 21, que se construyó de acuerdo a las dimensiones recomendadas para un espesor de 25 mm. El agujero de referencia permite calibrar la sensibilidad

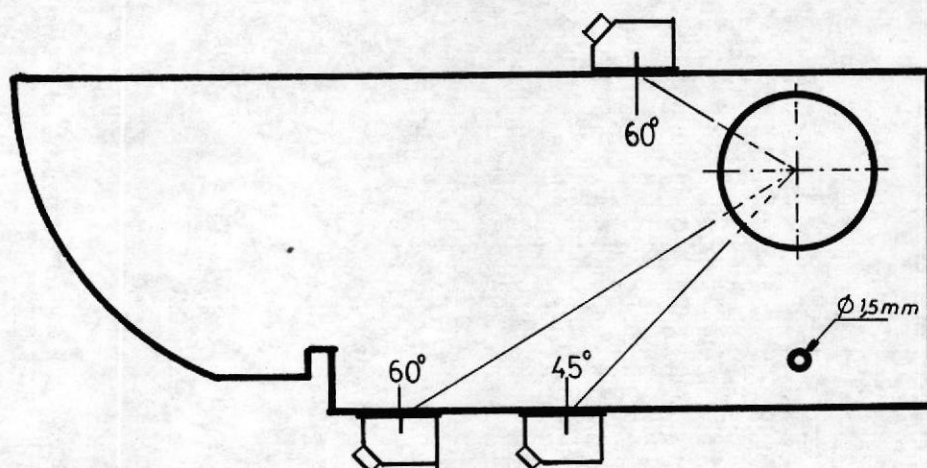


Fig. 28.- Verificación del Angulo de Refracción. Se utiliza el bloque VI para transductores de 45 y 60 grados.

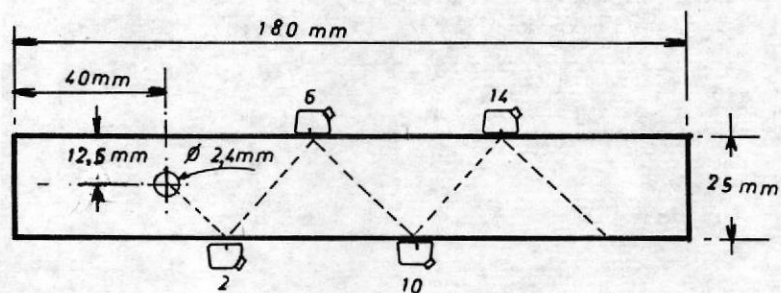


Fig. 29.- Bloque de Calibración según ASME para la construcción de la Curva DAC.

Se observan las distintas posiciones del transductor respecto al agujero de 2,4 mm.

del equipo según diferentes posiciones del transductor, lo que a su vez permite obtener indicaciones sobre la pantalla del equipo, que pueden relacionarse en cierta manera, con las indicaciones recibidas durante el ensayo. Su importancia radica en que la ganancia del amplificador del equipo determina el tamaño mínimo del defecto que puede ser detectado. Alta ganancia (amplificación elevada) permitirá detectar defectos o discontinuidades que quizás no son rechazables; por lo contrario una baja ganancia (amplificación baja) no detectará defectos que son perjudiciales o rechazables. Se hace necesario pues establecer un nivel óptimo de sensibilidad.

En la Fig. 29 se muestra bloque utilizado y las posiciones relativas del transductor con respecto al agujero de 2,4 mm. de diámetro durante el ensayo. A partir de estas posiciones se obtienen respuestas con cuyas amplitudes se elaboró la Tabla XI para posteriormente construir la Curva Distancia Amplitud (DAC) presentada en la Fig. 30. Para este efecto se utilizó un transductor angular de 60° , 2,25 MHz, tamaño 3/4 plg. La curva original se construyó en una lámina

TABLA XI

POSICION DEL TRANSDUCTOR Y AMPLITUDES DE LAS SEÑALES
PARA CONSTRUCCION DE UNA CURVA DAC

Posición del Transductor en octavos de paso	Distancia D en mm correspondiente a los octavos de paso	Distancia Sc recorrida por el haz (mm) $Sc = \frac{D}{\text{Sen } \alpha}$	Amplitud de la señal (altura de la pantalla = 51 mm.)	
			mm	%
2*	21,8	25,17	46*	90
6	65,6	57,75	38,5	75
10	109,4	126,4	15	29,4
14	163,1	176,8	6	11,8

* Valor extrapolado de la curva DAC

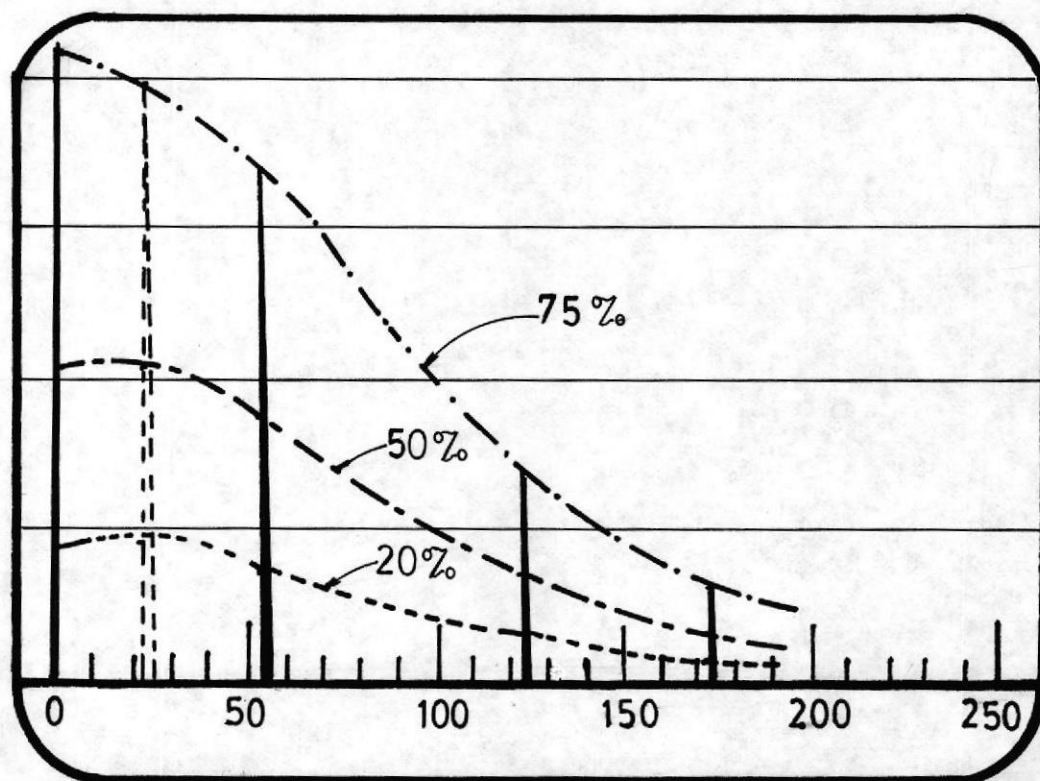


Fig. 30.- Curva Distancia Amplitud (DAC) para el Equipo Magnaflux PS 702A

transparente para ser sobrepuesta en la pantalla TRC, y de esta manera facilitar la lectura y evaluación de las amplitudes obtenidas en la inspección posterior de las soldaduras. La forma de operar es como sigue:

- La primera señal de la curva se obtiene colocando el transductor tan cerca como sea posible al agujero de referencia, siempre y cuando esta distancia no sea menor a $3/8$ de paso o de 40 mm (lo que sea menor). En estas condiciones se regula el mando de ganancia de manera que la respuesta corresponda al 75% de la altura total de la pantalla (según Ref. 12). En la Fig. 29 la posición corresponde al punto de respuesta inicial de referencia.

- Sin modificar la ganancia se coloca el transductor de manera análoga en las otras posiciones de reflexión indicada en la Fig. 29, cubriendo la distancia total a examinar. Las señales correspondientes se unen tal como se indica en la Fig. 30. Adicionalmente se han construido curvas por extrapolación para niveles de ganancia del 20% y 50% de acuerdo a lo

que recomiendan las normas correspondientes.

El nivel de ganancia de referencia para el registro y evaluación de los defectos es el que se estableció al fijar el primer punto de la curva DAC. Sin embargo, el nivel de ganancia de exploración será por lo menos 6 dB mayor que el anterior, para compensar pérdidas de atenuación que se pueden presentar en el ensayo real de las soldaduras.

2.4 EXPLORACION DE LAS UNIONES SOLDADAS

Antes de iniciar un ensayo por ultrasonidos en uniones soldadas, es necesario determinar las distancias de paso, 1/2 paso y calibrar el equipo de acuerdo a las técnicas de calibración polar y rectangular. La caracterización y localización final de las discontinuidades se realiza con ayuda de láminas transparentes, cartas de calibración y el uso de cálculos trigonométricos.

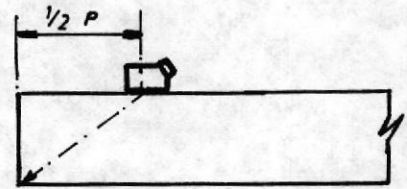
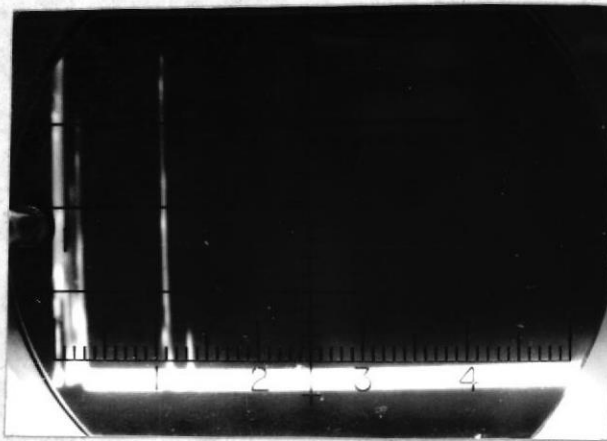
2.4.1 Determinación de la Distancia de Paso

En la Fig. 8 se definió y se representó esquemáticamente "P" que es la distancia lineal entre puntos consecutivos, cualesquiera de intersec -

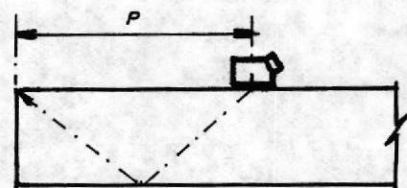
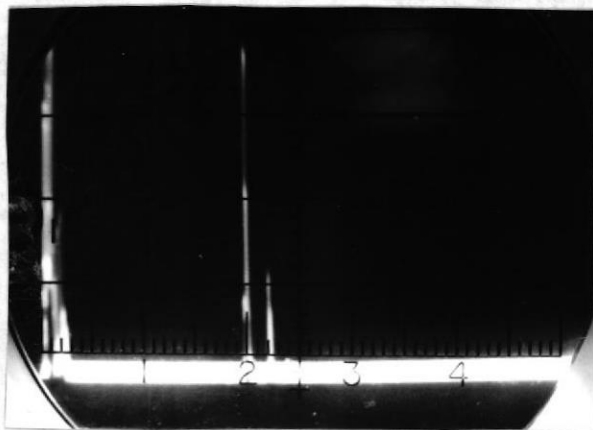
ción del haz sonoro con la superficie de la placa. Antes de la exploración de cada una de las piezas soldadas de la Tabla VI se procedió a determinar la distancia de paso y $1/2$ paso, para saber en qué rango se deberá mover el transductor para una inspección confiable y eficiente de la soldadura.

La Fig. 31 a representa el oscilograma correspondiente a la determinación de la distancia $1/2 P$, para la pieza 8 de 25 mm. de espesor, con un transductor de 45° , donde se observan dos ecos, el de la amplitud máxima corresponde a la reflexión del haz sonoro cuando su centro incide en el borde inferior de la chapa y una segunda reflexión que es un eco parásito. A la derecha del oscilograma se indica la posición del transductor sobre la pieza examinada.

La Fig. 31 b representa el oscilograma correspondiente a la distancia de paso, en este caso la reflexión del haz sonoro se produce cuando el haz incide en el borde superior de la chapa, tal como lo muestra la figura situada a la derecha del oscilograma. El procedimiento seguido en la



(a)



(b)

Fig. 31.- Oscilogramas correspondientes a la Determinación de $\frac{1}{2}$ paso (a) y paso (b), en el borde de una chapa de 25 mm. de espesor.

exploración realizada a cada una de las piezas de la Tabla VI, se detalla a continuación.

1.- Primeramente se realizó una observación visual de la unión soldada a fin de determinar la condición superficial de la misma; ésto es: grado de penetración, tipo de raíz, sobremonta, socavaduras, presencia de irregularidades (gotas de metal, incrustaciones, rugosidades, etc.). Esta observación tenía como objetivo preparar la superficie por donde se desplazará el transductor.

2.- Se examinó con un transductor normal el volumen del material base sobre el que ha de deslizarse el transductor angular, comprobando que el metal base se encuentra libre de defectos que pueda afectar la transmisión de los ultrasonidos.

3.- Se utilizó una frecuencia de ensayo de 2,25 MHz, la cual permite obtener una buena sensibilidad de ensayo y de mayor exactitud en la determinación de la extensión de los defectos.

del cordón debe hacerse con el menor recorrido del haz. En este caso la inspección se realizó con un transductor de 60° y durante la evaluación se utilizó a manera de complemento un transductor de 45° .

5.- La exploración de las uniones soldadas se realiza imprimiendo al transductor un movimiento característico senoidal o en zig-zag, con una ligera rotación de 10° a 20° con el objeto de ampliar el campo de acción del transductor y orientarlo favorablemente para la detección de los defectos que pueden encontrarse en cualquier dirección. La Fig. 32 muestra el movimiento característico del transductor respecto al cordón soldado. Se observa que el transductor se desplaza a distancias comprendidas entre paso y medio paso.

2.4.2 Exploración en Recorrido del Haz y en Proyección Acortada

Para la localización de defectos en la inspección de soldaduras por ultrasonido, se utilizan generalmente dos métodos de calibración: la cali-

bración polar y la calibración rectangular. (Ref. 20).

El método de calibración polar o calibración en recorrido del haz ultrasónico es el más usado en la práctica, sin embargo, requiere tiempo para determinar la posición del defecto con respecto al transductor y a la superficie ensayada. Por este efecto se requiere el uso de cálculos trigonométricos o de una carta de localización gráfica.

El método de calibración rectangular o de proyección acortada es menos usado, sin embargo, este método elimina el uso de cálculos trigonométricos ya que la localización de defectos se realiza mediante láminas transparentes, adaptadas a la pantalla del tubo de rayos catódicos (TRC) del instrumento. Durante la calibración es necesario que se obtengan al menos dos ecos de fondo, lo cual se consigue mediante el uso de los bloques V1 y V2.

Los métodos de calibración en recorrido del haz y en proyección acortada se explican en detalle

en el Apéndice C y en la Ref. 20.

En el presente trabajo se seleccionó la exploración polar o en recorrido del haz, debido a que este sistema presenta mayores variantes de estudio, lo cual permite una mejor evaluación de los resultados obtenidos durante la exploración.

2.4.3 Localización de Defectos mediante Cartas de Calibración

Para la evaluación de los defectos localizados en el examen por ultrasonidos de las uniones soldadas preparadas según la Tabla VI, se utilizan las llamadas cartas de calibración o localizadores gráficos, los mismos que fueron construidos para cada pieza.

La construcción de una carta de calibración se ilustra en la Fig. 33, para el caso de una chapa soldada de 19 mm. de espesor en V doble, inspeccionada con un transductor angular de 60° y 2,25 MHz de frecuencia, se utiliza la técnica de calibración en recorrido del haz.

- Primeramente se marca sobre la carta mediante una línea el espesor de la plancha. Se traza luego la trayectoria del haz sonoro uniendo el punto de incidencia del transductor (marca 0) a través del ángulo de refracción hasta la intersección de la línea horizontal que representa el espesor de la chapa (punto B). En este punto se produce la reflexión del haz, el cual con el mismo ángulo intercepta la cara superior de la chapa (punto A). En la Fig. 33, la distancia OA representa el paso de la onda.

- A continuación se utiliza un cursor transparente sobre el cual se dibuja la sección transversal del cordón de soldadura. Los datos referentes al ancho y forma del cordón se toman directamente de la unión soldada. El cursor se desplaza sobre la carta de calibración simulando el movimiento del transductor con respecto a la soldadura.

- Durante el ensayo se obtuvieron las siguientes lecturas: En la escala de tiempo del instrumento se observó que la distancia recorrida por el haz es 56 mm. La distancia medida desde el pun-

to de emisión del haz al centro del cordón es de 49 mm. aproximadamente. Llevando estos valores a la carta de la Fig. 33 se observa que el haz ultrasónico intersecta la raíz de la soldadura, lo cual se define como una falta de penetración que se encuentra a una profundidad de 10 mm.

La evaluación de los defectos en lo referente a la aplicación de los criterios de rechazo y aceptación se realizó empleando la curva de calibración distancia amplitud (DAC) explicada anteriormente, la misma que se construyó en una lámina transparente para ser sobrepuesta en la pantalla TRC y permitir así una rápida evaluación.

2.4.4 Identificación del Tipo de Defectos

La identificación del tipo de defecto es muy importante en la evaluación de un ensayo por ultrasonidos. Una vez detectada la presencia de un defecto en el cordón de soldadura se procede a identificarlo aplicando movimientos característicos al transductor. Estos movimientos hacen que el defecto al ser interceptado por las distintas zonas del haz sonoro produzcan señales de distin-

tas amplitudes, lo que permite su identificación.

El trabajo siguiente se realizó con el objeto de obtener una referencia del comportamiento del haz sonoro, al incidir sobre un defecto típico y poder así evaluar posteriormente las señales precedentes de la inspección realizada en cada una de las piezas de la Tabla VII. Para este efecto se utilizó la pieza N^o 1, la cual presenta una falta de penetración que se considera como un defecto lineal y la pieza N^o 8 a la cual se le hizo un agujero para simular un defecto circular.

La Fig. 34 describe los movimientos típicos que se le imprimen al transductor una vez detectado un defecto. Estos movimientos son: 1) rotación, 2) orbital, 3) lateral, 4) transversal.

La Fig. 35 describe el comportamiento que sufre la señal al realizar cada uno de los movimientos descritos y al incidir el haz ultrasónico sobre el defecto lineal de la pieza N^o 1. Se pudo notar que al aplicar un movimiento rotacional la señal decrece rápidamente ya que el haz sonoro deja de incidir normalmente sobre el defecto y

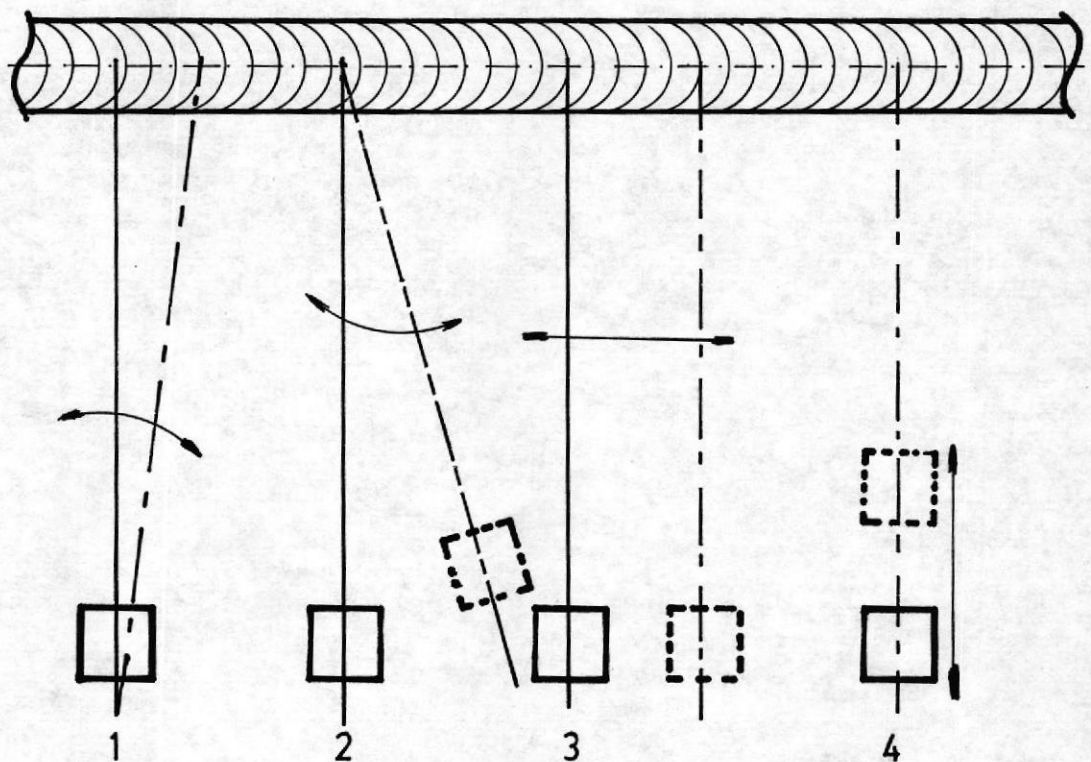


Fig. 34.- Movimientos de un transductor angular para la identificación del tipo de defecto.

- 1.- Rotación
- 2.- Orbital
- 3.- Lateral
- 4.- Transversal

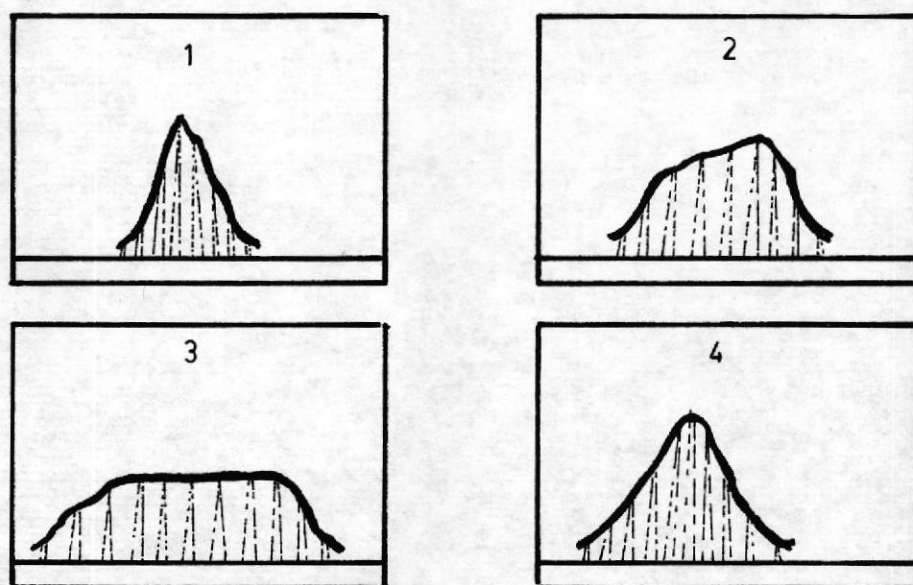
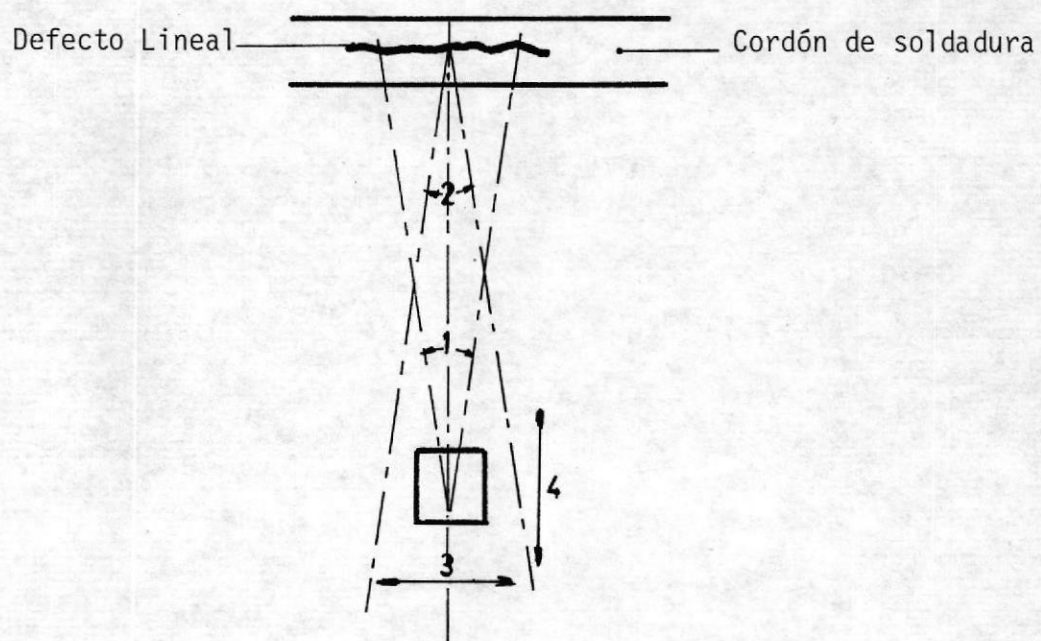


Fig. 35.- Curvas envolventes obtenidas durante la evaluación de un defecto lineal (falta de penetración) en la unión soldada de la pieza Nº 1.

el haz reflejado no retorna al transductor (Ver 1).

Al realizar el movimiento orbital la curva envolvente desarrollada es parecida a la anterior, pero en este caso el defecto es irregular por lo que se mantienen ondulaciones dado a que existen zonas de la superficie normales y no normales al haz incidente (Ver 2).

Cuando se realiza el movimiento lateral, la señal obtenida puede variar o mantenerse constante es decir, que la curva envolvente va a presentar ligeras irregularidades (Ver 3).

Al ejecutar el movimiento transversal la señal comienza a disminuir irregularmente y en forma progresiva desde su máxima amplitud (Ver 4). Con este movimiento se puede evaluar el tamaño en profundidad del defecto.

La Fig. 30 describe el comportamiento que sufre la señal al realizar cada uno de los movimientos descritos y al incidir el haz sonoro sobre el defecto circular de la pieza N° 8. Se observa que al imprimir al transductor un movimiento de

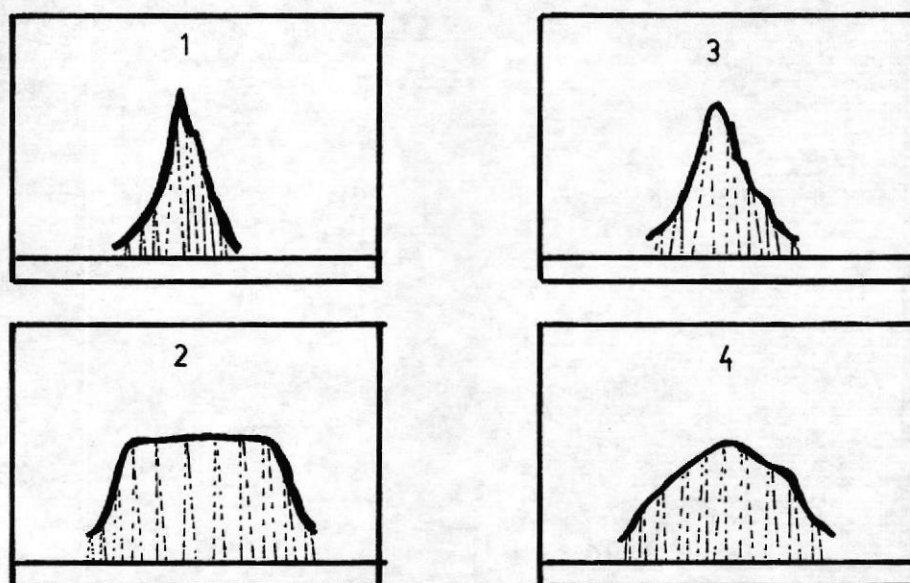
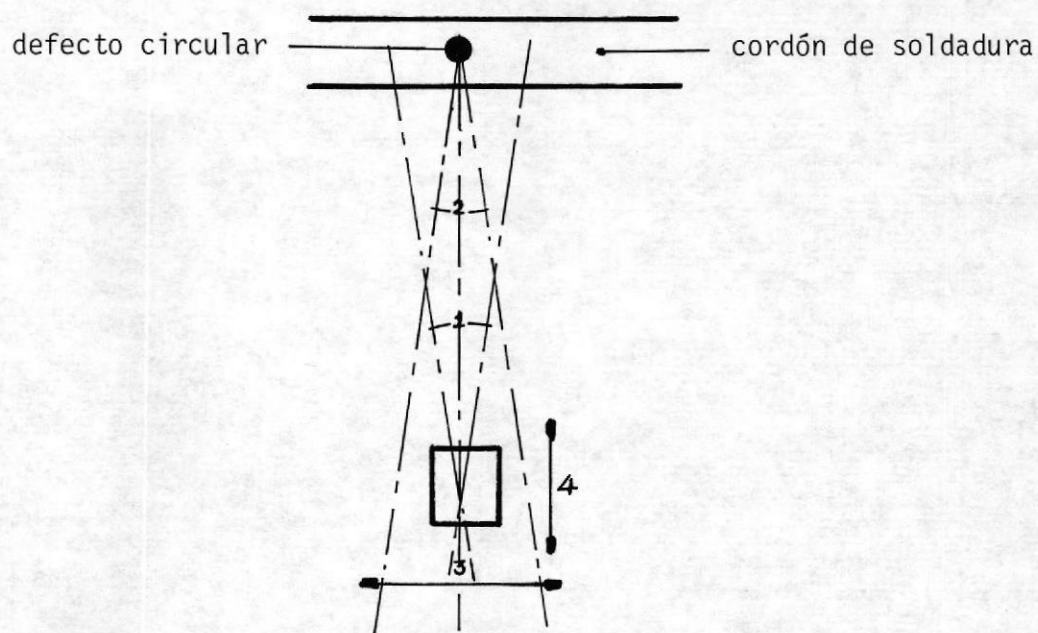


Fig. 36.- Curvas envolventes obtenidas en la evaluación de un defecto circular (agujero construido sobre la unión soldada de la pieza N° 8.

rotación la señal decae rápidamente tendiendo a desaparecer, por lo que la curva envolvente es muy aguda (Ver 1).

Al realizar el movimiento orbital, la curva envolvente permanece constante ya que el defecto presenta la misma superficie desde cualquier posición y la amplitud no varía (Ver 2).

Cuando el transductor se desplaza paralelo al cordón en movimiento lateral la curva envolvente se estrecha y la zona de máxima amplitud es un poco plana (Ver 3).

Al imprimir el movimiento transversal se obtiene la máxima amplitud y en esta posición se observa una disminución acelerada de la señal hasta la extinción (Ver 4).

Es de anotar que cuando se evalúan defectos planos es necesario emplear transductores de diferentes ángulos, en este caso se usaron los de 45° y 60° . Los defectos circulares en cambio producen reflexiones equivalentes para todos los ángulos de incidencia.

2.5 ESTUDIO COMPARATIVO POR RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

En el presente trabajo, las uniones soldadas presentadas en la Tabla VI fueron ensayadas adicionalmente por el método de Radiografía Industrial, con el fin de comprobar la presencia de los defectos que intencionalmente fueron fabricadas en dichas piezas.

La inspección radiográfica adicional al ensayo por ultrasonidos en soldaduras es importante en el caso de defectos pequeños tales como porosidades aisladas o inclusiones de escoria, que pueden pasar inadvertidas durante la inspección por ultrasonidos. Ante esto la radiografía presenta una ventaja que es la de que los poros o inclusiones pequeñas, dan origen a buenas impresiones sobre la placa radiográfica. De esta forma en la práctica, cuando una indicación no se puede enjuiciar claramente, se hace necesario complementar la inspección mediante el empleo de la radiografía. Además, en algunas ocasiones la orientación de los defectos hace que la detección por UTS no sea la más recomendada.

El ensayo radiográfico en la presente tesis se realizó utilizando el siguiente equipamiento y condiciones:

- Tamaño de fuente: 1,5 mm.
- KV: 140
- MAmp: - 6 para piezas de hasta 16 mm.
 - 7 para piezas mayores de 16 mm.
- Tiempo de Exposición: Variable de acuerdo al espesor radiografiado.
- Tipo de película: Kodak AA (con pantalla de Pb).
- Distancia Fuente/Película: 50 y 30 cm. (de acuerdo al espesor radiografiado.
- Indicador de calidad de Imagen: ASME N° 17 y N° 20.
- Calidad de Imagen: 2-4T
- Posición de los Indicadores: Lado de la fuente
- Revelado: Manual, 3 minutos a 24°C
- La observación radiográfica se realizó utilizando un megoscopio de alta intensidad.
- La densidad radiografica fue leída en un densitómetro digital y alcanzaron valores de mayores a 2 en al zona del cordón para las diferentes uniones.
- La interpretación radiográfica se realizó con la ayuda de la colección de Radiografías patrones del IIW (Instituto Internacional de la Soldadura).

Las radiografías resultantes de la inspección se presentan en el Apéndice D para todas las piezas soldadas. La discusión y comparación de resultados se realiza en el Capítulo siguiente.

CAPITULO III

DISCUSION DE RESULTADOS

En este capítulo se presentará para cada pieza soldada el oscilograma obtenido del ensayo y la carta de localización construida para visualizar e identificar el defecto. Adicionalmente se presentan las radiografías correspondientes a las piezas que fueron tomadas a efecto de comprobar las discontinuidades. Dichas radiografías se encuentran en el Apéndice D.

Durante la inspección se utilizó un transductor angular de 60° y 2,25 MHz. Con el fin de evaluar mejor el defecto encontrado se utilizó también un transductor angular de 45° y 1 MHz de frecuencia. Este transductor tiene la desventaja de producir una mayor dispersión del haz ultrasónico por lo que la señal obtenida se ve afectada ya que aparecen una serie de ecos parásitos. La calibración y evaluación se realizó utilizando una amplificación de -14 db, y la inspección se realizó usando una amplificación de -8db para una mayor sensibilidad de detección.

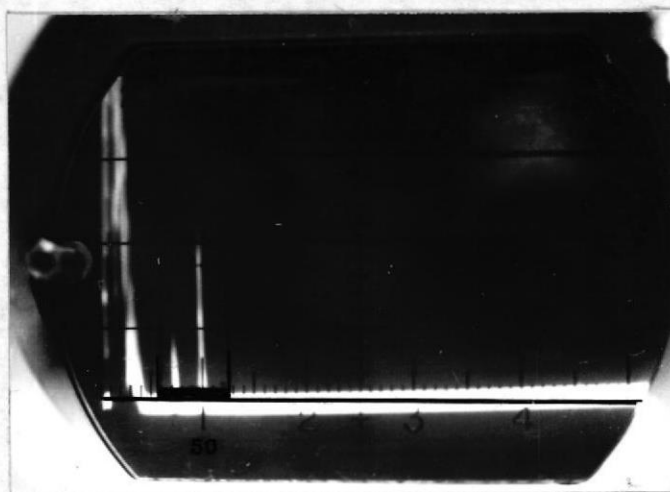
Durante la inspección y utilizando la técnica de exploración en recorrido del haz, se obtiene en la pantalla TRC el oscilograma correspondiente a cada una de las piezas soldadas y presentadas en la Tabla VI. En dicho oscilograma se lee la distancia recorrida por el haz (S_c) en el momento que se detecta un defecto, cuando el transductor se encuentra a una distancia D_{ζ} del centro del cordón.

Estos valores permiten localizar sobre la carta de calibración que se construye (explicada en el punto 2.4.3), la distancia D en proyección acortada a la que se encuentra el defecto, y la profundidad H con respecto a la superficie de la pieza ensayada, D y H pueden ser calculadas también por las expresiones

$$D = S_c \text{ Sen } \alpha \quad (19)$$

$$H = 2t - S_c \text{ Cos } \alpha \quad (20)$$

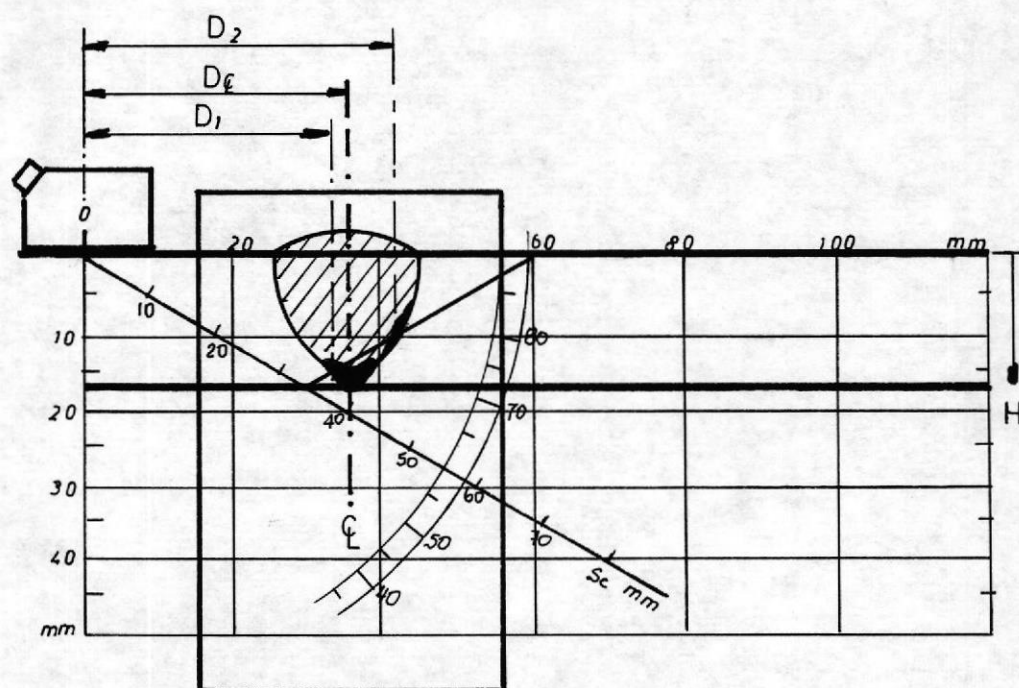
La Fig. 37 corresponde a los resultados obtenidos en la inspección de la pieza N° 1. El oscilograma muestra dos señales, la primera a una distancia $S_{c_1} = 38$ mm. y la segunda a $S_{c_2} = 48$ mm. cuando el transductor se encuentra a una distancia D_{ζ} aproximadamente igual a 35 mm. Los defectos detectados se hallan a una distancia en proyección acorta-



(1 unidad = 50 mm.)

$S_{C1} = 38$ mm

$S_{C2} = 48$ mm



$D_{\phi} = 35$ mm

$D_1 = 33$ mm

$H_1 = 13$ mm

$D_2 = 41,5$ mm

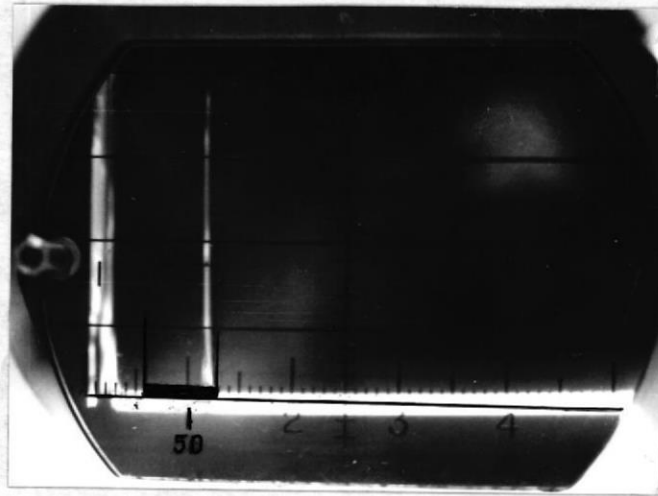
$H_2 = 8$ mm

Fig. 37.- Oscilograma y carta de localización correspondiente a la visualización de una falta de penetración y una falta de fusión en la unión soldada N° 1.

da $D_1 = 33$ mm. y $D_2 = 41,5$ mm. Con estos datos se elaboró la carta de calibración en donde se visualizan los defectos encontrados. Durante la exploración la segunda señal desapareció al mover el transductor paralelamente al cordón, mientras que la primera señal aumentó en amplitud y se mantuvo constante. Esto permite dictaminar que los defectos son una falta de penetración y una falta de fusión en su orden, que se encuentran a una profundidad de $H_1 = 13$ mm. y $H_2 = 8$ mm. respectivamente. Estos resultados se verificaron mediante el uso de radiografía industrial, tal como se muestra en la Fig. D-1 del Apéndice D. Según los criterios de aceptación y rechazo estos dos defectos se consideran inaceptables cual fuere su amplitud y su longitud. (Ref. ASME, Sec. VIII).

En la Fig. 38 se muestran los resultados obtenidos durante la inspección de la Pieza N° 3. Se observa en el oscilograma una señal producida a una distancia S_c aproximadamente igual a 59 mm. cuando D_c es de 46 mm. Una vez construida la carta de calibración se determina que la distancia D a que se encuentra el defecto es de 51 mm. a una profundidad H de 4 mm.

Como se puede observar la señal es bastante clara y similar a la correspondiente a la falta de fusión que se obtu-



(1 unidad = 50 mm)

$S_c = 59$ mm

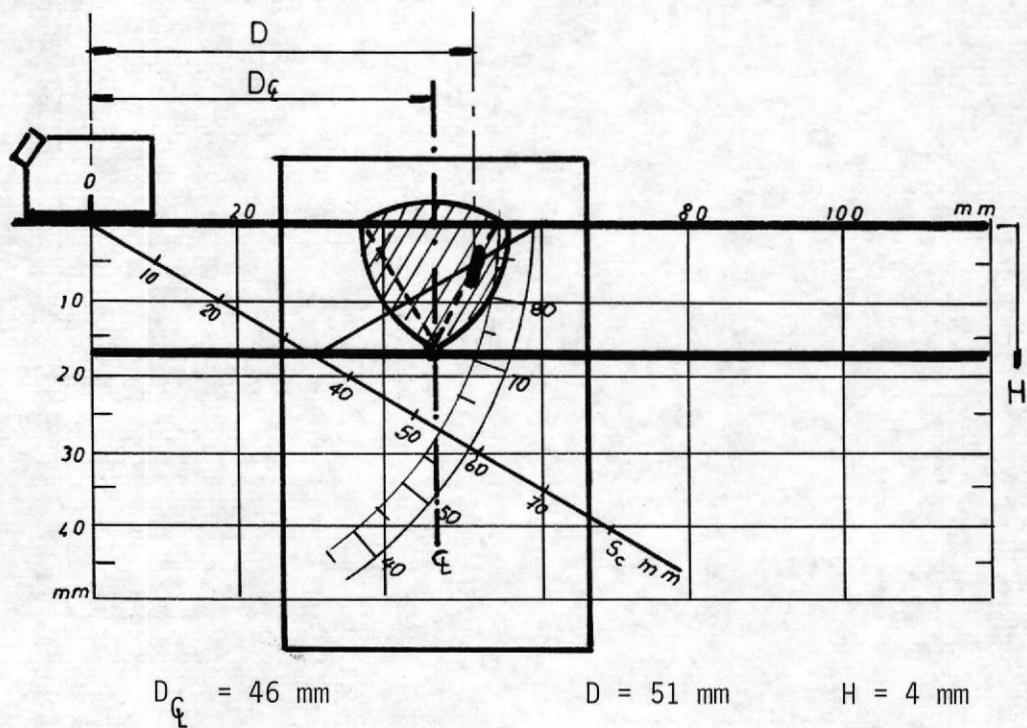
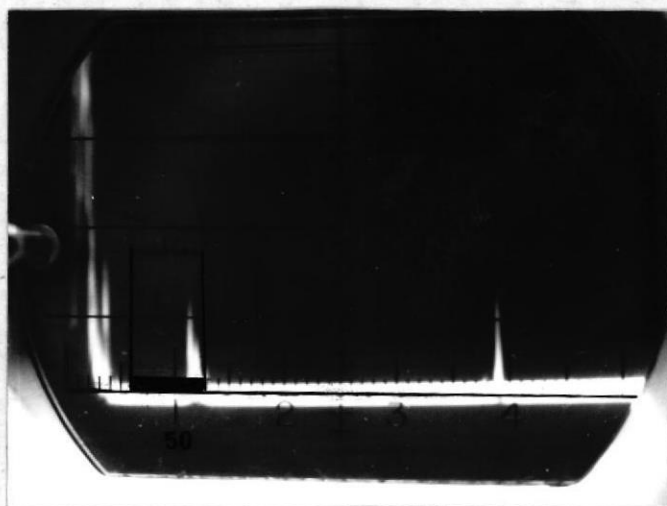


Fig. 38.- Oscilograma y carta de localización correspondiente a la visualización de una falta de fusión en la unión soldada N° 3.

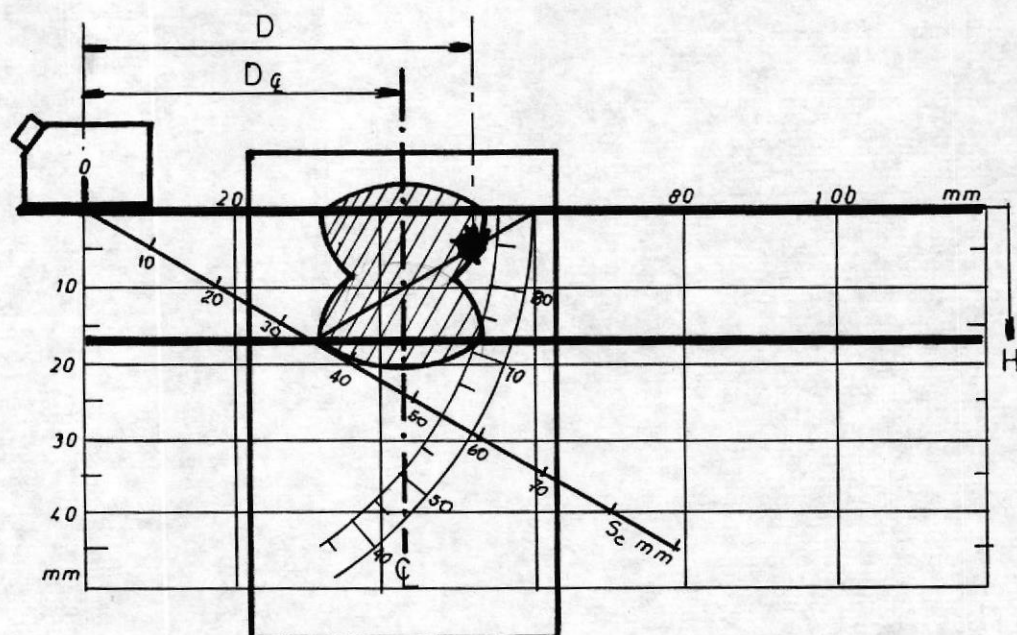
vo en la pieza N° 1. Para discernir con precisión el tipo de defecto detectado, se imprime al transductor un movimiento de rotación que hace que la señal desaprezca. Esto indica que el defecto es efectivamente una falta de fusión localizada a un lado del cordón, como se aprecia en la carta de calibración correspondiente. Este resultado fue comprobado utilizando radiografía industrial, tal como se muestra en la Fig. D-2 del Apéndice D. Según los criterios de aceptación este defecto se considera inaceptable. Además, cuando se utilizó la curva DAC la señal sobrepasó la curva referencia del 50%.

En la Fig. 39 se muestran los resultados obtenidos durante la inspección de la pieza N° 4 en el sector izquierdo de la chapa. Se observa en el oscilograma una señal producida a una distancia S_c que se encuentra entre 60 y 63 mm. por lo que para efectos de estudio suponemos la señal a $S_c = 61$ mm, cuando D_c es de 42 mm. Una segunda señal se observa a la derecha de la primera y proviene de la reflexión del haz en el borde posterior de la pieza. Con estos datos se localiza en la carta de calibración el defecto a un lado del cordón, y podría tratarse de una falta de fusión, sin embargo cuando se le imprime al transductor un movimiento orbital la señal presenta máximos y mínimos antes de desaparecer, el cual es un comportamiento típico de



(1 unidad = 50 mm)

$S_c = 61$ mm



$D_c = 42$ mm

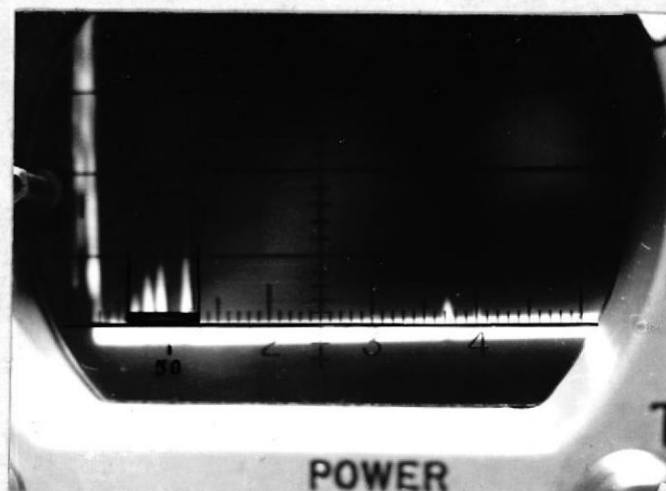
$D = 53$ mm

$H = 3$ mm

Fig.39.- Oscilograma y carta de localización correspondiente a la visualización de una inclusión de escoria en la unión soldada N° 4.

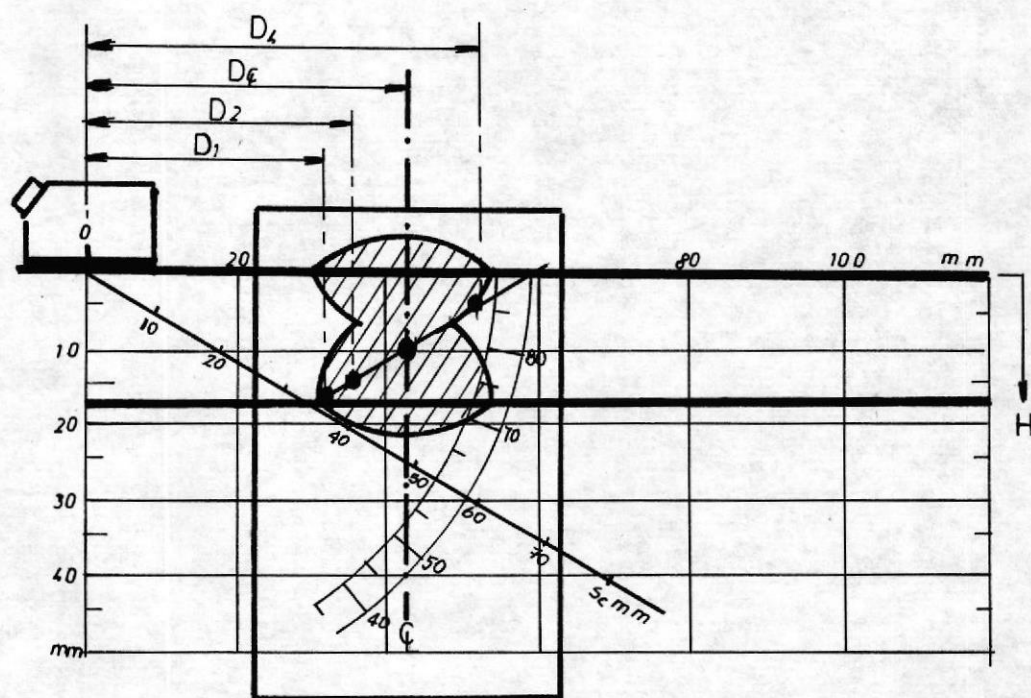
una señal proveniente de una inclusión de escoria, localizada a una distancia $D = 53$ mm. y a una profundidad $H = 3$ mm. Cuando se utilizó la curva DAC y se puso la amplificación en el nivel de evaluación, la señal era inferior a la curva de referencia del 20% por lo que el defecto se considera aceptable.

La Fig. 40 muestra los resultados obtenidos durante la inspección de la pieza N° 4 en su sector central. Se observa en el oscilograma 4 señales agrupadas, las que se encuentran a una distancia S_c de 35, 40, 45 y 60 mm. en su orden, cuando D_c es de 42 mm. La quinta señal corresponde a una reflexión en el borde posterior de la chapa. Durante la exploración no se visualizaron claramente las señales utilizando 8 db de atenuación por lo que se procedió a utilizar 6 db. En este caso las señales fueron visibles tal como se muestra en el oscilograma. Las distancias correspondientes a la proyección acortada fueron de $D_1 = 31$, $D_2 = 35$, $D_3 = 41$ y $D_4 = 52$ mm y la profundidad a que se encontraba cada uno de los defectos fue de $H_1 = 14$, $H_2 = 12$, $H_3 = 8$ y $H_4 = 6$ mm, respectivamente. Cuando se giraba el transductor en movimiento orbital algunas de estas señales se mantuvieron ya que su orientación era preferente al recorrido del haz. Este comportamiento indica que esta serie de señales provienen de porosidades agrupadas. La car-



(1 unidad = 50 mm)

$Sc_1 = 35$ mm $Sc_2 = 40$ mm $Sc_3 = 45$ mm $Sc_4 = 60$ mm



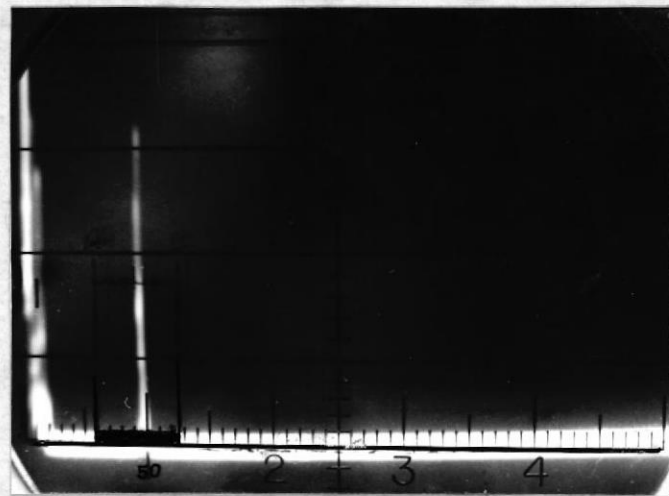
$D_c = 42$ mm $D_1 = 31$ mm $D_2 = 35$ mm $D_3 = 42$ mm $D_4 = 52$ mm
 $H_1 = 14$ mm $H_2 = 12$ mm $H_3 = 8$ mm $H_4 = 6$ mm

Fig. 40.- Oscilograma y carta de localización correspondiente a la visualización de inclusiones de gaseosas en la unión soldada N° 4.

ta de calibración construida con los datos obtenidos visualizan cada uno de estos poros. Estos resultados fueron más tarde comprobados utilizando el método radiográfico, tal como se observa en la Fig. D-3 del Apéndice D. Durante la evaluación de los defectos y al sobreponer la curva DAC en la pantalla TRC se observa que la amplitud de las señales es inferior a la curva referencial del 20%.

En la Fig. 41 se muestran los resultados obtenidos durante la inspección de la Piezas N° 5. Se observa en el oscilograma una señal producida a una distancia S_c aproximadamente igual a 47 mm, cuando D_c es de 46 mm. Una vez construida la carta de calibración se ubica el defecto en el centro del cordón, lo cual corresponde a una falta de penetración, la que se encuentra a una distancia $D = 44$ mm y a una profundidad $H = 8$ mm. Este defecto se lo detectó con un transductor de 45° desde ambos lados del cordón. Los resultados se comprobaron utilizando radiografía industrial, tal como se observa en la Fig. D-4 del Apéndice D. Durante la evaluación y utilizando la curva DAC la señal sobrepasó la curva referencial del 50% y según el Código ASME, Sec. VIII, este defecto es inaceptable.

En la Fig. 42 se muestran los resultados obtenidos durante la inspección de la pieza N° 6. El oscilograma presenta



(1 unidad = 50 mm)

Sc = 47 mm

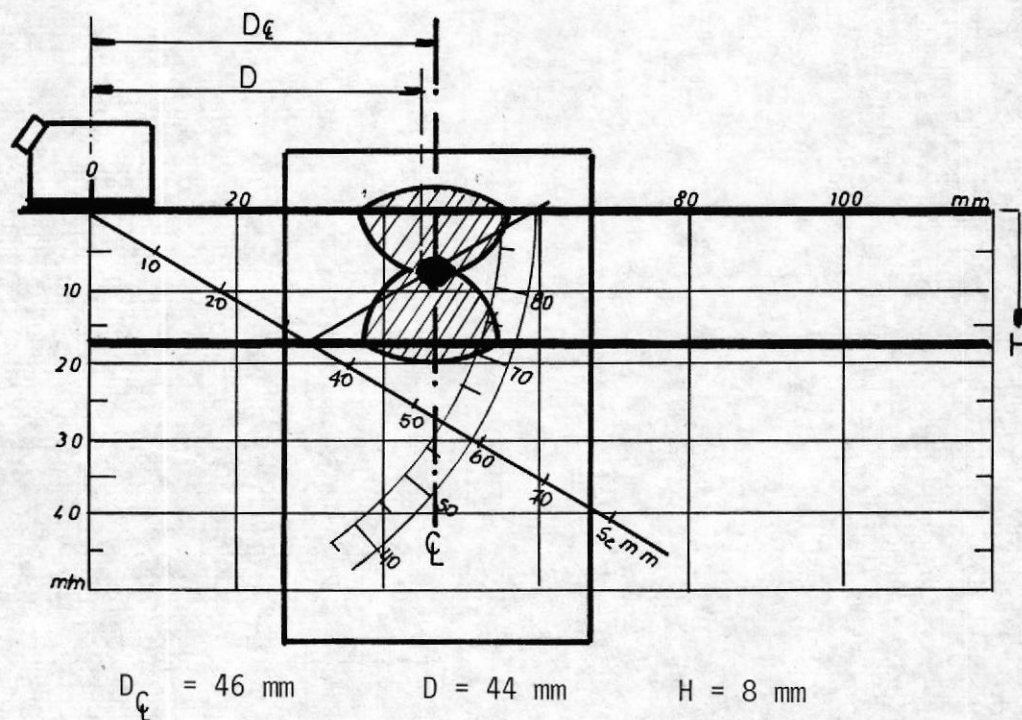
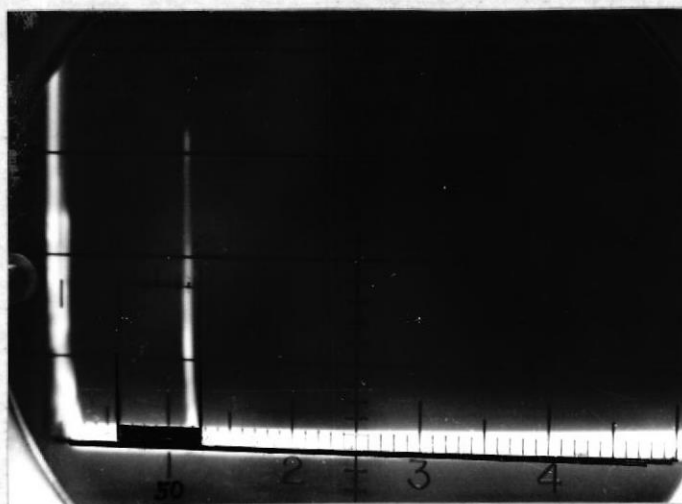
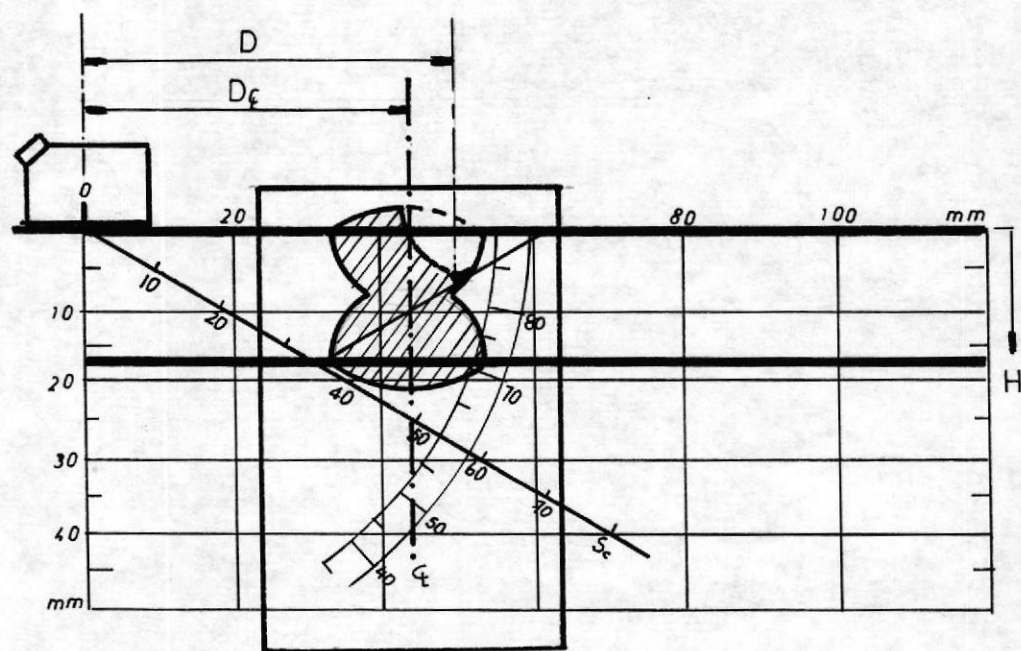


Fig. 41.- Oscilograma y carta de localización correspondiente a la visualización de una falta de penetración en la unión soldada N° 5.



(1 unidad = 50 mm)

Sc = 58 mm



$D_{\xi} = 43 \text{ mm}$

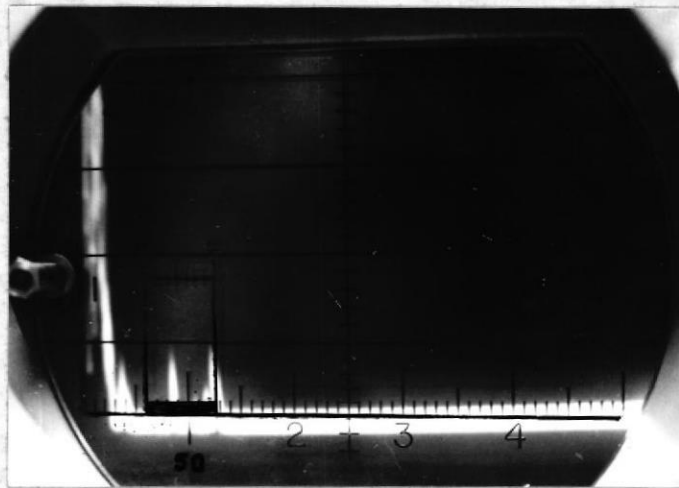
$D = 49 \text{ mm}$

$H = 5 \text{ mm}$

Fig. 42.- Oscilograma y carta de localización correspondiente a la visualización de una mordedura en la unión soldada N^o 6.

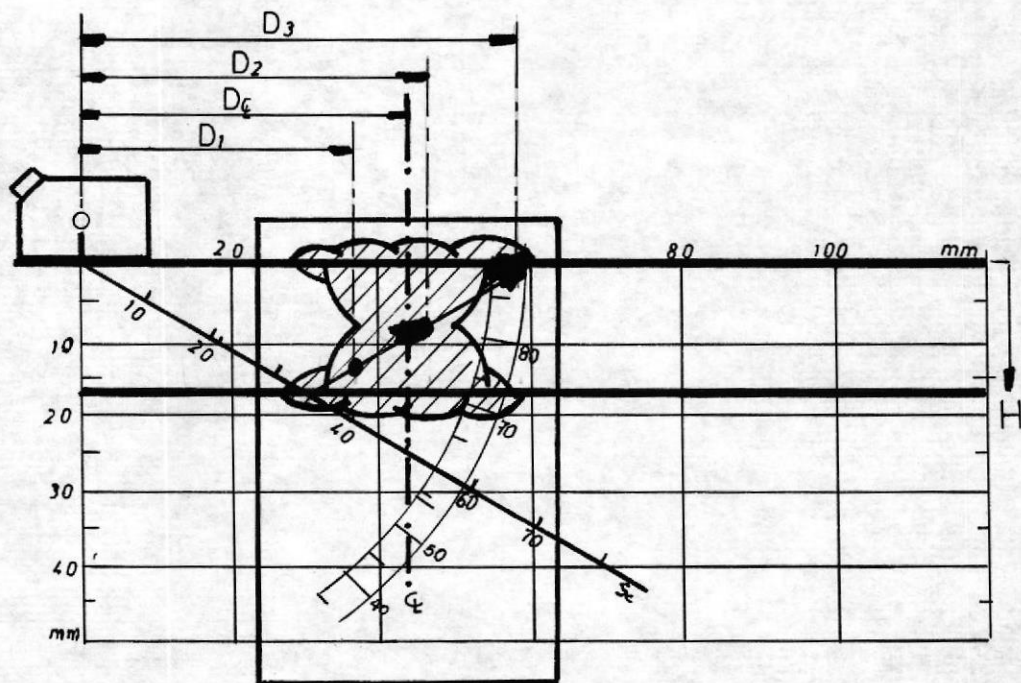
una señal localizada a una distancia $S_c = 58$ mm, cuando $D_c = 43$ mm. Una vez construida la carta de calibración se ubica el defecto, el mismo que se encuentra a una distancia $D = 49$ mm. y a una profundidad $H = 5$ mm. Al mover el transductor paralelamente al cordón la señal presenta pequeñas variaciones de amplitud y desaparece en la región correspondiente al sobrespesor de la pieza. Al mover el transductor perpendicularmente al cordón la señal se mantiene y recorre una distancia de 5 mm. aproximadamente, lo que indica que el defecto tiene características especiales correspondiendo a una mordedura. Este resultado fue comprobado mediante el uso de radiografía industrial. Este resultado se observa en la Fig. D-5 del Apéndice D. Durante la evaluación la señal sobrepasó la curva referencial del 50%, la mordedura tenía una dimensión de 40 mm. aproximadamente, por lo que esta discontinuidad es inaceptable.

En la Fig. 43 se muestran los resultados obtenidos durante la inspección de la pieza N° 7. En el oscilograma se observan algunas señales entre las marcas correspondientes al paso y 1/2 paso pero de modo claro se distinguen 3 de ellas y la discusión se centra solamente sobre ellas. La primera señal se localiza a $S_{c1} = 42$ mm y por su forma comparándola con las obtenidas anteriormente puede corresponder a una inclusión gaseosa (porosidad). La segunda señal



(1 unidad = 50 mm)

$Sc_1 = 42 \text{ mm}$ $Sc_2 = 53 \text{ mm}$ $Sc_3 = 58 \text{ mm}$



$D_c = 43 \text{ mm}$ $D_1 = 36 \text{ mm}$ $D_2 = 46 \text{ mm}$ $D_3 = 58 \text{ mm}$
 $H_1 = 13 \text{ mm}$ $H_2 = 8 \text{ mm}$ $H_3 = 5 \text{ mm}$

Fig. 43.- Oscilograma y carta de localización correspondiente a la visualización de una porosidad, una falta de penetración y una inclusión de escoria en la unión soldada N° 7.

a $Sc_2 = 53$ mm. (poco visible en la foto) es un pequeño pico que se estima por su situación que puede corresponder a una falta de penetración. La tercera señal situada a $Sc_3 = 58$ mm. por la forma irregular que tiene puede corresponder a una inclusión de escoria. Esto ocurre cuando el transductor se encuentra a una distancia D_C de 43 mm. Imprimiendo al transductor los movimientos adecuados se comprobó cada uno de estos defectos y en especial el segundo. En la carta de calibración se puede apreciar la ubicación de estos defectos los mismos que se encuentran situados a una distancia $D_1 = 36$, $D_2 = 46$, $D_3 = 58$ mm. y a una profundidad de $H_1 = 13$, $H_2 = 8$ y $H_3 = 5$ mm. en su orden. Durante la inspección se detectaron defectos que se encontraron prácticamente en la superficie del material tanto en la cara inferior como en la cara superior de la unión soldada, debido a que la superficie de la unión en la zona del cordón es bastante irregular, presenta mordeduras y sobrespesores las mismas que enmascaran toda esta variedad de defectos. Más tarde la prueba radiográfica confirmó cada uno de los resultados obtenidos tal como se observa en la Fig. D-6 del Apéndice D. Todas las señales sobrepasaron el nivel de la curva referencial del 20%.

En la Fig. 44 se presenta el oscilograma que se obtuvo en la inspección de la unión soldada N° 8, en la cual no apa-

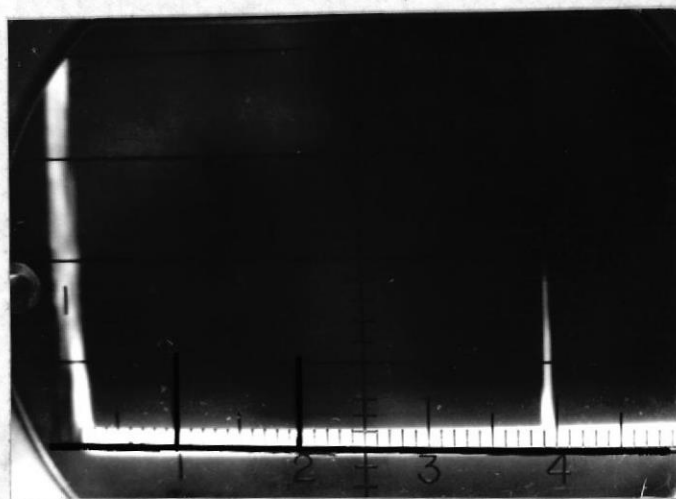


Fig. 44.- Oscilograma obtenido en la inspección de la unión soldada N^o 8; no se observan defectos.

rece señal alguna entre las marcas correspondientes a las distancias de paso y $1/2$ paso. Esto indica que la unión se encuentra libre de defectos, por lo que se considera buena. Este resultado fue comprobado radiográficamente, tal como lo muestra la Fig. D-7 del Apéndice D. A $Sc = 195$ mm se observa una señal la misma que corresponde a la reflexión del haz en el borde posterior de la pieza.

Como se ha podido apreciar, cada uno de los defectos estudiados presenta una señal característica que los diferencia entre ellos. Los defectos tales como falta de penetración, porosidades e inclusiones de escoria, en la mayoría de los casos se pudieron detectar desde ambos lados del cordón. El defecto que presentó mayor dificultad en detectarse fue el de las porosidades, por lo que hay que tener especial cuidado durante los ensayos por ultrasonido cuando se sospecha de este tipo de defecto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- La inspección por ultrasonidos en planchas con uniones soldadas defectuosas, utilizando la técnica por eco-pulsátil y en recorrido del haz, permite detectar eficientemente discontinuidades del tipo: falta de fusión y penetración, inclusiones de escoria, porosidades y mordeduras.
- 2.- Los defectos lineales del tipo de fusión y penetración fueron detectados fácilmente durante el ensayo y su señal sobrepasó el nivel de referencia del 20% en la pantalla TRC. De acuerdo a los criterios de aceptación y rechazo, Código ASME SEC. VIII, estos defectos son inaceptables, cualesquiera sea su tamaño.
- 3.- Los defectos esféricos tales como burbujas, porosidades aisladas y agrupadas, fueron detectados con cierta facilidad durante el ensayo, aunque fue necesario aumentar la sensibilidad del equipo en 2 db, para facilitar su detección.
- 4.- Se debe efectuar cuidadosamente la calibración del equi-

po de ultrasonidos sobre todo en la regulación de los niveles de sensibilidad empleados en la detección de los defectos, a fin de que la evaluación no los exagere ni tampoco los sobrestime.

- 5.- Cuando se tenga dudas sobre el defecto encontrado y el nivel de control de calidad lo requiera, se recomienda el uso de Radiografía Industrial. A este respecto sería interesante realizar un trabajo posterior de comparación de criterios de aceptación y rechazo de acuerdo a Normas Internacionales de piezas ensayadas por ultrasonidos y rayos X, a fin de comparar las exigencias de estos dos métodos.

- 6.- Se recomienda realizar un estudio de inspección por ultrasonidos en tuberías soldadas para desarrollar las técnicas que este estudio involucra. Este trabajo incluiría la elaboración de cartas y curvas de corrección y sería un complemento al realizado en la presente tesis.

APENDICE A

a) Determinación de la Distancia de Paso y Medio Paso

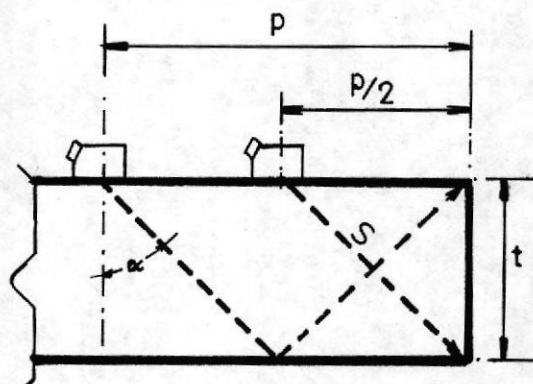
α = Angulo de Entrada

t = Espesor de Pieza

S = Camino recorrido por el haz

P = Paso

$P/2$ = 1/2 paso



De la figura tenemos que:

$$\text{Sen}\alpha = \frac{P/2}{S} \quad \text{Cos}\alpha = \frac{t}{S} \quad \text{Tang}\alpha = \frac{P/2}{t}$$

De la última expresión resulta:

$$\underline{\underline{P = 2 \cdot t \cdot \text{Tang}\alpha}}$$

b) Determinación de la posición de un Defecto:

H = profundidad a que se encuentra el defecto

D = Distancia medida desde el punto real de emisión al centro del cordón

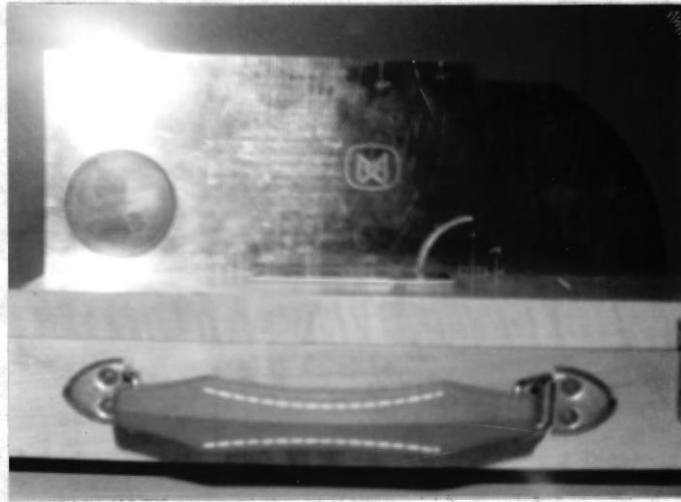
APENDICE BBLOQUES DE CALIBRACION USADOS EN ULTRASONIDOS

Fig. B.1.- Bloque de Calibración V1 del Instituto Internacional de la Soldadura (IIW).

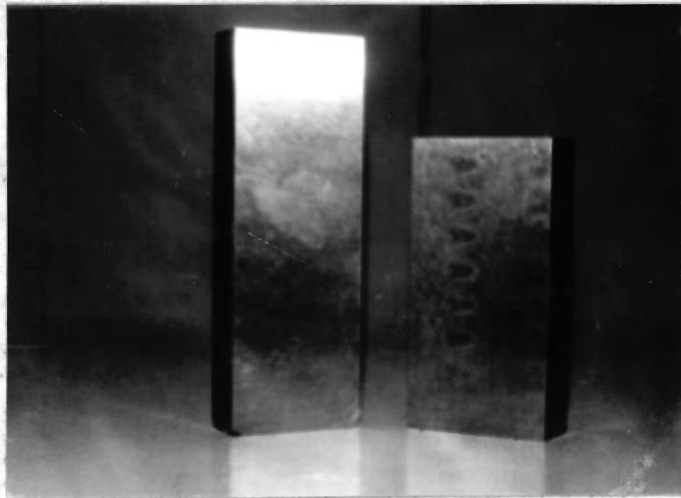


Fig. B.2.- Bloque básico de calibración construido según Norma ASME para la elaboración de la Curva DAC.

APENDICE CCALIBRACION EN RECORRIDO DEL HAZ Y EN PROYECCION ACORTADA

a) Calibración en recorrido del Haz

Se ajusta el instrumento para que la lectura obtenida en la pantalla TRC de la base de tiempo, sea la correspondiente al recorrido del haz.

La posición de una discontinuidad puede ser determinada mediante un cálculo trigonométrico sencillo, para el que se necesita conocer el ángulo del transductor y el espesor de la pieza ensayada.

La distancia D (Fig. C-1) a la que se encuentra el defecto medido desde el centro de emisión del transductor hacia el cordón de soldadura, es obtenida mediante la expresión $D = Sc \text{ Sen}\alpha$.

La profundidad a la que se encuentra el defecto se obtiene, mediante la expresión $H = 2t - Sc \text{ Cos}\alpha$. Con los datos obtenidos y los cálculos realizados se recurre al uso

de localizadores gráficos, por medio de los cuales se visualiza el tipo de defecto detectado. Este tipo de calibración se utilizó en la presente tesis.

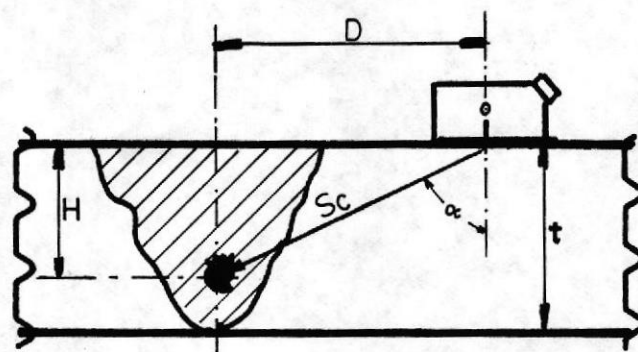


Fig. C.1.- Coordenadas de localización de discontinuidades en soldaduras.

b) Calibración en proyección acortada

En la Fig. C.2 se ilustran los principios en que se fundamenta esta calibración, la misma que representa la inspección por ultrasonidos de una pieza soldada conteniendo un defecto y utilizando un transductor angular en varias posiciones.

Para el caso en la Fig. C.2 se tiene que cuando el transductor está en la posición 1 la señal correspondiente a la distancia en la superficie es P_1 que co-

responde a un paso. La señal es producida por la reflexión en la superficie A. Cuando el transductor ocupa la posición 2, la señal producida aparecerá a la distancia de $1/2$ paso de la onda, la que se obtiene por la reflexión en la superficie B, produciendo la señal correspondiente al desplazamiento en la superficie igual a P_2 . Por lo tanto cualquier defecto en el cordón aparecerá entre el paso y el $1/2$ paso, puntos P_1 y P_2 respectivamente, tal como sucede cuando el transductor ocupa la posición 3.

En la Fig. C.3 se muestra la presentación de un oscilograma, en el que se indica la posición del paso y $1/2$ paso, así como la señal proveniente de la discontinuidad. Nótese que la distancia dada en la pantalla TRC entre los puntos P_1 y P_2 guarda correspondencia con el espesor de la pieza ensayada, por lo que para una mayor claridad de examen se marca sobre la pantalla TRC con un lápiz grueso las distancias correspondientes a P_1 y P_2 y entre estas dos marcas se dibuja el cordón de soldadura, situando la raíz del cordón en la marca correspondiente al $1/2$ paso y el sobre espesor en la correspondiente al paso.

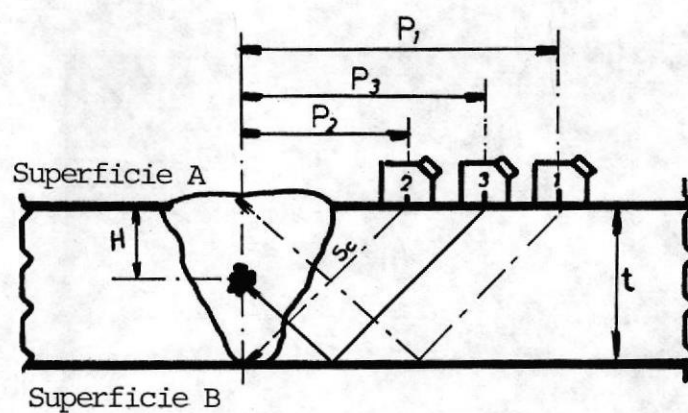


Fig. C.2.- Ilustración de la Calibración Rectangular

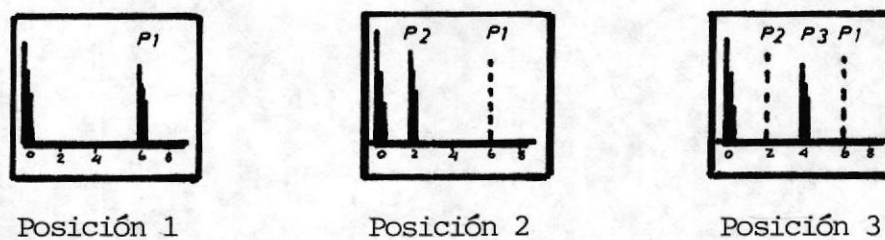


Fig. C.3.- Ubicación en la pantalla TRC de las señales correspondientes al paso (P1), medio paso (P2) y a una discontinuidad (P3).

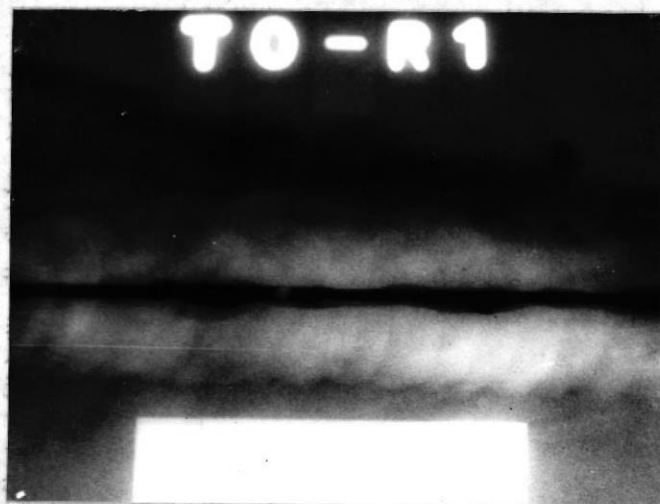
APENDICE DRESULTADOS RADIOGRAFICOS

Fig. D.1.- Radiografía correspondiente a la pieza soldada N° 1; se observa falta de penetración y falta de fusión.

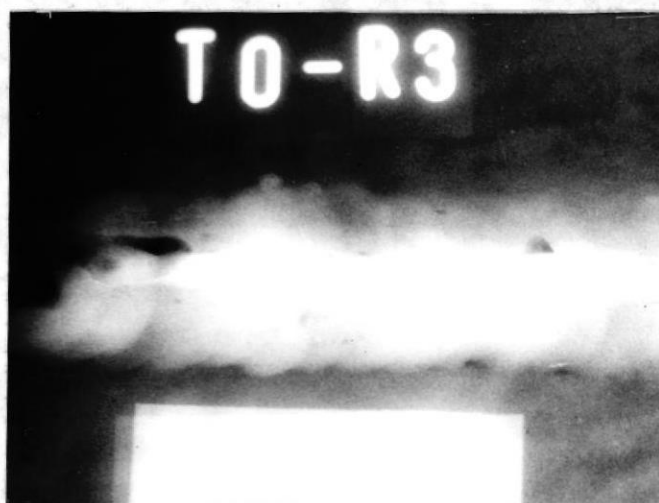


Fig. D.2.- Radiografía correspondiente a la pieza soldada N° 3; se observa falta de fusión.

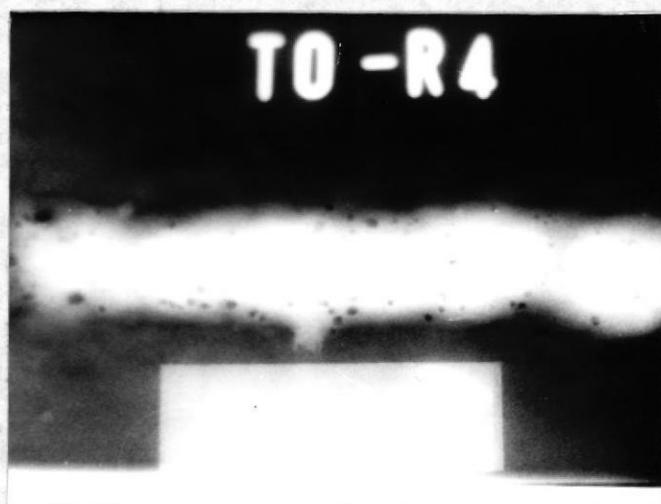


Fig. D.4.- Radiografía correspondiente a la pieza soldada Nº 4; se observan inclusiones gaseosas y una inclusión de escoria a la izquierda de la radiografía.

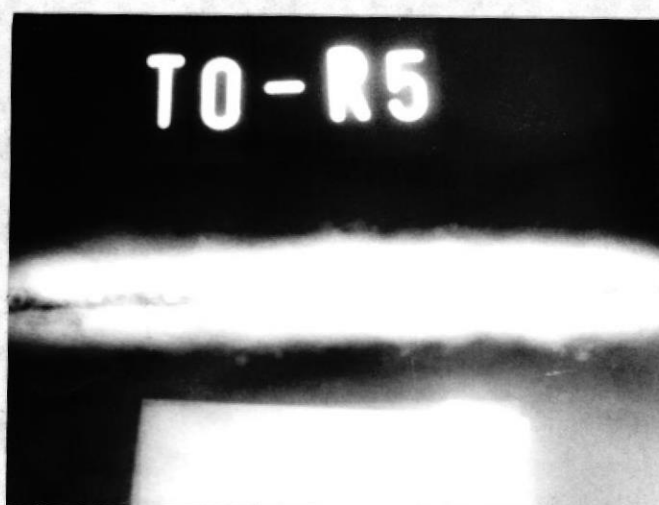


Fig. D.5.- Radiografía correspondiente a la pieza Nº 5; se observa falta de penetración.



Fig. D.5.- Radiografía correspondiente a la pieza soldada N° 6; se observa mordedura y sobreespesor.

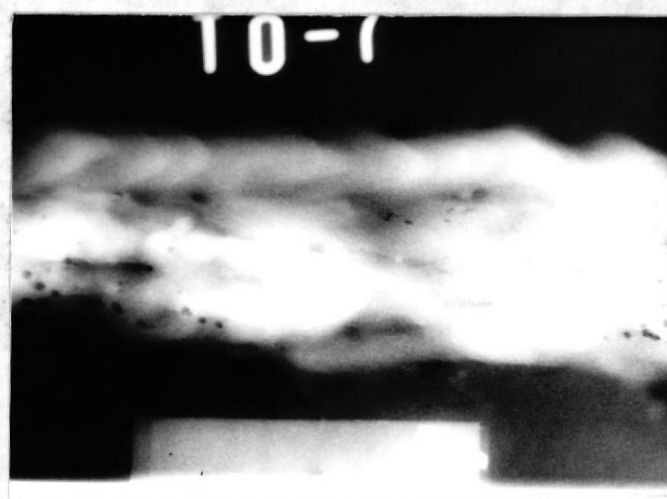


Fig. D.6.- Radiografía correspondiente a la pieza soldada N° 7; se observan porosidades, falta de fusión y penetración e inclusiones de escoria.

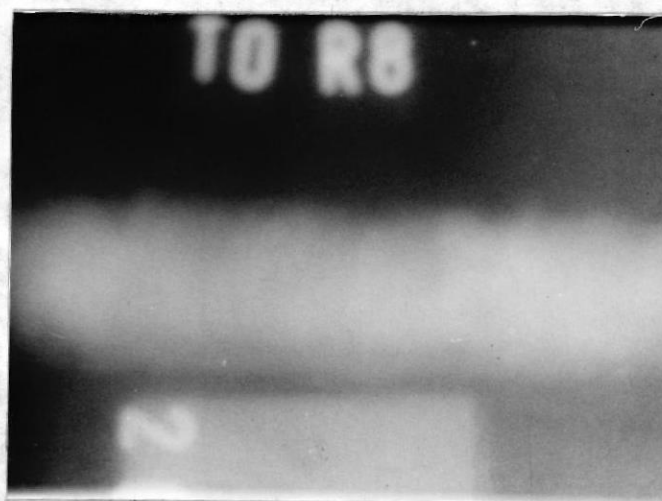


Fig. D.7.- Radiografía correspondiente a la pieza soldada N^o 8; se observa una soldadura sólida.

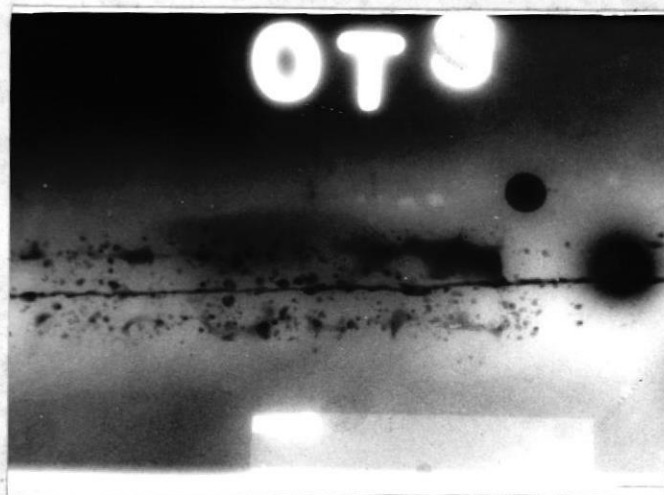


Fig. D.8.- Radiografía correspondiente a la pieza soldada N^o 9, se observa una soldadura defectuosa, nótese los agujeros realizados para estudiar el comportamiento del haz.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- BAEZ J., Ensayo Ultrasónico de los Materiales, Comisión Nacional de Energía Atómica, 1976.
- 2.- Riuz Rubio Alfonso, Aplicaciones de los Métodos de Ensayo no Destructivo al Examen de las Uniones Soldadas, Revista Soldadura, Volumen X, Número 1 Enero-marzo y número 2, abril-junio 1980.
- 3.- General Dynamics, Nondestructive Testing Ultrasonic Testing, San Diego, California, Copyright 1967, CT-644.
- 4.- Ruiz Bauza J. Luis, Ultrasonidos-primera parte, tema 3.3.4.1, Curso Interregional de Capacitación en la Garantía de Calidad - Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), Madrid, 1979.
- 5.- Cabezon F. y Ors J. Ensayo no Destructivo en algunos casos particulares de Uniones Soldadas, Revista Soldadura, Vol. 1, Núm. 1, 1972.
- 6.- Ortiz H. y Serrano O., Método de Ultrasonido, ESPOL, 1976.

- 7.- Benson Carlin, Ultrasónica, Ediciones URMO, 1a. Ed. 1972
- 8.- Introducción al Ensayo de Soldadura por Ultrasonidos, Krautkramer española, S.L. Madrid.
- 9.- Manual de Soldadura ESAB, Impreso en Francia EDI GEAD, París, 824.76.05.
- 10.- Stig Lundin, Las Consecuencias de los Defectos de las Soldaduras, Centro de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid 3.
- 11.- Ruiz Rubio Alfonso, Inspección Radiográfica de las Uniones Soldadas, Ediciones URMO S.A., 1981.
- 12.- API Recommended Practice for Ultrasonic Examination of Offshore Structural Fabrication and Guidelines for Qualification of Ultrasonic Technicians, First Edition, March 1980.
- 13.- Procedures and Recommendation for the Ultrasonic Testing of Butt Welds, the Welding Institute Abigtom Hall Cambridge, 1971.
- 14.- ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section 1, 1974

- 15.- Annual Book of ASTM Standard, Part. 11, 1979.
- 16.- ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section V, 1980.
- 17.- UNE 14613 Normas y Métodos Operatorios, Examen por Ultrasonidos de Uniones Soldadas, Vol. 6 Núm. 1, Revista Soldadura, Enero-marzo 1976.
- 18.- Catálogo, Model PS-702A Transistorized Pulse Ultrasonic Instrument Manufactured by Magnaflux Corp. 6/21/72.
- 19.- Norma INTA 11 04 22 - 12 04 22 - 13 04 22 . Recomendaciones para el Ensayo por Ultrasonidos de Materiales Metálicos por el Método de Contacto, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terrados, Madrid, enero 1981.
- 20.- Serrano O., y Ordoñez C., Inspección de Soldaduras con Ultrasonido Utilizando Ayudas Visuales Gráficas , Publicación para Certificación en Ultrasonido, Nivel III. INENDA Argentina, Marzo 1983.